



HAL
open science

Adaptation et mise en place d'un processus d'innovation et de conception au sein d'une PME

Adel Amin Ammar

► **To cite this version:**

Adel Amin Ammar. Adaptation et mise en place d'un processus d'innovation et de conception au sein d'une PME. Automatique / Robotique. Arts et Métiers ParisTech, 2010. Français. NNT : 2010ENAM0040 . pastel-00566135

HAL Id: pastel-00566135

<https://pastel.hal.science/pastel-00566135v1>

Submitted on 15 Feb 2011

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.

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

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité “ Conception ”

présentée et soutenue publiquement par

Adel Amin AMMAR

le 26 novembre 2010

**Adaptation et mise en place d'un processus d'innovation et de
conception au sein d'une PME**

Directeur de thèse : **Jean-Pierre NADEAU**

Co-encadrement de la thèse : **Dominique SCARAVETTI**

Jury

M. Jean-Claude BOCQUET, Professeur des Universités, LGI, Ecole Centrale Paris
M. Emmanuel CAILLAUD, Professeur des Universités, LGECO, Université de Strasbourg
M. Grigore GOGU, Professeur des Universités, LaMI, IFMA Clermont Ferrand
M. Olivier CAHUC, Professeur des Universités LMP, Université de Bordeaux 1
M. Jean-Pierre NADEAU, Professeur des Universités, TREFLE, Arts et Métiers ParisTech
M. Dominique SCARAVETTI, Maître de conférences, TREFLE, Arts et Métiers ParisTech
M. Claude MARQUET, Président Directeur Général, MARQUET & Cie

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Directeur de thèse
Co-encadrant
Invité

**T
H
È
S
E**

*À mes parents Ahmed et Hayet,
Et à Chifa, évidemment*

Remerciements

Au travers de ces quelques lignes, je souhaite exprimer ma reconnaissance et ma gratitude à toutes les personnes qui, par leur contribution directe ou leur soutien, m'ont aidé pour que je mène à bien ce travail de recherche.

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés au sein du laboratoire Inter-établissements TREFLE et de l'entreprise MARQUET & Cie.

Cette thèse de doctorat a été dirigée par Jean-Pierre NADEAU, Professeur des universités à l'école Arts et Métiers ParisTech. Ce moment est pour moi, l'occasion de te témoigner à nouveau ma plus grande estime et ma reconnaissance. Tu as toujours fait preuve d'une patience infinie. Tu m'as donné l'envie de faire cette thèse, tu m'as accordé ta confiance et tu m'as prodigué ton aide tant sur le plan humain, que scientifique ou professionnel. Tu m'as appris le travail de chercheur...Milles Merci.

Je tiens à remercier mon co-directeur de thèse, Dominique SCARAVETTI, pour son encadrement, son soutien enthousiaste, ses conseils et surtout sa présence amicale au long de ces trois années. Merci Dominique pour ta disponibilité sans faille et ta motivation quotidienne. Ces journées de travail (et notamment les voyages) resteront gravées à jamais dans ma mémoire.

Un très grand merci à Claude MARQUET, PDG de l'entreprise MARQUET & Cie, pour m'avoir accueilli au sein de son entreprise, mais également pour son aide et sa confiance tout au long des projets de développement ainsi que sa disponibilité dans la transmission de son savoir et son expérience. Merci pour vos qualités humaines et vos encouragements. Merci aussi pour l'honneur que vous m'avez fait par votre présence à mon jury de thèse.

J'adresse également mes remerciements aux personnes qui ont accepté de participer à ce jury de thèse :

– M. Emmanuel Caillaud, professeur à l'université de Strasbourg et M. Grigori Gogu, professeur à l'Institut Français de Mécanique Avancée de Clermont Ferrand, qui m'ont fait l'honneur d'être les rapporteurs de ma thèse.

– M. Jean-Claude Bocquet, professeur à l'école centrale de Paris, pour avoir accepté de présider ce jury et M. Olivier Cahuc, professeur à l'université de Bordeaux 1, pour avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse et de l'intérêt qu'il a porté sur mon travail.

Je remercie ensuite Eric ARQUIS, Directeur du TREFLE, de m'avoir accueilli au sein du laboratoire, ainsi que ses autres membres pour leur sympathie, je pense en particulier à MURIEL, MARIAN et Frédéric. Je remercie également tous les membres (permanents et non permanents) de l'équipe Système Energétique et Conception.

Je tiens à remercier tous mes collègues de l'entreprise MARQUET & Cie pour leur bonne humeur et leurs conseils lors de mes premiers pas dans l'entreprise, en particulier, Joëlle, Fabienne, Jean, Jacques, Claude. Mes remerciements vont aussi à Frédéric LAUNES pour son soutien quotidien, sa générosité et son grand cœur. C'est l'occasion aussi de t'exprimer ma plus grande estime et ma gratitude. Un grand merci à mon cher ami Yannick COSQUER pour ses remarques toujours très éclairées et pertinentes. Les échanges constructifs que nous avons eu ensemble m'ont régulièrement aidé...Merci.

Enfin, un grand merci à ma famille. À mes parents, qui m'ont soutenu et encouragé de loin, sans qui je ne pourrais pas, aujourd'hui, être fier de dire : "je suis docteur !". A mon frère, mes sœurs, mes beaux-frères qui m'ont dispensé des conseils toujours avisés et m'ont encouragé et motivé jour après jour. A ma belle-famille qui a bien sûr contribué, à sa manière, à ce travail. A ma famille en France (Véro, Martin, Giselle, Guillaume, Cédric, Vivianne, Damien, Anne, Camille, Christiane, Mathias, Antoine, Anne-Marie, Philippe) qui m'a soutenu et supporté encore plus spécialement pendant ces trois ans. Je garde un excellent souvenir de tous les moments passés ensemble. Une pensée particulière à mes neveux et nièces.

Surtout, merci à mon épouse Chifa qui a supporté ces longues journées, soirées, week-ends et vacances « volées », notamment au cours de ces derniers mois... Merci à elle, pour ceci et pour beaucoup d'autres choses...

Table des matières

Chapitre 1 Introduction générale	11
1.1 <i>Objet de la recherche</i>	11
1.2 <i>Problématique de recherche</i>	12
1.3 <i>Apports scientifiques et industriels de la thèse</i>	16
1.4 <i>Organisation du document</i>	17
Chapitre 2 Contexte industriel et de recherche	19
2.1 <i>MARQUET & Cie : Concepteur et fabricant d'articles chaussants</i>	19
2.2 <i>Contexte industriel</i>	20
2.2.1 <i>Marché très concurrentiel et dépendance de l'extérieur : quelles difficultés ?</i> . 21	
2.2.2 <i>Les solutions face à ce constat</i>	22
2.3 <i>Innovation : choix stratégique des entreprises</i>	23
2.3.1 <i>Innovation</i>	23
2.3.1.1 <i>Définition de l'innovation</i>	23
2.3.1.2 <i>Intensités d'innovation</i>	25
2.3.2 <i>PME et innovation</i>	26
2.3.2.1 <i>Spécificités des PME</i>	27
2.3.2.1.1 <i>Ressources limitées</i>	27
2.3.2.1.2 <i>Flexibilités des PME</i>	28
2.3.2.1.3 <i>Structure organisationnelle des PME</i>	28
2.3.2.2 <i>Risques dus à l'innovation dans les PME</i>	29
2.3.2.3 <i>Complexité de l'innovation en PME</i>	29

2.3.3	<i>Les processus d'innovation</i>	31
2.3.3.1	<i>Les processus d'innovation dits linéaires</i>	31
2.3.3.2	<i>Les processus d'innovation dits non linéaires</i>	33
2.4	<i>Processus de Conception : colonne vertébrale du processus d'innovation</i>	37
2.4.1	<i>Les différents types de processus de conception</i>	37
2.4.1.1	<i>Processus séquentiels</i>	37
2.4.1.2	<i>Processus itératifs</i>	39
2.4.1.3	<i>Processus séquentiels/itératifs</i>	41
2.4.2	<i>Les différents types de conception</i>	43
2.5	<i>Résolution de problèmes de conception</i>	45
2.5.1	<i>Résolution de problèmes par la créativité</i>	45
2.5.1.1	<i>Méthode TRIZ</i>	45
2.5.1.2	<i>MAL'IN : logiciel de conduite d'études de créativité technique et d'innovation</i>	48
2.5.2	<i>Résolution de problèmes par la réutilisation des connaissances</i>	49
2.5.2.1	<i>Pourquoi s'intéresser aux connaissances</i>	49
2.5.2.2	<i>Définitions des connaissances et leurs typologies</i>	50
2.5.2.2.1	<i>La notion de connaissances</i>	50
2.5.2.2.2	<i>Typologies de connaissances</i>	51
2.5.2.3	<i>Capitalisation des connaissances</i>	55
2.5.2.3.1	<i>Méthodes de capitalisation des connaissances</i>	55
2.5.2.3.2	<i>Synthèse et besoin</i>	57
2.6	<i>Conclusion</i>	57
Chapitre 3 Démarche de capitalisation des connaissances en vue de la construction d'une base de connaissances		59
3.1	<i>Analyse de l'existant</i>	60
3.1.1	<i>Analyse séquentielle des procédés existants</i>	61
3.1.2	<i>Représentation graphique de la décomposition fonctionnelle</i>	63
3.1.3	<i>Nouvelle représentation du graphe de décomposition fonctionnelle d'un procédé</i> 67	
3.2	<i>Extraction des connaissances</i>	71
3.2.1	<i>Description d'une solution technique réalisant une fonction</i>	72
3.2.1.1	<i>Identification d'une solution technique du point de vue énergétique</i>	72
3.2.1.2	<i>Heuristiques d'évolution des systèmes CTOC</i>	75

3.2.1.3	<i>Flux d'énergie mis en jeu</i>	75
3.2.1.4	<i>Exemple de structuration d'une solution technique</i>	77
3.2.2	<i>Qualification d'une solution technique</i>	79
3.2.2.1	<i>Identification des comportements physiques</i>	79
3.2.2.2	<i>Critères de pertinence d'une solution technique</i>	81
3.2.2.2.1	<i>Critères technologiques</i>	81
3.2.2.2.2	<i>Critères économiques</i>	83
3.2.2.2.3	<i>Critères de qualification société, marketing</i>	85
3.3	<i>Structuration des connaissances : construction d'une base de connaissances</i>	87
3.3.1	<i>Construction de la base des verbes</i>	88
3.3.1.1	<i>Analyse des bases de verbes existantes</i>	88
3.3.1.2	<i>Identification des classes primaires de la base de verbes selon une vision énergétique</i>	92
3.3.1.2.1	<i>Fonctions de composants</i>	92
3.3.1.2.1.1	<i>Classe de fonction "Convertir" liée au composant convertisseur</i>	93
3.3.1.2.1.2	<i>Classe de fonction "transmettre" liée au composant transmetteur</i>	93
3.3.1.2.1.3	<i>Classe de fonction "Fournir, Stocker" liée au composant source</i>	94
3.3.1.2.2	<i>Fonctions d'interaction composants/référence</i>	94
3.3.1.2.3	<i>Fonctions de contrôle/commande</i>	95
3.3.1.3	<i>Qualification des classes primaires de notre base de verbes</i>	96
3.3.1.4	<i>Base de verbes proposée</i>	98
3.3.2	<i>Construction de la base de compléments</i>	101
3.3.2.1	<i>Analyse statistique de la base de Hirtz</i>	103
3.3.2.2	<i>Base de compléments proposée</i>	105
3.3.3	<i>Compatibilité Verbe-complément</i>	109
3.3.4	<i>Interrogation de la base de connaissances</i>	110
3.4	<i>Conclusion</i>	113
Chapitre 4 Proposition d'une méthodologie de conception		115
4.1	<i>Vue d'ensemble de la méthodologie de conception</i>	115
4.2	<i>Phase 1 : Analyse fonctionnelle externe</i>	117
4.3	<i>Phase 2 : Décomposition fonctionnelle des tâches</i>	119
4.3.1	<i>Outil graphique</i>	120
4.3.2	<i>Réutilisation des décompositions fonctionnelles des procédés existants</i>	121
4.3.3	<i>Particularités des procédés MARQUET</i>	121

4.3.4	<i>Séquentialisation générique des procédés Marquet</i>	122
4.3.4.1	<i>Logique de séquence générique</i>	122
4.3.4.2	<i>Séquence générique mère à partir de la famille « déplacer »</i>	122
4.3.4.3	<i>Séquences génériques "filles" de mise en position</i>	123
4.3.4.4	<i>Séquences génériques filles d'actions spécifiques</i>	126
4.3.4.5	<i>Séquences génériques "filles" alternatives</i>	127
4.3.5	<i>Utilisation de la séquentialisation générique</i>	128
4.3.6	<i>Généralisation à des procédés de montage ou d'assemblage</i>	129
4.4	<i>Phase 3 : Agrégation de fonctions</i>	131
4.4.1	<i>Heuristiques de Stones et McAdams</i>	131
4.4.2	<i>Heuristiques d'agrégation proposées</i>	133
4.5	<i>Phase 4 : Recherche de solutions techniques</i>	138
4.5.1	<i>Utilisation de la base de connaissances</i>	138
4.5.2	<i>Recherche de solutions innovantes</i>	138
4.5.3	<i>Synoptique de recherche de solutions techniques</i>	143
4.6	<i>Phase 5 : Agrégation de composants</i>	144
4.6.1	<i>Agrégations internes dans la chaîne CTOC</i>	145
4.6.2	<i>Agrégations externes de chaînes CTOC</i>	147
4.7	<i>Phase 6 : Agencement et qualification du système</i>	148
4.7.1	<i>Agencement</i>	148
4.7.2	<i>Heuristiques de placement</i>	150
4.7.3	<i>Heuristiques d'interaction</i>	151
4.7.4	<i>Heuristiques de sûreté de fonctionnement</i>	153
4.7.5	<i>Heuristique de développement durable</i>	155
4.7.6	<i>Synthèse sur les heuristiques d'agencement</i>	156
4.8	<i>Synthèse : synoptique global de la méthodologie de conception de procédés de montage ou d'assemblage</i>	157
Chapitre 5 Application industrielle de la méthodologie de conception		161
5.1	<i>Présentation du procédé de remplissage manuel</i>	161
5.1.1	<i>Glossaire des termes métiers</i>	162
5.1.2	<i>Description du procédé d'enrobage manuel</i>	163
5.2	<i>Analyse fonctionnelle externe et cahier des charges fonctionnel</i>	165
5.2.1	<i>Demande initial MARQUET</i>	165
5.2.2	<i>Rédaction du cahier des charges fonctionnel</i>	166

5.2.3	<i>Rédaction de la Spécification Technique de besoin (STB)</i>	169
5.2.3.1	<i>Exigences fonctionnelles</i>	169
5.2.3.2	<i>Exigences de sûreté de fonctionnement</i>	169
5.2.3.3	<i>Exigences de conception et de production</i>	169
5.2.3.4	<i>Exigences de qualification et d'acceptation</i>	170
5.3	<i>Décomposition fonctionnelle du procédé d'enrobage</i>	170
5.4	<i>Agrégation de fonctions</i>	176
5.4.1	<i>Architecture de la machine avant l'agrégation de fonctions</i>	176
5.4.2	<i>Agrégation des fonctions filles des tâches d'assemblage ($S_{1,1}$ et $S'_{1,2}$)</i>	178
5.4.2.1	<i>Application de l'heuristique 1</i>	178
5.4.2.2	<i>Application de l'heuristique 2</i>	178
5.4.2.3	<i>Première évolution de la machine d'enrobage</i>	179
5.4.3	<i>Agrégation des fonctions filles des tâches de rempliage ($S_{1,2}$ et $S_{1,3}$)</i>	180
5.4.3.1	<i>Application de l'heuristique 1</i>	180
5.4.3.2	<i>Deuxième évolution de la machine d'enrobage</i>	181
5.4.4	<i>Synthèse de la phase d'agrégation de fonctions</i>	182
5.5	<i>Recherche de solutions techniques</i>	183
5.5.1	<i>Utilisation de la base de connaissances</i>	184
5.5.2	<i>Recherche de solutions innovantes pour la fonction "rabattre tissu"</i>	187
5.5.2.1	<i>Cas de première mousse</i>	187
5.5.2.1.1	<i>Conduite d'action pour résoudre le problème lié à la matière mousse</i> 187	
5.5.2.1.2	<i>Conduite d'action pour résoudre le problème lié au rempliage de première mousse</i>	190
5.5.2.2	<i>Cas de première carton</i>	193
5.6	<i>Agrégation de composants</i>	194
5.7	<i>Agencement de solutions techniques</i>	197
5.7.1	<i>Application des heuristiques de placement</i>	198
5.7.2	<i>Application des heuristiques d'interaction</i>	199
5.7.3	<i>Application des heuristiques de sûreté de fonctionnement</i>	201
5.7.4	<i>Application des heuristiques de développement durable</i>	203
5.7.5	<i>Architecture finale de la machine d'enrobage</i>	203
5.8	<i>Synthèse de la méthodologie de conception</i>	205
	205
	Conclusion générale et perspectives	207

<i>Bibliographie</i>	213
<i>Annexes</i>	223

Tables des illustrations

Figure 1. Problématique et moyens de résolution de la thèse CIFRE.....	15
Figure 2. Le modèle de la chaîne interconnectée (Kline & Rosenberg, 1986), (Chouteau & Viévard, 2007).....	33
Figure 3. Les phases de processus d'innovation (Roozenburg & Eekels, 1995).....	35
Figure 4. Processus de conception : un sous-processus du processus d'innovation	36
Figure 5. Modèle de Pahl & Beitz (Pahl & Beitz, 1996)	38
Figure 6. Processus de conception selon Roozenburg & Eekels (Roozenburg & Eekels, 1995)	40
Figure 7. La structure itérative du processus de conception (Roozenburg & Eekels, 1995) ...	41
Figure 8. La démarche de conception (Aoussat, 1990).....	42
Figure 9. Modèle générique de la démarche TRIZ (Thiebaud, 2003).....	46
Figure 10. Convergence de la démarche de TRIZ (Lerch & Schenk, 2009).....	47
Figure 11. Connaissances tacites et connaissances explicites (Grundstein, 2000)	53
Figure 12. Le cycle de création de la connaissance (Nonaka & Takeuchi, 1995)	54
Figure 13. Démarche de capitalisation de connaissances proposée	60
Figure 14. Décomposition fonctionnelle de la tâche "assembler semelle/talon" d'un procédé d'assemblage.....	63
Figure 15. Grafcet de décomposition de la sous-tâche "encoller semelle" (niveau non visible sur la Figure 14)	66
Figure 16. Grafcet de décomposition de la tâche "encoller semelle" d'un procédé d'encollage manuel	67
Figure 17. Représentation graphique de deux tâches parallèles de mêmes type et de même niveau	68
Figure 18. Représentation graphique de deux tâches parallèles, de types différents et de même niveau	69
Figure 19. Code de désignation des transitions entre deux tâches	69
Figure 20. Décomposition des tâches prenant en compte l'allocation des tâches, le temps, les transitions	70
Figure 21. Décomposition en tâches du procédé d'assemblage avec le nouveau graphe	70
Figure 22. Loi d'intégralité des parties (Savransky, 2000)	73
Figure 23. Décomposition globale d'une solution technique selon la classification CTOC....	74
Figure 24. Vision fonctionnelle des composants	75
Figure 25. Pulvérisateur de colle.....	77
Figure 26. Fonctionnement de la buse de pulvérisation de colle.	78
Figure 27. Analyse de la fonction de service "Pulvériser colle".	78
Figure 28. Modèle de représentation de fonction et flux (Henderson & Taylor, 1993).....	101
Figure 29. Organisation de la base de connaissances.....	111
Figure 30. Synoptique d'interrogation de la base de connaissances	112
Figure 31. Vue d'ensemble de notre processus de conception	116

Figure 32. Phase 1: Analyse fonctionnelle externe	119
Figure 33. Position initiale et finale	123
Figure 34. Analyse systématique des trajectoires planes possibles	126
Figure 35. Séquences génériques filles alternatives pour la fonction « Enduire colle »	128
Figure 36. Extrait d'une analyse séquentielle d'un procédé de montage de chaussons utilisant une buse de colle fixe	130
Figure 37. Extrait d'une analyse séquentielle d'un procédé de montage de chaussons utilisant une buse de colle mobile	130
Figure 38. Représentation schématique de l'heuristique de flux dominant (Stone a & McAdams, 2004)	131
Figure 39. Représentation schématique de l'heuristique de la transmission de flux (Stone a & McAdams, 2004)	132
Figure 40. Représentation schématique de l'heuristique " convertir-transmettre" (Stone a & McAdams, 2004)	132
Figure 41. Décomposition fonctionnelle de la tâche "encoller semelle".	134
Figure 42. Machine d'assemblage-dispositif d'encollage	135
Figure 43. Machine d'encollage-dispositif de manutention C1	135
Figure 44. Décomposition fonctionnelle de la tâche "encoller semelle", deuxième possibilité	136
Figure 45. Préhenseur d'un robot comprenant une ventouse pour le déplacement de pièces et une buse de colle pour l'encollage	137
Figure 46. Principe de résolution de la méthode MAL'IN (TREFLE, 2004)	139
Figure 47. Association Substance/champs selon la syntaxe MAL'IN	140
Figure 48. Graphe substances/champs d'une ligne de conditionnement de carcasse de congélateurs, syntaxe MAL'IN	141
Figure 49. Synoptique de recherche de solutions techniques : Phase 4 du processus de conception	144
Figure 50 . Modélisation d'un problème d'agencement	150
Figure 51. Méthodologie de conception proposée	160
Figure 52. Définition d'une première	162
Figure 53. Assemblage de la première carton avec la talonnette et l'enrobage tissu	163
Figure 54. Première carton enrobée	163
Figure 55. Assemblage de la première carton avec l'enrobage tissu	164
Figure 56. Remplissage avec la remplieuse électronique	164
Figure 57. Les entrées/sorties de la phase de l'analyse fonctionnelle externe	165
Figure 58. Analyse fonctionnelle externe : analyse systématique des milieux extérieurs, situation de vie utilisation	167
Figure 59. Les entrées/ sorties de la phase de décomposition fonctionnelle du procédé d'enrobage	170
Figure 60. 1 ^{er} niveau de la décomposition fonctionnelle du procédé d'enrobage automatique	171
Figure 61. Deuxième niveau de la décomposition fonctionnelle du procédé d'enrobage	173
Figure 62. Décomposition fonctionnelle de la fonction S _{2,1} "encoller tissu gauche"	174
Figure 63. Décomposition fonctionnelle du procédé d'enrobage automatique	175

Figure 64. Les entrées/ sorties de la phase d'agrégation de fonctions	176
Figure 65. Un exemple de conception de la machine d'enrobage automatique sans réalisation de phases d'agrégation	177
Figure 66. Première évolution de la machine d'enrobage automatique	180
Figure 67. Deuxième évolution de la machine d'enrobage automatique	182
Figure 68. Fonctions et solutions techniques du procédé d'enrobage à l'issue de la phase d'agrégation de fonctions	183
Figure 69. Les entrées/ sorties de la phase de recherche de solutions techniques	184
Figure 70. Interrogation de la base de connaissances pour la fonction "Positionner première"	185
Figure 71. Fonctions et solutions techniques du procédé d'enrobage à l'issue de l'interrogation de la base de connaissances.....	186
Figure 72. Première mousse	188
Figure 73. Graphe substances/champs du problème de remplissage de première mousse, syntaxe MAL'IN	188
Figure 74. Couronne pour première mousse	189
Figure 75. Formulation fonctionnelle graphique du procédé de remplissage manuel	190
Figure 76. Graphe substances/champs du problème de remplissage de première mousse, syntaxe MAL'IN	191
Figure 77. Principe de remplissage de première mousse : prototype réalisé.....	193
Figure 78. Principe de remplissage de première carton : prototype réalisé.....	194
Figure 79. Les entrées/ sorties de la phase d'agrégation de composants	194
Figure 80. Fonctions et solutions techniques du procédé d'enrobage automatique à l'issue de la phase de recherche de solutions	195
Figure 81. Les fonctions et les solutions techniques du procédé d'enrobage automatique à l'issue de la phase d'agrégation de composants	197
Figure 82. Les entrées/ sorties de la phase d'agencement.....	198
Figure 83. Croquis de l'architecture de la machine d'enrobage	200
Figure 84. Vue de dessus de la machine d'enrobage automatique.....	204
Figure 85. Vue globale de la machine d'enrobage automatique	205
Tableau 1. Aspects technologiques, sociétal et économique de l'innovation	24
Tableau 2. Modèle de Booz et al.(Booz, Allen, & Hamolton, 1968) d'après (Roulet, 2006)..	31
Tableau 3. Modèle de Cooper (Cooper, 1983) d'après (Roulet, 2006).....	32
Tableau 4. Modèle de Rochford (Rochford & Rudelius, 1992).....	32
Tableau 5. 40 principes d'innovation de la méthode TRIZ	46
Tableau 6. Exemples de variables conjuguées pertinentes (Pailhès, Sallaou, Nadeau, & Fadel, 2010).....	77
Tableau 7. Exemples d'effets produits et effets induits (Pailhès, Sallaou, Nadeau, & Fadel, 2010).....	80

Tableau 8. Tableau Caractérisation et écriture des critères de qualification d'une solution technique	86
Tableau 9. Base de verbes de Hirtz (Hirtz, Stone, McAdams, Szykman, & Wood, 2002).....	89
Tableau 10. Analyse de la fréquence d'utilisation de la base de Hirtz (Caldwell, 2009)	90
Tableau 11. Pourcentage d'utilisation de chaque verbe de la base de Hirtz (Caldwell, 2009)	91
Tableau 12. Classes de fonctions selon les états d'entrée et de sortie des fonctions des composants	92
Tableau 13. Classe de verbe primaire Convertir liée au composant Convertisseur (C).....	93
Tableau 14. Classe de verbe primaire Transmettre liée au composant Transmetteur (T).....	93
Tableau 15. Classe de verbes primaires Fournir et Stocker liée au composant Source (S)	94
Tableau 16. Classe de verbe primaire Lier à la référence	94
Tableau 17. Classe de verbe primaire contrôler liée au composant de Contrôle/ Commande.	95
Tableau 18. Classes primaires de notre base de verbes.....	95
Tableau 19. Correspondance des fonctions selon la vision énergétique (Sallaou, 2008)	97
Tableau 20. Analyse de la fréquence d'utilisation des verbes proposés	98
Tableau 21. Base de verbes	100
Tableau 22. Base de compléments de Hirtz (Stone R. , 1997).....	102
Tableau 23. Compléments les plus utilisés dans la base de compléments de Hirtz (Caldwell, 2009).....	103
Tableau 24. Fréquence d'utilisation de chaque complément de la base de Hirtz (Caldwell, 2009).....	104
Tableau 25. Décomposition de la classe primaire Energie	105
Tableau 26. Décomposition de la classe primaire Matière	106
Tableau 27. Décomposition de la classe primaire Signal.....	107
Tableau 28. Base de compléments	108
Tableau 29. Extrait de l'association Verbe/Complément.....	110
Tableau 30. Tableau Fonctionnel (CdCF).....	118
Tableau 31. Effets produits/induits associés à une glissière ou pivot glissant.....	153
Tableau 32. Les livrables associés aux méthodes préconisées du synoptique de conception	159
Tableau 33. Cahier des charges fonctionnel (CdCF) de la machine d'enrobage pour la situation de vie "utilisation"	168

Chapitre 1 Introduction générale

Innover pour durer : c'est la stratégie suivie par la plupart des sociétés françaises pour demeurer, maintenir des emplois et faire face aux conditions concurrentielles actuelles du marché. Cependant, innover technologiquement n'est quelque chose de simple ni d'inné, surtout pour les petites entreprises industrielles qui disposent rarement de méthodologies de conception et d'un service dédié à la conception et à l'innovation.

Le contexte global de nos travaux concerne la mise en place d'un processus d'innovation et de conception de nouveaux procédés de fabrication, dans le cadre d'une petite entreprise d'une trentaine de salariés.

Ce travail de recherche, qui s'inscrit au sein du génie mécanique, est intitulé "Adaptation et mise en place d'un processus d'innovation et de conception au sein d'une PME (MARQUET & Cie)". Cette thèse se déroule dans le cadre d'une convention CIFRE entre la société MARQUET & CIE, fabricant d'articles chaussants située à Villars et le laboratoire TREFLE UMR CNRS 8508 de l'Ecole Arts et Métiers ParisTech de Bordeaux.

1.1 Objet de la recherche

Pour répondre à des marchés de plus en plus complexes et à une concurrence accrue tant sur les technologies mises en œuvre que sur les processus de fabrication, une des pistes stratégique pour une grande majorité des entreprises, en particulier l'entreprise MARQUET & Cie, est la maîtrise de l'innovation technologique.

MARQUET et Cie est une petite entreprise qui fabrique des articles chaussants, au sein de laquelle nous avons effectué nos travaux de recherche. Face à une concurrence de plus en plus intense, cette entreprise a choisi d'innover et d'automatiser davantage ses procédés de fabrication afin de réduire les coûts et les délais de production. Cependant, l'innovation ne fait

pas partie de l'histoire et de la culture antérieure de cette entreprise. Il est donc pertinent de rationaliser l'innovation en tant que processus pour la comprendre, la maîtriser,... dans le but de pouvoir l'optimiser, la reproduire et pérenniser le processus d'innovation au sein de l'entreprise (Lattuf, 2006).

L'innovation technologique, par la transformation d'une ou plusieurs idées en procédés réels, impose impérativement d'avoir recours à la conception (Perrin, 2001). Mieux mener un processus de conception sera donc la clé pour la réussite du pilotage d'un processus d'innovation.

Un processus de conception est une séquence d'activités de conception faisant passer du besoin, à la résolution de problèmes, jusqu'à la définition d'une ou plusieurs architectures du procédé (Reymen, 2001). Un problème de conception pourrait être défini comme la différence ressentie entre une situation perçue et une situation désirée. La résolution de problème est le processus d'identification et de mise en œuvre d'une solution technique à un problème donné. En fonction du type du problème, la résolution peut s'opérer par la créativité ou par la réutilisation de connaissances. En d'autres termes, l'innovation peut provenir de la création de nouvelles connaissances ou de la combinaison nouvelle de connaissances existantes. Dans ce dernier cas, les connaissances doivent être facilement accessibles au groupe de conception et donc capitalisées dans un support pouvant être mis à jour au fil des projets.

L'enjeu est donc de rationaliser un processus de conception basé à la fois sur la réutilisation des connaissances et sur un processus créatif, pour la production de nouvelles connaissances. Cela constitue notre objet général de recherche.

1.2 Problématique de recherche

Nous souhaitons résoudre *le problème de l'innovation technologique en PME* par la mise en place d'une méthodologie de conception basée sur la réutilisation de connaissances et sur un processus créatif pour la création de nouvelles connaissances.

La première problématique de ce travail est liée à la capitalisation de connaissances afin de favoriser leur réutilisation. En effet, plusieurs méthodes ont été proposées dans la littérature pour soutenir la réutilisation en conception (Shahin, Andrews, & Sivaloganathan, 1999). Toutefois, ces méthodes sont principalement accessibles aux grandes entreprises. Ces

approches sont parfois difficilement exploitables dans les PME du fait de la complexité des outils, du manque de temps du dirigeant, du manque de ressources financières de l'entreprise pour mettre en place ces outils et du manque de personnel qualifié (Evangelista, Esposito, Lauro, & Raffa, 2010). De notre cas, la PME Marquet & Cie ne dispose ni d'outils ni de méthodes ni de personnel dédié pour gérer, capitaliser et archiver ses connaissances. En effet, beaucoup de systèmes de production ont été conçus et réalisés à l'extérieur de la PME et elle ne dispose pas forcément des données de conception.

Le contexte de l'emploi d'une base de connaissances en PME oblige à concevoir un outil et une démarche d'utilisation simple et rapide, accessible à un personnel non spécialiste de la conception, de la capitalisation ou de l'innovation. Développer une telle base de connaissances revient à développer une démarche pour identifier les connaissances, les exprimer, les archiver et les rendre accessible pour les réutiliser (Matta, Ermine, Aubertin, & Trivin, 2001).

La deuxième problématique concerne la méthodologie de conception. Même si les différents types de processus de conception seront détaillées ultérieurement (§2.4), nous souhaitons d'ores et déjà mentionner les difficultés rencontrés lors d'une mise en place d'un processus de conception en PME. En effet, dans la plupart des processus de conception, une trame est commune aux phases de conception (Suh, 1990) :

- Exprimer les besoins du client,
- Définir le problème à résoudre pour satisfaire les besoins,
- Conceptualiser la solution, c'est la phase de recherche de solutions,
- Effectuer l'analyse des risques, pour optimiser la solution proposée,
- Vérifier la conception obtenue, pour voir si elle répond aux besoins client initiaux.

Différents supports et méthodes de résolution sont proposés dans la littérature pour chaque phase. Toutefois, dans les petites entreprises, il n'est pas évident dans la majorité des cas, d'assurer l'adoption ou l'application exploitable de tous ces supports (Lattuf, 2006), (Thouvenin, 2002). C'est pourquoi, il nous a paru nécessaire d'adapter ces méthodes au contexte et aux besoins de l'entreprise MARQUET & Cie et de proposer des heuristiques pour accompagner le concepteur tout au long du processus.

Mon rôle, en tant que doctorant CIFRE dans l'entreprise MARQUET & Cie, a été de résoudre cette problématique de mise en place d'un processus d'innovation et de conception de nouveaux procédés de fabrication au sein de la PME, ainsi que la conception complète

d'un nouveau procédé de fabrication permettant à l'entreprise de fabriquer un produit nouveau.

A cette fin, une méthodologie de conception et une base de connaissances sont proposées. Elles sont destinées à devenir un outil d'aide à la conception et à la mise en place de nouveaux procédés de fabrication. La Figure 1 résume notre problématique et les moyens de résolution proposés dans le cadre de cette thèse en convention CIFRE.

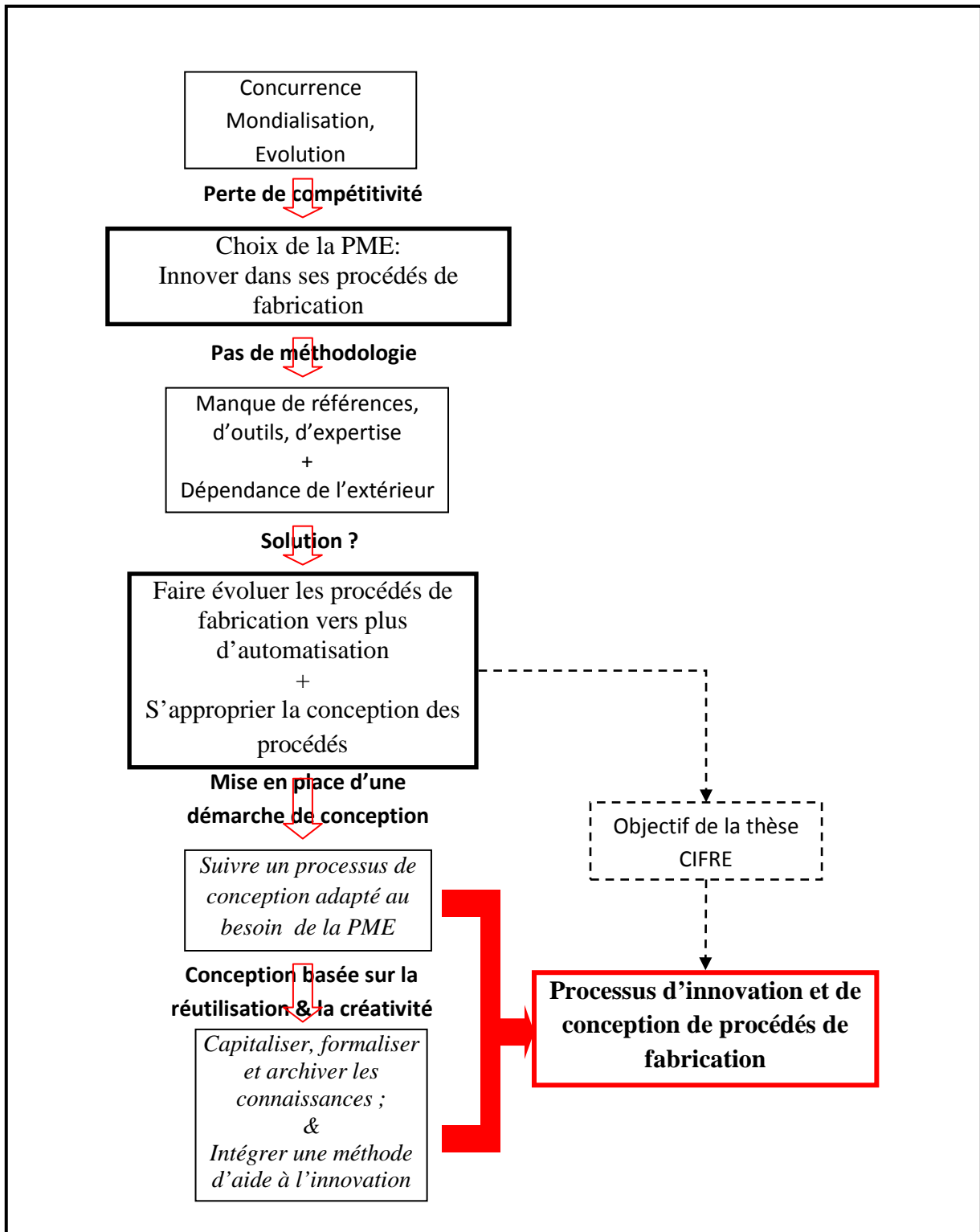


Figure 1. Problématique et moyens de résolution de la thèse CIFRE

1.3 Apports scientifiques et industriels de la thèse

En se basant sur des travaux de recherche réalisés au TREFLE-ENSAM (Sallaou, 2008), (Scaravetti, 2004), (Vernat, 2004), nous avons développé une méthode de capitalisation de connaissances adaptée au contexte de la PME.

Le point de départ de notre démarche est l'analyse des procédés existants dans l'entreprise MARQUET & Cie. Nous représentons un procédé de fabrication comme étant une succession de tâches, nommées aussi moments significatifs (Doré, Pailhès, Fischer, & Nadeau, 2007). Chaque tâche est ensuite décomposée en fonctions élémentaires afin d'avoir une représentation hiérarchique du procédé. Une fonction élémentaire est une action non décomposable.

Afin de faciliter la structuration des connaissances et favoriser l'unicité dans la description, les fonctions sont exprimées par un langage standard sous la forme "verbe - complément", où le verbe et le complément sont choisis dans des bases de verbes et de compléments existantes (Sallaou, 2008). Ces bases ont été enrichies par les termes métiers de l'entreprise ; et dans notre cas, ces termes spécifiques correspondent aux verbes et aux compléments du métier de la chaussure de l'entreprise MARQUET & Cie, fabriquant des articles chaussants.

Nous proposons une représentation graphique de la décomposition des procédés qui prend en compte l'allocation des tâches aux opérateurs ou au système, l'interaction entre utilisateur et système, les informations temporelles comme l'ordre et l'enchaînement des tâches, ainsi que les éléments de contrôle et de transitions entre tâches.

Une association entre les fonctions et les composants a été ensuite effectuée. L'objectif de cette association est de capitaliser les solutions techniques mises en œuvre, les composants ou sous ensembles utilisés nécessaires pour la réalisation d'une fonction donnée. L'identification des composants est basée sur une vision énergétique du cheminement du flux fonctionnel (Sallaou, 2008).

Nous avons ainsi conçu une base de connaissances. L'élément d'entrée dans cette base est la fonction élémentaire. A partir d'une association verbe-complément, la base proposera en sortie l'ensemble des solutions techniques possibles. Le principe d'utilisation de la base de connaissances a été conçu de manière à ce que, quel que soit le niveau d'interrogation (basé

sur des termes métiers ou sur des termes génériques), le système puisse fournir les solutions associées.

Cette démarche peut être adaptée à chaque entreprise, mais celle ci devra entrer dans les bases fonctionnelles, ses propres verbes et compléments métiers. Elle doit également analyser son existant et archiver les solutions techniques utilisées.

Nous avons également développé une méthodologie de conception basée sur la décomposition fonctionnelle du système et intégrant la simplification de l'architecture de système dès les premières phases du processus de conception. En effet, nous avons intégré au processus, des phases d'agrégation, guidées par des heuristiques d'agrégation. Le but de ces phases est de réduire le nombre de fonctions en opérant des agrégations. Par conséquent, le nombre de composants diminue et l'architecture du système se simplifie. Des heuristiques d'agencement ont été aussi définies pour aider le concepteur durant la phase d'agencement de concepts.

Par ailleurs, la résolution de problèmes de conception est basée sur la réutilisation des connaissances à partir de la base de connaissances déjà développée et sur la créativité pour générer de nouvelles idées en utilisant le logiciel de conduite d'études de créativité technique MAL'IN (Nadeau, Pailhes, & Olivares, 2004), (Trefle, 2004).

Cette méthodologie va être implémentée dans un outil informatique, qui permettra de respecter les contraintes de son appropriation en PME, à savoir : une utilisation et une mise à jour simples et rapides, un outil accessible à un personnel non spécialiste de la conception, de la capitalisation ou de l'innovation, ainsi qu'une identification de différents rôles d'utilisateurs. Cet outil est destiné à devenir un outil d'aide à la conception et à l'innovation, adapté à l'entreprise MARQUET & Cie.

Les travaux menés dans l'entreprise MARQUET ont montré la pertinence de la démarche globale de conception. Dans le but d'automatiser un procédé de fabrication dans la PME, nous avons appliqué cette méthodologie et nous avons conçu une machine automatique d'enrobage.

1.4 Organisation du document

Le *Chapitre 2* concerne la description du contexte industriel et scientifique de recherche. Nous présentons d'abord la société MARQUET & Cie. Ensuite, nous exposons une

synthèse bibliographique dans le domaine de l'innovation, de la conception et de la gestion des connaissances. Nous limiterons notre champ d'investigation aux aspects méthodologiques liés notamment aux petites structures industrielles telles que les PME.

Nous proposons dans le *Chapitre 3* une méthodologie de capitalisation et de structuration des connaissances. Nous nous sommes inspirés des méthodes de capitalisation de connaissances de la littérature, surtout celles dédiées aux projets de conception, afin d'en proposer une adaptée au contexte de la PME. L'élément structurant pour la méthode de capitalisation proposée est la fonction élémentaire.

La démarche d'extraction et de structuration des connaissances au sein de la PME est exposée dans la deuxième partie de ce chapitre.

Enfin, nous présenterons l'architecture de la base de connaissances et la façon de l'utiliser afin d'obtenir des solutions de conception relatives à une fonction donnée.

Nous proposons dans le *Chapitre 4* un processus de conception, ainsi que les différents supports et heuristiques proposés dans chacune de ses phases. La recherche de concepts est basée sur la réutilisation de l'existant capitalisé dans une base de connaissances et sur un processus créatif guidé par le logiciel MAL'IN. Nous avons, d'autre part, intégré dans le processus des phases d'agrégation, dans le but de réduire le nombre de fonctions et de composants.

Enfin, le *Chapitre 5* présente une application industrielle de conception d'un nouveau procédé de fabrication, en utilisant la méthodologie proposée. En effet, cette dernière a été mise en œuvre lors de la conception d'une machine d'enrobage dans l'entreprise partenaire, et a permis la définition de concepts innovants. Les résultats de conception obtenus permettent de vérifier la pertinence de notre démarche.

Chapitre 2 Contexte industriel et de recherche

Dans ce chapitre, nous souhaitons décrire le contexte industriel et scientifique au sein duquel nous avons évolué pendant trois ans. Nous aborderons le domaine des processus d'innovation en Génie Industriel et plus particulièrement les processus de conception de nouveaux procédés de fabrication.

Dans un premier temps, nous présentons dans ce chapitre le contexte industriel de ce travail de recherche.

Ensuite, nous effectuerons une relecture de la littérature dans le domaine de l'innovation et de la conception de nouveaux procédés. Cette relecture nous permettra de mettre en exergue les différents éléments qui caractérisent la complexité de l'innovation. Nous délimiterons notre champ d'investigation à des aspects méthodologiques liés notamment aux petites structures industrielles telles que les PME.

2.1 MARQUET & Cie : Concepteur et fabricant d'articles chaussants

La société MARQUET & Cie est une entreprise familiale créée en 1924 par Monsieur Emile Marquet, grand père des actuels dirigeants. Elle s'est développée sous l'impulsion de Monsieur Pierre Marquet qui en assura la direction de 1945 à 1981 et la transforma en société anonyme en 1961. Ses fils Claude et Jacques lui succédèrent. Claude devint le Président Directeur Général et Jacques le Directeur Général. Ils transformèrent la société anonyme en société par actions simplifiée en 2002 et gardèrent leurs fonctions.

Située en Périgord (France), elle est spécialisée dans la fabrication d'articles chaussants. Grâce à des partenariats avec des ressources technologiques et aux aides européennes, cette manufacture spécialisée dans un chausson textile haut de gamme maintient localement 30 emplois dans un secteur économique fragilisé par la concurrence des pays à bas coût de main d'œuvre. Elle réalise un chiffre d'affaires annuel de deux millions d'euros.

Cette PME contribue largement à changer l'image de l'article chaussant, ayant créé un concept nouveau de chaussures textiles d'intérieur. La pantoufle se fait escarpin, prend des couleurs, peut même s'orner d'un prénom brodé, ce qui n'est pas le fort de la première pantoufle venue des pays à bas coût de main d'œuvre. Ces efforts se sont traduits par un investissement qui lui a permis de s'équiper des technologies récentes comme les découpeurs laser et jet d'eau, l'impression numérique, l'injection plastique et des postes robotisés.

Possédant des postes de CAO, l'entreprise conçoit ses outillages en interne et les fabrique par frittage laser de poudre polyamide. En effet, l'entreprise MARQUET est équipée d'une machine de prototypage rapide par frittage laser, qui lui a permis d'avoir de la flexibilité dans la conception de ses outillages.

L'entreprise, qui vise, un marché très ciblé, s'est engagée aussi dans l'e-commerce, proposant sur son site Internet des chaussons personnalisés, fabriqués et livrés en 72 heures.

Marquet & Cie est certifié ISO 9001 version 2008 sur l'ensemble de son activité (conception, fabrication et vente de pantoufles et articles chaussants).

2.2 Contexte industriel

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la société MARQUET & Cie évolue dans un secteur économique très fragilisé par la concurrence des pays à bas coût de main d'œuvre. Sa situation financière s'est dégradée ces dernières années du fait de l'évolution des exigences du marché et de l'apparition sur le marché de produits chinois à des prix très concurrentiels. C'est dans cet environnement industriel que notre recherche-action a débuté.

Dans ce paragraphe, nous évoquerons les difficultés rencontrées par l'entreprise depuis quelques années, dues à la concurrence et aussi à sa dépendance à des ressources extérieures pour la modernisation de ses produits et de ses procédés de fabrication. Ensuite, nous présenterons les choix stratégiques proposées par le décideur de MARQUET & Cie pour rester compétitif.

2.2.1 Marché très concurrentiel et dépendance de l'extérieur : quelles difficultés ?

Le marché du chausson est un marché de niche puisque seuls les pays à bas coût de main d'œuvre peuvent produire à des prix très concurrentiels. L'entreprise MARQUET & Cie, où l'industrie de la pantoufle était historiquement ancrée, est l'une des survivantes de la crise qui a décimé à partir des années 1970 le secteur d'activité de la chaussure dans la région, concurrencé par les importations à bas prix. Aujourd'hui, il reste dans le secteur de Nontron tout au plus une dizaine de manufactures de chaussons, là où il y en avait plus de 500 pendant les années 50.

L'entreprise MARQUET & Cie fabriquait à l'origine des articles chaussants qui étaient commercialisés sur les régions Aquitaine et Midi Pyrénées. Au début des années 70, la commercialisation des productions s'orienta petit à petit vers la grande distribution. Ce circuit absorbait 100% de la production à la fin des années 80. Comprenant que l'augmentation des exigences de la grande distribution était incompatible avec ses objectifs, la société Marquet & Cie a cherché à explorer d'autres circuits de distribution. C'est ainsi qu'elle se positionna petit à petit sur le secteur de la lingerie, du linge de maison et du linge de nuit, choix stratégique qui a permis la pérennisation de son activité. Cette décision a eu comme conséquences la réduction de sa production et de son chiffre d'affaires, cela a également entraîné des licenciements.

Dans le but de simplifier les opérations et d'améliorer la productivité, l'entreprise a choisi d'innover technologiquement en automatisant ses procédés de fabrication. N'ayant pas un personnel qualifié en conception et en innovation, la PME a investi dans des outils industriels robotisés adaptés à sa production et à ses créations, conçus et fabriqués par des intégrateurs extérieurs. A partir des besoins exprimés, les intégrateurs réalisent des machines spéciales présentées à la PME avec des prix très élevés. Cette stratégie entraîne la dépendance de l'entreprise à l'égard des intégrateurs aussi bien pour la réalisation que pour la maintenance et provoque des frais importants, conduisant à un déséquilibre de la structure financière de la PME. A ce déséquilibre financier s'ajoute un contexte économique mondial pénalisant ainsi qu'une concurrence nationale et internationale importante. Cela bloque l'activité de développement de l'entreprise et l'empêche d'automatiser davantage ses procédés de fabrication.

2.2.2 Les solutions face à ce constat

Face à cette situation financière déséquilibrée et un marché très concurrentiel, l'entreprise a du changer sa stratégie de management en répondant au triptyque « coût, qualité, délais ». A cette fin, le décideur de la société MARQUET & Cie s'est trouvé devant deux scénarios :

- Adopter un mouvement "perpétuel" d'innovation technologique pour réduire davantage les coûts et les délais de fabrication.

Et/ou

- Délocaliser la production dans un pays à faible coût de main d'œuvre

La seconde solution, adoptée par beaucoup d'entreprises françaises de différents secteurs (une PME sur 6) (Roulet, 2006), aurait permis à l'entreprise de bénéficier de tous les avantages de la délocalisation, à savoir :

- Faible coût de la main d'œuvre
- Exonération des impôts et des charges patronales
- Des réglementations environnementales peu contraignantes
- Durée de travail minimum de 40 heures / semaine.

Malgré ces avantages, le décideur de l'entreprise MARQUET & Cie a écarté l'option de délocalisation et s'est donc orientée vers la première solution : s'orienter vers l'innovation technologique afin de réduire les coûts et les délais de fabrication. Mais vu la situation financière de l'entreprise, l'objectif n'est pas de garder une dépendance à l'égard des intégrateurs mais de développer sa propre démarche d'innovation.

L'objectif qui est alors apparu a été de concevoir en interne une partie ou la totalité de ses nouveaux procédés de fabrication.

L'objectif de ma mission au sein de la société fût donc de mettre en place un processus d'innovation et de conception adapté au contexte de la PME pour étudier, concevoir, voire développer de nouveaux procédés de fabrication permettant de réduire les coûts et les délais de fabrication.

2.3 Innovation : choix stratégique des entreprises

Nous souhaitons montrer à travers cette étude bibliographique que l'innovation au sein d'une PME est un phénomène complexe et nécessite de suivre et de mettre en place un processus bien défini. Nous montrons que ce dernier devra être basé sur les domaines de la conception, de l'innovation et de la connaissance.

2.3.1 Innovation

2.3.1.1 Définition de l'innovation

Les premières définitions simples de l'innovation sont: originalité, changement, hardiesse, nouveauté, invention. L'innovation est l'action d'introduire dans une chose établie quelque chose de nouveau ou d'encore inconnu (Dictionnaire Robert Grand & Collins, 2009).

Or, selon l'économiste autrichien Schumpeter, il y a une distinction nette entre invention et innovation : La réalisation d'une invention et la mise en pratique de l'innovation correspondante sont, économiquement et sociologiquement, deux choses entièrement différentes (Schumpeter, 1939). Pour lui, l'innovation correspond au premier usage commercial d'un produit, un procédé ou un service, qui n'avait jamais été exploité auparavant. Il définit donc l'innovation comme le résultat de la mise en valeur économique et l'acceptation sociale d'une invention.

Giget quant à lui définit l'innovation en l'opposant à l'invention. Pour lui, l'innovation touche à la réussite de l'introduction de l'invention dans la pratique sociale. Cette réussite n'est pas seulement technique, mais également économique, industrielle, commerciale, sociale et culturelle (Giget, 1998).

Selon Nadeau et al (Nadeau, Pailhes, & Olivares, 2004), le produit innovant n'existe que si trois aspects sont pris en compte :

- Sociétal (adéquation à un besoin)
- Economique (adéquation à des possibilités d'achat),
- Technologique (adéquation à des facilités d'usage).

Les caractéristiques et les entités concernées par ces trois aspects sont données dans le Tableau 1.

Tableau 1. Aspects technologiques, sociétal et économique de l'innovation

Aspect	Caractérisation	Entité concernée
<i>Technologique</i>	Savoir faire Connaissance	Entreprise, fournisseurs Secteurs industriels
<i>Sociétal</i>	Définition du besoin Vision citoyenne Réglementation Adhésion	Utilisateur Collectivité/Entreprise Etat (France)/CEE/International Décideurs/Employés
<i>Economique</i>	Bénéfice Coût investissement Coût d'achat Coût de possession Maîtrise globale, énergie, déchets et effluents	Entreprise Entreprise Client acheteur Client utilisateur Etat

Nous pouvons remarquer, à partir de ces définitions, que l'innovation est la mise en place de la nouveauté conduisant à des résultats exploitables. Elle est vue donc comme étant un résultat sous forme de produit, service ou procédé.

Gonard propose la définition suivante : l'innovation ne peut être considérée comme un instant précis, celui de la mise sur le marché de la nouveauté, mais doit être envisagée en tant que processus (Gonard & Louazel, 1997). Cette idée est mentionnée dans plusieurs travaux, l'innovation est identifiée aussi comme étant un processus global de sous processus inter-reliés (Marquis & Meyers, 1969).

Pour Giget, il s'agit d'un processus long et complexe, interactif et itératif, qui requiert l'implication de nombreux acteurs aux compétences complémentaires et doit faire l'objet de multiples adaptations pour réussir (Giget, 1998).

L'innovation se définit aussi comme l'ensemble des démarches scientifiques, technologiques, organisationnelles, financières et commerciales qui aboutissent, ou sont censées aboutir, à la réalisation de produits ou procédés technologiquement nouveaux ou améliorés (manuel d'Oslo, OCDE, 2005).

Nous déduisons, d'après ces dernières définitions, que la notion d'innovation est vue comme un processus permettant d'atteindre un résultat. Nous allons prétendre cette vision car

elle nous permettra d'identifier la succession d'actions dynamiques, évolutives et complexes de l'innovation.

L'innovation peut prendre plusieurs formes (Sternberg, Pretz, & Kaufman, 2003), (Tödting, Lehner, & Kaufmann, 2009): innovation technologique, organisationnelle, commerciale. On distingue également les innovations de produits et les innovations de procédés. Une référence internationale, à savoir le manuel de Frascati rédigé par des experts de l'OCDE, définit l'innovation comme la transformation d'une idée en un produit nouveau ou amélioré introduit sur le marché, ou en un procédé opérationnel nouveau ou amélioré utilisé dans l'industrie ou dans le commerce (Manuel de Frascati, OCDE, 1994).

L'innovation technologique permet d'améliorer la productivité de l'entreprise par la mise au point de procédés de fabrication nouveaux ou considérablement améliorés, ce qui, en abaissant les coûts unitaires de production, favorise sa compétitivité et lui confie un avantage concurrentiel permanent. L'innovation produit permet à l'entreprise de se différencier en commercialisant un produit nouveau (bien ou service) ou un produit existant mais incorporant une nouveauté ce qui favorise sa compétitivité hors-prix, lui donne également un avantage concurrentiel temporaire (Truchot, Suchamp, & Guidat, 1997).

Nous allons focaliser notre intérêt sur les processus d'innovation qui aboutissent à une innovation de procédés qui auront ensuite des impacts sur l'évolution des produits.

2.3.1.2 Intensités d'innovation

La mise en œuvre de l'innovation dans l'entreprise est caractérisée par deux niveaux : l'innovation incrémentale et l'innovation de rupture (Neau, 2003), (Le Duff, 1999).

L'innovation incrémentale est l'ensemble des petites innovations dont la somme permet à une entreprise de se distinguer de ses concurrents. Elle est souvent le moyen pour qu'une entreprise conserve son avance sur ses concurrents. Ce champ d'action peut être plus communément appelé l'amélioration continue (Roulet, 2006).

Selon Merlant, l'innovation incrémentale ne renverse pas les conditions d'usage, mais y apportent une amélioration sensible (Merlant, 1993).

La plupart des petites et moyennes entreprises font de l'innovation incrémentale de produit et de procédé. Un peu plus de 10% d'entre elles font de l'innovation de rupture (Julien, St-Pierre, & Beaudoin, 1996).

L'innovation de rupture, appelée aussi l'innovation radicale, représente la naissance d'un produit ou d'un procédé radicalement nouveau. Elle a tendance à changer complètement l'existant. D'après Neau, l'innovation de rupture modifie profondément les conditions d'utilisation par les clients et s'accompagne souvent d'un bouleversement technologique (Neau, 2003).

Cependant, quel que soit son niveau de mise en œuvre, l'innovation technologique est aujourd'hui la politique la plus utilisée dans les entreprises.

Nous effectuerons par la suite une relecture de la littérature dans le domaine de l'innovation en PME. Cela va nous permettre de recenser les principaux éléments déterminants de l'innovation dans le contexte des petites et moyennes entreprises.

2.3.2 PME et innovation

Historiquement, les entreprises cherchaient à organiser le triptyque qualité-coût-délai. Maintenant, la stratégie cible à atteindre est la maîtrise de la tétralogie qualité-coût-délai-innovation (Le Meur, 2000). Dans un contexte de plus en plus exigeant (mondialisation, concurrence, ...), cette stratégie basée sur la nécessité d'innover est devenue indispensable en particulier dans les PME-PMI.

A ce jour, il n'existe pas une définition unique de "Petites et Moyennes Entreprises" (PME) dans le monde. Dans la plupart des pays, les entreprises sont classées selon leur taille mesurée le plus souvent en termes d'effectif ou en montant de chiffres d'affaires (Davidson & Griffin, 2003). La commission des communautés européennes a défini la PME à l'échelle des pays membres : la PME est une entreprise indépendante financièrement, employant moins de 250 salariés avec un chiffre d'affaires plafonné à 40 millions d'euros (Journal officiel des communautés Européennes du 30 avril 1996).

Les Petites et Moyennes Entreprises (PME) sont des composantes primordiales de l'économie de nombreux pays, leur proportion pouvant atteindre 97 % du nombre total d'entreprises (Wolff & Pett, 2006). Quels que soient leurs niveaux de développement économique et industriel, les PME sont parées de toutes les vertus (Kim, Knotts, & Jones, 2008), (Abdul-Nour, Drolet, & Lambert, 1999): dynamisme, flexibilité, réactivité, ambiance de travail conviviale, etc.

Mais face à la tendance de mondialisation des marchés et de la concurrence, les PME-PMI doivent faire évoluer leurs stratégies et s'approprier des pratiques, qui jusque là étaient

réservées aux seules entreprises multinationales. Elles se retrouvent donc au cœur des préoccupations scientifiques et publiques afin de maintenir, voire de susciter leur croissance (Edwards, Delbridge, & Munday, 2005); (Hoffman, Parejo, Bessant, & Perren, 1998); (O'Regan, Ghobadian, & Gallear, 2006). L'un des facteurs jugés stratégiques pour leur croissance, autant pour l'emploi que pour leur chiffre d'affaires, est l'innovation (Adams, Bessant, & Phelps, 2006) ; (Freel & Robson, 2004) ; (Hoffman, Parejo, Bessant, & Perren, 1998). Halilem va même jusqu'à dire que l'innovation est la plus importante des composantes de la stratégie des PME (Halilem & St-Jean, 2007).

Pour Giget, l'innovation n'occupe pas un rôle clef dans la dynamique de l'entreprise mais représente le cœur même de la démarche entrepreneuriale (Giget 1, 1994).

D'une façon générale, la capacité d'innovation des PME dépend de plusieurs facteurs liés à l'organisation et la structure de ces entreprises. Comprendre les différents aspects et contraintes auxquels les PME sont confrontées est nécessaire afin de recenser les problèmes pouvant être rencontrés lorsqu'on accompagne une entreprise qui veut innover.

2.3.2.1 Spécificités des PME

Les spécificités de la PME peuvent se résumer en trois grands axes, à savoir : ressources limitées, flexibilité et forme organisationnelle.

2.3.2.1.1 Ressources limitées

En se basant sur des études sur l'innovation dans un contexte de PME, l'une des caractéristiques qui semble récurrente concerne leurs ressources financières et humaines qui sont généralement limitées (Carmel & Nicholson, 2005), (Wolff & Pett, 2006).

Ce manque de ressources a un impact important sur l'innovation. En effet, les PME ont peu d'effectifs attachés à la recherche et au développement (Thouvenin, 2002). La majorité des employés dans les PME sont non qualifiés et par conséquent la portion de leurs employés consacrée exclusivement à des activités de R&D sera minime (Storey, 1994). Il est rare qu'une PME recrute un ingénieur ou un scientifique (Storey, 1994). En revanche, les PME qui possèdent un personnel qualifié, notamment des scientifiques et des ingénieurs, sont avantagées au niveau du processus d'innovation (Darroch & McNaughton, 2002); (Hoffman, Parejo, Bessant, & Perren, 1998).

Pour innover, l'une des sources des PME, en particulier la PME MARQUET & Cie, est issue des idées des employés. Pour cette raison, les PME essaient souvent de valoriser l'importance des employés en assurant leur formation. Cette stratégie est pertinente puisque les formations augmentent leurs capacités d'innovation (St-Pierre & Mathieu, 2003).

2.3.2.1.2 Flexibilités des PME

Par rapport aux grandes entreprises, les PME ont une structure plus flexible (Wolff & Pett, 2006), (Thouvenin, 2002). Cette flexibilité réside dans leur capacité à s'adapter rapidement aux changements de la demande et aux aléas de la conjoncture.

La flexibilité représente un des atouts des PME pour être dans une position favorable dans le cadre d'innovations incrémentales (Dodgson, 2000), (Scozzi, Garavelli, & Crowston, 2005).

Par leur petit nombre d'employés, les PME ont une gestion de proximité de leurs personnels, ce qui permet d'améliorer les relations professionnelles, mais aussi d'exercer un contrôle plus direct et d'accomplir un travail souvent plus intensif.

2.3.2.1.3 Structure organisationnelle des PME

Les PME sont généralement représentées comme des espaces de travail intimes s'organisant autour d'un seul homme. En raison de cette grande centralisation sur le chef d'entreprise, les PME ont du mal à hiérarchiser l'importance stratégique relative aux différentes contraintes qui pèsent sur l'entreprise (Hyvärinen, 1993).

La spécificité des PME tient à une série d'éléments qui sont déterminés fondamentalement par la personnalité du chef d'entreprise. Ce dernier est rarement un salarié. Il est souvent un homme de terrain et le propriétaire de la PME.

Les PME peuvent se développer soit au gré d'une multitude de microdécisions, prises au jour le jour, qui vont aboutir peu à peu à une ligne stratégique cohérente, mais non planifiée, soit que l'opportunisme du patron ou que les opportunités du marché qu'il a su saisir, amènent l'entreprise à suivre une direction qui n'était pas du tout prévue.

Dans leur logique de développement, les PME fonctionnent sur le mode du court terme. En effet, elles cherchent souvent à maximiser un retour sur investissement très rapide.

D'autre part, les PME ont un caractère informel dans les communications internes et une structure moins bureaucratique (Scherer, 1991). Ces caractéristiques semblent être déterminantes dans l'adoption de processus d'innovations (Julien & Carrier, 2002).

2.3.2.2 Risques dus à l'innovation dans les PME

Les éléments de risques qui ont une influence directe sur le processus d'innovation sont dus souvent à des risques de gestion commerciale et technologique.

Comme nous l'avons mentionné, les PME ont généralement peu de ressources humaines qualifiées. Le manque d'ingénieurs ou de scientifiques lors de la phase de recherche et de développement affecte directement le succès d'un projet d'innovation. L'absence de spécialistes pour la commercialisation de nouveaux projets augmente aussi le degré de risque. L'un des facteurs internes du succès des projets d'innovation est la présence d'ingénieurs et de scientifiques qualifiés au sein de l'entreprise et le leadership apporté par un dirigeant ayant un niveau élevé de formation académique (Hoffman, Parejo, Bessant, & Perren, 1998).

Au début du lancement d'un projet d'innovation, le risque commercial est élevé. Ce dernier est dû à la réaction du marché et de la clientèle au moment de son introduction. A la fin du projet, le risque augmente davantage par peur de la réaction de la part des concurrents qui peuvent soit lancer un produit de substitution novateur, soit réduire les prix de leurs produits.

Face à une réduction constante du cycle de vie des produits (Moore & Garnsey, 1993), ainsi que les technologies (Boly, Renaud, Lopez Monsalvo, & Guidat, 1998), les PME doivent réagir rapidement ce qui mène à accroître l'intensité du risque.

Les entreprises qui développent l'innovation sous une forme radicale en introduisant de nouvelles technologies sont confrontées à plus de risques que celles qui utilisent des technologies connues et éprouvées. Selon Moore et Garnsey (Moore & Garnsey, 1993), la difficulté de prédire les résultats des projets de recherche et de développement issus de technologies récentes, les délais d'implantation de ces technologies, le transfert de celles-ci en produits commercialement acceptables présentent des défis très importants.

2.3.2.3 Complexité de l'innovation en PME

Innover pour une PME relève d'une complexité réelle ou apparente, qui crée des freins importants. Cette complexité est liée à de nombreux éléments de natures très différentes.

Avant tout, l'innovation peut prendre des formes extrêmement diverses : faire mieux, faire différemment, faire autre chose, faire plus vite, faire moins cher ou faire ensemble (Giget 1, 1994). La recette de l'innovation n'est pas donc encore définie. D'autre part, les éléments d'incertitude et donc de risques présentés dans le paragraphe précédent complexifient davantage le pilotage de l'innovation.

En tenant compte de la spécificité organisationnelle des PME, une complexité due aux chefs d'entreprises et aux personnels des PME peut être l'origine des complications rencontrées lors d'une démarche d'innovation au sein de ces entreprises.

Vu la conjoncture actuelle, les dirigeants des PME ont peur d'investir dans des projets d'innovation qui paraissent risqués. Ce comportement est la source de la complexité des objectifs des PME qui cherchent à la fois à se différencier et à valoriser leur savoir-faire (Alter, 1999). Cette stratégie mène à des risques de conflits et par conséquent à l'échec de l'innovation.

D'autre part, les personnels des PME, vu leur faible nombre, n'ont pas assez de temps pour bien planifier et mener un projet d'innovation. Selon le ministère de l'industrie, près de 60% des entreprises innovantes ont été amenées à retarder certains projets, près d'une sur trois en a abandonné, et plus d'un quart a renoncé devant les difficultés (Ministère de l'industrie, 1996)

Comme Fricke (Fricke, 1998) et Thouvenin (Thouvenin, 2002), nous partageons l'idée que la complexité de l'innovation est due aussi à celle du produit. En effet, ce dernier est composé de plusieurs composants interdépendants dont leur assemblage nécessite l'intégration de plusieurs savoirs. Le fait donc qu'une personne quitte l'entreprise bloque déjà le processus. Par exemple, un salarié d'une PME de dix personnes part en retraite, c'est 10% du personnel qu'il faudra remplacer (Torres, 1997).

Comme tout phénomène complexe, l'innovation technologique, tout en étant une source de dangers, constitue, pour l'entreprise, un creuset d'atouts. En effet, l'entreprise se trouve face aux attributs de la complexité qu'offre l'innovation technologique. L'innovation est décrite complexe lorsqu'elle n'est pas totalement comprise ou maîtrisée (Smida, 2006). Il est donc pertinent d'organiser l'innovation en tant que processus pour la comprendre et la maîtriser afin de pouvoir l'optimiser, la reproduire et pérenniser ce processus au sein de l'entreprise.

2.3.3 Les processus d'innovation

Dans la littérature, l'innovation en tant que processus est un sujet qui a été traité de différentes manières. L'analyse de ces différents points de vues nous a permis de distinguer deux types d'approches : les processus dits linéaires ou séquentiels ou encore mécaniques et les processus dits non linéaires ou non séquentiels ou organiques.

2.3.3.1 Les processus d'innovation dits linéaires

Les processus dits linéaires proposent une séquentialité des actions depuis la recherche fondamentale de l'idée jusqu'à la mise au point d'un produit final commercialisé. Ils sont définis comme étant des processus mécaniques de type opérationnel qui partent de l'activité de recherche, à l'activité de développement, puis à l'activité de fabrication (Roozenburg & Eekels, 1995).

Comme montre le Tableau 2, Booz, Allen et Hamilton ont modélisé le processus d'innovation par sept phases, prenant en compte des actions liées à la stratégie, à l'économie et aux tests de faisabilité.

Tableau 2. Modèle de Booz et al.(Booz, Allen, & Hamolton, 1968) d'après (Roulet, 2006)

<i>Stratégie de nouveaux produits</i>
<i>Recherche d'idées</i>
<i>Evaluation</i>
<i>Analyse économique</i>
<i>Développement</i>
<i>Tests</i>
<i>Commercialisation</i>

En se reposant sur ce dernier, Cooper a proposé un autre modèle constitué aussi de sept phases (Tableau 3).

Tableau 3. Modèle de Cooper (Cooper, 1983) d'après (Roulet, 2006)

<i>Emergence de l'idée</i>
<i>Evaluation préliminaire</i>
<i>Elaboration du concept</i>
<i>Développement</i>
<i>Test</i>
<i>Essai</i>
<i>Lancement</i>

Rochford et Rudelius (Rochford & Rudelius, 1992) ont ensuite proposé un modèle, présenté dans le Tableau 4, plus détaillé dans les actions à mener mais qui garde une même ligne directrice.

Tableau 4. Modèle de Rochford (Rochford & Rudelius, 1992)

	<i>Recherche d'idées</i>
Résolution du problème	<i>Evaluation initiale</i>
	<i>Analyse du marché préliminaire</i>
	<i>Etude technique préliminaire</i>
	<i>Etude de production préliminaire</i>
	<i>Analyse financière préliminaire</i>
	<i>Etude de marché</i>
	<i>Développement du produit</i>
Implémentation	<i>Test du produit en interne</i>
	<i>Test du produit en clientèle</i>
	<i>Test marché</i>
	<i>Analyse financière initiale</i>

Au regard de ces travaux, nous retenons trois étapes essentielles sur lesquelles sont basés les processus d'innovation dits linéaires. La première est l'étape de transition de l'émergence à la concrétisation d'une idée. La deuxième est l'étape d'évaluation et de passage de la concrétisation au prototype, puis l'étude de la faisabilité technique et économique de

l'idée. Enfin, la troisième étape consiste à la fabrication afin de mettre le produit final sur le marché.

2.3.3.2 Les processus d'innovation dits non linéaires

Pour d'autres auteurs, le processus d'innovation est un phénomène de couplage entre technique et marché (Chanel, 1995). Ce couplage est assuré par des actions qui ne se déroulent pas forcément de manière linéaire. De nombreux exemples détaillés par les auteurs montrent le caractère non linéaire du processus d'innovation.

Pour décrire le processus d'innovation, S.Kline et N. Rosenberg proposent un modèle dit de la « chaîne interconnectée » présenté par la Figure 2 (Kline & Rosenberg, 1986).

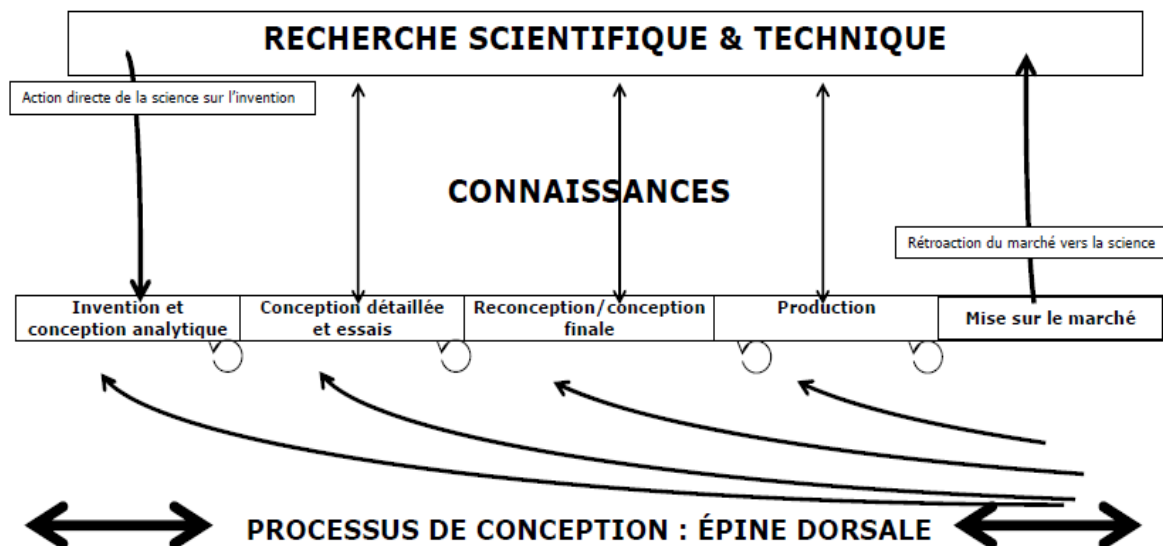


Figure 2. Le modèle de la chaîne interconnectée (Kline & Rosenberg, 1986), (Chouteau & Viévard, 2007)

Comme montre la Figure 2, ce modèle détaille les interactions et les itérations qui mènent vers l'objectif final qui est d'innover (Kline & Rosenberg, 1986). Dans leur modèle, ils établissent les liens entre les domaines de l'innovation d'une part, des connaissances et de la recherche d'autre part. Le processus d'innovation non linéaire ainsi décrit est structuré autour de cinq « chemins » particuliers (Chouteau & Viévard, 2007):

I. Le processus de conception joue un rôle central dans le processus d'innovation :

La conception est essentielle selon eux, pour initier l'innovation technique, et les reconceptions sont essentielles pour aboutir au succès. Le processus central de l'innovation n'est pas la science mais la conception (Kline & Rosenberg, 1986). Ce processus de conception se divise lui-même en diverses étapes :

- l'invention et la conception analytique,
- la conception détaillée et les essais,
- la conception finale,
- la production,
- la mise sur le marché de l'innovation.

En plaçant, le processus de conception au centre du processus d'innovation, les deux auteurs refusent la toute puissance de la science sur le fait innovatif.

II. À ce premier axe s'en superpose un autre qui est constitué par l'ensemble des rétroactions. Ces dernières peuvent intervenir à différents niveaux :

- entre deux étapes successives de la chaîne,
- faire remonter plusieurs étapes en arrière,
- rétroagir sur l'ensemble du processus d'innovation en cas d'un nouveau besoin par exemple.

III. La Science n'est plus l'élément central mais elle intervient selon deux modalités :

- Il est possible de puiser des connaissances dans le stock existant afin d'alimenter le processus d'innovation ou si ce stock n'est pas suffisant de solliciter de nouvelles connaissances pour satisfaire le processus d'innovation engagé.
- La nature des connaissances puisées varie en fonction de chaque étape du processus d'innovation. Par exemple, au moment de l'invention, ce sont plutôt les connaissances de recherche fondamentale qui sont sollicitées alors qu'au moment du développement, on sollicite davantage une recherche qui concerne la façon dont les différents composants peuvent interagir.

IV. Il peut exister des innovations radicales directement issues du développement de sciences nouvelles mais elles sont très rares

V. Certaines rétroactions peuvent émaner de l'innovation pour agir sur la recherche scientifique et sa dynamique : les relations ne sont pas unilatérales.

Roozenburg et Eekels, deux spécialistes néerlandais de la conception, ont proposé un autre modèle similaire à celui de Kline et Rosenberg mais avec une vision plus microscopique du processus d'innovation (Figure 3). Ils renforcent le fait que le processus d'innovation est pluridisciplinaire, défini par des interactions entre le processus de conception du produit, de celui du système de production associé et du plan de marketing.

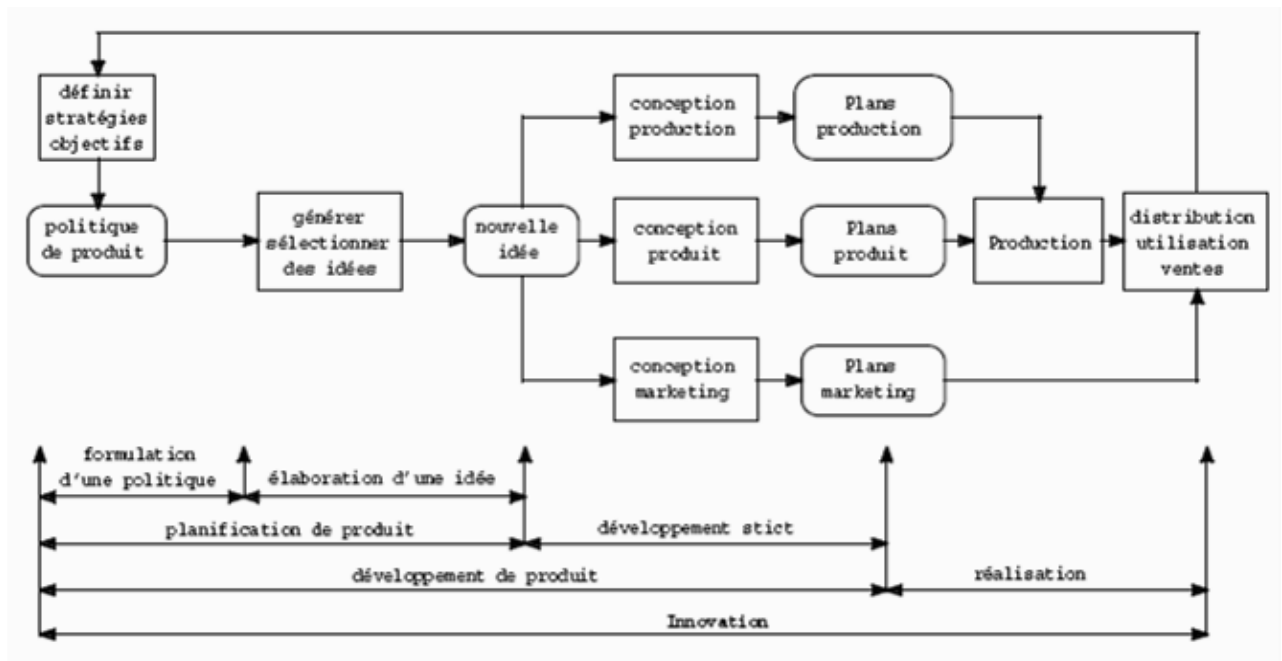


Figure 3. Les phases de processus d'innovation (Roozenburg & Eekels, 1995)

Pour Forest, le processus d'innovation est un concept auquel peuvent être rattachées quatre dimensions (Forest, Micaelli, & Perrin, 1997):

1. Une dimension temporelle : Tout processus d'innovation :
 - peut être borné (un début et une fin),
 - requiert des flux d'informations entre activités,
 - intègre des activités qui prennent du temps, etc.

2. Une dimension rationnelle : Le processus d'innovation est globalement non routinier et localement routinier.
 - Un processus routiniers : les activités sont ordonnées et exécutent ce qui a été prévu.
 - Un processus non routiniers : les activités ne sont pas ordonnées a priori car pilotées selon une stratégie opportuniste.

3. Une dimension productive: En effet, le processus d'innovation

- crée de la valeur, par transformation d'une idée (une invention) en bien ou service susceptible de répondre à un besoin et par interaction entre les offreurs et les demandeurs, l'amont et l'aval,
- intègre des activités amont dont les décisions critiques engagent un niveau élevé de dépenses futures,
- utilise des ressources (données techniques, lois scientifiques, etc.), en consomme (équipements, etc.) et en produit (prototypes, connaissances, données, etc.).

4. Une dimension coopérative : Le processus d'innovation suppose une coopération entre acteurs car :

- la connaissance totale requise pour innover est distribuée entre eux,
- tous y trouvent un gain.

Ces derniers modèles étudiés semblent les plus proches de notre réflexion de recherche et de la réalité observable dans l'industrie. En effet, nous partageons l'idée que les tâches de conceptions représentent les éléments essentiels dans la réussite de l'innovation.

Selon Perrin, les activités de conception impulsent l'innovation (Perrin, 2001). Cette idée est partagée par plusieurs auteurs qui supposent que la conception est le socle de base du processus d'innovation (Simon, 1991), (Perrin, 2001). Lattuf propose même de développer le processus de conception avant l'innovation : L'innovation (comme un processus ou comme un résultat), ne peut être présente que dès qu'il se met en place un processus de conception, soit-il conscient ou non, structuré ou non (Lattuf, 2006).

Roulet, dans sa définition de l'innovation affirme qu'innover c'est concevoir (Roulet, 2006). La possibilité d'innovation technologique, par la transformation d'une ou plusieurs idées en produits ou procédés réels, nécessite donc impérativement d'avoir recours à la conception. Cette dernière représente un sous processus du processus d'innovation (Figure 4).

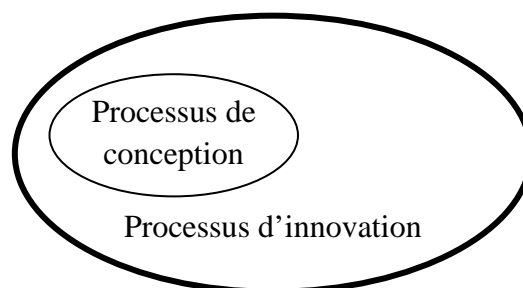


Figure 4. Processus de conception : un sous-processus du processus d'innovation

2.4 Processus de Conception : colonne vertébrale du processus d'innovation

Comme le processus d'innovation est basé sur celui de conception, nous avons dressé un état de l'art des réflexions issues du domaine de la conception. Nous définissons les différents types de processus et de conception.

2.4.1 Les différents types de processus de conception

Un processus de conception est une séquence d'activités de conception, nécessaires pour créer une ou plusieurs représentations du produit (Reymen, 2001).

Plusieurs descriptions de processus de conception existent dans la littérature, nous retiendrons les trois types de modélisation suivants: les processus séquentiels, les processus itératifs et les processus séquentiels/itératifs.

2.4.1.1 Processus séquentiels

Les premiers processus de conception séquentiels qui ont fait leurs apparitions, sont ceux de Zwicky en 1948, Asimow et Buhl en 1962, Fasal en 1965. Ces auteurs proposent une approche systématique de conception basée sur trois phases principales (Scaravetti, 2004):

- L'étude de faisabilité (définition et validation du besoin),
- La phase de conception préliminaire (choix de concepts) et architecturale,
- La conception détaillée (préparation du dossier technique).

Ces processus sont basés donc sur une succession chronologique des toutes les phases à réaliser. Cependant, la caractéristique d'un processus séquentiel réside dans le fait que le résultat d'une phase constitue la donnée d'entrée de la phase suivante (Roulet, 2006).

Pahl et Beitz ont proposé, dans les années quatre vingt, un modèle de processus séquentiel basé sur quatre phases (Pahl a & Beitz a, 1984):

- Détermination des spécifications
- Emergence des concepts
- Conception architecturale

- Conception détaillée

A partir de la détermination de spécifications, ce modèle permet d'aboutir à une solution prête à être fabriquée. La figure ci-dessous (Figure 5) détaille les différentes phases de déroulement du processus de Pahl et Beitz (Pahl & Beitz, 1996).

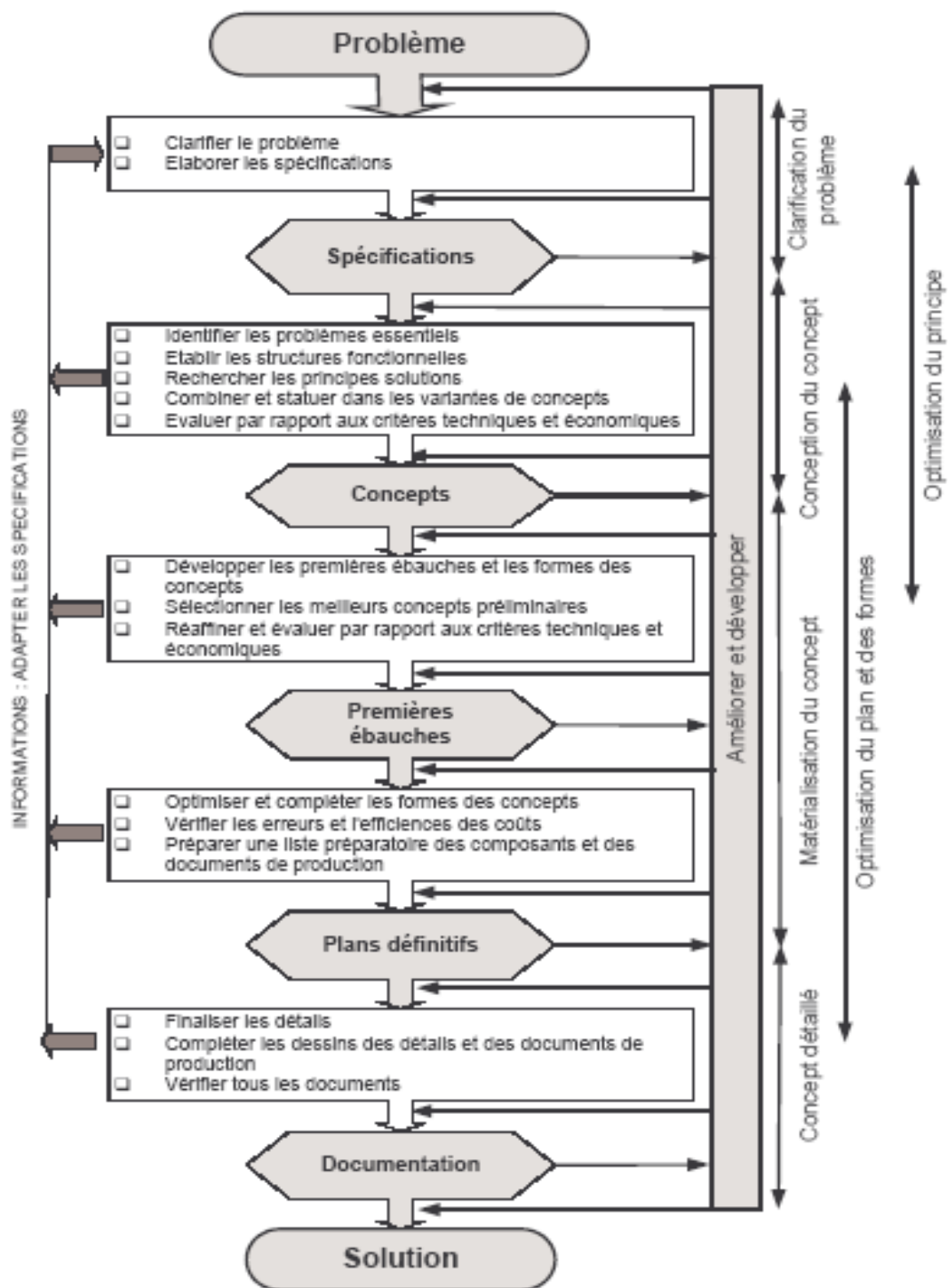


Figure 5. Modèle de Pahl & Beitz (Pahl & Beitz, 1996)

Le processus de conception proposé par Pahl et Beitz (Figure 5) est décomposé en phases, sous-phases et étapes. Cette décomposition hiérarchique ajoute plus de précision dans l'organisation et la description des activités de conception.

Ulrich et Eppinger ajoutent une phase de prototypage et de mise en place de l'industrialisation par rapport au modèle de Pahl et Beitz pour proposer ainsi son modèle, un peu plus détaillé que les autres auteurs, basé sur six phases (Ulrich & Eppinger, 1999).

2.4.1.2 Processus itératifs

Les processus itératifs ont été développés afin de répondre à un besoin de réduction des délais et des coûts de conception et de développement. Pour ce cas de modélisation, le processus n'est plus vu comme étant une succession linéaire de phases mais plus tôt un ensemble de problèmes à résoudre successivement.

Les néerlandais N. Roozenburg et J. Eekels (Roozenburg & Eekels, 1995) ont proposé une modélisation de la conception comme itération d'un cycle élémentaire de conception (Figure 6).

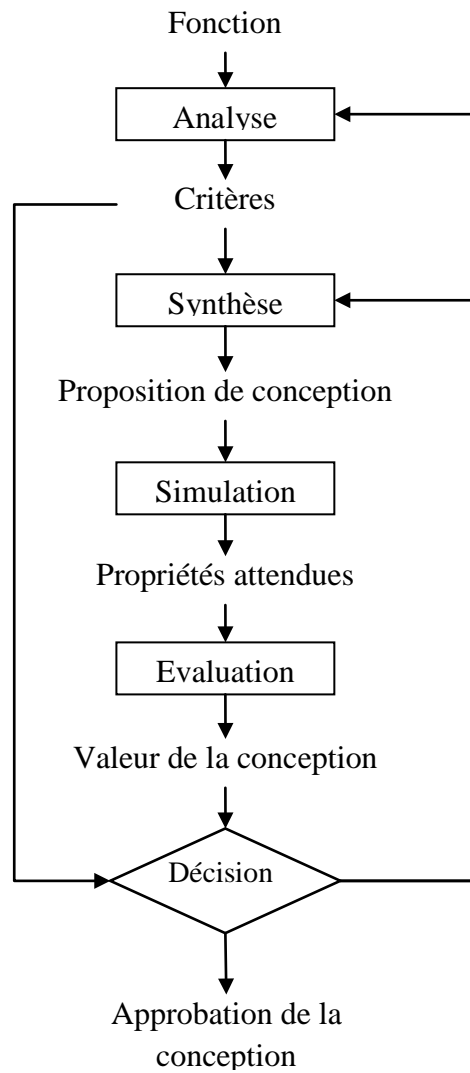


Figure 6. Processus de conception selon Roozenburg & Eekels (Roozenburg & Eekels, 1995)

Dans la modélisation itérative proposée, les solutions de conception et les spécifications évoluent simultanément (Figure 7). A un moment donné du processus de conception, un ensemble de spécifications détermine une solution de conception qui à son tour contribuera à définir un nouvel ensemble de spécifications.

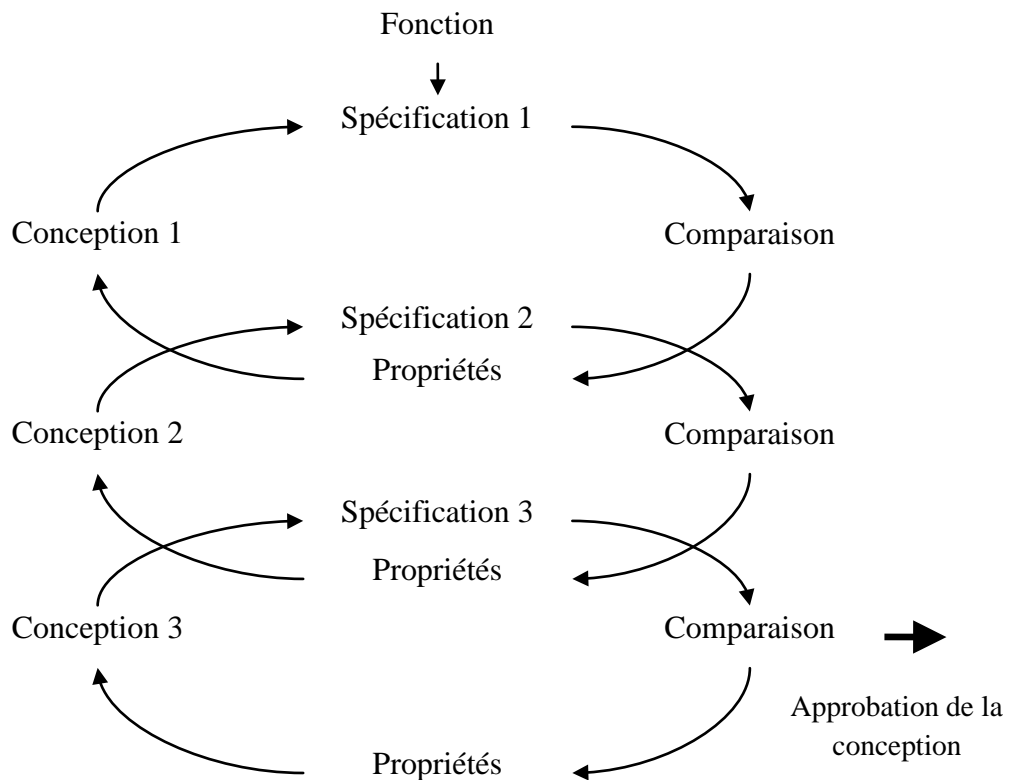


Figure 7. La structure itérative du processus de conception (Roozenburg & Eekels, 1995)

2.4.1.3 Processus séquentiels/itératifs

Aoussat a proposé un modèle séquentiel mais itératif, présenté par la Figure 8 . Il intègre, dès la phase amont du processus, toutes les phases de conception afin d'identifier et de prendre en compte toutes les contraintes relatives au cycle de vie du nouveau produit, procédé ou machine. Le fait d'intégrer tous les domaines (la technique, l'ergonomie, le design, le marketing,...) rend ce modèle pluridisciplinaire (Aoussat, 1990).

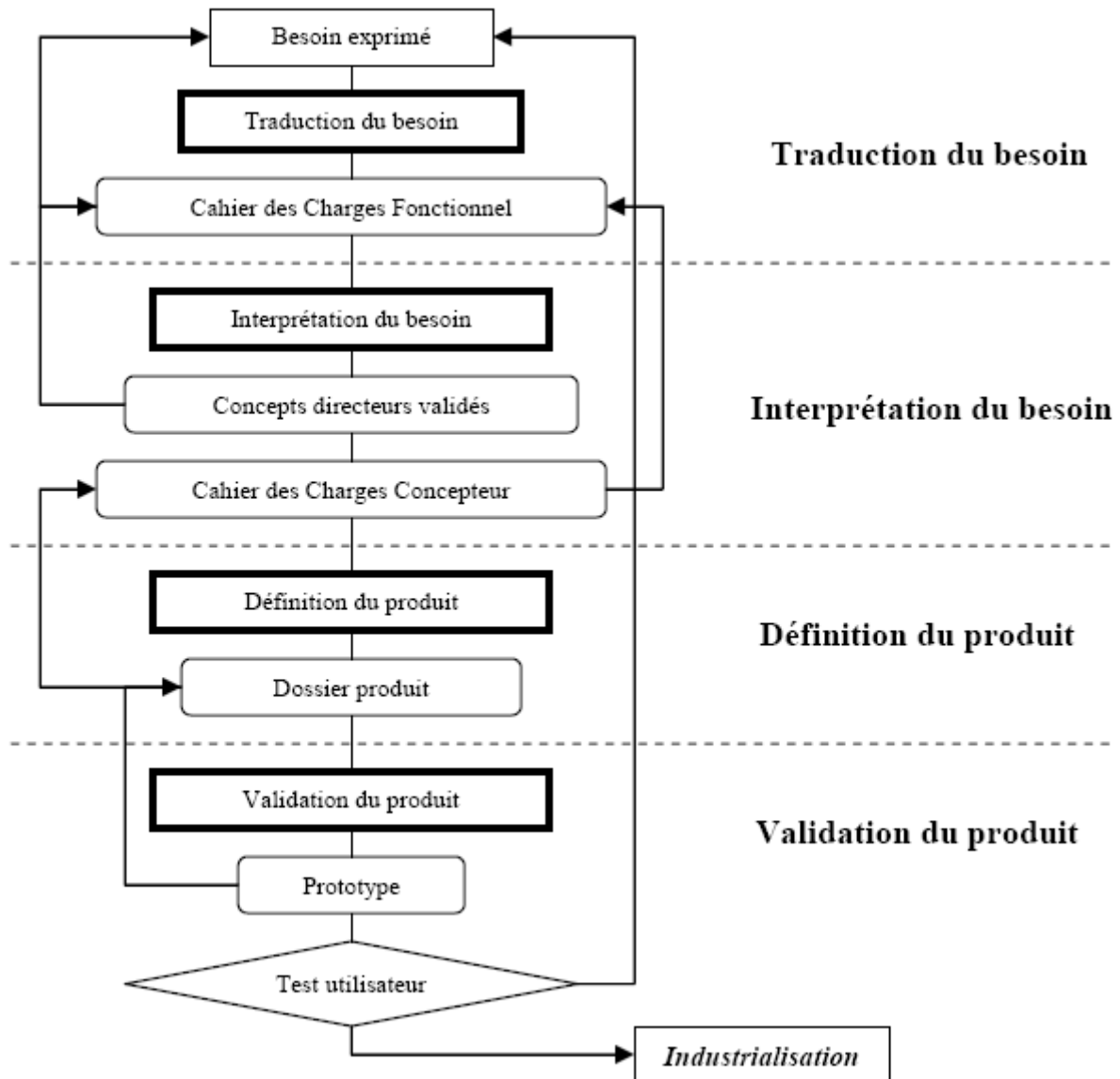


Figure 8. La démarche de conception (Aoussat, 1990)

Son modèle est basé sur quatre phases d'itérations:

- Traduction du besoin : c'est la phase de formulation et de détermination des caractéristiques du produit à concevoir. Le produit final de cette phase est le cahier de charge fonctionnel du produit.
- Interprétation du besoin : c'est la phase de recherche de concept, basée sur la créativité. Différents outils peuvent être utilisés dans cette phase tel que le Brainstorming. Les idées choisies doivent être par la suite validées.

- Définition du produit : cette phase permet de relier les différentes données relatives au produit et les structurer dans un dossier produit.
- Validation de produit : c'est une phase de prototypage et de tests à l'issue de la troisième phase afin de valider définitivement le produit et lancer sa fabrication.

2.4.2 Les différents types de conception

Trois types de conception ont été retenus par Kota et Ward (Kota & Ward, 1991): créative, innovante et routinière. La conception routinière ou re-conception est une étape de modification des caractéristiques d'une structure existante alors que la conception *créative* et *innovante* ont pour objet, respectivement la décomposition fonctionnelle et les choix de principes techniques associés (Longueville, Le Cardinal, & Bocquet, 2001).

Scaravetti dans son travail de thèse a classé les types de conception suivant la part de connaissances nouvelles qu'elles nécessitent (Scaravetti, 2004):

- La **re-conception** consiste à reprendre une solution existante pour l'adapter à une nouvelle demande ou nouvelle technologie de fabrication. Il peut s'agir également d'une mise à jour, planifiée dans le cycle de vie du produit avant son introduction sur le marché, afin qu'il reste compétitif (Dieter, 2000)
- La conception **routinière** ne nécessite pas de nouvelles connaissances. Elle est basée sur l'utilisation de solutions standards, qui sont souvent cataloguées. Elle peut concerner soit la modification d'une solution, en simplifiant par exemple la conception existante, soit un nouveau produit en assemblant différents concepts connus.
- La conception **innovante** est la combinaison entre des solutions existantes et d'autres nouvelles. Elle peut concerner une innovation par combinaison nouvelle d'éléments de produits existants, une nouvelle utilisation de technologie sur une solution existante, une application de nouveaux procédés de fabrication.
- La conception **créative** doit apporter une réponse à un problème. Elle définie comme étant l'élément clé de la transformation de l'inconscient en conscient (Sriram, et al., 1989).

En se basant sur ces définitions des différents types de conception, il nous paraissait pertinent d'appliquer dans notre cas la conception innovante. Elle a l'avantage de permettre de combiner l'existant de l'entreprise et de nouvelles fonctionnalités novatrices. La recherche

de nouvelles solutions à des problèmes techniques tient une place non négligeable dans le processus de conception.

Hatchuel, Le Masson et Weil définissent la conception innovante comme une expansion des espaces de concepts (C) et de connaissances (K) (Hatchuel, Le Masson, & Weil, 2005). Le terme de « connaissance » est défini comme une proposition ayant un statut logique dans K. Le terme de « concept » se réfère à ce que l'on appelle une proposition partiellement compréhensible dans K, mais à laquelle on ne peut attribuer de valeur logique évidente (ex : cette proposition est « vraie » ou cette proposition est « fausse ») (Hatchuel & Weil a, 2002). D'après ces auteurs, un concept n'est donc pas « une connaissance » (Hatchuel b & Weil b, 2003). Plus précisément, la théorie C-K consiste à la fois à :

- mener des raisonnements convergents (en ajoutant des propriétés qui spécifient le concept) ou des raisonnements divergents (en trouvant des variantes du concept) ;
- explorer le monde (expansion des connaissances → créativité) ou l'expertiser (réutilisation des connaissances existantes).

A partir de ce postulat, deux approches existent pour la résolution de problèmes lors d'une conception innovante:

- Dans le cas où les caractéristiques du problème et le niveau de ressources disponibles (y compris l'état de la connaissance) autorisent un éventail de solutions potentielles, la résolution de problèmes peut s'opérer par la réutilisation de connaissances. En effet, la combinaison nouvelle de solutions déjà connues est susceptible de donner naissance à l'innovation. D'après Martinet (Martinet, 2003), la conception de nouveautés est la combinaison des savoirs possédés par les individus et l'invention de nouvelles façons de les utiliser. En d'autres termes, pour la résolution de problèmes de conception, les concepteurs se basent sur les connaissances possédées afin de proposer des solutions.
- Dans d'autres circonstances, les données du problème et le niveau de ressources disponibles génèrent des contradictions qui ne permettent pas d'aboutir à une combinaison ou un compromis acceptable : il n'existe pas de solution existante satisfaisante au problème. Dans ce cas, la résolution de problème ne peut se faire que par la créativité technique (Nadeau1, Pailhès, & Scaravetti, 2006).

Dans le but de prendre en compte ces deux approches dans le processus d'innovation et de conception qui sera proposé à l'entreprise MARQUET & Cie, un état d'art sur les méthodes et les outils pour la résolution de problèmes de conception sera présenté dans le paragraphe suivant. Nous distinguons les deux cas : résolution de problèmes par la créativité et résolution de problèmes par la réutilisation des connaissances.

2.5 Résolution de problèmes de conception

2.5.1 Résolution de problèmes par la créativité

Dans certains cas, les solutions au problème n'existent pas a priori. L'activité de conception se doit alors de les élaborer. Les méthodes classiques destinées à résoudre ces problèmes sont souvent à caractère psychologique : les méthodes de créativité (Choulier & Drăghici, 2000). L'exemple le plus connu est le brainstorming.

Depuis quelques années, une théorie de résolution des problèmes inventifs est apparue en occident. Il s'agit de la méthode TRIZ (acronyme russe pour "Théorie de Résolution Inventive de Problème") qui est une approche algorithmique de résolution des problèmes techniques (Altshuller, 1999) , (TRIZ, 2000).

2.5.1.1 Méthode TRIZ

TRIZ, un acronyme russe, peut être traduit en anglais par "Theory of Inventive Problem Solving" (acronyme anglo-saxon TIPS) ou en français par "Théorie de la Résolution de Problèmes Inventifs".

Les origines de la méthodologie remontent à la fin des années 40 en ex-URSS. Genrich Saulovich Altshuller, le père des travaux sur TRIZ, était l'une des victimes des condamnations arbitraires de l'ère Staline et fut emprisonné (de 1950 à 1954). On le transféra au camp de Vorkuta, où il était détenu avec des ingénieurs, physiciens, juristes, architectes et autres scientifiques. C'est là qu'Altshuller capitalisa les connaissances qui lui permettront, plus tard, de développer la méthodologie et les outils TRIZ (Altshuller & Shapiro, 1956).

Altshuller s'efforçait à comprendre l'évolution des systèmes depuis l'aube de l'humanité. Il analysa 40000 brevets de différentes classes de la Classification Internationale des Brevets (CIB ou IPC pour International Patent Classification), pour en tirer 39 critères

universels de la conception pour un ingénieur. L'extension de ce travail, dans les années 60-70, sur 400000 brevets mondiaux permit de dégager les 40 principes d'innovation énoncés dans le Tableau 5 (Altshuller 1, 1964).

Tableau 5. 40 principes d'innovation de la méthode TRIZ

1. La segmentation	21. L'action rapide pour la sécurité
2. L'extraction	22. La transformation d'un effet nuisible en effet utile
3. La qualité locale	23. L'asservissement
4. l'asymétrie	24. L'intermédiaire
5. La combinaison	25. Le self service
6. L'universalité	26. La copie
7. Les poupées gigognes	27. L'éphémère bon marche
8. Le contrepois	28. La évolution du système mécanique
9. L'action contraire préalable	29. Les fluides
10. L'anticipation	30. Le déformable
11. La prévention	31. Les matériaux poreux
12. L'équipotentialité	32. Le changement de couleur
13. L'alternative	33. L'homogénéité
14. La courbure	34. Le rejet et la régénération
15. L'adaptabilité	35. Le changement de propriétés
16. La action réduite ou excessive	36. La transition de phases
17. Le changement de dimension	37. L'expansion thermique
18. La vibration mécanique	38. L'oxydation
19. L'action périodique	39. L'environnement inerte
20. La continuité d'une action d'utilité	40. Les matériaux composites

Altshuller propose de résoudre un problème en dehors des réalités industrielles. Une représentation générique de sa démarche est proposée par la Figure 9.

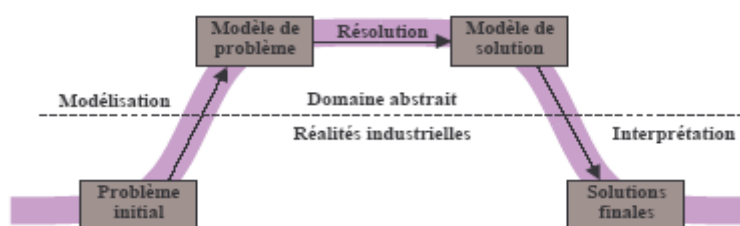


Figure 9. Modèle générique de la démarche TRIZ (Thiebaud, 2003)

Dans cette représentation (Figure 9), les problèmes et les solutions spécifiques relèvent du domaine physique alors que les modèles de problème et les modèles de solutions relèvent du domaine abstrait. La démarche démarre à partir d'un problème spécifique. Il s'agit dans un premier temps de formuler un problème "standard" ou général, puis d'utiliser les outils TRIZ

pour déterminer les solutions génériques, et enfin d’interpréter ces solutions génériques pour en tirer des solutions spécifiques. A ces trois étapes, il convient toutefois d’ajouter des étapes qui, sans être propres à TRIZ, sont utilisées dans la démarche : une étape amont d’identification du problème à traiter, et une étape aval d’évaluation.

La démarche TRIZ propose une méthodologie détaillée pour assister l’acteur dans l’identification des modèles de problème et des concepts de solutions. En revanche, le modèle décrit ne permet pas d’aboutir à une solution innovante de manière immédiate. En effet, une solution spécifique d’un problème spécifique est en général à l’origine de nouveaux problèmes spécifiques, pour lesquels de nouvelles solutions doivent être trouvées. La solution retenue in fine résulte ainsi d’un processus convergent de résolutions de problèmes spécifiques successifs (Figure 10).

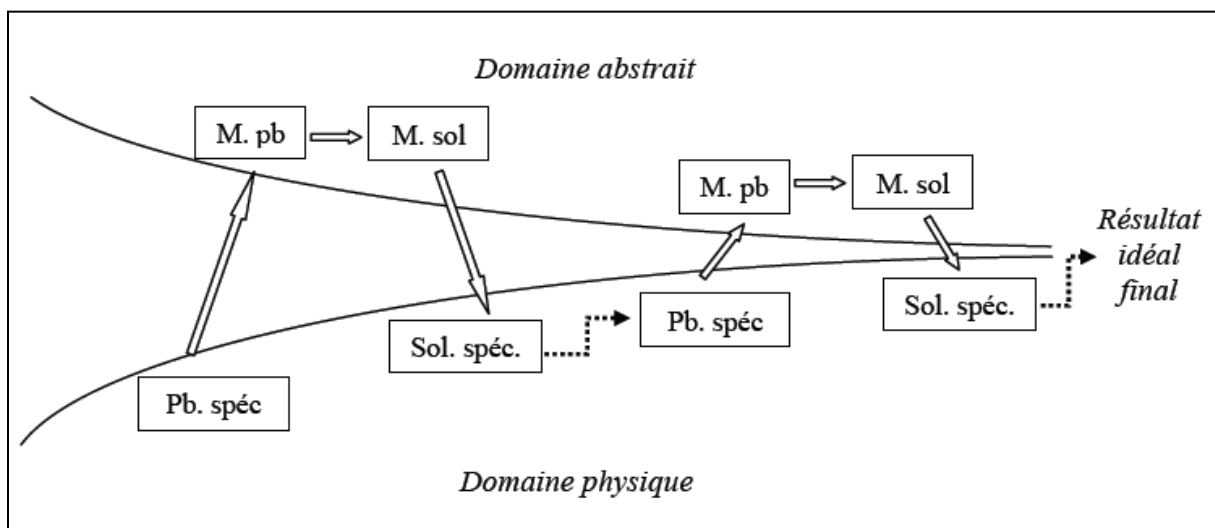


Figure 10. Convergence de la démarche de TRIZ (Lerch & Schenk, 2009)

Cependant, même si la démarche TRIZ est souvent jugée intéressante par les entreprises, elle est également qualifiée de complexe, lourde et surtout difficile à approprier par les petites entreprises (Lerch & Schenk, 2009). L’expérience a montré qu’il est très difficile pour une PME-PMI de mettre en œuvre la démarche TRIZ. En effet, le temps d’apprentissage de cette méthode est important.

Les outils TRIZ classiques demandent la connaissance d’un vocabulaire, l’adhésion à des procédures particulières et un entraînement systématique. De plus, il n’y a pas de procédure complètement définie pour la formulation du problème : un problème spécifique,

bien défini dans un contexte donné, sera transformé en un problème générique dans des termes propres à TRIZ (Ngassa, Thouvenin, Millet, & Truchot, 2000).

Dans le but de faciliter la phase initiale d'analyse et de structuration du processus de créativité et de mieux déployer les outils de créativité avec des temps de mise en œuvre relativement courts, le laboratoire TREFLE a développé et réalisé un logiciel de conduite d'études de créativité technique et d'innovation MAL'IN, Méthodes d'Aide à L'Innovation (Nadeau, Pailhes, & Olivares, 2004), (Trefle, 2004).

2.5.1.2 MAL'IN : logiciel de conduite d'études de créativité technique et d'innovation

Le logiciel MAL'IN est basé sur les travaux réalisés au TREFLE-ENSAM dans le groupe de recherche « Systèmes Energétiques et Conception », alliant les outils de l'analyse fonctionnelle (organigramme technique, bloc diagramme fonctionnel), à une méthodologie intégrant des outils adaptés de la théorie TRIZ.

Ce logiciel est bâti autour d'un questionnaire permettant, d'analyser, de formuler et de résoudre un problème industriel (Nadeau & Pailhès, 2007). Ainsi le questionnaire comporte quatre parties : analyse de problèmes, formulation, résolution et hiérarchisation des solutions. Afin de récolter et de structurer les informations disponibles dans le groupe de créativité, les phrases utilisées dans le questionnaire sont redondantes et permettent à chaque participant de retrouver sa sémantique personnelle (Nadeau¹, Pailhès, & Scaravetti, 2006). La redondance permet aussi de lutter contre les rétentions d'information du personnel de l'entreprise, voulues ou non. Ainsi, au bout de la phase d'analyse et de structuration, une vision très complète du problème est établie, vision qui intègre les différents points de vue des participants.

Comparée à la théorie TRIZ, la démarche de conduite d'étude de créativité MAL'IN :

- suit une démarche structurée sous forme de questionnaire, rendant facile l'utilisation de la démarche,
- utilise le vocabulaire et les outils de l'analyse fonctionnelle, qui sont connus dans le milieu industriel,
- simplifie les outils TRIZ pour focaliser sur la recherche d'idées,
- intègre des outils d'analyse des graphes et des exemples ciblés,
- est implémentée dans un logiciel de conduite d'étude ergonomique et pratique.

Ces avantages justifient la réussite de cette démarche industriellement dans les grandes entreprises aussi bien dans les petites. Elle est aussi adoptée dans l'enseignement par plusieurs écoles d'ingénieurs en France et à l'étranger.

2.5.2 Résolution de problèmes par la réutilisation des connaissances

Nous avons montré dans la partie précédente de ce chapitre que la réutilisation de l'existant est apparue comme un facteur prépondérant dans le développement d'un processus de conception et en particulier dans la résolution de problèmes de conception. Ces constatations nous ont orientées vers le domaine des connaissances.

En effet, un nombre important de connaissances est échangé au cours du processus de conception dans l'équipe impliquée dans le projet. Dans le cas des PME, les personnels n'ont ni le temps ni les moyens de chercher et capitaliser ces informations, ni de les rendre accessibles aux concepteurs.

Pour aider les concepteurs à exécuter leurs tâches, dans le cadre d'une conception innovante, une base de connaissances peut donc s'avérer très utile. Le but d'une telle base serait de modéliser et stocker un ensemble de connaissances et de permettre leurs réutilisations lors de la conception de nouveaux procédés au sein de la PME MARQUET. Cette base devra s'appuyer sur un système informatique pouvant être facilement mis à jour, maintenu et validé au fil des projets.

2.5.2.1 Pourquoi s'intéresser aux connaissances

La connaissance représente un capital intellectuel très volatile de l'entreprise. Des défaillances liées à des pertes de connaissances sont observées surtout dans les petites et moyennes entreprises. Elles sont fragilisées en cas de départ d'un de leurs membres, du fait d'un départ en retraite, du passage à la concurrence, d'une réduction des effectifs, etc. (Moison & Weil, 2000), (Ben Sta, 2006). Pour ces entreprises, la perte est minimisée si elles ont su capitaliser et archiver les connaissances et les expériences de l'intéressé.

En archivant ses projets et ses expériences passées, l'entreprise acquiert beaucoup plus de performance et évite la répétition des erreurs commises précédemment. Selon Simoni, capitaliser les connaissances issues des projets aurait pour objectif de mettre à disposition l'expérience des individus et groupes qui y ont participé, constituant ainsi un réservoir de

ressources et d'idées tant pour ceux qui ont participé et qui se remémorent l'intérêt de certaines situations que pour les autres qui pourraient trouver là des réponses pour l'exploration de nouvelles pistes de recherche (Simoni, 2001).

Mémoriser et ré-exploiter dans d'autres projets les connaissances produites devient donc un enjeu capital pour les PME. La connaissance est devenue, plus encore que le capital et les ressources physiques, l'ingrédient essentiel de la création de valeur (Mack, 1995).

Le partage et la capitalisation de connaissances se concrétisent rapidement par des résultats tangibles (Ben Sta, 2006). Pour ce qui concerne la conception, les entreprises voient augmenter leurs capacités d'innovation tout en réduisant les coûts et les délais. Or, au cours d'un processus de conception, un nombre très important d'informations et de connaissances est échangé entre les acteurs impliqués dans le projet. Pour gagner en terme de temps de recherche des données et des informations, ces connaissances doivent être accessibles aux membres de l'équipe des concepteurs et donc capitalisées dans un support pouvant être mis à jour au fil et à mesure des conceptions.

Ainsi, les connaissances sont considérées comme une ressource de l'entreprise au même titre que d'autres actifs. Selon Barney, les ressources d'une entreprise sont les actifs, capacités, processus organisationnels, informations, connaissances, etc..., contrôlés par l'entreprise et qui lui permettent de concevoir et mettre en oeuvre ses stratégies (Barney, 1991).

2.5.2.2 Définitions des connaissances et leurs typologies

2.5.2.2.1 La notion de connaissances

Certains auteurs distinguent, pour définir la nature de la connaissance, les notions de donnée, information, connaissance, savoir et savoir-faire (Tsuchiya, 1995),(Ermine, Chaillot, Bigeon, Charreton, & Malavieille, 1996) et (Coste, 2000):

- Les **données** sont des faits de base, qui apparaissent au cours de la réalisation d'une tâche. Elles peuvent être transcrites sous forme de chiffres, de mots ou de symboles, de figures (Baizet, 2004). L'AFNOR définit une donnée comme un fait, notion ou instruction représentée sous forme conventionnelle convenant à la communication, à l'interprétation ou au traitement par des moyens humains ou automatiques.

- Les **informations** représentent un ensemble de données propres à revêtir un sens particulier, pour un utilisateur donné. A côté de cette définition objective de l'information, une autre approche subjective consiste à considérer que tout peut être information, mais que c'est uniquement le regard porté sur un objet qui le rend porteur d'information (Frochot, 2003).
- Les **connaissances** sont des représentations immatérielles d'une partie du monde (physique, de la conscience ou mathématique), structurées pour un objectif précis. Les connaissances sont des données qui influencent le déroulement de processus. En structurant de différentes façons restrictives de l'information, on obtient des connaissances différentes : explicites ou tacites collectives ou individuelles, déclaratives ou procédurales. Nous les définissons dans le paragraphe §2.5.2.2.2.
- Les **savoirs** sont l'ensemble de connaissances portant sur un sujet donné (Blouin & Bergeron, 1997). Ils représentent les connaissances acquises par l'étude et par l'expérience. Le savoir est clairement formulé et contextualité dans l'ensemble des connaissances implicites nécessaires à sa bonne compréhension (Ben Sta, 2006).
- Les **savoir-faire** sont les compétences techniques ou habiletés, alliées à l'expérience dans l'exercice d'un champ d'activité professionnel (Blouin & Bergeron, 1997).

Prax distingue les notions de donnée, information et connaissance, de la notion de compétence. Selon lui, la compétence est un ensemble de connaissances, de capacités d'action et de comportements structurés en fonction d'un but et dans un type de situation donné (Prax, 2000). Dans le domaine professionnel, la compétence sera définie comme un savoir-agir résultant de la mobilisation et de l'utilisation efficaces d'un ensemble de ressources internes ou externes dans des situations relevant d'un contexte professionnel.

2.5.2.2.2 Typologies de connaissances

Les connaissances sont différenciées entre elles suivant leurs natures, leurs objets et leurs formes (Deneux, Lerch, Euzenat, & Barthès, 2002). Plusieurs distinctions sont possibles :

➤ **Connaissances individuelles et connaissances collectives :**

Les connaissances individuelles sont détenues par au moins un des acteurs de l'organisation alors que les connaissances collectives sont partagées par tous les membres d'une organisation.

Si l'on considère les savoir-faire de l'entreprise définis précédemment, on peut penser qu'ils reposent strictement sur des connaissances individuelles. Cependant, certaines connaissances individuelles ont une dimension collective qui se traduit par des compétences et des logiques d'action spécifiques de l'entreprise.

➤ Connaissances techniques et connaissances managériales :

Les connaissances techniques sont les connaissances utiles à une personne ou un groupe de personnes pour accomplir une tâche. Deneux et al présentent un exemple concret lié au domaine de la conception mécanique (Deneux, Lerch, Euzenat, & Barthès, 2002). Ils caractérisent les connaissances en conception suivant une représentation en trois modèles :

- Le modèle fonctionnel permettant de représenter le besoin exprimé par le client du produit,
- Le modèle physique ou structurel concernant les aspects architecturaux du produit,
- Le modèle processus spécifiant les activités nécessaires à l'élaboration du produit.

Les connaissances managériales, quand à elles, concernent les activités organisationnelles et stratégiques de l'entreprise.

➤ Connaissances déclaratives et connaissances procédurales :

Baizet a défini ces connaissances comme suit : les connaissances dites déclaratives permettent de décrire une situation ou d'établir des faits séparés de leur contexte d'emploi ultérieur, ce qui permet de ne pas préjuger de l'utilisation de la connaissance a posteriori. En opposition à ce premier type, les connaissances dites procédurales permettent d'énoncer des règles ou les conditions d'exécution d'une tâche, ce qui implique une connaissance en quelque sorte figée dans une utilisation particulière, connue a priori (Baizet, 2004).

➤ Connaissances tacites et connaissances explicites :

Ces deux types de connaissances ont été diffusés par Nonaka et Takeuchi en 1995 (Nonaka & Takeuchi, 1995) puis par Polanyi en 1996 (Polanyi, 1996).

Les connaissances explicites sont les connaissances transmissibles dans un langage formel. Elles sont capturées dans les bibliothèques, des archives et des bases de données, elles peuvent être constituées de plans, de modes d'emploi, de catalogues, etc. D'après Polanyi, les connaissances explicites réfèrent à la connaissance qui peut être exprimée sous forme de mots, de dessins, d'autres moyens « articulés » notamment les métaphores (Polanyi, 1996).

Les connaissances tacites, ou implicites sont les connaissances qui sont difficilement exprimables, quelle que soit la forme du langage (Polanyi, 1996).

Une comparaison entre les connaissances explicites appelées également savoirs et les connaissances tacites appelées savoir-faire a été dressée par Grundstein. Elle est représentée dans la Figure 11. D'après ce schéma, les savoirs de l'entreprise sont constitués d'éléments tangibles (les bases de données, les procédures, les plans, les modèles, les algorithmes, les documents d'analyse et de synthèse) alors que les savoir-faire sont composés d'éléments immatériels (les habilités, les tours de mains, les routines, les connaissances de l'historique et des contextes décisionnels).

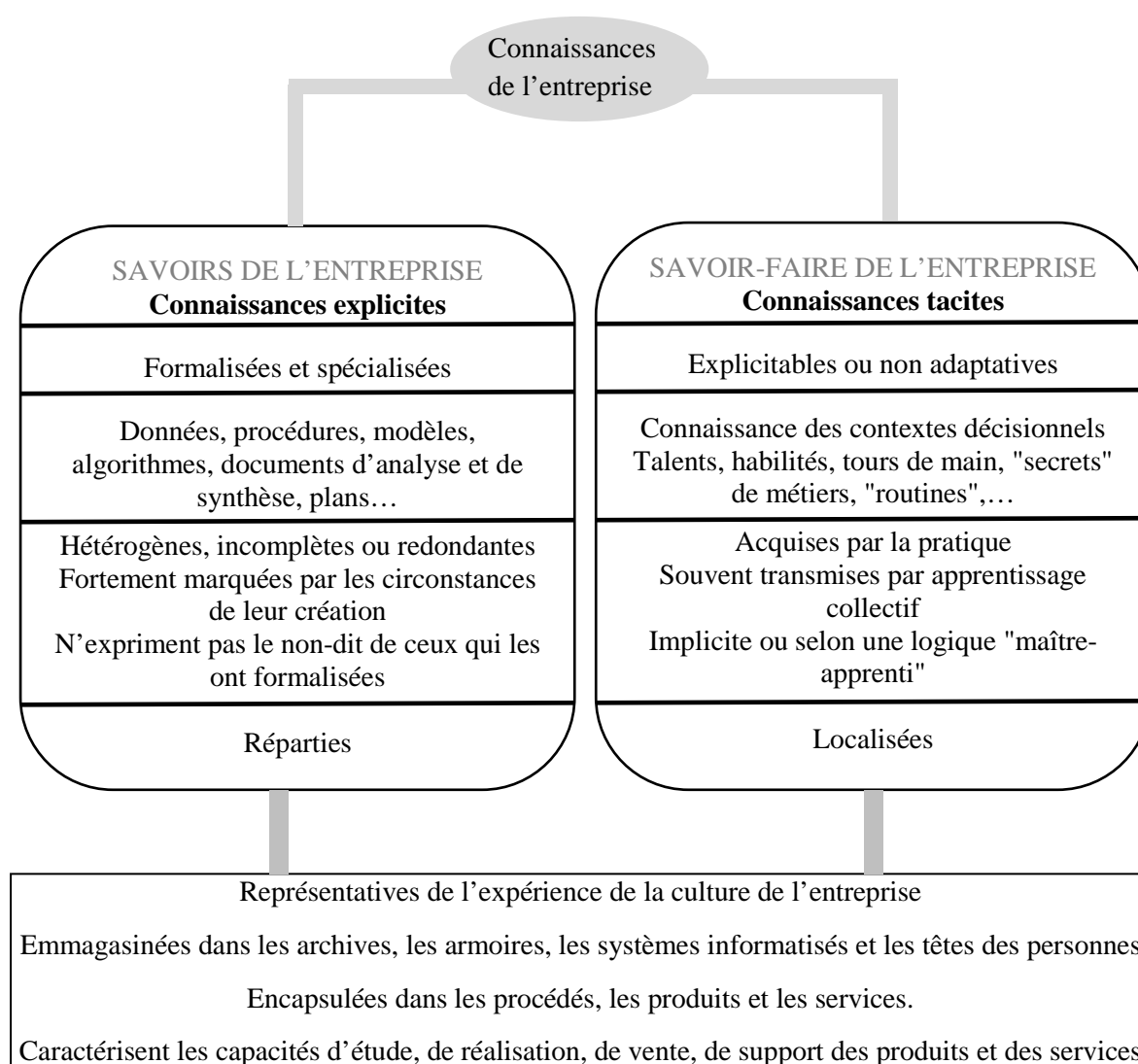


Figure 11. Connaissances tacites et connaissances explicites (Grundstein, 2000)

Compte tenu de la double nature des connaissances explicites et tacites, Nonaka et Takeuchi décrivent quatre modes de conversion de la connaissance (Nonaka & Takeuchi, 1995). Leur modèle de conversion des connaissances appelé « **SECI** model », illustré à la Figure 12, comporte ces quatre phases :

- **Socialisation** : c'est la création de connaissances tacites à partir d'autres connaissances tacites. C'est la transmission de connaissances tacites d'une personne à l'autre par l'observation et la pratique.
- **Externalisation** : c'est la conversion de connaissances tacites en connaissances explicites.
- **Combinaison** : c'est la création de connaissances explicites à partir d'autres connaissances explicites.
- **Internalisation** : c'est la conversion de connaissances explicites en connaissances tacites, c'est l'équivalent de l'apprentissage par l'action.

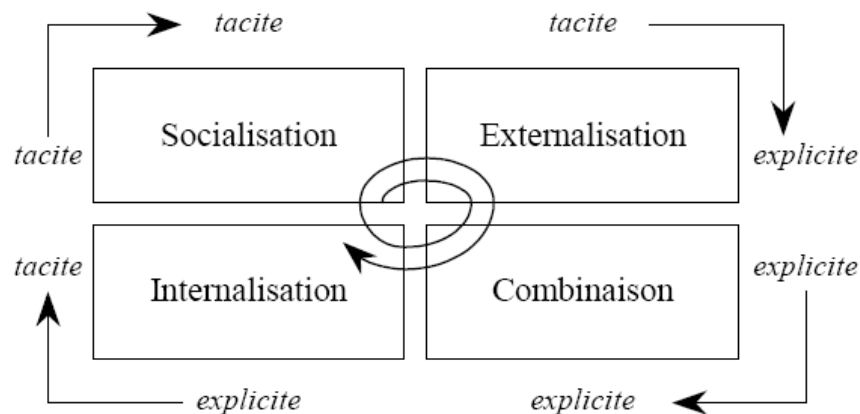


Figure 12. Le cycle de création de la connaissance (Nonaka & Takeuchi, 1995)

L'objectif de ce cycle de conversion de la connaissance est de capitaliser les savoirs de l'entreprise et favoriser leur passage de leur état non formalisé et individuel à un état formalisé et éparpillé.

Dans le cas de la PME MARQUET & Cie, les types de connaissances à capitaliser sont principalement des connaissances tacites sur les façons de faire, sur la conception des produits ainsi que sur les concepts de solutions mis en œuvre dans les procédés de fabrication d'articles chaussants. Beaucoup de systèmes de production ont été conçus et réalisés à

l'extérieur de la PME. Une démarche d'observation de l'existant est donc nécessaire, pour capitaliser et formaliser la façon dont les fonctions ont été mises en œuvre concrètement et techniquement.

2.5.2.3 Capitalisation des connaissances

Différentes méthodes de gestion de connaissances existent dans la littérature. Cependant, ces méthodes sont très lourdes à mettre en œuvre dans le cadre de petites entreprises qui ont peu de moyens et de personnel qualifié. Ces entreprises se trouvent face à une difficulté pour capitaliser et préserver leurs connaissances.

Dans le but de proposer un guide méthodologique pour la construction d'une base de connaissances afin de favoriser la réutilisation de l'existant dans l'entreprise MARQUET & Cie, nous avons analysé plusieurs méthodes de capitalisation de connaissances qui existent dans la littérature. Nous nous sommes intéressés à celles qui sont dédiées aux projets de conception.

2.5.2.3.1 Méthodes de capitalisation des connaissances

Il existe plusieurs méthodes de capitalisation héritées de l'ingénierie de la connaissance (Holsapple & Joshi, 2001), (Lai & Chu, 2000). Ces méthodes proposent des modélisations et des méthodologies (interviews, analyse de documents, ...).

Rasovska a également recensé des méthodes et outils pour la gestion de connaissances dans les projets de conception (Rasovska, Chebel-Morello, & Zerhouni, 2008). Parmi celles là, nous avons étudié quatre méthodes qui nous paraissaient les plus dédiées à la capitalisation des connaissances liées aux procédés de fabrication:

- La méthode MASK (méthode d'analyse et de structuration de connaissances) a pour objectif de modéliser les connaissances, de les formaliser sous une forme graphique qui rend visibles les interactions entre chaque élément de connaissance (Matta, Ermine, Aubertin, & Trivin, 2001).
- La méthode SAGACE (Penalva, 1993) a comme principe de base la modélisation des connaissances statiques décrivant un système de production. Cette modélisation se base sur trois types de visions : fonctionnelle, organique et opérationnelle.
- La méthode CommonKADS (Schreiber, et al., 1999) permet de traiter tout le processus d'acquisition de connaissances, du recueil au développement d'un système de base de connaissances.

- La méthode Componential Framework se base sur la modélisation des connaissances selon trois perspectives : tâche, information et méthode (Steels, 1993).

Nous allons voir les aspects de la connaissance communs à ces quatre approches ainsi que des descriptions qui ne sont propres qu'à un modèle.

Chaque approche présente au minimum une description de l'activité sous forme de tâches. L'approche MASK propose une analyse de type fonctionnelle descendante où chaque activité est décomposée hiérarchiquement. Cette décomposition arborescente raffine récursivement les tâches de plus haut niveau en sous-tâches plus détaillées. L'ordonnancement des tâches est également spécifié.

Componential Frameworks propose aussi une décomposition graphique des tâches, sous forme d'un arbre appelé structure de tâches. Des modèles précisent les connaissances consultées et construites pour réaliser une tâche et mettent en évidence comment les connaissances ont été utilisées pour réaliser chaque tâche.

La vision opérationnelle de SAGACE décrit la tâche et les acteurs, tandis que les fonctions, les contraintes de conception, les objectifs sont décrits dans la vision fonctionnelle.

CommonKADS définit l'organisation globale des tâches, les entrées et les sorties, les pré-conditions et les critères de performance. Les agents humains ou informatiques impliqués dans la réalisation des tâches, ainsi que les ressources et compétences nécessaires sont également décrits. Les communications homme-machine sont explicitées. Finalement, l'organisation entreprise est spécifiée en décrivant ses grandes fonctions.

D'autre part, la méthode MASK intègre l'évolution d'une connaissance et permet d'appréhender globalement les évolutions qui ont amené la connaissance à l'état actuel. De plus, sur la base d'une analyse à posteriori, il est possible de visualiser les évolutions des objets ou concepts principaux du système. Un arbre généalogique retrace les apparitions et les disparitions, les raisons de l'évolution, ainsi que les éléments positifs et négatifs apportés par chaque génération.

Enfin, pour la description des solutions mises en œuvre, MASK spécifie la structure conceptuelle mise en place pour accomplir les tâches ou les fonctions. SAGACE parle de vision organique. Le modèle de conception CommonKADS correspond à la spécification technique du système. MASK propose de décrire, en plus, les interactions entre deux systèmes via un flux (matière, énergie ou information) caractérisant les phénomènes physiques.

2.5.2.3.2 Synthèse et besoin

Toutes ces méthodes s'appliquent à la conception. Elles permettent la manipulation de différents types de connaissances. Les méthodes MASK, Componential Framework et CommonKADS permettent de définir plusieurs typologies de connaissances : information, contexte, signification, tâche, méthode, information, modèle de domaine et ontologie. Ces méthodes sont dédiées à la représentation d'un processus. La méthode SAGACE permet de représenter les aspects fonctionnels, organiques et opérationnels comme résultat d'un projet.

Ces outils décrivent des systèmes, jusqu'à des organisations complexes. A cette fin, ils sont basés sur la décomposition d'un processus en tâches et définissent l'ordonnement liant les tâches entre elles. Par contre, le temps d'exécution des tâches, la description du contexte des tâches (les objets, utilisateurs...), les conditions de passage d'une tâche à une autre ne sont pas toujours présentes.

Dans notre cas, les connaissances à capitaliser dans la PME partenaire sont liées aux procédés de fabrication. Afin de décrire et capitaliser un procédé complet, il est nécessaire de pouvoir retracer la succession temporelle des tâches et des fonctions élémentaires, leurs ordonnancements et les transitions entre elles, tout en précisant l'allocation des tâches aux opérateurs humains ou à la machine. Les phases d'interaction homme-machine doivent être présentes.

Enfin, pour la réalisation de chaque fonction élémentaire, l'entreprise souhaite pouvoir capitaliser la solution technique mise en œuvre, les composants ou sous ensembles utilisés, ainsi que les énergies nécessaires.

Nous devons donc développer une démarche de capitalisation et de structuration des connaissances adaptée au besoin de la PME MARQUET & Cie.

2.6 Conclusion

Nous avons indiqué au début de ce chapitre l'objectif industriel que souhaitait atteindre l'entreprise MARQUET & CIE : il s'agit non seulement d'innover et d'intégrer de nouveaux procédés de fabrication mais encore de disposer à terme d'un outil lui permettant d'être autonome et de maîtriser son processus d'innovation.

Nous avons montré que la possibilité d'innovation technologique, par la transformation d'une ou plusieurs idées en procédés réels, nécessite donc impérativement d'avoir recours à la conception. Cette constatation impose de s'appuyer sur un processus de conception bien défini.

En se basant sur la comparaison faite entre les différents types de conception, il nous paraissait pertinent d'appliquer la conception innovante. Dans ce cas, la résolution de problèmes peut s'opérer soit par créativité en utilisant l'outil MAL'IN, soit par la réutilisation des connaissances.

Afin de formaliser et capitaliser la connaissance en vue de la construction d'une base de connaissances réutilisable dans la conception de futurs procédés, nous proposons donc dans le chapitre 3 une démarche de capitalisation et de structuration des connaissances adaptée au besoin de l'entreprise MARQUET & Cie.

Chapitre 3 Démarche de capitalisation des connaissances en vue de la construction d'une base de connaissances

Tout comme les grandes entreprises, les PME sont aussi confrontées au roulement de personnel et aux départs à la retraite de leurs travailleurs expérimentés, menant à la perte de connaissances (McAdam & Reid, 2001). Le défi pour ces sociétés est de pouvoir capitaliser cette connaissance et la partager dans l'organisation.

L'analyse de méthodes existantes de capitalisation des connaissances présentée dans le deuxième chapitre (§2.5.2.3.1) a montré que ces outils ne sont pas adaptés à notre objectif. Pour cette raison, nous avons développé une méthode de capitalisation de connaissances répondant au besoin de l'entreprise MARQUET & Cie.

La méthode proposée repose sur trois étapes. Comme montre la Figure 13, la première étape consiste à une analyse de l'existant. Le but est de modéliser les procédés de fabrication existants afin de mettre en évidence et de décrire les tâches et les fonctions mises en place dans chaque procédé. Nous adoptons dans cette étape une vision fonctionnelle.

Dans la deuxième étape, nous souhaitons extraire et capitaliser toutes les informations pertinentes liées à la réalisation techniques des fonctions. Cette étape est basée sur une vision énergétique pour la formalisation des solutions techniques.

Enfin, la troisième étape est une étape de structuration des connaissances afin de les rendre accessibles et favoriser la réutilisation. Des bases fonctionnelles (base de verbes + base de compléments) ont été développées afin de définir une façon standard pour l'expression des fonctions et pour l'interrogation de la base de connaissances.

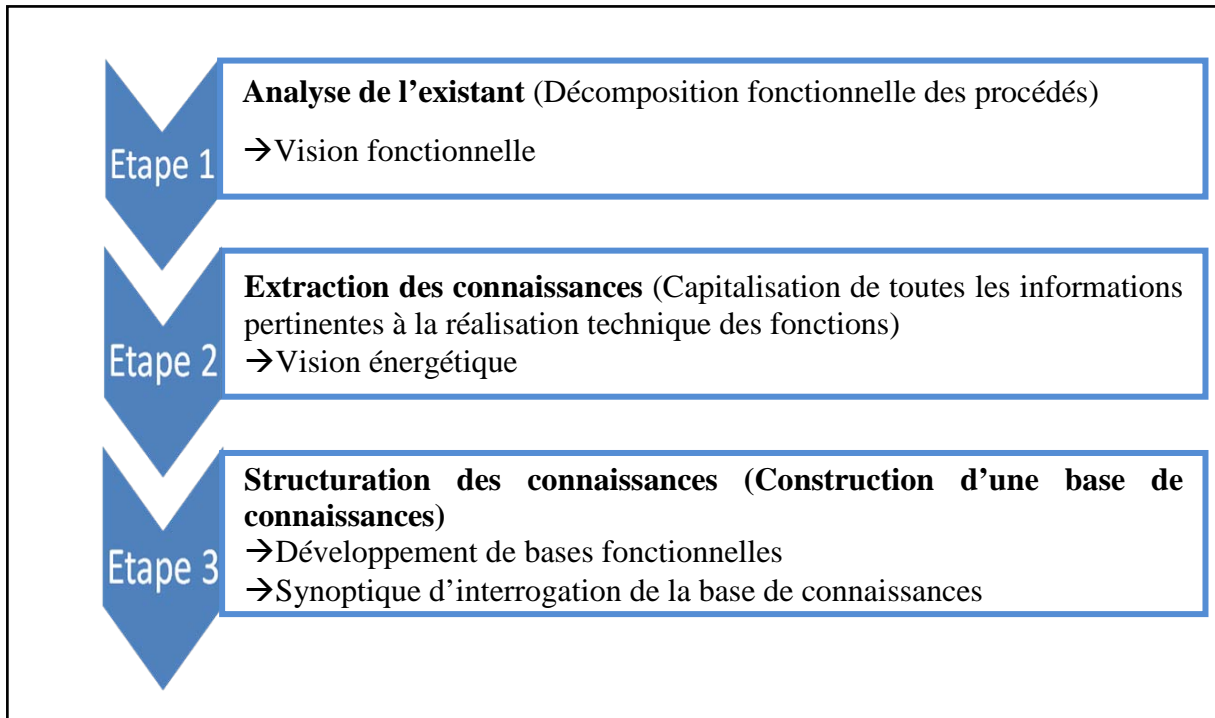


Figure 13. Démarche de capitalisation de connaissances proposée

Nous nous intéressons, dans ce chapitre, à la présentation de la démarche proposée pour l'extraction, la formalisation et la structuration des connaissances liées aux savoirs et aux savoir-faire de la PME. Notre but est de proposer un guide méthodologique pour la construction d'une base de connaissances.

3.1 Analyse de l'existant

L'analyse de l'existant nécessite une démarche structurée en vue de dresser un bilan clair et précis des procédés de fabrication existants dans l'entreprise MARQUET & Cie. La plupart des méthodes d'analyse de l'existant reposent sur la même démarche ; il s'agit de modéliser les systèmes existants (Nazarenko, 2003).

Dans la démarche d'analyse, la modélisation d'un procédé permet de représenter sa structure et son fonctionnement. En se référant à la comparaison de différentes méthodes de capitalisation de connaissances présentée dans le chapitre précédent, il nous paraît pertinent de baser notre démarche d'analyse de l'existant sur la décomposition fonctionnelle des procédés. Le but d'une telle décomposition est de mettre en évidence et de décrire les tâches à

effectuer pour accomplir un travail. Il s'agit d'une analyse de type fonctionnelle descendante, où chaque tâche est décomposée hiérarchiquement en sous-tâches de plus bas niveau.

La hiérarchie traduit l'organisation structurelle du procédé et met en relief la séquentialité des tâches et leur synchronisation. Cette représentation est intéressante car elle permet, d'une part, de représenter le fonctionnement effectif du procédé, c'est-à-dire l'ensemble des services que le système devra fournir, et, d'autre part, de modéliser les connaissances et de garder une trace du raisonnement à des fins d'explication lors de la réutilisation (Goel, 1996).

Le modèle de tâche permet également d'identifier les tâches effectuées par l'opérateur, celles effectuées par le procédé et celles dues à l'interaction entre l'opérateur et le procédé.

Pour chaque tâche, nous souhaitons extraire les moyens, les composants, les connaissances et les informations nécessaires ou utiles pour sa réalisation technique. D'après Golbreich et al, une tâche est définie par les éléments suivants (Golbreich, Delouis, & Scapin, 1989):

- Un état initial constitué des arguments d'entrée de la tâche,
- Un état final constitué des arguments de sortie de la tâche,
- Un but indiquant explicitement le but recherché que l'exécution de la tâche permet d'atteindre,
- Des préconditions ou un ensemble de prédicats exprimant des conditions sur l'état initial, qui doivent nécessairement être satisfaites pour déclencher l'exécution de la tâche,
- Des postconditions ou un ensemble de prédicats exprimant des conditions sur l'état final qui doivent nécessairement être satisfaites après l'exécution de la tâche,
- Un corps représentant un niveau opérationnel indiquant comment la tâche peut être exécutée.

Ces éléments permettent de capitaliser une façon, déjà éprouvée par l'entreprise, de réaliser une tâche propre à son métier, qui se retrouvera dans d'autres procédés. A cette fin, l'analyse des procédés existants dans la PME est notre point de départ dans la démarche de capitalisation.

3.1.1 Analyse séquentielle des procédés existants

Un procédé est représenté dans notre cas comme étant une succession de tâches. Ces tâches ont ensuite été décomposées en sous-tâches ou fonctions élémentaires, nommées aussi

moments significatifs (Doré, Pailhès, Fischer, & Nadeau, 2007). Une fonction élémentaire du modèle de tâches est une action élémentaire non décomposable ou non décomposée. Le but de cette décomposition est d'avoir une représentation hiérarchique et une capitalisation de toutes les connaissances en allant du plus général (tâche mère) au plus détaillé (fonctions élémentaires).

L'analyse des procédés existants est basée sur deux sources principales :

- les compétences individuelles liées aux connaissances et aux savoir-faire des employés de l'entreprise qui donnent une information qualitative sur ce qu'est le procédé étudié. Ces informations sont capitalisées par des interviews et des entretiens avec les différents opérateurs de l'entreprise ainsi que sur l'observation des opérateurs sur les postes de travail.
- l'acquisition de données directement sur le système, donnant plutôt une information quantitative sous forme de mesures. La capitalisation de ces données est rapide lorsqu'il existe un dossier technique du procédé étudié. Dans le cas contraire, beaucoup de temps est nécessaire afin de pouvoir comprendre et analyser le système.

L'analyse des procédés existants s'est déroulée en deux étapes : en cours d'action, que l'on nomme analyse *in vivo*, et après l'action que l'on qualifie d'analyse *a posteriori*.

La capitalisation est normalement une activité qui se fait en cours d'action (Graugnard & Quiblier, 2006). Sachant qu'un des facteurs limitant de la capitalisation est l'accessibilité aux informations, on tendrait à privilégier la capitalisation *in vivo* qui permet d'exploiter la mémoire encore vive et d'avoir un accès complet à l'information.

Cependant, le temps passé entre l'action et sa capitalisation est un facteur déterminant. Si le délai est trop court, il y a le risque de ne pouvoir identifier les tâches du procédé avec certitude, mais la mémoire encore vive, donne un accès complet à l'information. Inversement, si la capitalisation est menée sur un délai trop long, les différentes tâches et fonctions d'un procédé apparaissent avec clarté mais la mémoire s'altère. Ce travail de mémoire, *a posteriori*, ne laisse bien souvent que l'énumération des résultats, sans références aux méthodes mises en œuvre pour y parvenir. Dans ce cas, beaucoup de temps est consacré à l'extraction de connaissances.

Afin de permettre une capture et une réutilisation efficace de l'information de conception, une représentation appropriée de la décomposition fonctionnelle du procédé est indispensable (Ki Moon, Simpson, Shu, & Kumura, 2009).

3.1.2 Représentation graphique de la décomposition fonctionnelle

La décomposition des procédés en tâches a été réalisée au début de ce travail avec l'outil CTTE (Concur Task Trees Environment) (Mori, Paterno, & Santoro, 2002). La Figure 14 présente un exemple de décomposition d'une tâche d'un procédé d'assemblage. Nous ferons référence au procédé de cet exemple tout au long de ce chapitre pour illustrer concrètement notre démarche de capitalisation. Pour des raisons de confidentialité, nous n'avons présenté dans la Figure 14 que la décomposition fonctionnelle de la tâche "assembler semelle/talon" du procédé d'assemblage. Cette tâche consiste à assembler une semelle avec un talon. Il s'agit de positionner la semelle par l'opérateur sur un plateau. Le plateau fixé à la tige d'un vérin va amener la semelle au poste d'encollage. A la fin de l'encollage, l'opérateur positionne un talon sur la semelle encollée. L'ensemble sera pressé par un plateau presseur afin d'assurer un assemblage parfait entre les deux pièces.

Comme montre la Figure 14, la tâche "assembler semelle/talon" est décomposée en quatre sous-tâches qui sont "positionner semelle", "encoller semelle", "positionner talon sur semelle" et "presser talon/semelle". La sous-tâche "encoller semelle" est décomposée elle-même en cinq fonctions élémentaires qui sont "avancer semelle", "pulvériser colle", "déplacer semelle", "arrêter pulvérisation" et "reculer semelle".

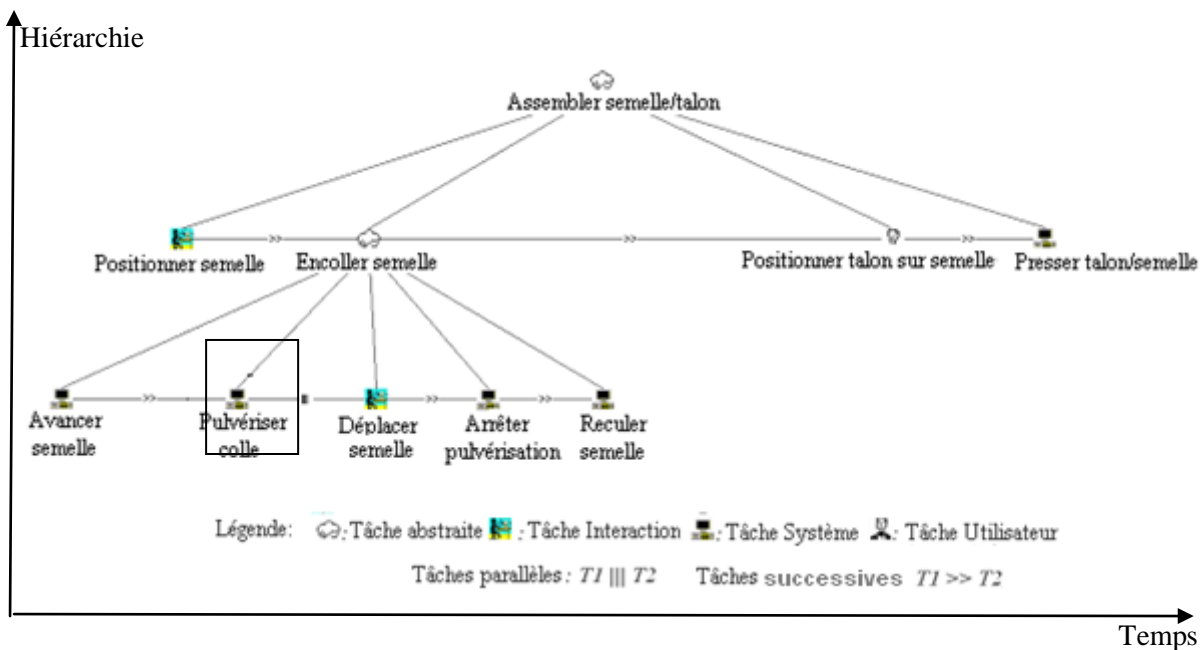






Figure 14. Décomposition fonctionnelle de la tâche "assembler semelle/talon" d'un procédé d'assemblage.

Ce graphe CTTE permet de représenter l'allocation des tâches aux opérateurs ou au système. Ainsi, différents logos sont utilisés pour spécifier le type de la tâche. Nous distinguons :

- Les tâches d'interaction  qui spécifient les interactions entre l'utilisateur et le système au travers des dispositifs d'entrées. Dans le cas de "positionner semelle", cette sous-tâche est manuelle et effectuée par l'opérateur qui positionne la semelle en utilisant un système de positionnement fixé sur la machine.
- Les tâches abstraites , d'un niveau d'abstraction élevé et qui doivent à leur tour être décomposées en fonctions élémentaires. Une fonction élémentaire du modèle de tâches est une action élémentaire non décomposable ou non décomposée. La sous-tâche "encoller semelle" par exemple est décomposée en cinq fonctions élémentaires.
- Les tâches opérateurs  qui sont réalisées par l'opérateur et qui représentent des tâches manuelles, cas de la tâche "positionner talon sur la semelle".
- Les tâches systèmes  qui sont réalisées par le système et qui représentent des tâches automatisées, cas de la tâche "presser talon/semelle". Cette tâche est réalisée par une presse automatique.

La décomposition en tâches du procédé d'assemblage avec l'outil CTTE comporte deux dimensions (Figure 14) :

- Une dimension hiérarchique : la tâche globale est découpée en sous-tâches qui peuvent elles-mêmes être décomposées afin d'avoir une représentation hiérarchique du procédé. Le processus est répété jusqu'à ce que les tâches élémentaires soient suffisamment simples. Dans notre exemple (Figure 14), la tâche "encoller semelle" se décompose en cinq fonctions élémentaires. Cette dimension de décomposition arborescente des tâches se lit verticalement.
- Une dimension temporelle : le graphe de décomposition comporte des informations temporelles comme l'ordre et l'enchaînement des tâches ou les récursivités qui sont difficilement décrites avec les outils de l'analyse fonctionnelle (FAST par exemple). Cette dimension temporelle se lit horizontalement sur le graphe de décomposition CTTE. Elle est spécifiée dans cet outil par des signes présentés par cette légende:

- $T1|||T2$: les tâches T1 et T2 sont simultanées ou parallèles et peuvent donc être effectuées dans n'importe quel ordre. C'est le cas des fonctions "pulvériser colle" et "avancer semelle".
- $T1>>T2$: quand la tâche T1 est terminée, la tâche T2 devient active. Par exemple, nous pouvons citer la sous-tâche "encoller semelle" qui ne devient active qu'à l'issue de la première sous-tâche "positionner semelle".
- $T1[>>T2$: quand la tâche T1 se termine, elle fournit des informations à la tâche T2 et l'active,
- $T1[>T2$: quand une tâche T2 se produit, la tâche T1 est désactivée.

Cependant, cet aspect temporel est difficile à interpréter directement en lisant le graphe de décomposition CTTE, il faut avoir la légende des codes signes.

Par ailleurs, le passage d'une tâche ou d'une fonction à une autre est défini par des transitions et des éléments de contrôle. Ces éléments n'apparaissent pas dans la décomposition précédente (Figure 14), mais sont représentés dans l'outil « Graphe Fonctionnel de Commande Etapes Transition » (GRAFCET) : la Figure 15 représente la décomposition de la tâche "encoller semelle" du procédé décrit dans la Figure 14. Les transitions conditionnent le passage d'une fonction à une autre. L'élément de contrôle/commande est celui qui permet ce passage. Il est le fruit de systèmes matériels. Il s'agit, dans cet exemple, de capteurs de présence et de position pour la fonction de déplacement de la semelle et d'un capteur de pression pour la fonction de pulvérisation. En effet, la semelle est placée sur un plateau fixé à la tige d'un vérin. En détectant la présence d'une semelle par un capteur de présence, le plateau avance. Lorsque la semelle se trouve sous la buse de colle, un capteur de présence la détecte et active la pulvérisation. Cette dernière s'arrête lorsque la distance parcourue par le plateau sous la buse correspond à la longueur de la semelle. Cette distance est contrôlée par un capteur de position. A la fin de la pulvérisation, le plateau recule à sa position de départ permettant à l'opérateur de récupérer la semelle encollée.

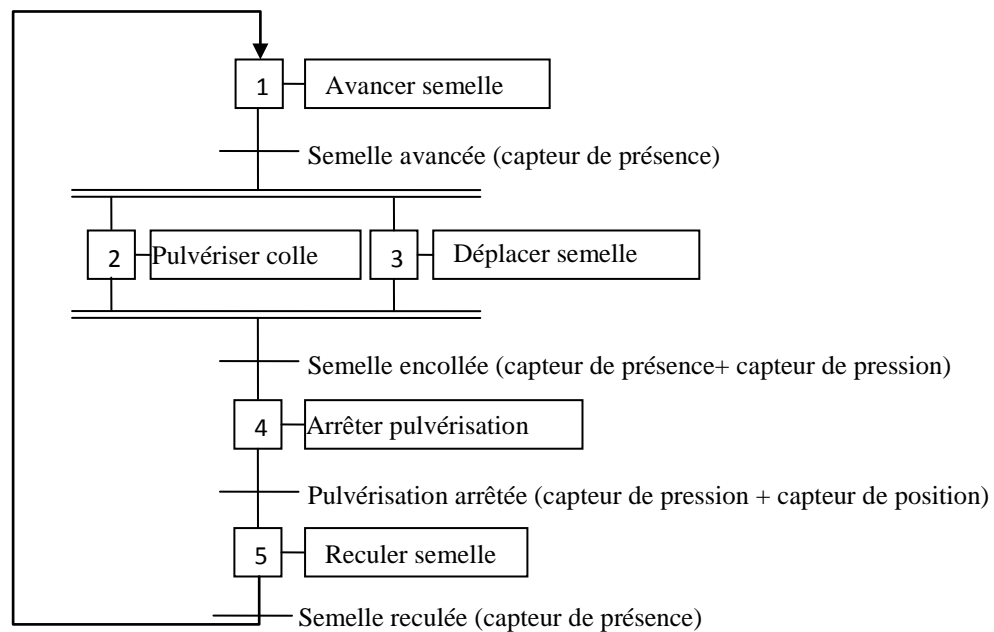


Figure 15. Grafcet de décomposition de la sous-tâche "encoller semelle" (niveau non visible sur la Figure 14)

Dans certains cas, lorsque la transition dépend de l'humain, les éléments de contrôle/commande peuvent être liés à ses récepteurs somesthésiques et sensoriels (Doré, Pailhès, Fischer, & Nadeau, 2007). La somesthésie est la sensibilité aux diverses excitations subies par le corps, à l'exception de celles provenant des organes internes (Doré-1, Pailhès, Fischer, & Nadeau, 2006). Elle comprend les sensations extéroceptives (tact, pression, chaud, froid), les sensations proprioceptives (musculaires et tendineuses) et les sensations douloureuses (Doré 2, 2004). L'information sensorielle est définie comme étant l'information relative aux sensations générées par un produit et perçues par l'utilisateur au cours d'une situation de vie.

L'analyse sensorielle fait intervenir l'homme comme instrument de mesure et utilise les principales sensations perçues par le corps humain (Doré 2, 2004). Dans notre cas, ces sensations sont principalement l'odorat, la vue, la somesthésie (le toucher, retour d'efforts) et l'ouïe.

La Figure 16 présente la décomposition fonctionnelle de la tâche "encoller semelle" appartenant à un procédé d'encollage manuel. Dans ce cas, l'opérateur pose la semelle sur une table de travail. Cette fonction "poser semelle" est contrôlée par les sensations de toucher et de la vue. Ensuite, l'opérateur prend à la main un pulvérisateur de colle manuel et il pulvérise la colle tout en balayant la surface de la semelle à encoller. Le contrôle de débit de la colle est effectué par la vue (quantité de colle), l'ouïe (bruit du pulvérisateur), l'odorat (indiquant que

la colle est sortie de la buse) et la somesthésie (effort exercé sur la gâchette). Une fois que la semelle est encollée, l'opérateur arrête la pulvérisation et il remet le pulvérisateur à sa place.

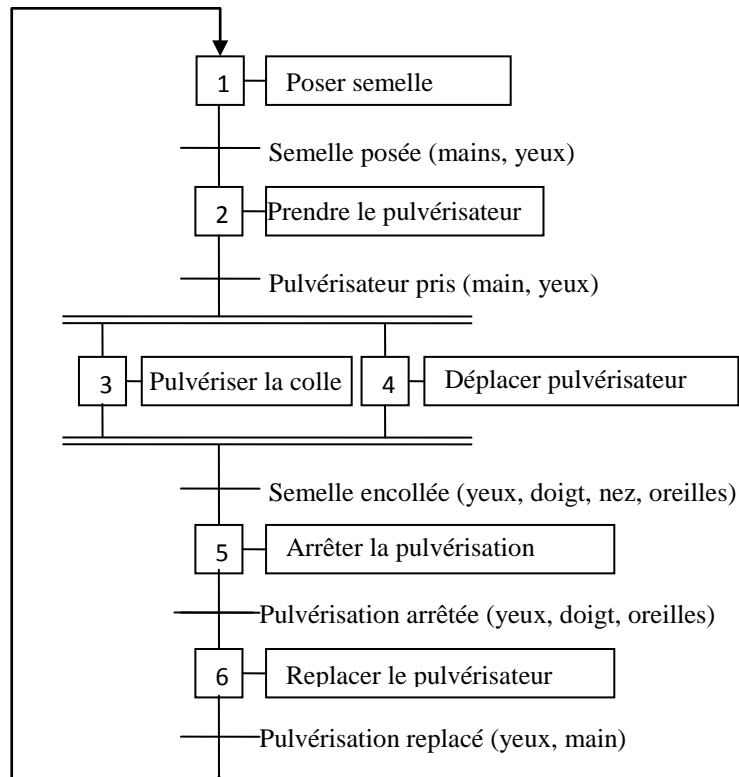


Figure 16. Grafcet de décomposition de la tâche "encoller semelle" d'un procédé d'encollage manuel

Nous souhaitons enrichir la représentation de la décomposition fonctionnelle et temporelle proposée par CTTE, en associant les conditions de transition et en améliorant la lecture des informations temporelles. Ainsi, toutes les informations seront réunies sur un même graphe.

Pour cette raison, nous proposons ensuite une nouvelle représentation du graphe de décomposition des tâches.

3.1.3 Nouvelle représentation du graphe de décomposition fonctionnelle d'un procédé

Dans cette nouvelle représentation graphique, le type de la tâche n'est plus défini par un logo comme dans la Figure 14 mais par des lettres, ce qui permet ultérieurement la

numération des tâches et le codage des transitions. A cette fin, les lettres A, S, I et U représentent respectivement les tâches **A**bstracte, **S**ystème, **I**nteraction et **U**tilisateur. En effet, la connaissance de l'allocation des tâches est indispensable pour concevoir des interfaces ergonomiques entre l'utilisateur et la machine s'il s'agit d'une tâche d'**I**nteraction, d'automatiser la tâche si elle est manuelle (tâche **U**tilisateur) et de prévoir des améliorations en cas de reconception pour les tâches **S**ystèmes.

A chaque niveau de décomposition i dans l'arborescence, les tâches sont ordonnées selon leurs ordres temporels j . Ainsi, nous notons $A_{i,j}$ la tâche **A**bstracte d'ordre j du niveau de décomposition i . Cependant, deux cas particuliers peuvent être rencontrés par rapport à cette notation :

- a. Deux tâches de même type (ex : **U**tilisateur) de même niveau qui se passent en parallèle, sont notées : la première $U_{i,j}$ et la deuxième $U'_{i,j}$.

Par exemple, la tâche 3 "pulvériser colle" et la tâche 4 "déplacer pulvérisateur", présentées dans la Figure 16, sont des tâches **U**tilisateur du niveau de décomposition 2 qui se font en parallèles. Elles seront notées $U_{2,3}$ et $U'_{2,3}$ et modélisées comme suit (Figure 17):

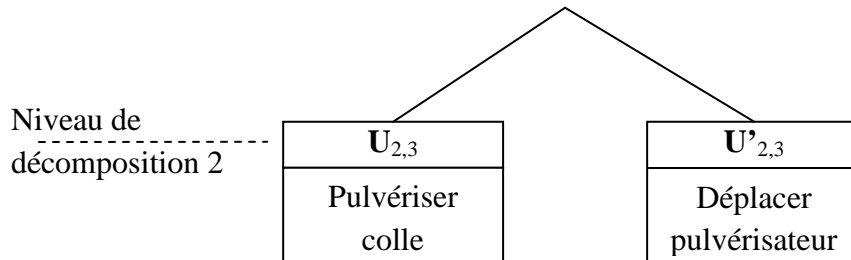


Figure 17. Représentation graphique de deux tâches parallèles de mêmes type et de même niveau

- b. Deux tâches différentes (ex : une tâche **S**ystème et une tâche d'**I**nteraction) de même niveau qui se passent en parallèle, nous notons alors la première $S_{i,j}$ et la deuxième $I_{i,j}$. Par exemple, la tâche 2 "pulvériser colle" et la tâche 3 "déplacer semelle", présentées dans la Figure 14, sont respectivement une tâche **S**ystème et une tâche **I**nteraction du niveau de décomposition 2 qui se font en parallèles. Elles seront notées respectivement $S_{2,2}$ et $I_{2,2}$ et modélisées comme suit (Figure 18):

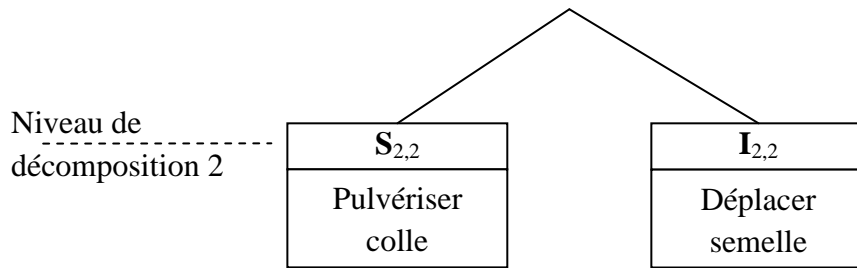


Figure 18. Représentation graphique de deux tâches parallèles, de types différents et de même niveau

Afin de définir, dans le graphe de décomposition, les transitions entre tâches, nous définissons un codage de désignation des transitions. Ce codage est présenté sur la Figure 19. La transition entre ces deux tâches consécutives est notée $i, X_{i,j}, X_{i,j+1}$.

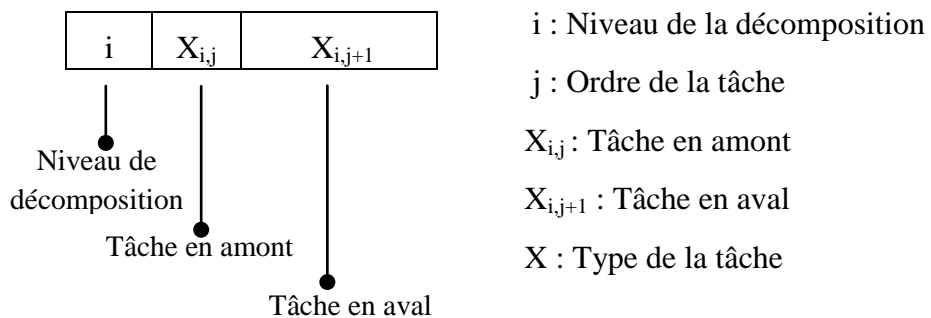


Figure 19. Code de désignation des transitions entre deux tâches

A partir de ces informations, nous présentons sur la Figure 20 notre représentation graphique de décomposition fonctionnelle d'un procédé. L'allocation des tâches, les spécifications temporelles, l'ordre d'exécution et les transitions entre tâches sont présents.

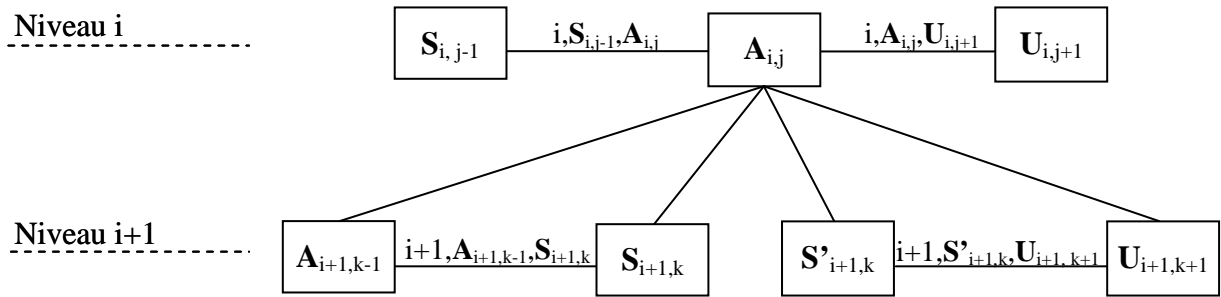


Figure 20. Décomposition des tâches prenant en compte l'allocation des tâches, le temps, les transitions

La transition pour réaliser la tâche $A_{i+1,k-1}$ est la transition en amont de la tâche mère de $A_{i+1,k-1}$. La transition s'écrit : $i, S_{i,j-1}, A_{i,j}$. La transition pour contrôler la tâche $U_{i+1,k+1}$ et passer à la tâche suivante est la transition en aval de la tâche mère de $U_{i+1,k+1}$, dans ce cas, la transition s'exprime $i, A_{i,j}, U_{i,j+1}$.

Ce graphe (Figure 20) représente le modèle théorique, sur lequel sera basée son implémentation dans un support informatique. La décomposition en tâches du procédé d'assemblage (Figure 14) sera présentée avec le nouveau graphe comme montre la Figure 21.

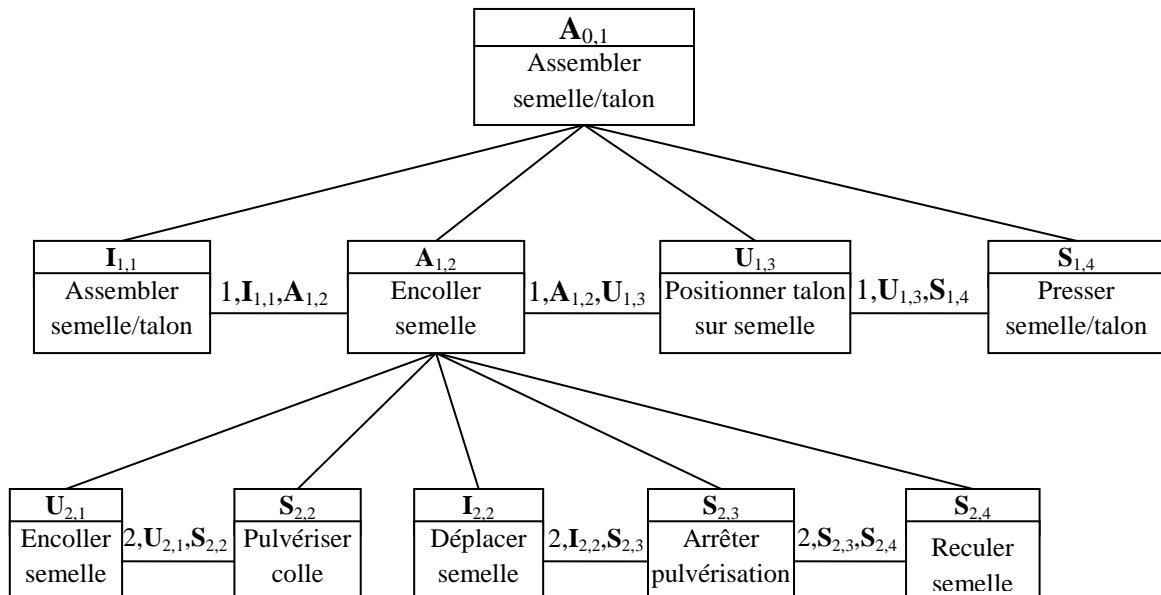


Figure 21. Décomposition en tâches du procédé d'assemblage avec le nouveau graphe

Ainsi, un processus de fabrication peut être archivé, par le biais de cette description qui précise les tâches nécessaires, leur ordre et leur allocation, ainsi que les transitions. Ce codage graphique va permettre le stockage, non seulement de toutes les décompositions fonctionnelles des procédés existants, mais aussi des procédés conçus.

L'analyse des fonctions élémentaires va permettre ensuite de capitaliser toutes les connaissances pertinentes qui constituent la base de connaissances. A cette fin, nous allons mettre en place une démarche d'extraction et de structuration des connaissances pour analyser toutes les fonctions élémentaires de chaque tâche d'un procédé.

3.2 Extraction des connaissances

Le but d'une base de connaissances est de modéliser et stocker un ensemble de connaissances et de permettre leurs réutilisations lors de la conception de nouveaux procédés au sein de la PME. La démarche d'extraction doit faciliter l'émergence de connaissances à prendre en compte pendant la phase de formulation de la base de connaissances.

Dans notre démarche, nous cherchons à faire le lien entre les fonctions et les solutions techniques mis en œuvre pour leurs réalisations. Il s'agit donc d'extraire les solutions techniques ainsi que les connaissances permettant leurs qualifications. Le but de la qualification est de fournir des éléments de choix au concepteur durant la phase de réutilisation.

Une solution technique est définie par association de composants pour constituer un système cohérent et répondant à un besoin. Chacun des composants réalise une ou plusieurs fonctions, selon son emplacement dans le niveau systémique, nécessaires à la réalisation de la fonction globale. D'après Sallaou (Sallaou, 2008), un composant sera défini par :

- Sa (ses) fonction(s) ;
- Son (ses) flux fonctionnel(s) ;
- Ses entrées et sorties, qui constituent les interfaces d'interactions avec d'autres composants ;
- Son comportement, concerne la description de la manière dont il réagit face à des sollicitations extérieures, qui peuvent être dues à des éléments extérieurs au système,

ou propres au système. Ce comportement peut décrire d'éventuels effets induits (§3.2.2.1).

Il est souvent difficile de proposer une vision systémique standard d'une solution technique, cependant une organisation logique peut s'avérer utile pour limiter les confusions ou les divergences de description. Pour cette raison, nous avons adopté une vision énergétique pour la description d'une solution technique. Cette vision, basée sur des travaux précédents (Pailhès, Sallaou, Nadeau, & Fadel, 2010), permet d'une part de décrire exhaustivement tous les composants d'une solution technique, et d'autre part, d'extraire les éléments pertinents à entrer dans la base, de les lier et de les hiérarchiser pour leur exploitation ultérieure.

3.2.1 Description d'une solution technique réalisant une fonction

3.2.1.1 Identification d'une solution technique du point de vue énergétique

La description d'un système technique est souvent vue comme un découpage métier par métier, ou un découpage par niveaux, avec des critères fonctionnels.

La première loi d'évolution des systèmes techniques définie dans la méthode TRIZ (Altshuller a, 1984), (Savransky, 2000) et reprise ensuite par Nadeau et al (Nadeau J. , Pailhes, Dore, & Scaravetti, 2005), (Doré-1, Pailhès, Fischer, & Nadeau, 2006), (Pailhès-, Sallaou, & Nadeau, 2007) permet de distinguer, pour un système donné, quatre éléments principaux essentiels à la réalisation de l'action (ou des actions) requise(s) (Figure 22).

Cette loi stipule que la réalisation d'une action fait intervenir quatre entités : un moteur, une transmission, un élément de travail (opérateur) et un élément de contrôle. Chacune de ces entités doit atteindre une performance suffisante (ou minimale) pour que le système soit opérationnel. Cette loi signifie en particulier que si l'une des parties du système est défaillante, le système n'est pas viable. L'action est réalisée par le passage d'un flux fonctionnel (pour réaliser l'action souhaitée). Ce flux transite, de l'énergie d'entrée à l'opérateur, via le moteur et le transmetteur. Ce flux fonctionnel correspond à un flux énergétique. La loi d'intégralité des parties considère qu'un système est optimal lorsqu'il contient une fonction de contrôle assurée par un composant contrôleur (Savransky, 2000). Le contrôle peut se faire sur un, deux, ou sur l'ensemble des composants.

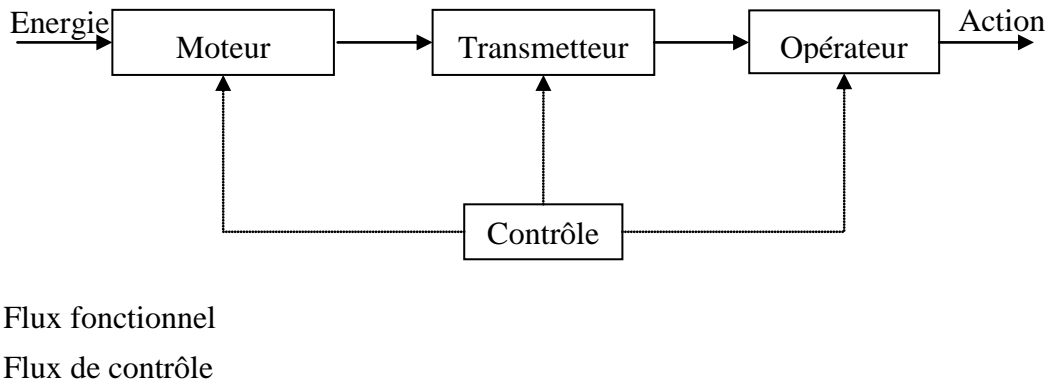


Figure 22. Loi d'intégralité des parties (Savransky, 2000)

Si l'on confronte cette loi à une vision énergétique, chaque entité de la loi d'intégralité doit se traduire sous une forme énergétique caractéristique. Nous assimilons l'action que doit réaliser le système à la fonction que doit accomplir ce système. La loi d'intégralité stipule que la réalisation d'une action est issue de l'utilisation d'un élément de type moteur, du point de vue énergétique cet élément est un convertisseur (Convertisseur C) qui permet de transformer une énergie. Cette énergie transite ensuite à travers un élément de transmission, cet élément correspond à un transmetteur d'un point de vue énergétique (Transmetteur T). Un opérateur (Opérateur O) réalise ensuite l'action. L'opérateur permet de réaliser l'action requise par le système ou l'unité en utilisant l'énergie de sortie du transmetteur.

La modélisation précédente (Figure 22) peut être complétée par un composant source qui permet de fournir et de stocker de l'énergie ainsi que des composants de liaison à la référence qui permettent de positionner les différents composants par rapport à une référence (Sallaou, 2008).

On se propose d'organiser la description et la structuration d'une solution technique selon la loi d'intégralité des parties définie et complétée comme indiqué sur la Figure 23. Nous appelons cette représentation (Figure 23) la classification CTOC d'une solution technique.

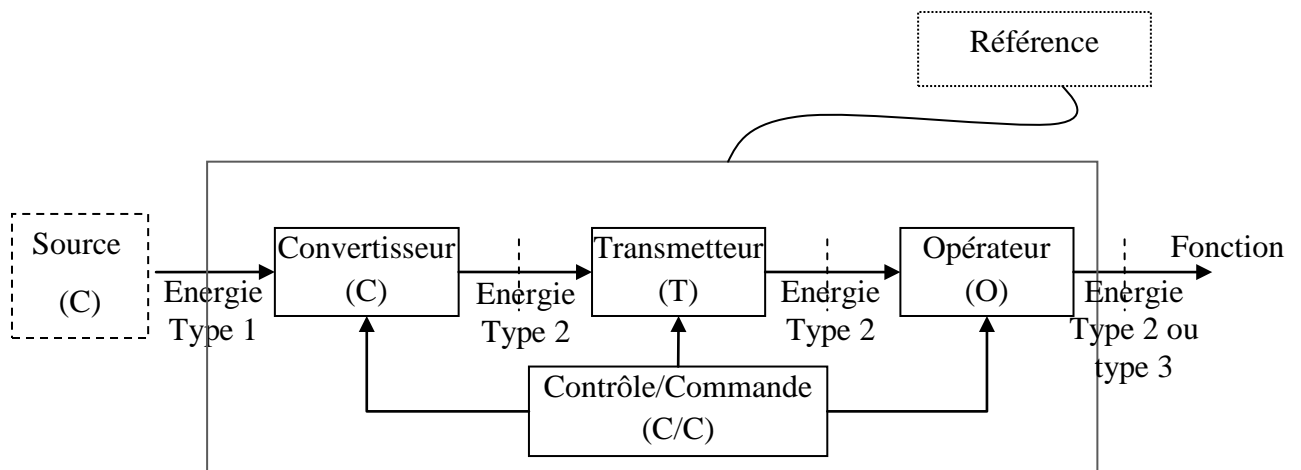


Figure 23. Décomposition globale d'une solution technique selon la classification CTOC

Ainsi, une solution technique est donc composée d'un ensemble de composants selon la classification CTOC (Figure 23). Nous distinguons des composants fonctionnels (Convertisseur, Transmetteur, Opérateur), des composants liaison à la référence (Référence), des composants de contrôle/commande et une source d'énergie :

- Source (S): Elle peut être externe ou interne au système (ou unité considérée). Elle permet de fournir et de stocker de l'énergie.
- Convertisseur (C): Convertit l'énergie importée par la source en énergie utilisable par les autres composants du système (l'énergie est de type 1 à l'entrée et de type 2 à la sortie). Il concerne la conversion du type d'énergie.
- Transmetteur (T): Permet de transmettre l'énergie sans changement de type (l'énergie est d'un type identique 2 à l'entrée et à la sortie). Cependant, il peut agir en changeant les paramètres pertinents de cette énergie pour les adapter aux contraintes du système. Par exemple, pour un système de pulvérisation, les conduites flexibles permettent d'adapter l'énergie pneumatique du compresseur à la buse de colle en augmentant la pression.
- Opérateur (O): permet de réaliser l'action requise par le système ou l'unité en utilisant l'énergie de sortie du transmetteur. L'énergie à la sortie de l'opérateur peut être : soit d'un type 3 différent du type 2, dans ce cas l'opérateur est un convertisseur d'énergie, soit du même type 2 ce qui correspond à un transmetteur. Ainsi, l'opérateur sera dans tous les cas soit un convertisseur soit un transmetteur.

- Contrôle – commande (C/C): Permet de garantir la bonne réalisation des fonctions des différents composants. Généralement, les éléments de contrôle/commande assurent le passage du flux fonctionnel dans des conditions les plus favorables à celui-ci. On remarque que ces éléments ne seront aussi que des convertisseurs et des transmetteurs.
- Liaison à la référence (Réf) : Permet de positionner les différents composants par rapport à la référence. C'est un composant d'interaction entre un composant et une référence de niveau supérieur. Cette référence peut être externe au système pour une référence globale au niveau 0 ou interne au système pour une référence locale à un niveau systémique donné.

3.2.1.2 Heuristiques d'évolution des systèmes CTOC

Les systèmes CTOC évoluent de la manière suivante :

- Le transmetteur disparaît en laissant place simplement à une interaction directe entre Convertisseur et Opérateur,
- Convertisseur et Opérateur se jumellent et forment un bloc fonctionnel compact qui assure directement l'action voulue. L'ensemble est vu comme un Convertisseur,
- L'énergie nécessaire n'a pas besoin de transformation, il n'y a donc pas de convertisseur. L'ensemble est vu comme un Transmetteur.
- La position du contrôle doit être optimisée et le système de contrôle/commande peut aller jusqu'à un asservissement.

3.2.1.3 Flux d'énergie mis en jeu

Les composants d'une solution technique sont siège de circulation de flux fonctionnels. L'analyse des composants permet de les réduire à deux grandes familles : les convertisseurs, s'ils changent de type d'énergie et les transmetteurs, s'ils conservent le même type d'énergie (Figure 24).

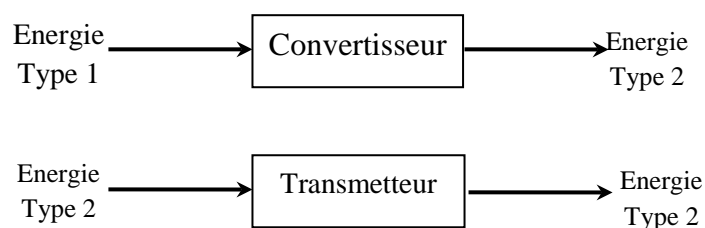


Figure 24. Vision fonctionnelle des composants

Nous distinguons les flux d'énergie suivants :

Energie mécanique : Elle concerne l'énergie potentielle et l'énergie cinétique. L'énergie potentielle représente l'énergie qu'un corps peut emmagasiner sous l'effet d'une force conservative. L'énergie cinétique est l'énergie que possède un corps du fait de son mouvement. Elle est elle-même divisée en énergie cinétique de rotation ou de translation selon le type de mouvement.

Energie électrique : L'énergie électrique est l'énergie fournie sous forme de courant électrique à un système.

Energie hydraulique/pneumatique : Elle désigne l'ensemble des énergies ayant trait aux fluides (liquide ou gaz) par le biais des débits et pressions. De la même manière que pour l'énergie mécanique, on peut diviser ce type d'énergie en énergie potentielle et énergie cinétique.

Energie thermique : Il existe deux types d'énergies thermiques :

- Sous forme enthalpique : $H = Cp.T + \Delta H$, utilisée sous deux formes : soit avec changement de phase, avec une partie dite latente ΔH , soit sans changement de phase, avec une partie dite sensible $Cp.T$. Dans ces deux cas, l'évolution de la conversion est réversible.
- Sous forme d'un Pouvoir Calorifique Interne (*PCI*). Elle est utilisée en brûlant le matériau ou le fluide. Dans ce cas, cette transformation est irréversible.

La différenciation des différents types d'énergie peut être observée dans le Tableau 6. On définit, pour chaque type d'énergie mise en jeu, les variables caractérisant les flux d'entrée et de sortie que nous avons appelé les variables conjuguées pertinentes. Le flux d'énergie est le produit entre la variable d'état et sa variable temporelle. Le Tableau 6 présente, pour les types d'énergie présentés ci-dessus, les variables pertinentes correspondantes ainsi que l'expression du flux d'énergie.

Tableau 6. Exemples de variables conjuguées pertinentes (Pailhès, Sallaou, Nadeau, & Fadel, 2010)

Type d'énergie	Variables conjuguées pertinentes		Flux d'énergie (puissance)
	Variables temporelles	Variables d'état	
Mécanique (Translation)	Vitesse (V)	Force (F)	F.V
Mécanique (Rotation)	Vitesse de rotation (ω)	Couple (C)	C. ω
Hydraulique / Pneumatique	Débit volumique (q_v)	Pression (p)	$q_v \cdot p$
Thermique (Sensible)	Débit de capacité (q.Cp)	Température (T)	q.Cp.T
Thermique (Stockage)	Débit (q)	Pouvoir calorifique interne (PCI)	q.PCI
Electrique	Courant (I)	Tension électrique (U)	I.U

L'identification de ces variables conjuguées pertinentes va permettre de spécifier le type de l'énergie à l'entrée et à la sortie du composant.

La définition de ces variables pertinentes va servir également à déduire les effets produits et les effets induits liés aux composants et à leurs interactions (Pailhès, Sallaou, Nadeau, & Fadel, 2010). Ces effets seront définis dans le paragraphe 3.2.2.1.

3.2.1.4 Exemple de structuration d'une solution technique

Nous nous intéressons dans cette partie à présenter un exemple d'extraction illustrant notre vision énergétique pour la description d'une solution technique de la fonction "pulvériser colle" (fonction encadrée dans la Figure 14).

La solution technique mis en place pour cette fonction, dans un procédé de fabrication de l'entreprise MARQUET & Cie, est donnée par la figure suivante (Figure 25).



Figure 25. Pulvérisateur de colle

Il s'agit d'une buse de colle qui possède deux entrées :

- une entrée pour la colle, stockée dans un réservoir pressurisé et transportée à la buse de colle par des flexibles sous l'effet de la pression.
- Une deuxième entrée double pour l'air comprimé qui atomisent la colle à la sortie de la buse. L'air comprimé est produit par un compresseur d'air. Le débit d'air est contrôlé par un capteur de pression placé à la sortie du compresseur.

La Figure 26 correspond à un schéma simplifié de la solution présentée sur la Figure 25 et montre le flux de colle au centre de la buse, ainsi que des arrivées d'air comprimé en périphérie.

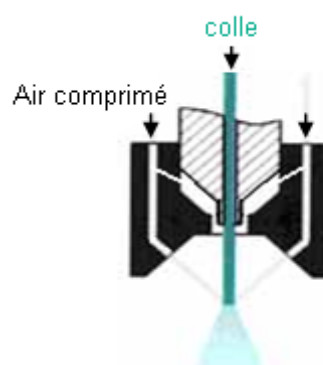


Figure 26. Fonctionnement de la buse de pulvérisation de colle.

La Figure 27 met en évidence la solution technique, représentée avec la classification CTOC, mise en œuvre pour la fonction "pulvériser colle". Le Convertisseur est un compresseur transformant l'énergie électrique en énergie pneumatique. Le Transmetteur correspond à des conduites flexibles qui transmettent l'énergie pneumatique. Enfin, l'Opérateur est une buse de pulvérisation qui est dans ce cas un convertisseur d'énergie pneumatique en énergie fluidique. Le Contrôle/Commande s'effectue en maîtrisant la pression sur le Compresseur.

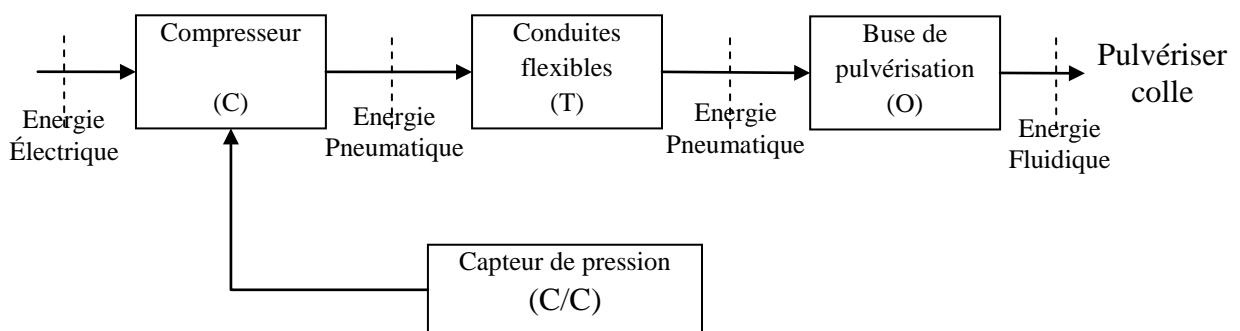


Figure 27. Analyse de la fonction de service "Pulvériser colle".

De cette façon, par le biais de cette classification CTOC, nous avons extrait et structuré toutes les solutions techniques mises en place dans les procédés de fabrication de la PME MARQUET & Cie.

Une fonction donnée peut avoir plusieurs solutions techniques. Dans ce cas, le concepteur aura un choix à faire lors de la réutilisation. A cette fin, nous avons capitalisé, pour chaque solution, toutes les connaissances permettant sa qualification.

3.2.2 Qualification d'une solution technique

Nous intéressons dans cette partie à définir toutes les connaissances permettant la qualification d'une solution technique. Il s'agit de l'identification des comportements physiques de composants et de proposer une liste de critères de pertinence.

3.2.2.1 Identification des comportements physiques

La définition de l'architecture de systèmes par assemblage de composants est basée sur la définition optimale du cheminement de flux fonctionnels (Pailhès, Sallaou, Nadeau, & Fadel, 2010). Ces flux font appel à des phénomènes physiques. Chaque composant doit remplir correctement sa fonction (ou ses fonctions) en fonctionnement normal.

Du point de vue sécurité, un composant doit assurer la ou les fonctions pour lesquelles il est conçu sans qu'aucun de ses éléments ne se détériore. La connaissance des effets produits et induits ainsi que les modèles physiques qui en découlent conditionnent les choix du concepteur lors de la réutilisation. A cette fin, ces informations doivent être capitalisées et associées à chaque solution technique.

Un effet produit est un effet lié uniquement aux variables conjuguées définies précédemment (Tableau 6). Les effets induits apparaissent si des éléments viennent se coupler aux effets produits en raison de la conception du système. Par exemple, si un composant se déforme et si le composant voisin l'empêche de se déformer librement, alors des contraintes thermomécaniques vont apparaître (modification de la géométrie).

Ces effets induits peuvent être :

- Des effets induits nuisibles : les effets générés par la réalisation d'une fonction donnée d'un composant et dégradant son fonctionnement (usure, bruit, échauffement,...).

- Des effets induits à risque : effet entraînant un dysfonctionnement du composant lié à la réalisation de la fonction (rupture, déformation,...).

Ces effets induits peuvent se traduire, au niveau d'un composant, par des pertes de puissance ou par une dégradation du fonctionnement (rendement, jeu, ...).

Le Tableau 7 précise les effets produits et des exemples d'effets induits en fonction des variables conjuguées mises en jeu. Les effets produits sont systématiques et associés aux types de flux. Les effets induits vont être sélectionnés en fonction des applications.

La connaissance des effets induits, représentant des conséquences néfastes par rapport aux composants adjacents, permet au concepteur d'écarter une solution technique donnée lorsqu'il a un choix à faire. Dans certains cas, ces effets induits peuvent faire appel à des composants secondaires permettant d'éliminer ou de minimiser leurs impacts sur la qualité du service rendu par le dit composant ou sur ses performances (exemple : système de refroidissement dans le cas d'un composant générant un flux thermique comme effet induit).

Tableau 7. Exemples d'effets produits et effets induits (Pailhès, Sallaou, Nadeau, & Fadel, 2010)

Variables d'état	Variables temporelles	Effets produits	Effets induits
Force (F)	Vitesse (V)	Déformation	Jeu/Bridage/Contraintes/Vibrations
		Frottements	Usure/Transferts de chaleur/Dilatation/Rétraction /Jeu /Bridage/Contraintes /Fluage
Pression (P)	Débit volumique (q_v)	Déformation	Fuites/Contraintes
		Frottements	Dilatation/Rétraction/Jeu/Bridage/Contraintes / Pollution/Encrassement/pertes de charge
Température (T)	Débit de capacité ($q.C_p$)	Flux de chaleur	Dilatation/Rétraction/Jeu/Bridage /Contraintes /Fluage/Givrage/Prise en glace
		Frottements	Dilatation/Rétraction/Jeu/Bridage/Contraintes Pollution/Encrassement

Afin que chaque composant remplisse correctement sa fonction, sa définition doit passer impérativement par un calcul de dimensionnement. Cette phase permet, d'une part, de pallier d'éventuels effets induits et, d'autre part, d'évaluer les performances d'une solution de

conception ou d'effectuer le choix entre différentes solutions. Pour cette raison, nous allons capitaliser non seulement les variables conjuguées associées aux fonctions d'un composant, mais aussi des informations chiffrées (valeurs numériques, intervalles, etc.).

3.2.2.2 Critères de pertinence d'une solution technique

Le concepteur doit pouvoir qualifier la solution proposée et en choisir une lorsqu'il y a un choix à faire parmi plusieurs solutions. La base de connaissances doit donc contenir des critères de pertinence de la conception, associés à chaque solution technique.

Aoussat parle de critères de tri, qui sont exprimés dans la phase de traduction de besoin, et qui permettent en phase finale d'effectuer le tri et le choix de solutions (Aoussat a, 1996).

Beaucoup de méthodes dans la littérature listent des critères d'évaluation de concepts. D'après Scaravetti (Scaravetti, 2004), ces critères peuvent être classés en trois catégories : critères technologiques (fonctionnels et structurels), critères économiques et critères de qualification propres au service marketing ou pertinents du point de vue de l'entreprise cliente de la conception.

Dans le paragraphe suivant, nous présentons et listons ces critères. Ils sont ensuite récapitulés dans le Tableau 8.

3.2.2.2.1 Critères technologiques

- Performances attendues par le client

En ayant un choix à faire, le concepteur s'assure en premier lieu de la qualification chiffrée du résultat attendu précisé dans les critères d'appréciation du Cahier des Charges Fonctionnel CdCF. Il s'agit souvent de paramètres physiques (force, vitesse, température, pression, etc.), de la productivité (nombre d'actions par unité de temps) et du rendement.

- Sûreté de fonctionnement

La sûreté de fonctionnement regroupe la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité (Monchy, 2000).

- Fiabilité

La fiabilité est la caractéristique d'un système exprimée par la probabilité qu'il accomplisse la fonction pour laquelle il a été conçu, dans des conditions données et pendant

une durée donnée (AFNOR, 1991). Ainsi, la durée de vie d'un système est utilisée pour mesurer la quantité de service rendu. D'une manière générale, on mesure la durée de vie d'un système par le nombre d'heures durant lesquelles il a effectivement fonctionné (Zwingmann, 2005).

Le critère de fiabilité est un indice « positif » (idée d'amélioration), mais il représente une probabilité de défaillance. Son indicateur MTBF (Mean Time Between Failure) ou Temps de fonctionnement moyen entre défaillances (FMED) mesure le temps écoulé entre deux défaillances.

- *Maintenabilité*

La maintenance regroupe l'ensemble des activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement pour accomplir une fonction requise (AFNOR, 1991). La complexité croissante des systèmes engendre des coûts d'opération et de maintenance élevés. Plus que le système contient des composants standards, plus que le temps et par conséquent le coût de la maintenance diminuent.

L'indicateur MTTR (Mean Time To Repair) littéralement: temps moyen pour réparer, exprime la moyenne des temps des tâches de réparation.

- *Disponibilité*

La disponibilité peut se voir à deux niveaux (Scaravetti, 2004):

- La solution technique doit être rapidement en état de fonctionnement lorsqu'on veut l'utiliser. Par exemple, la solution doit être rapidement mise en température.
- La solution technique doit être rapidement opérationnelle en cas de panne ou d'actions correctives.

Le critère de disponibilité opérationnelle est : $D^{op} = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR}$

- *Sécurité*

La sécurité des systèmes, pour les grands secteurs industriels, est liée à des réglementations qui définissent des règles et critères. Sa quantification passe par une analyse du risque (Prevost & Waroquier, 1994). Il s'agit des limites admissibles pondérées de coefficients de sécurité.

L'AMDEC est un outil de sûreté de fonctionnement, qui a pour but d'évaluer l'impact, ou la criticité, des modes de défaillances des composants d'un système sur la sécurité. Cette criticité (C) est la multiplication de l'indice de gravité (G) par l'indice d'occurrence de la cause (O) et par l'indice de détection des contrôles (D) (Bouti & Aït-Kadi, 1994).

- Autonomie

L'interaction homme/machine est un point important dans l'autonomie des systèmes (Lampe, 2006). Les études de Crandall et Goodrich mettent également l'accent sur l'impact de la participation de l'homme sur l'autonomie (Crandall & Goodrich, 2003).

Ainsi, nous caractérisons une solution technique comme étant autonome lorsqu'elle ne nécessite pas d'intervention humaine.

- Critères structurels

Ils concernent des attributs sur la solution technique relative à sa structure. Il s'agit de :

- La masse,
- L'encombrement,
- La résistance à l'environnement (atmosphère, vibrations, corrosion, etc.).

3.2.2.2 Critères économiques

- Coûts

Les coûts intègrent toutes les dépenses engagées pour la conception et la réalisation d'un système. D'après Scaravetti (Scaravetti, 2004) , les coûts concernent :

- Coût financier : industrialisation, production, recyclage, maintenance,
- Coût énergétique : l'énergie concernée est en premier lieu l'énergie consommée.

L'analyse du cycle de vie (ACV) permet d'aller encore plus loin et d'intégrer alors les coûts énergétiques de fin de vie et de production des matériaux utilisés (Roozenburg & Eekels, 1995).

- Coût en temps : il s'agit des temps relatifs aux opérations de fabrication, de montage mais aussi des temps liés à l'utilisation de la solution technique (temps de mise en température, temps d'arrêt, etc.).

Le critère de coût dans la base de connaissances doit être daté afin de prendre en compte l'évolution monétaire.

- Coût liés au développement durable et éco-conception

Une définition très souvent citée de l'éco-conception est due à Fiksel qui considère l'éco-conception comme la prise en compte systématique des considérations

environnementales, de santé et de sûreté dans l'évaluation des performances de conception d'un produit (ou d'un service) sur tout son cycle de vie (Fiksel, 1996).

Au sens de la norme ISO 14062, l'éco-conception vise à proposer des démarches et principes généraux de conception permettant de minimiser, à performances égales, l'impact environnemental d'un produit durant tout son cycle de vie (ISO, 2002).

La notion d'éco-conception peut se définir à une échelle locale et à une échelle globale (Ventere, 1997):

- ✓ L'échelle locale implique l'environnement proche du système, elle concerne les possibilités de nuisance sonore et odoriférante, d'action sur les milieux extérieurs environnants et la production de déchets.
- ✓ L'échelle globale va faire intervenir la maîtrise des ressources énergétiques, l'implication dans les changements climatiques.

En conception, les impacts que cherche prioritairement à réduire l'éco-conception sont :

- La consommation de matière renouvelable ou non renouvelable,
- La consommation d'énergie, d'eau,
- L'effet de serre,
- La pollution des eaux,
- La pollution des sols,
- Les transports,
- Les déchets.

- Coût lié à la recyclabilité

Un des objectifs fixés dans le cadre de la mise en œuvre d'une démarche d'éco-conception est le recyclage (Houe Ngouna, 2006). Le DFR (*Design For Recycling*) ou conception pour le recyclage concerne une panoplie de méthodes permettant d'améliorer la recyclabilité d'un produit (Hundal, 2000), (Ishii, 1998). Il est guidé par une échelle des valeurs portant sur l'impact environnemental du type de recyclage envisagé. On distingue ainsi ces impacts, qui définissent dans notre cas les critères de recyclabilité :

- Le taux de matériaux recyclables inclus dans le produit,
- La démontabilité: les principaux objectifs de la Conception pour le Désassemblage (*CpD*) en vue de l'optimisation de la « démontabilité » d'un produit (Johansson, 1997)

sont de faciliter la séparation des matières, l'identification des éléments à séparer, leur accessibilité et leur manipulation lors du démontage, etc.,

- Qualité du matériau : compatible, broyable, séparable, recyclable sans démontage (Hundal, 2000).

3.2.2.2.3 Critères de qualification société, marketing

Scaravetti a listé plusieurs critères de qualification société, marketing (Scaravetti, 2004). Nous retenons ceux qui aident à une prise de décision lors de la réutilisation, à savoir :

- Risques encourus en matière de coûts et de délais
Pour une phase de cycle de vie, le risque est défini comme grandeur à deux dimensions caractérisant un événement redouté : la probabilité d'occurrence et la gravité des conséquences (en terme de perte de performance ou de coûts) (Grenouilleau, Desroches, Dejax, & Peres, 1999).
- Ergonomie, facilité de contrôle, accessibilité, interface homme-machine
- Effets sur l'environnement : génération de bruit, vibrations, odeurs, variation de température, humidité, etc.
- Mise en œuvre de la solution (facilité, rapidité)

Le Tableau 8 récapitule dans la première colonne tous les critères de qualification que nous venons de lister et qui seront associés à chaque solution technique contenue dans la base de connaissances. Dans la deuxième colonne, nous indiquons les moyens de qualification du critère. Enfin, la troisième colonne précise le formalisme d'écriture d'une contrainte permettant l'évaluation quantitative du critère (Scaravetti, 2004).

Tableau 8. Tableau Caractérisation et écriture des critères de qualification d'une solution technique

Critère de qualification	Caractérisation	Ecriture
• Critère technologique		
Performances attendues	-Rendement/puissance -Paramètres physiques (force, vitesse, température, pression) -Productivité (nombre d'actions par unité de temps)	Performance $\in [x, y]$ Performance $\in \{x, y, z\}$ Performance $> x$
Fiabilité	MTBF : mean time between failure	MTBF $> x$
Maintenabilité	-MTTR: mean time to repair -Taux de composants standards	MTTR $> x$
Disponibilité	Indicateur de disponibilité opérationnelle: $D^{op} = \frac{MTBF}{MTTR + MTBF}$	$1 > D^{op} > x$
Sécurité	Critère de criticité AMDEC $C = \text{niveau de gravité} * \text{proba. occurrence} * \text{proba. non détection}$	$C < x$
Autonomie	-Energétique (durée de fonctionnement) -Ne pas nécessiter d'intervention humaine	Autonomie $> x$ Oui non
Masse	Masse totale, maximum	Masse $< x$
Encombrement	Dimension min (ou max)	Dimension $> x$
Résistance à l'environnement	Niveau max de température/ pression/ humidité/ salinité/	Température $< x$...
• Critères économiques		
Coût d'industrialisation	Coûts outillage + machines \ main d'œuvre Coûts de mise au point	Coût $< x$
Coûts de production	Coûts de fonctionnement Durée de production	Coût $< x$ Durée $< x$
Coût de possession	-consommation énergétique -coût du cycle de vie (acquisition, exploitation, maintenance)	Coût $< x$
Coût de maintenance préventive	Coûts d'intervention	Coût $< x$
Développement durable/ éco-conception	-consommation de matière -consommation d'énergie -émission de gaz, de pollution, de déchets -indicateur d'impact effet de serre : kg de CO2 équivalent émis	Consommation $< x$ Rejet $< x$

Recyclabilité	-% masse totale recyclable -irréversibilité des liaisons (démontable/ non démontable) -compatibilité des matériaux	% masse < % max Oui/non
Coût de recyclage	Coûts de démontage \ traitement, etc.	Coût < x
• Critères société, marketing		
Risques de conception, coûts, délais	IRP= gravité*occurrence*validation	IRP < x
Mise en fonctionnement	temps	Temps < x
Mise en route	Mise en température, etc.	Temps < x
Impact environnemental (nuisances)	-Niveau de bruit généré -générations d'odeur -nuisance visuelle	Niveau de bruit < x Oui/non Oui/non

3.3 Structuration des connaissances : construction d'une base de connaissances

La phase d'extraction a consisté à remplir une banque de connaissances. Ces connaissances sont des fonctions élémentaires et des solutions techniques permettant leurs réalisations. Pour chaque solution technique, nous l'avons qualifié par l'identification des comportements physiques et des critères de pertinence (Tableau 8). Il s'agit maintenant d'archiver ces connaissances et d'en permettre le partage au sein de l'entreprise ainsi que leurs réutilisations ultérieures.

Dans l'objectif de la construction d'une base de connaissances, un intérêt particulier est donné à l'unification et la standardisation du langage, et spécialement dans le cas de la conception qui nécessite l'intervention de plusieurs acteurs multidisciplinaires.

Comme la démarche de capitalisation a été conduite à travers une décomposition fonctionnelle, une définition précise des fonctions est donc recherchée. Les fonctions sont exprimées par un verbe et un complément (Hirtz, Stone, McAdams, Szykman, & Wood, 2002). Cependant, une même fonction peut être décrite de différentes manières en utilisant :

- ✓ Soit des verbes synonymes. Exemple : *déplacer semelle/avancer semelle*
- ✓ Soit des compléments ayant les mêmes caractéristiques physiques ; exemple : *déplacer semelle/déplacer solide*.

A ces difficultés d'expression vient s'ajouter un autre problème lié aux habitudes des concepteurs dans la formulation des fonctions : l'utilisation, par la plupart des concepteurs de verbes n'indiquant pas directement l'action attendue d'un produit (par exemple: permettre, être, avoir,...), peut entraîner des confusions et des problèmes de communication (Sallaou, 2008).

Dans ce contexte, plusieurs auteurs (Hirtz, Stone, McAdams, Szykman, & Wood, 2002), (Stone R. , 1997), (Szykman, Racz, & Sriram, 1999), (Sallaou, 2008) se sont intéressés, selon leurs orientations, à trouver des bases de fonctions standard capables d'exprimer de façon exhaustive et précise les fonctions. C'est dans cette optique que des bases de verbes et de compléments ont été proposées.

En se basant sur ces travaux, nous avons développé une base de verbes et une base de compléments adaptés à nos besoins et à la vision énergétique décrite au § 3.2.1.1. L'entrée à la base de connaissances est la fonction exprimée par un verbe et un complément choisis à partir de ces bases. Pour une fonction donnée, la base de connaissances proposera l'ensemble des solutions techniques capitalisées, liées à l'association verbe-complément.

Nous présentons dans cette partie de ce chapitre la construction des bases de verbes et de compléments ainsi que l'architecture de la base de connaissances et la façon de l'interroger.

3.3.1 Construction de la base des verbes

La construction de la base de verbes est basée sur une analyse comparée des différents travaux concernant les bases fonctionnelles existantes en vue de leur utilisation et adaptation dans notre contexte.

3.3.1.1 Analyse des bases de verbes existantes

La première base de verbes est celle de Hirtz et al (Hirtz, Stone, McAdams, Szykman, & Wood, 2002). Comme le montre le Tableau 9, elle est organisée sur une hiérarchie à trois niveaux. La hiérarchie a été créée pour permettre aux concepteurs de décrire la fonction avec différents niveaux de détail.

Cette base contient huit classes primaires et cinquante-trois verbes. Les auteurs de cette base prétendent que le niveau secondaire fournit le détail de fonction le plus spécifique.

Tableau 9. Base de verbes de Hirtz (Hirtz, Stone, McAdams, Szykman, & Wood, 2002)

Primary	Secondary	Tertiary
Branch	Separate	Divide
		Extract
		Remove
	Distribte	
Channel	Import	
	Export	
	Transfer	Transport
		Transmit
Guide	Translate	
	Rotate	
	Allow DOF	
Connect	Couple	Join
		Link
	Mix	
Control Magnitude	Actuate	
	Regulate	Increase
		Decrease
	Change	Increment
		Decrement
		Shape
	Condition	
Stop	Prevent	
	Inhibit	
Convert	Convert	
Provision	Store	Contain
		Collect
	Supply	Supply
Signal	Sense	Detect
		Measure
	Indicate	Track
		Display
Process		
Support	Stabilize	
	Secure	
	Position	

Caldwell (Caldwell, 2009) a étudié la fréquence d'utilisation des verbes de la base de Hirtz dans le cas de décompositions fonctionnelles de deux ensembles de 11 et de 110 produits (Tableau 10). On remarque que seulement quelques verbes sont utilisés très fréquemment (occurrence supérieure à 3 % : **transfer** avec une fréquence d'utilisation de 36.9% pour l'ensemble de 11 produits et de 27.3 % pour l'ensemble de 110 produits, **import** avec une fréquence d'utilisation de 10.3% pour l'ensemble de 11 produits et de 14 % pour

l'ensemble de 110 produits, **convert** avec une fréquence d'utilisation de 8.7% pour l'ensemble de 11 produits et de 9.9 % pour l'ensemble de 110 produits, **export** avec une fréquence d'utilisation de 10.3% pour l'ensemble de 11 produits et de 9.5 % pour l'ensemble de 110 produits, **guide** avec une fréquence d'utilisation de 11.1% pour l'ensemble de 11 produits et de 9.3 % pour l'ensemble de 110 produits).

Tableau 10. Analyse de la fréquence d'utilisation de la base de Hirtz (Caldwell, 2009)

Liste de Fonctions/ Résultats de Verbes significatifs	Nombre d'utilisation dans un ensemble de 11 produits	Pourcentage d'utilisation dans un ensemble de 11 produits	Nombre d'utilisation dans un ensemble de 110 produits	Pourcentage d'utilisation dans un ensemble de 110 produits
Transfer	225	36.9%	1236	27.3%
Import	63	10.3%	633	14.0%
Convert	53	8.7%	447	9.9%
Export	63	10.3%	429	9.5%
Guide	68	11.1%	422	9.3%
Change	28	4.6%	205	4.5%
Actuate	22	3.6%	193	4.3%
Store	21	3.4%	158	3.5%
Regulate	13	2.1%	128	2.8%
Supply	10	1.6%	100	2.2%
Stop	10	1.6%	98	2.2%
Distribute	12	2.0%	93	2.1%
Separate	7	1.1%	70	1.5%
Stabilize	2	0.3%	69	1.5%
Secure	4	0.7%	53	1.2%
Transmit	1	0.2%	46	1.0%
Couple	5	0.8%	45	1.0%
Position	0	0.0%	42	0.9%
Process	3	0.5%	27	0.6%
Mix	0	0.0%	27	0.6%

Dans ces travaux de thèse (Caldwell, 2009), Caldwell a présenté les pourcentages d'utilisation de chaque verbe de la base de Hirtz dans son étude effectuée sur deux ensembles de 11 et de 110 produits (Tableau 11).

Nous remarquons qu'il y a beaucoup de verbes définis dans la base fonctionnelle qui ne sont pas utilisés. Seulement vingt-quatre verbes parmi cinquante-trois verbes disponibles sont utilisés dans les décompositions fonctionnelles des onze produits. D'autre part, les verbes du premier et de deuxième niveau sont les plus utilisés.

Tableau 11. Pourcentage d'utilisation de chaque verbe de la base de Hirtz (Caldwell, 2009)

Primary	11-product set	110-product set	Secondary	11-product set	110-product set	Tertiary	11-product set	110-product set
Branch	3.4%	3.7%	Separate	1.5%	1.7%	Divide	0.0%	0.0%
						Extract	0.3%	0.1%
						Remove	0.0%	0.0%
			Distribte	1.9%	2.0%			
Channel	68.1%	60.0%	Import	10.2%	13.7%			
			Export	10.2%	13.7%			
			Transfer	36.6%	27.8%	Transport	0.0%	0.1%
						Transmit	0.2%	1.0%
			Guide	11.2%	9.3%	Translate	0.2%	0.0%
						Rotate	0.0%	0.1%
Allow DOF	0.0%	0.0%						
Connect	0.8%	1.6%	Couple	0.8%	1.0%	Join	0.0%	0.0%
						Link	0.0%	0.0%
			Mix	0.0%	0.6%			
Control Magnitude	12.3%	13.7%	Actuate	3.6%	4.2%			
			Regulate	2.1%	2.8%	Increase	0.0%	0.0%
						Decrease	0.0%	0.0%
			Change	5.0%	4.5%	Increment	0.3%	0.0%
						Decrement	0.0%	0.0%
						Shape	0.2%	0.0%
			Stop	1.6%	2.2%	Condition	0.0%	0.0%
Prevent	0.0%	0.0%						
Inhibit	0.0%	0.1%						
Convert	8.6%	9.7%	Convert	8.6%	9.7%			
Provision	5.0%	5.8%	Store	3.4%	3.7%	Contain	0.0%	0.1%
						Collect	0.0%	0.2%
			Supply	1.6%	2.2%			
Signal	0.8%	1.6%	Sense	0.0%	0.6%	Detect	0.0%	0.2%
						Measure	0.0%	0.0%
			Indicate	0.3%	0.4%	Track	0.0%	0.0%
						Display	0.0%	0.0%
			Process	0.5%	0.6%			
Support	1.0%	3.9%	Stabilize	0.3%	1.5%			
			Secure	0.6%	1.1%			
			Position	0.0%	0.9%			
SUM	100%	100%		100%	99.6%		1.1%	

Ces analyses vont nous aider à construire notre base de verbes en gardant seulement les verbes les plus utilisés de la base de Hirtz, tout en ajoutant les verbes métiers de l'entreprise MARQUET & Cie. La base de verbes doit être également adaptée à notre vision énergétique utilisée pour l'expression des solutions techniques.

3.3.1.2 Identification des classes primaires de la base de verbes selon une vision énergétique

Sur la base de notre approche énergétique, nous avons montré que la solution technique réalisant une fonction donnée est un système composée d'un ensemble de composants selon la classification CTOC (convertisseur, transmetteur, référence, source, contrôle).

L'identification de la typologie de la circulation et de la transformation des flux d'énergie dans ce système permet de distinguer des fonctions de composants (convertisseur ou transmetteur), des fonctions d'interaction composant/référence, et des fonctions de contrôle/commande.

3.3.1.2.1 Fonctions de composants

La fonction d'un composant est définie en fonction de l'état des flux fonctionnels d'énergie à son entrée et à sa sortie. Le Tableau 12 montre les différentes classes de fonctions identifiées à partir des actions sur un flux d'énergie. Selon l'état à l'entrée et à la sortie, ce flux peut être :

- transmis, cas d'un composant Transmetteur,
- converti, cas d'un composant Convertisseur,
- fourni/stocké, cas d'un composant Source.

Dans le cas des composants Source, la conversion d'énergie est une conversion d'énergie externe en énergie interne potentielle et vice versa.

Tableau 12. Classes de fonctions selon les états d'entrée et de sortie des fonctions des composants

Composants	Flux d'entrée	Flux de sortie	Fonctions
Convertisseur	Energie type 1	Energie type 2	Convertir
Transmetteur	Energie type 1	Energie type 1	Transmettre
Source	Pas d'entrée	Energie type 2	Convertir/Fournir
	Energie type 1	Pas de sortie	Convertir/Stocker

3.3.1.2.1.1 Classe de fonction "Convertir" liée au composant convertisseur

Cette classe exprime l'action de transformation de l'énergie nécessaire à l'utilisation (en sortie) à partir de l'énergie récupérée (à l'entrée). Un complément doit être rajouté pour exprimer le type d'énergie à l'entrée et à la sortie « *convertir l'énergie (1) en énergie (2)* ».

Le verbe convertir est définie comme étant une classe primaire de notre base de verbe (Tableau 13).

Tableau 13. Classe de verbe primaire Convertir liée au composant Convertisseur (C)

Composants liés avec la classe primaire	Classe primaire de verbes	Correspondant dans la base de Hirtz	Traduction
Convertisseur (C)	Convertir	Convert	Transformer

3.3.1.2.1.2 Classe de fonction "transmettre" liée au composant transmetteur

On utilise le verbe "transmettre" lorsqu'il s'agit d'une transmission du même type de flux entre l'entrée et la sortie d'un composant. Cette transmission de flux d'énergie peut se faire avec ou sans évolution des variables associées aux flux (variables conjuguées exprimées au paragraphe 3.2.1.3).

Nous définissons le verbe "transmettre" comme étant la deuxième classe primaire de notre base de verbe. Des verbes correspondants au verbe "transmettre" dans la base de Hirtz ainsi que leurs synonymes sont présentés dans le Tableau 14.

Tableau 14. Classe de verbe primaire Transmettre liée au composant Transmetteur (T)

Composants liés avec la classe primaire	Classe primaire de verbes	Correspondant dans la base de Hirtz	Traduction
Transmetteur (T)	Transmettre	Transmit	Transformer
		Transport	Transporter
		Transfert	Transférer
		Condition	Adapter
		Increase	Augmenter
		Decrease	Diminuer
		change	Changer
		Separate	Séparer
		Distribute	Disperser
		Mix	Mélanger
		Stop	Stopper

3.3.1.2.1.3 Classe de fonction "Fournir, Stocker" liée au composant source

Les verbes "fournir" et "stocker" sont liés au composant source. Ils vont par la suite constituer deux classes primaires de notre base de verbes. Des verbes correspondants au verbe "fournir" et "stocker" dans la base de Hirtz ainsi que leurs synonymes sont présentés dans le Tableau 15.

Tableau 15. Classe de verbes primaires Fournir et Stocker liée au composant Source (S)

Composants liés avec la classe primaire	Classe primaire de verbes	Correspondant dans la base de Hirtz	Traduction
Source (S)	Fournir	Supply	Fournir
			Approvisionner
	Stocker	Store	Stocker
		Collect	Collecter
		Contain	Contenir

3.3.1.2.2 Fonctions d'interaction composants/référence

Ces fonctions permettent d'exprimer des liaisons et des positionnements entre les différents composants et une référence.

En conception et d'un point de vue agencement de composants, la mise en œuvre de ces fonctions correspond à l'analyse des différentes possibilités de liaison et à des choix architecturaux.

Nous définissons l'expression "lier à la référence" pour retranscrire les interactions composants/référence. Lier à la référence sera donc la cinquième classe primaire de notre base de verbe associée au composant de liaison avec la référence (Tableau 16).

Tableau 16. Classe de verbe primaire Lier à la référence

Composants liés avec la classe primaire	Classe primaire de verbes	Correspondant dans la base de Hirtz	Traduction
Liaison à la référence	Lier à la référence	Guide	Guider
		Translate	Guider en translation
		Rotate	Guider en rotation
		Secure	Fixer
		Position	Positionner

3.3.1.2.3 Fonctions de contrôle/commande

Cette fonction permet de garantir la bonne réalisation des fonctions du système ou de ces composants. Elle permet en général de pallier d'éventuels effets induits (Pailhès, Sallaou, Nadeau, & Fadel, 2010).

La fonction "contrôler" peut être considérée comme une association d'une fonction spécifiant un prélèvement d'information concernant un flux (acquisition) et d'une fonction de commande pour agir sur l'entité ou le flux concerné (commande). L'ensemble de ces actions sera modélisé par le verbe "contrôler", qui représentera la sixième classe primaire de notre base de verbes (Tableau 17).

Tableau 17. Classe de verbe primaire contrôler liée au composant de Contrôle/ Commande

Composants liés avec la classe primaire	Classe primaire de verbes	Correspondant dans la base de Hirtz	Traduction
Contrôle/ Commande (C/C)	Contrôler	Actuate	Actionner
		Regulate	Reguler
		Detect	Détecter
		Measure	Mesurer
		Indicate	Indiquer
		Stabilize	Stabiliser
		Stop	Stopper

Pour résumer, le Tableau 18 récapitule nos six classes primaires de notre base de verbes.

Tableau 18. Classes primaires de notre base de verbes

Composants liés avec la classe primaire	Classe primaire de verbes
Convertisseur (C)	Convertir
Transmetteur (T)	Transmettre
Liaison à la référence (R)	Lier à la référence
Source (S)	Fournir
	Stocker
Contrôleur (C/C)	Contrôler

3.3.1.3 Qualification des classes primaires de notre base de verbes

Une comparaison entre les fonctions de la base de Hirtz (Hirtz, Stone, McAdams, Szykman, & Wood, 2002) et les classes de fonctions que nous proposons a été réalisée (Sallaou, 2008).

Le Tableau 19 présente la correspondance entre les fonctions retenues selon la vision énergétique des flux et les fonctions de la base de Hirtz, occupant les trois premières colonnes du Tableau 19.

Nous pouvons voir aisément sur le Tableau 19 que les classes primaires de verbes proposées permettent de contenir l'ensemble des verbes utilisés par Hirtz.

Tableau 19. Correspondance des fonctions selon la vision énergétique (Sallaou, 2008)

Base de verbes de Hirtz			Classe primaire de verbes adoptés				
Classe primaire	Classe Secondaire	Classe Tertiaire	Convertir		Transmettre	Lier à référence	Contrôler/ Commander
			Convertir	Fournir/Stocker			
Branch	Separate				•		
		Divide			•		
		Extract			•		
		Remove			•		
	Distribute				•		
Channel	Import			•			
	Export			•			
	Transfer				•		
		Transport			•		
		Transmit			•		
	Guide					•	
		Translate				•	
Rotate					•		
Allow DOF					•		
Connect	Couple				•		
		Join			•		
		Link			•		
	Mix				•		
Control magnitude	Actuate						•
	Regulate						•
		Increase			•		
		Decrease			•		
		Change			•		
	Change	Increment			•		
		Decrement			•		
		Shape					•
		Condition					•
	Stop				•		•
Prevent				•		•	
Inhibit				•		•	
Convert	Convert		•				
Provision	Store			•			
		Contain		•			
		Collect		•			
	Supply			•			
Signal	Sense		•				•
		Detect					•
		Measure	•				
	Indicate						•
		Track					•
		Display	•				
Process		•					
Support	Stabilize					•	
	Secure					•	
	Position					•	

Le Tableau 20 montre une analyse de la fréquence d'utilisation des verbes proposés selon notre vision énergétique sur les produits étudiés par Caldwell (Caldwell, 2009). Nous remarquons que l'ensemble des verbes que nous avons retenu, constituant les classes primaires de notre base de verbes, recouvre bien le domaine mis en évidence par Caldwell et représente les verbes les plus utilisés par Hirtz.

Ces résultats valident bien notre vision énergétique adoptée pour le développement de notre base fonctionnelle.

Tableau 20. Analyse de la fréquence d'utilisation des verbes proposés

Liste de Fonctions/ Résultats de Verbes significatifs	Transmettre	Convertir		Contrôler	Lier à la référence
		Stocker/Fournir	Convertir		
Pourcentage dans un ensemble de 11 produits	42,6 %	39,5%		6,0 %	11,8 %
		25,7 %	13,8 %		
Pourcentage dans un ensemble de 110 produits	35,7 %	44,3%		8,6 %	11,4 %
		29,2 %	15,0 %		

3.3.1.4 Base de verbes proposée

En s'appuyant sur les travaux proposés par Hirtz (Hirtz, Stone, McAdams, Szykman, & Wood, 2002), Sallaou (Sallaou, 2008) et Caldwell (Caldwell, 2009), (Sen, Caldwell, Summers, & Mocko, 2010), nous avons décomposé les six classes primaires de verbes (convertir, transmettre, fournir, stocker, lier à la référence, contrôler) en quatre niveaux (Tableau 21). Ces niveaux correspondent à une hiérarchie sémantique de plus en plus précise. Les verbes sont organisés dans ces quatre niveaux, avec des termes de haut niveau (classe 1) et des termes à bas niveau (classe 4).

Dans ce tableau, nous avons réorganisé selon notre vision de conception, les verbes contenus dans les autres bases de verbes (Hirtz, Stone, McAdams, Szykman, & Wood, 2002), (Sallaou, 2008) tout en tenant compte de l'analyse faite par Caldwell (Caldwell, 2009). Ces verbes sont structurés comme suit :

- Verbes de classes primaires : ils occupent la première colonne du Tableau 21 et sont liés à notre vision énergétique. Ils représentent des verbes génériques pères.
- Verbes de classes secondaires : ces verbes occupent la deuxième colonne du Tableau 21. Ils sont les verbes les plus utilisés dans les décompositions fonctionnelles. De ce fait, nous verrons dans le chapitre 4 qu'ils vont être utilisés pour l'élaboration d'heuristiques génériques.
- Verbes de classes tertiaires : ils occupent la troisième colonne du Tableau 21 et sont des verbes généraux permettant l'analyse séquentielle.

- Verbes de classes quaternaires : ils occupent la quatrième classe du Tableau 21 et sont des verbes permettant d'avoir plus de précision dans la description. Ils concernent également des verbes métiers de l'entreprise MARQUET & Cie, fabricant des articles chaussants (par exemple : enrober, remplir ...). Ces verbes sont donc couramment utilisés dans l'entreprise MARQUET et Cie.

En parcourant la base de verbes de la classe primaire à la classe quaternaire, on aura de plus en plus de précision dans la description fonctionnelle. Par contre, le cheminement inverse va amener à une réduction sémantique, utilisé pour faire des agrégations de fonctions. Cette partie sera présentée au chapitre suivant.

Tableau 21. Base de verbes

Classe primaire	Classe secondaire	Classe tertiaire	Classe quaternaire
Convertir	Convertir		
Transmettre	Déplacer	Déplacer en translation	Glisser, translater, avancer, reculer, monter, descendre, décaler
		Déplacer en rotation	Tourner, pivoter, retourner, rouler, plier, rabattre, replier, remplir, enrouler, bobiner,
		Transférer	Envoyer, transporter, décharger, éjecter, souffler, presser, tirer, canaliser, serrer, frotter, gommer, appuyer, marteler, amener, apporter, injecter, récupérer, aspirer, absorber, attirer, pomper, évacuer, écraser, vibrer,
		Disperser	Pulvériser, propager, dissiper
		Poser	Etaler, revêtir, couvrir, recouvrir, enrober, pousser, encoller, étendre, appliquer, Placer, mettre en place, Enduire
		Prendre	Tenir, soulever, porter, enlever, ramasser, emporter, lever, prélever
	Reproduire	reconstituer,	Scanner, imprimer, photographier, calquer, copier, gaufrer, graver, marquer, fritter, usiner, former, fabriquer, dupliquer, sculpter,
	Assembler	Coudre	Border, Surfiler, surjeter, piquer, jointer, strobeler, broder, ourler, baguetter, suturer, festonner, faufiler
		Lier	Clouer, souder, aspirer, agraffer, attacher, relier, visser, grouper, coller, contre coller, boulonner, fusionner, gutter, unir, riveter, mélanger, tremper
		Joindre	Connecter, brancher, raccorder
	Séparer		Couper, diviser, trier, écarter, dégager, extraire, dissocier, cloisonner, diviser, isoler, partager, éjecter, découper, trancher, filtrer, sectionner, dépiler
	Adapter	Augmenter	Agrandir, amplifier, élever, multiplier, ajouter, charger, accélérer, épaissir, prolonger, maximiser, gonfler, allonger, remplir
		Diminuer	baisser, réduire, raccourcir, amincir, comprimer, dégonfler, rétrécir, enlever, fondre, vider, compacter
		Changer	Modifier, inverser, ajuster, corriger, déformer, chauffer, rafraîchir, liquéfier, réactiver, sécher, évaporer, brûler, humidifier, broyer, lubrifier
	Lier à la référence	Positionner	
Fixer			Accrocher, bloquer, coincer, immobiliser, attacher, caler
Guider			Guider en translation
		Guider en Rotation	
Fournir			Alimenter, produire, approvisionner,
Stocker	collecter		Récupérer, rassembler, matelasser, capitonner, empiler, entasser
	Contenir		Emmagasiner, accumuler
Contrôler	Maîtriser	Régler	Doser, asservir,
		Stabiliser	Figier, équilibrer
		Commander	Actionner, exciter
		Stopper	Arrêter, freiner, éteindre
	Surveiller	Détecter	Repérer, capter,
		Mesurer	Compter, comparer, acquérir, jauger

3.3.2 Construction de la base de compléments

Comme montre la Figure 28, une fonction du graphe de décomposition est définie comme tout mécanisme par lequel les transformations d'un élément de base ("matière", "énergie" ou "Signal") en un autre se produisent dans une entité (Henderson & Taylor, 1993).

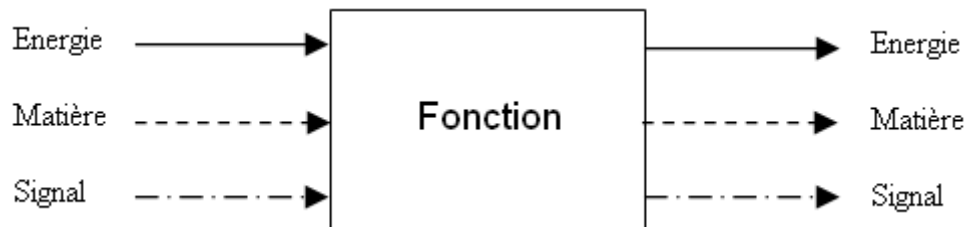


Figure 28. Modèle de représentation de fonction et flux (Henderson & Taylor, 1993)

La définition de la fonction se basant sur l'identification de la matière, de l'énergie et de l'information (signal) en tant qu'éléments de base, a été adoptée par plusieurs autres auteurs (Bo & Salustri, 1999), (Stone, Wood, & Crawford, 2000).

La description de la fonction est exprimée sous la forme d'un verbe et un complément. Ce dernier représente le flux fonctionnel concerné qui peut être soit une énergie, de la matière ou une information (signal) (Hirtz, Stone, McAdams, Szykman, & Wood, 2002).

Hirtz et al. ont défini une base de compléments représentée dans le Tableau 22. Elle est organisée sur une hiérarchie à trois niveaux, avec des termes de haut niveau comme l'énergie (classe 1) et des termes à bas niveau, comme l'énergie mécanique de rotation (classe 3). Cette base contient quarante cinq termes.

Tableau 22. Base de compléments de Hirtz (Stone R. , 1997)

Primary	Secondary	Tertiary	
Material	Human		
	Gas		
	Liquid		
	Solid		Object
			Particulate
			Composite
	Plasma		
	Mixture		Gas-gaz
			Liquid-liquid
			Solid-solid
			Solid-liquid
			Liquid-gaz
			Solid-gaz
			Solid-liquid-gaz
			Colloidal
Signal	Status	Auditory	
		Olfactory	
		Tactile	
		Taste	
		Visuel	
	Control	analog	
		Discrete	
Energy	Human		
	Acoustic		
	Biological		
	Chemical		
	Electrical		
	Electro-magnetic		Optical
			Solar
	Hydraulic		
	Magnetic		
	Mechanical		Rotational
			Translational
	Pneumatic		
	Radioactive/Nuclear		
Thermal			

3.3.2.1 Analyse statistique de la base de Hirtz

Comme pour les verbes, Caldwell (Caldwell, 2009) a étudié la fréquence d'utilisation des compléments de la base de Hirtz dans les décompositions fonctionnelles d'un ensemble de 11 produits puis de 110 produits (Tableau 23). On retrouve à peu près les mêmes pourcentages d'utilisation de compléments pour les deux ensembles de 11 produits et de 110 produits.

Les cinq termes les plus utilisés sont les énergies mécaniques et électriques, la matière solide, le signal de contrôle et l'énergie humaine. L'énergie mécanique est le premier terme à être utilisée dans les décompositions fonctionnelles avec des fréquences de 27.1 % et de 23.8% pour respectivement les ensembles de 11 produits et de 110 produits.

En total, dix-huit termes sur les quarante-cinq termes de la base de Hirtz ont été utilisés lors des décompositions fonctionnelles de 11 produits, trente-quatre termes utilisés sur quarante-cinq pour l'ensemble de 110 produits.

Tableau 23. Compléments les plus utilisés dans la base de compléments de Hirtz (Caldwell, 2009)

	11-product set	110-product set
Functional Basis flows used	18 out of the 45 available	34 out of the 45 available
High frequency terms within function lists	Mech. Energy: 27.1% Elec. Energy: 24.8% Control Signal: 11.7% Solid: 9.4% Human Energy: 9.1%	Elec. Energy: 23.8% Mech. Energy: 18.3% Solid: 12.0% Human Mat.: 8.2% Control Signal: 7.2%

Pour mieux voir la fréquence d'utilisation de chaque complément de la base de Hirtz, Caldwell a proposé le tableau suivant (Tableau 24). Sur ce tableau, nous visualisons clairement l'utilisation de chaque terme de la base de Hirtz dans les décompositions fonctionnelles des 11 et 110 produits. Nous remarquons que plusieurs termes sont non utilisés. Ces termes occupent surtout le troisième niveau de la base de Hirtz. Les compléments les plus utilisés sont ceux du premier et du deuxième niveau avec une fréquence d'utilisation de 79%.

Tableau 24. Fréquence d'utilisation de chaque complément de la base de Hirtz (Caldwell, 2009)

Primary	11-product set	110-product set	Secondary	11-product set	110-product set	Tertiary	11-product set	110-product set		
Material	22.6%	29.8%	Human	6.2%	8.2%					
			Gas	2.9%	2.1%					
			Liquid	0.0%	2.0%					
			Solid	9.4%	12.0%	Object			0.0%	0.0%
						Particulate			0.0%	0.0%
						Composite			0.0%	0.0%
			Plasma	0.0%	0.0%					
			Mixture	4.1%	5.5%	Gas-gaz			0.0%	0.1%
						Liquid-liquid			0.0%	0.0%
						Solid-solid			0.0%	0.0%
						Solid-liquid			0.6%	2.2%
						Liquid-gaz			0.6%	0.2%
						Solid-gaz			0.0%	0.1%
						Solid-liquid-gaz			0.1%	0.0%
Colloidal						0.0%	0.3%			
Signal	12.8%	10.4%	Status	1.0%	2.0%	Auditory	0.0%	0.1%		
						Olfactory	0.0%	0.0%		
						Tactile	0.0%	0.0%		
						Taste	0.0%	0.0%		
						Visuel	0.0%	0.2%		
			Control	11.7%	7.3%	analog	0.0%	0.1%		
						Discrete	0.0%	0.1%		
Energy	64.6%	59.8%	Human	9.1%	6.3%					
			Acoustic	0.7%	0.7%					
			Biological	0.0%	0.1%					
			Chemical	0.0%	0.8%					
			Electrical	24.8%	23.8%					
			Electro-magnetic	1.0%	1.8%	Optical			0.0%	0.8%
						Solar			0.0%	0.0%
			Hydraulic	0.0%	0.3%					
			Magnetic	0.6%	0.3%					
			Mechanical	27.4%	22.3%	Rotational			0.3%	3.0%
						Translational			0.0%	1.0%
			Pneumatic	0.3%	1.5%					
			Radioactive/ Nuclear	0.0%	0.0%					
Thermal	0.7%	2.0%								
SUM	100%	100%		100%	98.9%		1.6%	8.1%		

3.3.2.2 Base de compléments proposée

Par analogie avec la base de verbes, nous définissons une base de compléments. Le premier niveau de cette base est composé des trois flux fonctionnels de base : énergie, matière et information. Ce premier niveau est ensuite décomposé en plusieurs niveaux. Nous nous sommes basés sur la base de Hirtz (Hirtz, Stone, McAdams, Szykman, & Wood, 2002), l'étude faite par Caldwell (Caldwell, 2009), sur les travaux du TREFLE (Pailhès, Sallaou, Nadeau, & Fadel, 2010), ainsi que sur l'analyse de l'existant de l'entreprise MARQUET et de ses besoins.

En se référant au Tableau 24, nous avons sélectionné les classes les plus utilisées pour définir les classes du deuxième niveau. Ainsi, la classe primaire "Energie" est décomposée en cinq classes secondaires : énergie mécanique, énergie électrique, énergie pneumatique, énergie hydraulique et énergie thermique (Tableau 25). Comme pour la base de Hirtz, l'énergie mécanique est décomposée en classes tertiaires définies par énergie mécanique de translation et énergie mécanique de rotation.

Tableau 25. Décomposition de la classe primaire Energie

Classe primaire	Classes secondaires	Classes tertiaires
Energie	Mécanique	De translation
		De rotation
	Electrique	
	Pneumatique	
	Hydraulique	
	Thermique	

De même que l'énergie, la classe primaire "Matière" a été décomposée en quatre classes secondaires qui sont les classes les plus utilisées dans la base de Hirtz (voir Tableau 24). Ces classes secondaires sont "solide", "gel", "liquide" et "gaz". Les classes tertiaires proposées dans la base de Hirtz liées à ces classes secondaires sont rarement utilisées dans les décompositions fonctionnelles des produits (Caldwell, 2009). Nous avons donc exclu les classes tertiaires proposées par Hirtz et nous avons défini de nouvelles classes tertiaires permettant la caractérisation physique de chaque élément du 2^{ème} niveau : un solide par exemple pourra être soit préformé, soit un film (épaisseur négligeable), soit sous forme de billes ou de poudre. Un liquide peut être newtonien, non newtonien ou bien une émulsion. Enfin, un gaz peut être sous forme de brouillard, de vapeur saturée ou de vapeur surchauffée.

Le choix de ces classes tertiaires a été basé sur des travaux du TREFLE (Nadeau, Pailhes, & Olivares, 2004), (TREFLE, 2004). Exceptionnellement pour la classe secondaire "Solide", le flux le plus utilisé dans l'entreprise, trois caractérisations binaires pourront compléter la description des classes tertiaires: rigide/souple, poreux/non poreux, compressible/non compressible. La décomposition hiérarchique de la classe primaire "Matière" est présentée par le Tableau 26.

Cette décomposition a été complétée par un quatrième niveau qui correspond dans notre cas aux compléments métiers de la PME MARQUET & Cie (par exemple : semelle, enrobage, posage, etc.). Ce dernier niveau peut donc être adapté aux différentes entreprises.

Tableau 26. Décomposition de la classe primaire Matière

Classe primaire	Classes secondaires	Classes tertiaires				Classes quaternaires	
Matière	Solide	Préformé	rigide	poreux		Forme, posage	
				Non poreux		Talon, bombout,	
			Souple	Compressible	Poreux		Mousse, première mousse
					Non poreux		tuyau
				Non Compressible	Poreux		
					Non poreux		Semelle, ventouse
		Film	Rigide	Poreux		Carton, première carton,	
				Non poreux		Combrion, bouton	
			Souple	Poreux		Tissu, film de colle, bordure, tige	
				Non poreux		Membrane latex, silicone	
		Billes	Rigide			Billes de colle, granulés de PVC	
			Souple			strass	
		Poudre				polyamide	
		Pâte, Gel				Mastic, graisse	
	Liquide	Newtonien			Colle aqueuse,		
		Non newtonien			Colle cyanolite		
		Emulsion					
	Gaz	Brouillard					
		Vapeur saturée					
		Vapeur surchauffée					

La même logique a été appliquée pour la décomposition de la classe primaire "Signal". Nous avons repris les classes secondaires et tertiaires les plus utilisées dans la base de Hirtz (Tableau 24). La décomposition hiérarchique de la classe primaire Signal est donnée par le Tableau 27.

Tableau 27. Décomposition de la classe primaire Signal

Classe primaire	Classes secondaires	Classes tertiaires
Signal	Contrôle	Analogique
		Digital
	Statut	Auditif
		Visuel
		Tactile

Ainsi, la base de compléments complète est présentée par le Tableau 28.

Tableau 28. Base de compléments

Compléments							
Classe primaire	Classe secondaire	Classe tertiaire				Classe quaternaire	
Energie	Mécanique	de translation					
		de rotation					
	Pneumatique						
	Hydraulique						
	Thermique						
	Electrique						
Matière	Solide	Préformé	rigide	Poreux		Forme, posage	
				Non poreux		Talon, bombout, insert	
			Souple	compressible	Poreux		Mousse, première mousse
					Non poreux		tuyau
				Non compressible	Poreux		
					Non poreux		Semelle, ventouse
		Film	Rigide	Poreux		Carton, première carton,	
				Non poreux		Combrion, bouton	
			Souple	Poreux		Tissu, film de colle, bordure, tige	
				Non poreux		Membrane latex, silicone	
		Billes	Rigide			Billes de colle, granulés de PVC	
			Souple			strass	
	Poudre				polyamide		
	Pâte, Gel				Mastic, graisse		
	Liquide	Newtonien				Colle aqueuse, solvant	
		Non newtonien				Colle cyanolite	
		Emulsion					
	Gaz	Brouillard					
		Vapeur saturée					
		Vapeur surchauffée					
Signal	Contrôle	Analogique					
		Digital					
	Statut	Auditif					
		Visuel					
		Tactile					

3.3.3 Compatibilité Verbe-complément

Dans notre démarche, l'élément d'entrée dans la base de connaissances est la fonction élémentaire, composée d'un verbe et d'un complément. La combinaison de ces deux termes n'est pas toujours possible; certaines associations sont incohérentes, par exemple glisser gaz. L'interrogation de la base de connaissances ne doit donc se faire qu'avec des fonctions sémantiquement correctes.

La problématique que nous posons ici, concerne l'identification des relations sémantiques possibles entre les verbes et les compléments, qui selon nous, doit être prise en compte lors de la construction de la base de connaissances. Ces relations sont considérées comme fondamentales pour associer exhaustivement chaque verbe à un ensemble de compléments compatibles.

Dans notre cas, l'étude de compatibilités sémantiques a été effectuée pour chaque verbe de la base de verbes: Nous identifions, pour chaque verbe, tous les compléments compatibles jusqu'au niveau tertiaire de la base de compléments. Le Tableau 29 présente un extrait de cette étude : chaque ligne correspond à un verbe, puis les colonnes correspondent aux compléments. Le tableau complet est donné dans l'annexe N°4. Nous attribuons le chiffre 1 lorsque le verbe est compatible avec un complément et le chiffre 0 lorsqu'ils ne sont pas compatibles.

Durant cette étude, nous avons rencontré trois cas :

- Des verbes qui sont compatibles avec tous les compléments, cas du verbe "déplacer".
- Des verbes qui ne sont compatibles qu'avec quelques compléments. Pour le verbe "glisser" par exemple (Tableau 29), il n'est compatible qu'avec la matière solide préformé et toutes ses classes tertiaires et quaternaires ainsi que la matière solide film.
- Des verbes causatifs qui demandent d'être précédés d'un autre verbe. C'est typiquement *faire* qui s'emploie, suivi de l'infinitif du verbe concerné, par exemple faire glisser. Dans notre cas, nous ignorons le premier verbe et nous interrogeons notre base qu'avec le deuxième verbe.

A partir d'une association verbe-complément, la base proposera les solutions techniques capitalisées liées à ce couple verbe-complément. Les solutions techniques sont décrites selon la classification CTOC (cf. §3.2.1.1). Le principe d'utilisation de la base de connaissances est conçu de manière à ce que, quel que soit le niveau d'interrogation (basé sur des termes métiers ou avec des termes génériques), le système puisse fournir les solutions associées.

Pour chaque solution technique sont associés les effets produits et les effets induits ainsi que la fiche de critères de pertinence donnée par le Tableau 8. Ces informations permettent aux utilisateurs de choisir une solution lorsqu'il y a un choix à faire.

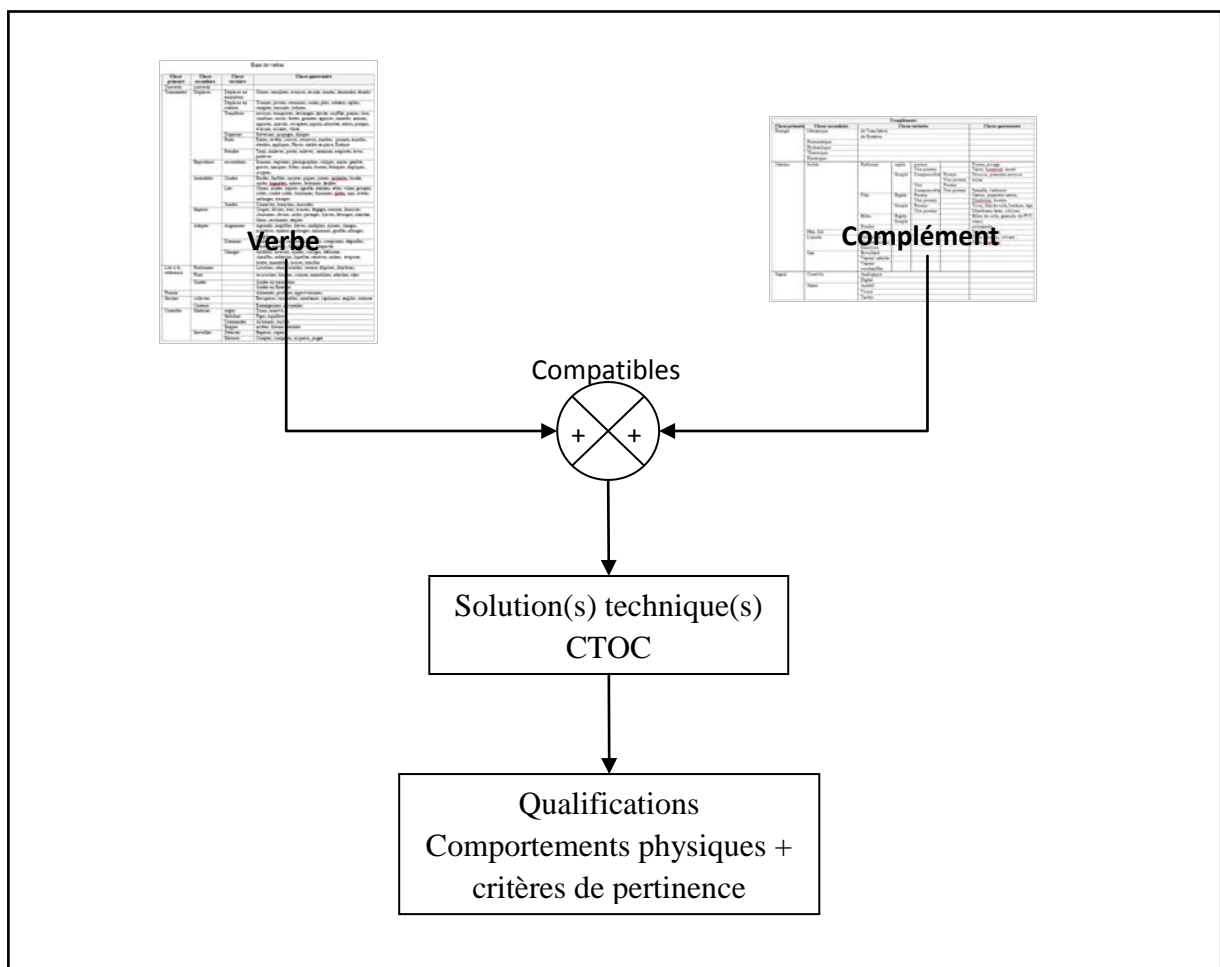


Figure 29. Organisation de la base de connaissances

Un système à base de connaissances est un dispositif complexe censé accompagner l'utilisateur dans la résolution d'un problème de conception. L'utilisateur, confronté à un

problème spécifique, interroge le système sur les solutions possibles. Dans notre cas, il lui soumettra une fonction élémentaire sous la forme d'un verbe et de compléments. Le système proposera les solutions techniques liées à l'association verbe-compléments.

L'interrogation de la base de connaissances est présentée par le synoptique ci-dessous (Figure 30).

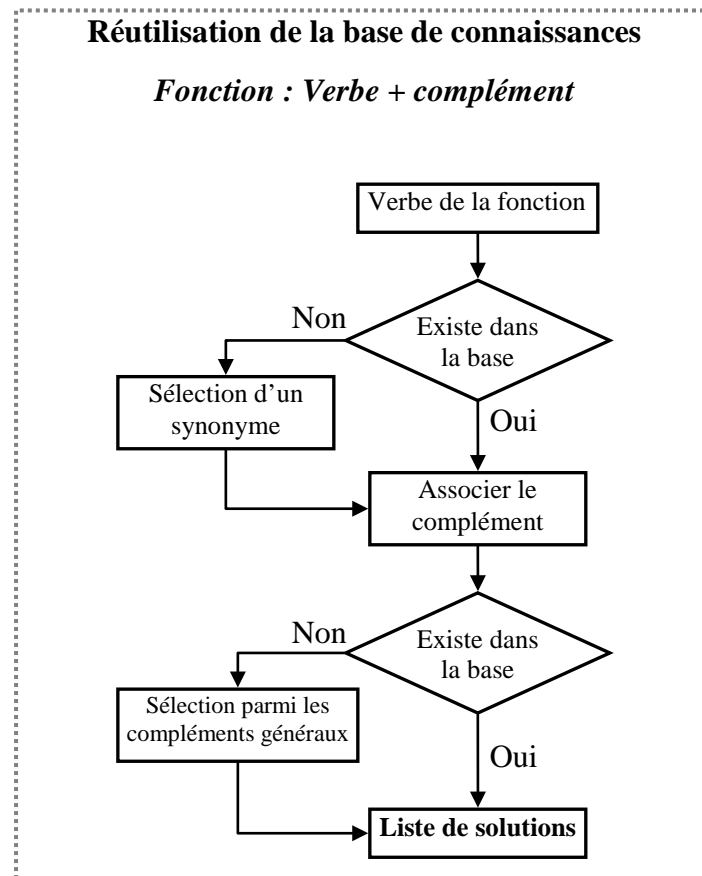


Figure 30. Synoptique d'interrogation de la base de connaissances

Le concepteur commence par saisir son verbe ou le choisir dans la liste de la classe quaternaire. Si ce dernier existe dans la base, le concepteur passe à l'étape suivante. Sinon, la classe tertiaire de la base des verbes lui sera proposée. Dans ce cas, soit il sélectionne un des verbes de cette classe qu'il juge synonyme de son verbe saisi au départ, soit il remonte à la classe secondaire et s'il le faut à la classe primaire.

Au moment où le verbe est choisi, une liste de compléments métiers compatibles sera proposée. Ainsi, le concepteur se retrouve devant deux possibilités :

- soit le complément à ajouter existe dans la liste proposée au niveau quaternaire. Dans ce cas, il le sélectionne et il aura en sortie les solutions techniques liées à la combinaison du verbe et du complément sélectionné.
- Soit le complément à ajouter n'existe pas dans la liste proposée. A ce moment, le concepteur doit parcourir la base de compléments génériques dès la première classe pour caractériser physiquement son complément. A titre d'exemple, il peut définir son complément comme étant une matière solide/préformée/rigide/non poreuse. A ce niveau, une liste de solutions lui sera fournie.

3.4 Conclusion

Dans l'objectif de construire une base de connaissances, nous avons développé une démarche de capitalisation de connaissances. La première étape de cette démarche est une phase d'analyse de l'existant lié aux procédés de fabrication de l'entreprise. Un procédé est représenté comme étant une succession de tâches. Chaque tâche a été décomposée en fonctions élémentaires exprimées sous la forme d'un verbe et d'un complément.

Pour représenter cette décomposition hiérarchique d'un procédé, nous avons développé un outil graphique qui prend en compte l'allocation des tâches et des fonctions, la succession temporelle ainsi que les conditions de contrôles et de transitions. Ainsi, par le biais de cet outil, un processus de fabrication peut être archivé.

Pour chaque fonction élémentaire, nous avons capitalisé la solution technique mise en œuvre, les composants ou sous ensembles utilisés nécessaires pour sa réalisation. Nous avons identifié les composants à partir de la classification CTOC (Convertisseur/Transmetteur/Opérateur/Contrôle) basée sur une vision énergétique du cheminement du flux fonctionnel.

Associée à chaque solution technique, nous avons capitalisé toutes les connaissances permettant sa qualification. Ces connaissances concernent l'identification des effets produits et induits ainsi que des critères de pertinence. Ces informations vont aider le concepteur à faire un choix lors de la phase de réutilisation de connaissances.

Pour archiver les connaissances capitalisées dans une base de connaissances et permettre leur partage, un intérêt particulier est donné à l'unification et la standardisation du langage. A cette fin, nous avons développé une base de verbes ainsi qu'une base de compléments. Chacune des deux bases est décomposée en quatre niveaux. Ces niveaux correspondent à une sémantique de plus en plus précise.

L'identification des relations sémantiques possibles entre les verbes et les compléments a été prise en compte dans la construction de la base de connaissances afin d'associer exhaustivement chaque verbe à un ensemble de compléments compatibles. Ainsi, pour une fonction donnée exprimée par une association compatible de verbe-complément, la base proposera au concepteur toutes les solutions techniques capitalisées liées à cette fonction.

La base de connaissances développée sera utilisée dans notre méthodologie de conception lors de la phase de recherche de concepts.

Chapitre 4 Proposition d'une méthodologie de conception

Une méthodologie de conception est une séquence d'activités de conception faisant passer du besoin à la définition d'une ou plusieurs architectures du procédé (Reymen, 2001). Dans le cadre de nos travaux, il s'agit d'une démarche destinée à guider la PME dans la conception de nouveaux procédés de fabrication.

Nous proposons dans ce chapitre une méthodologie de conception séquentielle mais itérative, basée sur la créativité et la réutilisation de l'existant dans la recherche de solutions. Les aspects d'itération et de réutilisation sont pris en compte afin de répondre à un besoin de réduction des délais et des coûts de conception et de développement.

Nous allons dans un premier temps présenter une vue d'ensemble de notre processus de conception puis nous détaillerons chacune des phases, tout en illustrant par des exemples concrets. Nous présenterons à la fin du chapitre le synoptique global de conception.

4.1 Vue d'ensemble de la méthodologie de conception

Les principales phases de notre processus de conception sont représentées sur la Figure 31. Cela correspond à une vision simplifiée du synoptique de conception présenté à la fin de ce chapitre. La méthodologie proposée est une séquence d'activités de conception répartie sur six phases. Cette démarche est particulièrement destinée à guider la PME MARQUET dans la conception de nouveaux procédés de fabrication.

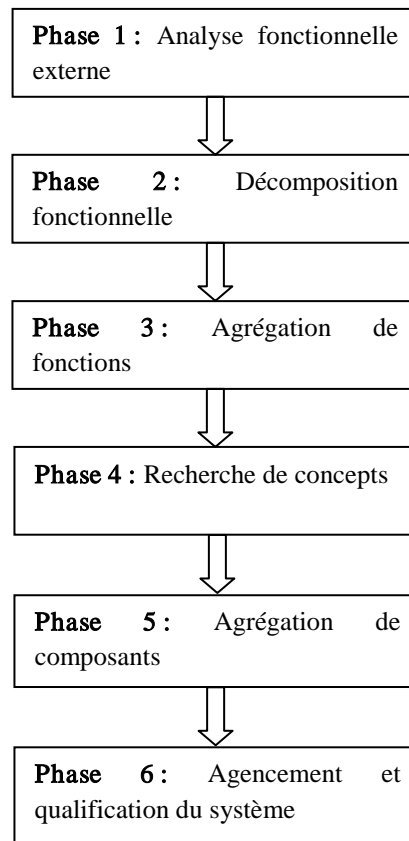


Figure 31. Vue d'ensemble de notre processus de conception

La première phase est une analyse fonctionnelle externe classique, qui débouche sur l'écriture de Cahier des Charges fonctionnel (CdCF).

La décomposition fonctionnelle, phase 2, est une étape importante dans la conception de nouveaux systèmes (Pahl & Beitz, 1988), (Suh, 1990). Elle consiste à diviser la fonction globale attendue du système en tâches et en sous-tâches et fonctions élémentaires, permettant ainsi d'avoir une représentation hiérarchique du système en allant du plus général au plus détaillé. C'est la méthode qui a été aussi suivie lors de la capitalisation de connaissances.

L'expression des fonctions sous la forme d'un verbe plus un complément, sélectionnée à partir des bases de verbes et de compléments, a montré qu'il y a des fonctions qui convergent vers un même contexte. Par exemple, les fonctions "avancer semelle" et "évacuer semelle" sont des fonctions de déplacement et convergent par conséquent vers la même fonction "déplacer semelle".

A partir de ce constat, nous avons intégré dans notre processus de conception une phase d'agrégation de fonctions (phase 3). Le but de cette phase est d'agréger une ou

plusieurs fonctions élémentaires. Cette phase est guidée par des heuristiques d'agrégation qui seront présentés par la suite.

Les heuristiques sont des règles constatées, fondées sur l'analyse. Elles se veulent simples, explicites, pratiques et rapides d'utilisation. Elles sont tirées d'une part des règles de l'art (Stone & Kristin, 2000), (Stone a & McAdams, 2004) et d'autre part, de l'expérience de conception dans l'entreprise ainsi que l'analyse de l'existant déjà faite.

La phase suivante est la phase de recherche de solutions techniques réalisant les fonctions élémentaires. Cette quatrième phase de notre processus de conception est basée sur l'utilisation de la base de connaissances déjà présentée au chapitre 3: le but de la réutilisation est de retrouver, pour une fonction déjà connue dans la PME, toutes les informations pertinentes permettant sa mise en œuvre.

Dans le cas d'une nouvelle fonction (non connue dans l'entreprise) ou bien si la solution trouvée dans la base n'est pas satisfaisante, la recherche de concept sera basée sur la créativité. Nous utilisons la Méthode d'Aide à L'Innovation et le logiciel de conduite d'études MAL'IN associé (Nadeau, Pailhes, & Olivares, 2004), (TREFLE, 2004).

La phase d'agrégation de composants (phase 5) est destinée à étudier les liens entre les composants dans le but de diminuer leur nombre et de faciliter par la suite la phase d'agencement de solutions. Comme dans le cas de la phase d'agrégation de fonctions (phase 3), des heuristiques d'agrégation de composants sont proposées pour aider le concepteur lors de cette phase.

Enfin, la phase d'agencement et de qualification du système (phase 6) consiste à définir l'architecture du procédé en agençant les différents concepts. Des heuristiques d'aide à l'agencement sont proposées aussi pour cette phase.

Nous détaillerons dans ce chapitre chaque phase de notre méthodologie de conception ainsi que les outils utilisés pour accompagner le concepteur tout au long du processus.

4.2 Phase 1 : Analyse fonctionnelle externe

L'analyse fonctionnelle est utilisée dans la première phase de notre démarche de conception. Elle consiste à analyser le besoin auquel devra répondre le procédé, les fonctions qu'il devra remplir, les contraintes auxquelles il sera soumis, ainsi qu'à les caractériser. C'est la base d'élaboration du Cahier Des Charges Fonctionnel, qui représente la référence

permanente que tout concepteur doit posséder pour concevoir des solutions, les analyser et effectuer un choix. L'outil "bête à corne", un des éléments de la méthode APTE, est un outil graphique permettant l'expression du besoin et la recherche de la fonction globale du système.

Suite à l'expression du besoin, une analyse fonctionnelle externe permet d'exprimer les fonctions du système étudié, c'est-à-dire mettre en évidence les services et les fonctions contraintes du système. A cette fin, la Méthode APTE propose un outil méthodologique : la Pieuvre. Pour chaque situation de vie, le système est en liaison avec un certain nombre d'éléments de son environnement qui constituent les milieux extérieurs. Les relations créées par le procédé avec ou entre ses éléments du milieu extérieur représentent les fonctions de service (AFNOR, 1990).

Les fonctions de service représentent le but de l'action du système. Elles sont l'expression du besoin et elles identifient les relations créées par le système entre deux ou plusieurs éléments de son milieu extérieur d'utilisation. Les fonctions contraintes représentent les actions et / ou les réactions du système par rapport aux différents milieux extérieurs. Elles définissent les contraintes imposées au système (AFNOR, 1990).

L'identification des fonctions de services est ensuite suivie d'une étape de caractérisation de ces fonctions. Le tableau fonctionnel (Tableau 30) permet une caractérisation des fonctions de service ou contraintes. Ce tableau spécifie, pour chaque fonction :

- *Des critères d'évaluation* : qui représentent des paramètres retenus pour apprécier la manière dont une fonction est remplie ou une contrainte respectée.
- *Une échelle d'évaluation ou un niveau* : qui repère l'échelle adoptée pour un critère d'appréciation d'une fonction.
- *Une tolérance acceptée* : qui peut être soit une flexibilité (indication sur les possibilités de moduler un niveau pour un critère), soit une limite (niveau de critère d'appréciation au-delà ou en-deçà duquel le besoin est non satisfait).

Tableau 30. Tableau Fonctionnel (CdCF)

Fonction	Critère	Niveau	Flexibilité, limite
FP1 :			
FP2 :			
FC1 :			

La caractérisation des différentes fonctions de service et fonctions de contraintes constitue le Cahier des Charges fonctionnel CdCF (Tableau 30). D’après la norme AFNOR, c’est un document par lequel le demandeur exprime son besoin (ou celui qu’il est chargé de traduire) en terme de fonctions de service et de contraintes.

La Spécification Technique de Besoin STB est un document par lequel le demandeur exprime son besoin en termes d’exigences techniques (Cavaillés, 1991). La STB complète le CdCF en spécifiant les conditions de vérification du respect de ces exigences afin de qualifier le système conçu.

La STB précise quatre parties permettant d’exprimer (Scaravetti, 2004):

- Les exigences fonctionnelles, énumérées dans le cahier des charges fonctionnel,
- Les exigences de sûreté de fonctionnement, exprimées en termes de fiabilité, de maintenabilité, de disponibilité et de sécurité,
- Les exigences concernant la conception et la production, liées à des limitations de liberté de conception et de production,
- Les exigences concernant la qualification du système conçu.

Comme montre la Figure 32 , la première phase de notre méthodologie de conception concerne l’analyse du besoin qui débouche sur la rédaction de la STB.

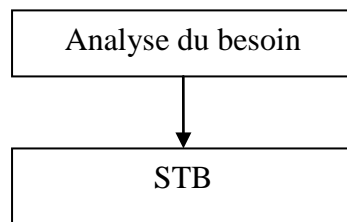


Figure 32. Phase 1: Analyse fonctionnelle externe

4.3 Phase 2 : Décomposition fonctionnelle des tâches

On rappelle qu’une tâche ou sous-tâche se traduit par une fonction réalisée par le procédé.

La décomposition fonctionnelle consiste à diviser la fonction globale du système, définie dans la première phase, en grandes tâches puis en fonctions élémentaires. Il s’agit de

définir une succession logique entre ces diverses tâches ou fonctions, afin de présenter entièrement le procédé à concevoir.

Pour aider le concepteur à définir cette décomposition fonctionnelle et la séquentialité des fonctions, nous proposons trois méthodes, à savoir : la visualisation par l'outil graphique pour représenter la décomposition, la réutilisation des décompositions fonctionnelles de procédés existants et la séquentialisation générique des procédés Marquet.

4.3.1 Outil graphique

La modélisation graphique de la décomposition des tâches est effectuée par notre outil graphique, présenté au chapitre précédent (Figure 20). Ainsi le concepteur sera aidé par les fonctionnalités de cet outil, c'est-à-dire :

- L'aspect hiérarchique : la tâche globale du système est découpée en sous-tâches qui peuvent elles-mêmes être décomposées. La modélisation graphique de cette décomposition permet donc d'avoir une représentation hiérarchique du procédé.
- L'aspect temporel : l'outil graphique comporte des informations temporelles comme l'ordre et l'enchaînement des tâches. Ces informations sont facilement interprétées et sont directement lisibles sur le graphe grâce au codage déjà défini.
- L'allocation des tâches : cette fonctionnalité offre la possibilité au concepteur d'attribuer des allocations pour une tâche donnée si elle est imposée par le cahier des charges (tâche système, tâche utilisateur ou tâche d'interaction). La modélisation de l'allocation des tâches permet également de gagner du temps lors de la recherche de solutions. En effet, si une fonction donnée est imposée par le cahier des charges qu'elle soit automatique, le concepteur pourra prendre en compte cette exigence dès cette phase, en attribuant à cette fonction l'allocation de tâche "Système", représentée dans l'outil graphique par la lettre S. Dans ce cas, lors de la phase de recherche de solutions, le concepteur ne s'intéressera qu'à des solutions automatisées.
- Identification des transitions entre fonctions : l'outil graphique permet de représenter les conditions de transition et de contrôle entre les fonctions. Ainsi, le concepteur est obligé de définir ces conditions à chaque ajout de fonctions ou de tâches.

4.3.2 Réutilisation des décompositions fonctionnelles des procédés existants

Lors de l'analyse de l'existant, nous avons effectué les décompositions fonctionnelles de tous les procédés existants de l'entreprise. Ainsi, ces procédés ont été archivés, par le biais de l'outil graphique qui précise les tâches décomposées, leurs ordres et leurs allocations, ainsi que les transitions entre tâches.

Nous mettons à la disposition du concepteur ces informations qui vont l'aider à définir la décomposition séquentielle des tâches du procédé conçu. Par exemple, pour décomposer la tâche "encoller semelle", le concepteur observe sa décomposition fonctionnelle dans les procédés existants. Plus la base se complète, plus elle sera riche de propositions de solutions utilisables.

Le concepteur pourra donc soit réutiliser soit modifier la décomposition rencontrée dans un autre procédé. Il pourra avoir également des solutions alternatives lui offrant plus de choix dans la conception.

4.3.3 Particularités des procédés MARQUET

Nous avons constaté lors de la décomposition fonctionnelle des procédés existants dans l'entreprise MARQUET que les verbes de la famille "déplacer" sont les plus utilisés. Le taux d'utilisation de ces verbes dans les procédés existants est de 70% (pourcentage calculé à partir des procédés capitalisés).

Si nous analysons les procédés de fabrication de chaussons, nous faisons les constatations suivantes :

- un chausson est composé d'éléments prédécoupés,
- ces éléments doivent être assemblés donc défilés ou récupérés dans un système de stockage, puis posés et positionnés,
- ces éléments doivent être formés, remplis (cf. glossaire §5.1.1),
- ces éléments doivent être reliés entre eux, c'est-à-dire mis en interaction, à différents stades de la fabrication et constituer des sous ensembles,
- la semelle constitue la référence,
- les différentes liaisons se font par couture ou collage, les composants d'interaction sont le fil ou la colle,
- le chausson ou les éléments de chausson sont placés dans un carton ou un emballage.

L'ensemble des actions constatées fait intervenir des actions de verbe père « déplacer », que ce soient les différents transports d'éléments vers le lieu d'assemblage, les stockages finaux ou les actions de formage. Les actions de formage sont les plus difficiles à formaliser car leur précision impose des actions simultanées et concomitantes.

La séquentialisation des tâches conduit à des procédés complexes comme ceux utilisés dans la chaussure, procédés utilisant des mini vérins, des étriers et des renvois pour plier le cuir localement et définir une forme. Dans le cas particulier des procédés MARQUET, la fonction remplir (cf. glossaire §5.1.1) qui consiste à replier des tissus sur des composants préformés aurait pu se faire par des techniques équivalentes. Cette solution a été remise en cause car trop complexe et encombrante, elle a suscité de nouvelles recherches de solutions (MAL'IN) et des développements qui font maintenant partie de la base fonctionnelle.

Les actions de liaison à la référence (dont remplir fait partie) vont faire aussi intervenir des actions de verbe père « déplacer » dans les tâches élémentaires.

4.3.4 Séquentialisation générique des procédés Marquet

4.3.4.1 Logique de séquence générique

A partir des constats précédents, nous proposons de mettre en place des séquences génériques des procédés MARQUET.

Nous partons d'une séquence générique mère construite avec comme base la famille "déplacer". Puis nous proposons diverses séquences génériques filles, c'est-à-dire avec un niveau de description plus précis se situant dans les niveaux inférieurs de la représentation graphique des tâches.

La logique séquentielle laisse la place à l'utilisation de blocs fonctionnels connus et validés réalisant des actions précises et contenus dans la base de connaissances.

4.3.4.2 Séquence générique mère à partir de la famille « déplacer »

Les actions spécifiques sont les actions qui se traduisent par un verbe qui n'est pas de la famille « déplacer ». Un procédé MARQUET se caractérise par des actions spécifiques encadrées par des actions de type déplacement selon l'énumération :

- Récupération de l'élément
- Mise en position de l'élément

- Action spécifique
- Evacuation de l'élément

Ce constat est corroboré par le fait que 70% des verbes utilisés en analyse de l'existant sont de souche « déplacer ». On peut ainsi définir une séquence générique mère à partir des verbes de père « déplacer » :

| [*Prendre ou récupérer ou dépiler ou*] puis [*déplacer ou avancer*
| *ou*] puis [*positionner ou centrer ou*] puis [**action spécifique**]
| puis [*prendre ou déplacer ou évacuer ou*]

Le choix des verbes dépend du cas que l'on traite. La base de verbes va aider à l'expression car les verbes de la famille « déplacer » sont en grand nombre et constituent 30% de la base.

4.3.4.3 Séquences génériques "filles" de mise en position

Le choix des verbes influencent le découpage séquentiel. Par contre, on peut proposer des séquences génériques, en particulier pour la mise en position d'une pièce.

La mise en position est une tâche qui intervient souvent et qui veut qu'un élément passe d'une position initiale à une position finale. De surcroît, la récupération et l'évacuation impliquent aussi des états initiaux et finaux.

Prenons le cas de la mise en position d'une pièce dans un plan. La Figure 33 pose le problème d'un positionnement dans un plan.

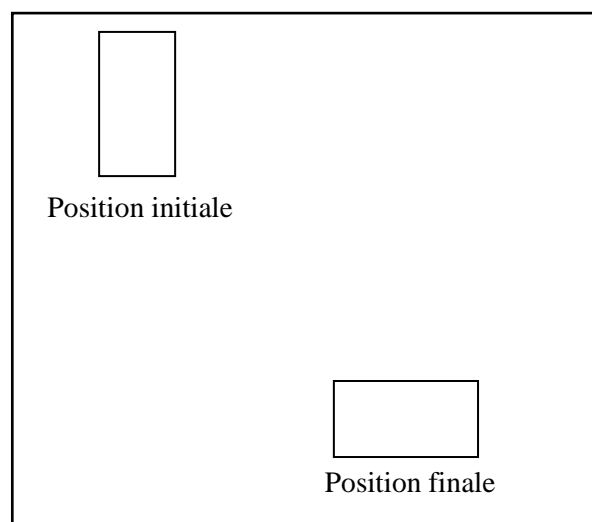


Figure 33. Position initiale et finale

Pour amener une pièce d'une position à une autre (Figure 33), différentes trajectoires planes sont possibles. Dans une vision systématique, nous représentons sur la Figure 34 tous les cas possibles. A chaque trajectoire correspond une décomposition en fonctions élémentaires utilisant les verbes de la famille "déplacer". Soit dans une vision séquentielle :

Cas 1 :

[Déplacer] puis [reculer] puis [pivoter]

Cas 2 :

[Reculer] puis [déplacer] puis [pivoter]

Cas 3 :

[Pivoter] puis [déplacer] puis [reculer]

Cas 4 :

[Pivoter] puis [reculer] puis [déplacer]

Cas 5 :

[Déplacer] puis [pivoter]

Cas 6 :

[Pivoter] puis [déplacer]

Cas 7

[Tourner] puis [déplacer]

Cas 8

[Déplacer] puis [tourner]

Les tâches successives peuvent aussi se faire en simultané et ainsi permettre un gain de temps. La simultanéité va imposer certains choix de composants. Les séquences génériques deviennent alors :

Cas 1bis ou 3bis :

[[Déplacer] puis [reculer]] et [pivoter]

Cas 2bis ou 4bis :

[[Reculer] puis [déplacer]] et [pivoter]

Cas 5bis ou 6bis :

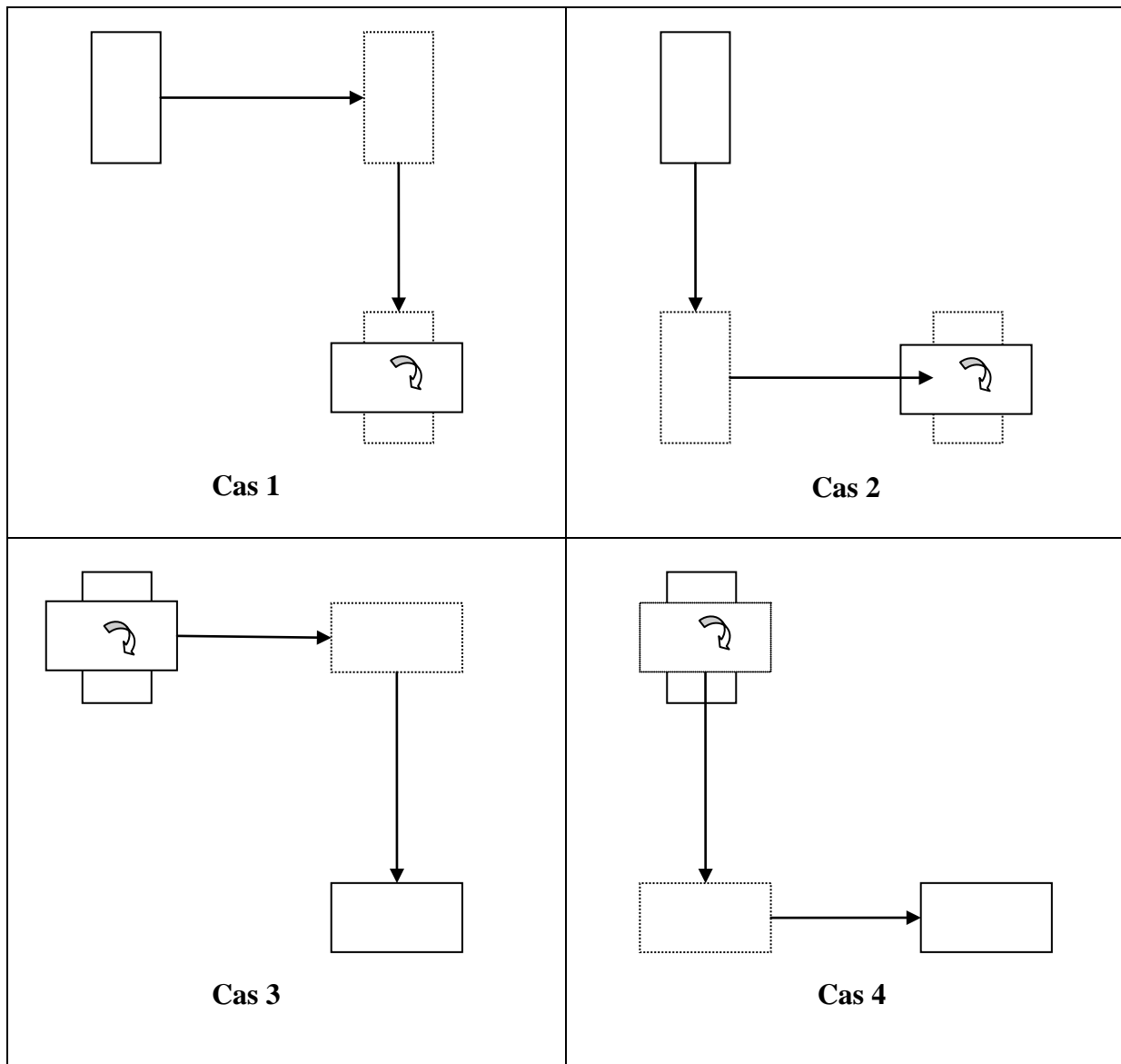
[Déplacer] et [pivoter]

Cas 7bis ou 8bis :

[Déplacer] et [tourner]

L'intérêt de ces séquences réside dans le fait que les solutions associées impliquent des composants simples et standardisés comme des vérins, des tapis roulants et des vérins rotatifs.

Les alternatives à ces séquences de déplacement plan (2D) sont des séquences de trajectoire 3D, c'est-à-dire que l'élément va sortir du plan formé par les positions initiale et finale. Ces séquences vont conduire à des infrastructures volumiques, des systèmes de convoyage et des robots manipulateurs.



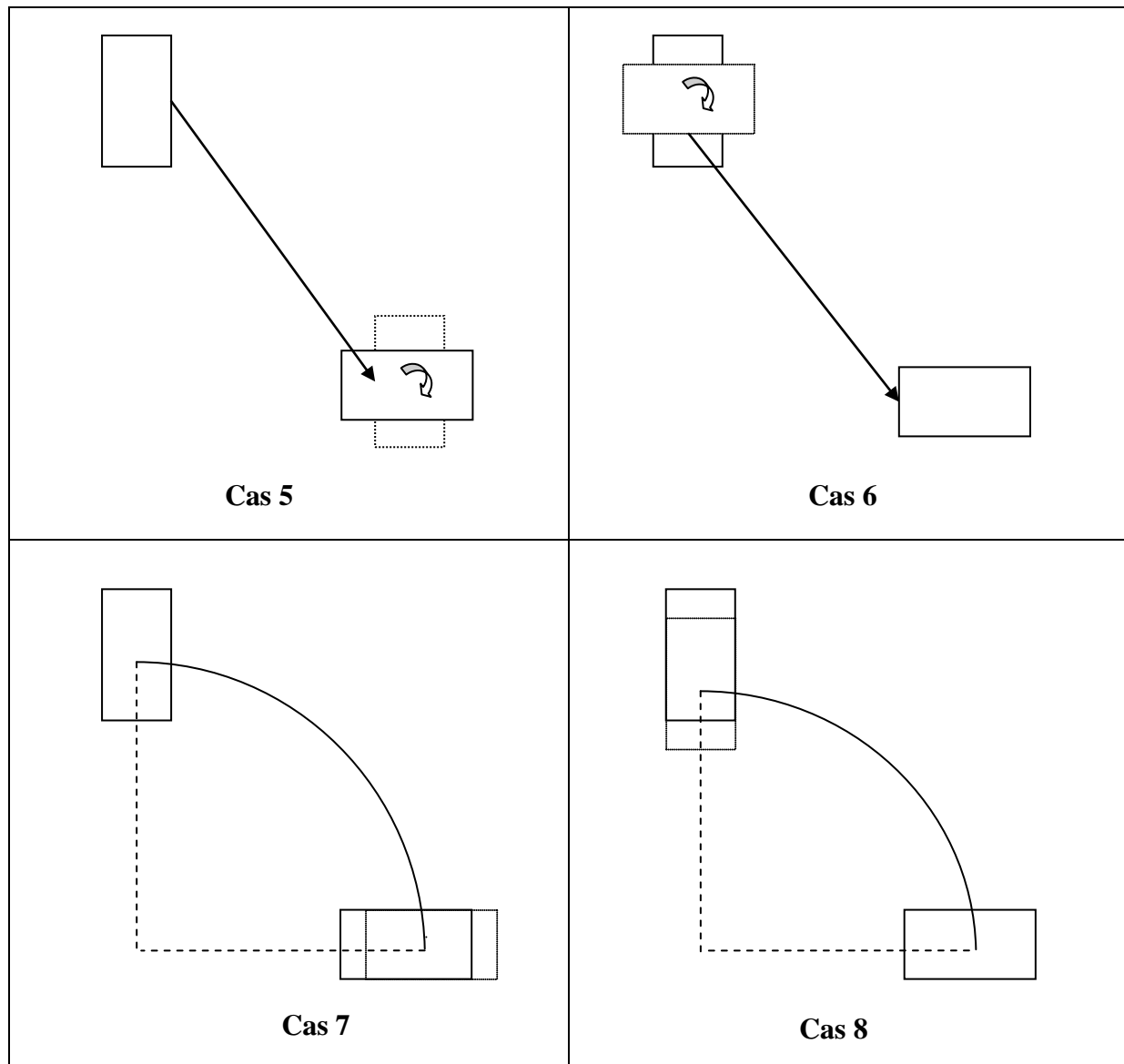


Figure 34. Analyse systématique des trajectoires planes possibles

4.3.4.4 Séquences génériques filles d'actions spécifiques

Les actions spécifiques sont des actions définies globalement par des verbes autres que ceux la famille « déplacer ». Par contre, aux niveaux inférieurs on aura des structures équivalentes à celle de la séquence générique mère mais se rapportant à l'outil ou au système réalisant l'action.

L'action spécifique se fait par une sous-action spécifique caractérisée par un verbe d'une famille différente de la famille « déplacer », elle est encadrée par des actions de type déplacement selon l'énumération :

- Récupération de l'outil ou du système,
- Mise en position de l'outil ou du système,
- Sous-action spécifique,
- Evacuation de l'outil ou du système.

La séquence générique s'écrit alors pour l'outil ou le système :

[Prendre ou récupérer ou dépiler ou] puis [déplacer ou avancer ou] puis [positionner ou centrer ou] puis [sous-action spécifique] puis [prendre ou déplacer ou évacuer ou]

Si l'outil est fixe, il n'y a pas besoin de séquence générique, la séquence mère décrit déjà le processus car c'est l'élément (semelle par exemple) qui se déplace.

4.3.4.5 Séquences génériques "filles" alternatives

La séquence précédente (§ 4.3.4.4) montre que pour réaliser l'action spécifique, on doit avoir un positionnement relatif de l'élément et de l'outil. On aura alors à réaliser, en simultané, un déplacement relatif et la réalisation de l'action. Les séquences génériques alternatives seront alors :

Cas 1 : l'outil ou le système est fixe

[Déplacer élément] et [fonctionner outil ou système]

Cas 2 : l'élément est fixe

[Déplacer outil (ou système)] et [fonctionner outil ou système]

Cas 3 : aucun n'est fixe

[Déplacer élément et outil (ou système)] et [fonctionner outil ou système]

Un exemple très rencontré dans les procédés MARQUET, illustrant les séquences génériques filles alternatives, est celui de la dépose de colle sur les semelles. Comme montre la Figure 35, la fonction « Enduire colle » peut être réalisée soit en déplaçant la semelle en gardant la buse de colle fixe (cas 1), soit en déplaçant la buse de colle tout en gardant la semelle fixe (cas 2).

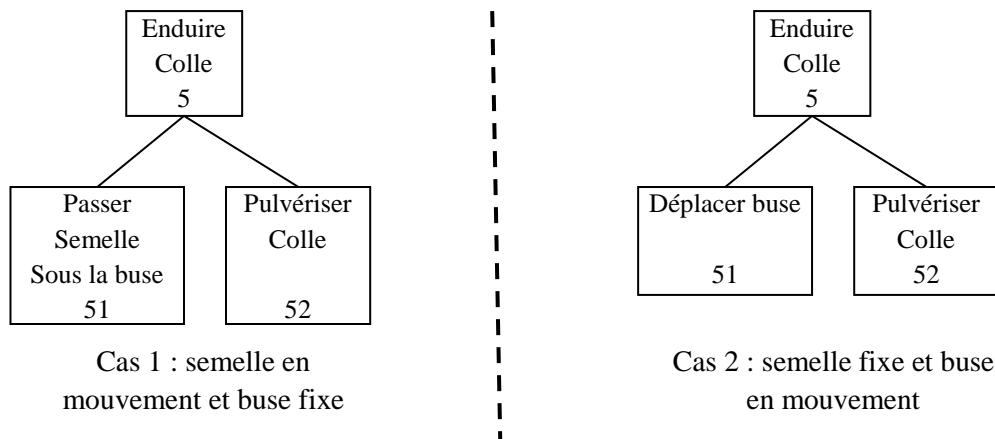


Figure 35. Séquences génériques filles alternatives pour la fonction « Enduire colle »

4.3.5 Utilisation de la séquentialisation générique

La séquence mère permet de définir le procédé et de discerner les actions spécifiques. Ces actions spécifiques seront soit connues (elles font partie de la base) ou inconnues, soit à remettre en cause dans le nouveau procédé. Cette analyse se fait donc à un niveau systémique élevé. Les nouvelles actions feront l'objet de conception innovante à partir de la méthode MAL'IN.

Les séquences filles permettent de descendre dans les niveaux systémiques et d'aller vers des tâches ou fonction élémentaires. Cette décomposition permet de correctement définir le procédé.

Il faut rappeler que le concepteur dispose de la base de connaissances et qu'il peut décider de l'utilisation de blocs fonctionnels, composants multifonctions connus et validés. Ces composants vont alors remplacer toute une chaîne de séquentialisation.

Les choix de tâches ou les évolutions de ces choix vont se faire à partir des critères de la STB. On pourra ainsi justifier les choix par :

- La diminution du temps de cycle de fonctionnement,
- L'augmentation de la productivité,
- La facilité de maintenance,
- La facilité de contrôle,
- Les différents coûts d'investissement, de possession,...
- Le temps de retour d'investissement
-

4.3.6 Généralisation à des procédés de montage ou d'assemblage

Les procédés MARQUET sont des procédés de montage ou d'assemblage. Nos séquences peuvent être utilisées pour tout procédé de montage ou d'assemblage. On peut donc dire que la phase d'analyse séquentielle s'appuie sur des séquences génériques de description de procédés de montage ou d'assemblage.

Nous représentons sur la Figure 36 et la Figure 37 un extrait d'une analyse séquentielle d'un procédé de montage de chaussons où nous pouvons visualiser clairement les différents types de séquences génériques. Cet extrait s'intéresse à une séquence générique mère construite avec des verbes de la famille "déplacer" et lié à l'action spécifique "encoller semelle". La séquence générique mère de l'exemple présenté est :

<p><i>[Prendre une forme montée] puis [déplacer la forme] puis [positionner la forme (sur la presse)] puis [encoller semelle] puis [poser semelle sur la forme]</i></p>

L'action spécifique « encoller semelle » se fait par une sous-action spécifique « **Enduire colle** » caractérisée par un verbe d'une famille différente de la famille « déplacer ». Ainsi, la séquence générique fille de l'action spécifique « encoller semelle » s'écrit :

<p><i>[Dépiler semelle] puis [déplacer semelle] puis [centrer semelle] puis [Enduire colle] puis [évacuer semelle]</i></p>
--

En utilisant les séquences génériques filles présentées sur la Figure 35, la fonction « Enduire colle » peut se faire de deux manières : soit en gardant la buse fixe et déplaçant la semelle (Figure 36) soit l'inverse (Figure 37). Dans le cas de la Figure 36, la séquence générique fille de la fonction de mise en position « déplacer semelle » est :

[Avancer semelle] puis [lever semelle] puis [retourner semelle].

Dans la Figure 37, « déplacer semelle » est décomposée en *[Avancer semelle] puis [poser semelle].*

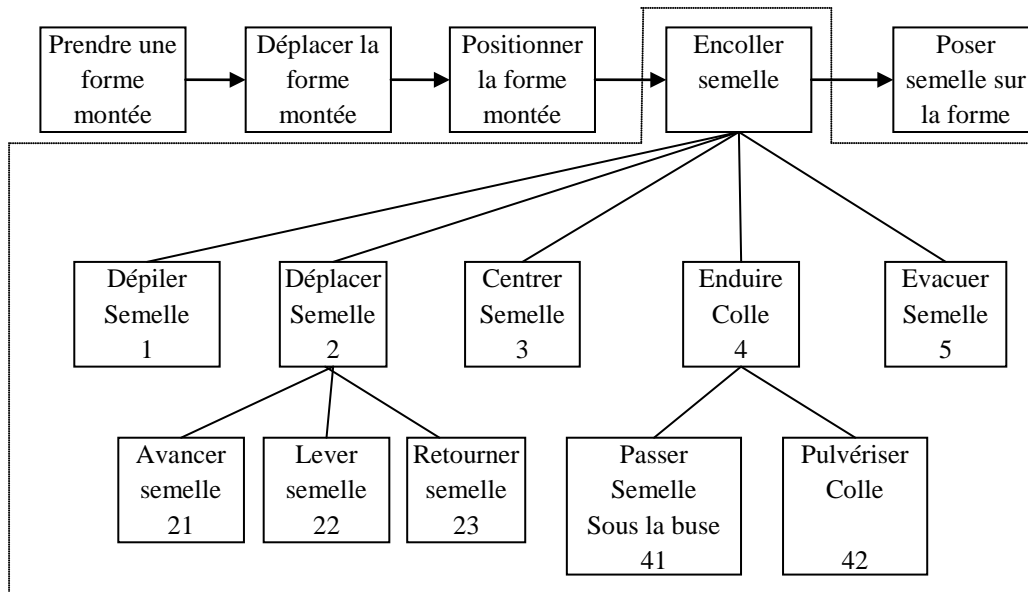


Figure 36. Extrait d'une analyse séquentielle d'un procédé de montage de chaussons utilisant une buse de colle fixe

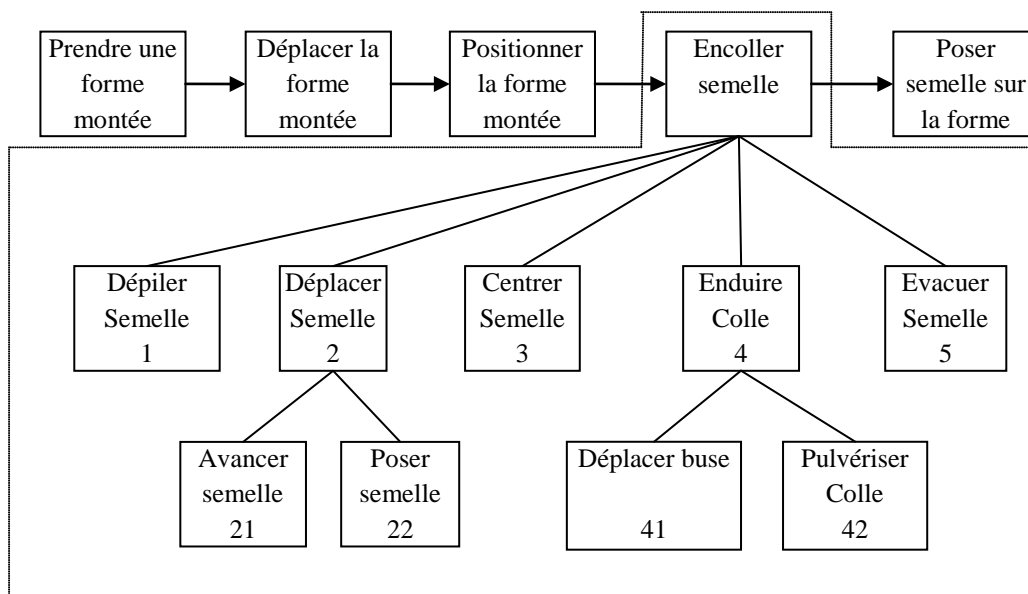


Figure 37. Extrait d'une analyse séquentielle d'un procédé de montage de chaussons utilisant une buse de colle mobile

Cependant, cette analyse systématique vers des fonctions de base (Figure 36, Figure 37) complexifie le système et son architecture. Elle augmente aussi le nombre de contrôles. Pour diminuer le nombre de fonctions élémentaires et simplifier l'architecture du système,

nous proposons une phase d’agrégation de fonctions qui permet combiner deux ou plusieurs fonctions.

4.4 Phase 3 : Agrégation de fonctions

4.4.1 Heuristiques de Stones et McAdams

La phase d’agrégation de fonctions est définie et utilisée pour combiner deux ou plusieurs fonctions élémentaires. La réalisation technique des fonctions agrégées conduira à une seule solution technique. Nous pouvons ainsi minimiser le nombre de composants et par conséquent simplifier l’architecture du système dès la phase amont de conception.

Dans leurs derniers travaux, Stone et al ont travaillé sur la simplification de l’architecture de systèmes dès la phase de décomposition fonctionnelle (Stone a & McAdams, 2004). En définissant une fonction comme étant la transformation d’un flux fonctionnel, ils proposent de regrouper les fonctions en modules et ensuite de chercher les solutions techniques module par module.

Le regroupement des fonctions en modules est basé essentiellement sur les types de flux aux entrées et aux sorties des fonctions. Stone et al ont défini trois heuristiques pour identifier les fonctions pouvant être regroupées (Stone & Kristin, 2000). Ces heuristiques sont :

1. *Heuristique du flux dominant* : Sur la Figure 38, chaque rectangle représente une fonction. L’ensemble des fonctions dont le flux à l’entrée est le même qu’à la sortie du système définissent un module.

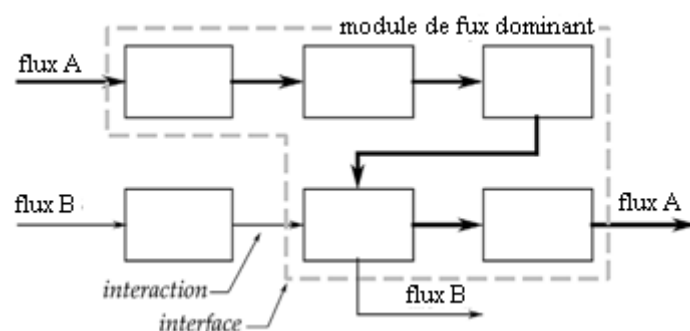


Figure 38. Représentation schématique de l’heuristique de flux dominant (Stone a & McAdams, 2004)

2. *Heuristique de la transmission de flux* : deux ensemble de fonctions en parallèles qui transmettent le même flux constituent des modules (Figure 39).

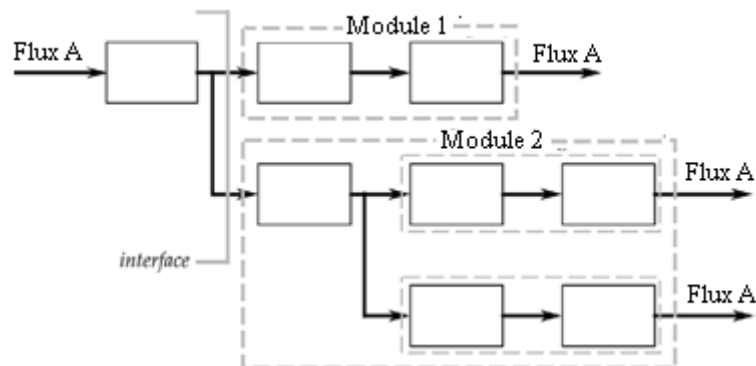


Figure 39. Représentation schématique de l'heuristique de la transmission de flux (Stone a & McAdams, 2004)

On retrouve dans ces deux heuristiques notre notion de transmetteur. Dans notre vision, ce module est globalement un transmetteur donc directement considéré comme un bloc et naturellement vu comme un module transmetteur. Nous le rappellerons dans nos heuristiques de second niveau d'agrégation de la phase 5.

3. *Heuristique de conversion-transmission* : une fonction de conversion ou des fonctions de conversion-transmission de flux constituent un module (Figure 40).

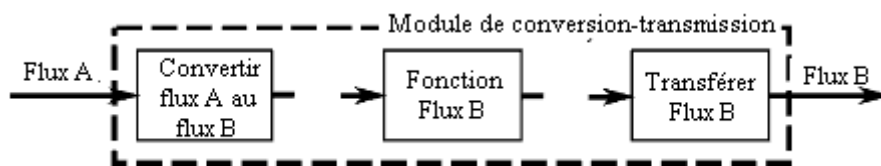


Figure 40. Représentation schématique de l'heuristique "convertir-transmettre" (Stone a & McAdams, 2004)

Cette heuristique est une expression partielle (élimination des transmetteurs) des heuristiques d'évolution d'un système "CTOC" exprimées au paragraphe §3.2.1.2.

L'application des heuristiques de Stone nécessite avant tout la spécification de tous les flux (énergie, matière, signal) à l'entrée et à la sortie de chaque fonction. Cela n'est pas le cas

au stade où nous en sommes dans l'analyse. Nous définirons des heuristiques comparables dans la phase 5 quand les premières solutions et les types de flux seront connus.

4.4.2 Heuristiques d'agrégation proposées

L'originalité de notre travail est d'utiliser simplement l'expression de la fonction et la sémantique développée par les bases de verbes et de compléments pour structurer cette phase d'agrégation. En effet, le choix des fonctions pouvant être agrégées dépend des verbes avec lesquels les fonctions ont été exprimées.

Les verbes issus de la même classe secondaire ou tertiaire de la base des verbes et associés au même complément représentent des fonctions de même type, qui peuvent éventuellement être agrégées et réalisées par la même solution technique ou par un même composant multifonctions.

La notion de verbe père permet donc de sélectionner les fonctions pouvant être agrégées. A partir de ce constat, nous proposons une première heuristique:

Heuristique 1 : *Les fonctions relevant d'un même verbe père de classe 2 ou de classe 3 associées au même complément ou aux compléments de même caractéristiques physiques, peuvent être agrégées et réalisées par un composant unique.*

Cette heuristique se décline en une liste de solutions particulières. Cette liste est tirée de l'analyse des procédés existants et de l'expérience de conception au sein de l'entreprise partenaire. Parmi les solutions proposées et associées de cette première heuristique, nous pouvons citer :

- Pour plus de 3 fonctions de déplacement, utiliser un robot avec un préhenseur adéquat.
- Pour 2 fonctions de déplacement suivant une même direction, ayant une position d'arrivée ou de départ commune, utiliser un vérin avec une position intermédiaire.
- Deux fonctions de déplacement en translation et en rotation peuvent être agrégées et réalisées par un vérin roto-linéaire.

A titre d'exemple, la Figure 41 représente une décomposition fonctionnelle de la fonction principale "encoller semelle" (partie encadrée Figure 36) ; les allocations et les transitions ne sont pas présentes afin de simplifier le graphe. A travers cette décomposition, nous illustrons l'application de cette première heuristique.

Les fonctions 1, 21, 22, 23, 41 et 5 appartiennent au même verbe père de classe 2 "déplacer" et sont associées au même complément "semelle" donc elles sont susceptibles d'être agrégées. Ce regroupement en une seule fonction permet de réduire les composants et de simplifier les contrôles.

Ainsi, nous ramenons le problème de huit fonctions élémentaires à trois fonctions (déplacer semelle, centrer semelle, pulvériser colle), ce qui engendre par conséquent un gain de temps dans la recherche de solutions et aussi une réduction du nombre de composants.

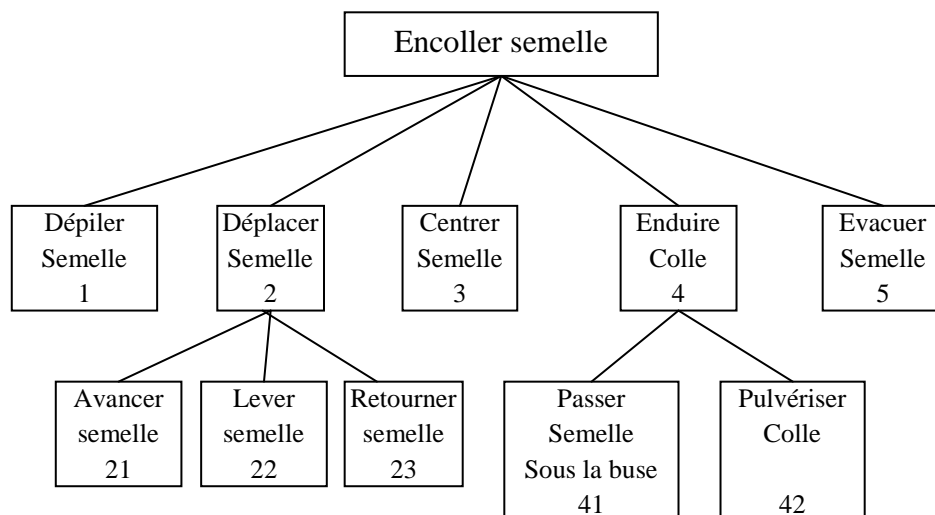


Figure 41. Décomposition fonctionnelle de la tâche "encoller semelle".

Cette première façon d'agréger qui consiste à regrouper six fonctions de déplacement conduit au choix d'un robot avec un préhenseur comme solution technique. La Figure 42 présente une partie d'une machine d'assemblage où nous pouvons visualiser l'application concrète de cette heuristique pour l'exemple étudié. Le déplacement de la semelle est assuré par un robot et une main de préhension. La pulvérisation se déclenche au moment où la semelle est présente sous la buse fixée verticalement.

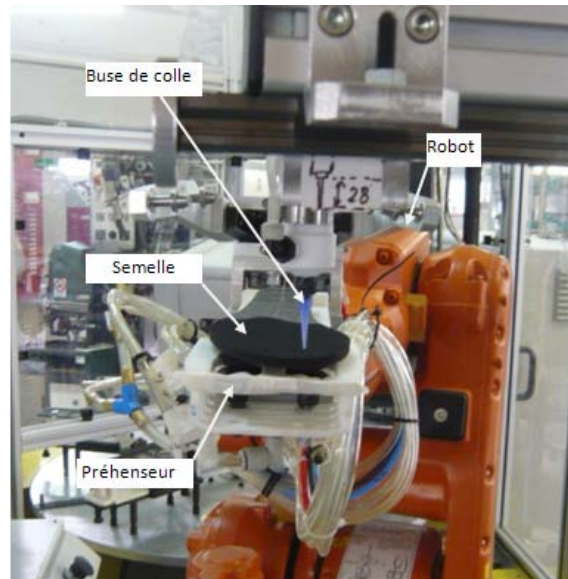


Figure 42. Machine d'assemblage-dispositif d'encollage

Le même problème de conception (Figure 41) peut être étudié différemment. La première heuristique peut être appliquée d'une autre manière. En effet, les fonctions 1, 21, 22 et 23 ont des verbes associés au même complément "semelle" et issus du même verbe père de classe 2 "déplacer" donc peuvent être agrégées et réalisées par un composant unique C1. Ce composant C1 est un système à 3 axes constitué par trois vérins linéaires (Figure 43).

De même, les fonctions 41 et 5 relèvent du même verbe père de classe 3 "transférer" et sont associées au même complément "semelle" donc peuvent aussi être agrégées et réalisées par un composant unique C2. Ce dernier est un vérin linéaire sur lequel est fixé un plateau. L'avance du plateau portant la semelle sous la buse de colle déclenche la pulvérisation.

Ainsi, le problème est ramené de huit fonctions élémentaires à quatre fonctions.



Figure 43. Machine d'encollage-dispositif de manutention C1

La décomposition fonctionnelle de la tâche "encoller semelle" (Figure 41) peut être représentée différemment en utilisant les séquences génériques filles alternatives pour la fonction "Enduire colle" (Figure 37). En effet, au lieu d'avoir une buse fixe et une semelle mobile, on peut avoir une semelle fixe sous une buse de colle mobile (Figure 44).

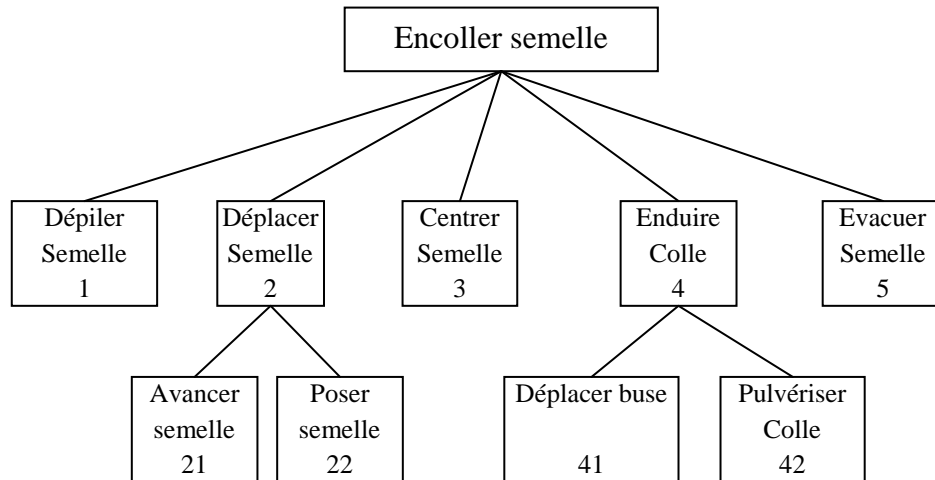


Figure 44. Décomposition fonctionnelle de la tâche "encoller semelle", deuxième possibilité

En appliquant la première heuristique, les fonctions 1, 21, 22 et 5 appartiennent au même verbe père de classe 2 "déplacer" et sont associées au même complément "semelle" donc elles sont susceptibles d'être agrégées et peuvent être réalisées par un composant unique C.

D'autre part, la fonction 4 "Enduire colle" se décompose en deux fonctions simultanées 41 et 42 dont leurs verbes sont issus du même verbe père de classe 2 "déplacer". Cependant, les compléments associés aux verbes pour l'expression de ces fonctions sont différents et n'ont pas les mêmes caractéristiques physiques. Vu que les fonctions "déplacer buse" et "pulvériser colle" sont exprimées par des verbes issus du même verbe père que les fonctions 1, 21, 22 et 5, elles peuvent alors être agrégées au composant unique C par un composant d'interaction.

Cette logique, adoptée dans plusieurs exemples de conception au sein de la PME, nous a permis de proposer une deuxième heuristique d'agrégation des fonctions.

Heuristique 2 : Des fonctions relevant d’un même verbe père mais de compléments différents, peuvent être agrégées à un composant unique par un composant d’interaction ou un outillage adéquat.

En appliquant les deux heuristiques d’agrégation sur le graphe de décomposition fonctionnelle de la tâche d’encollage présenté Figure 44, nous ramenons le problème de huit fonctions à deux fonctions (déplacer, centrer).

La Figure 45 représente une partie d’une machine d’assemblage où nous pouvons visualiser l’application concrète de ces heuristiques pour l’exemple étudié. Le déplacement des pièces est assuré par un robot et une main de préhension. La buse de colle est fixé au préhenseur du robot par un support adéquat. La colle est amenée par des flexibles et la pulvérisation est commandée par le programme du robot.

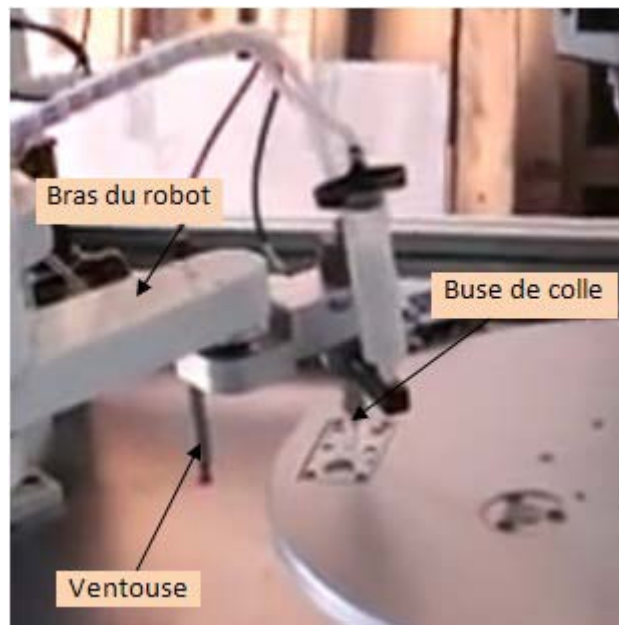


Figure 45. Préhenseur d’un robot comprenant une ventouse pour le déplacement de pièces et une buse de colle pour l’encollage

4.5 Phase 4 : Recherche de solutions techniques

4.5.1 Utilisation de la base de connaissances

Cette phase est basée principalement sur l'utilisation de la base de connaissances. L'élément d'entrée dans la base est la fonction élémentaire. L'interrogation de la base est définie par le synoptique présenté au chapitre 3 (Figure 30). Le but de la réutilisation est de retrouver, pour une fonction déjà connue dans la PME, toutes les informations pertinentes permettant sa mise en œuvre. En s'aidant des effets produits et induits ainsi que de la fiche de critères de pertinence associés à chaque solution technique, le concepteur pourra faire un choix.

Lorsqu'il s'agit d'une nouvelle fonction ou lorsque les solutions proposées par la base de connaissances sont non satisfaisantes, nous recherchons d'autres solutions industrielles déjà réalisées et proposées par des fournisseurs. La base de connaissances sera enrichie par les solutions trouvées. Dans le cas où on n'a pas trouvé de solutions industrielles matures, on résout le problème par des sessions de créativité.

4.5.2 Recherche de solutions innovantes

La recherche de solutions innovantes se base sur un processus créatif (Méthode d'Aide à L'INnovation) guidé par le logiciel de conduite d'études MAL'IN. On dispose d'une méthodologie complète, systématique et organisée, pour la recherche de concepts innovants (Figure 46). La méthodologie se base sur la succession de 3 étapes :

- Une phase d'analyse et de structuration, cette phase se base sur l'analyse fonctionnelle, sur une vision organique (l'organigramme technique étendu aux milieux extérieurs) et sur une vision physique et structurelle (flux physiques et blocs diagrammes fonctionnels) ;
- Une phase de formalisation du problème sous forme de biais d'attaque du problème, sous forme de contradictions ou de simplification à l'instar de TRIZ. Ces biais d'attaque sont d'une part, trouvés à partir de l'analyse des comportements physiques lors de la réalisation de l'action et, d'autre part, par l'analyse du graphe substance/champs de la théorie TRIZ,

- Une phase de résolution à partir des outils classiques TRIZ dont certains ont été adaptés pour la méthode MAL’IN.

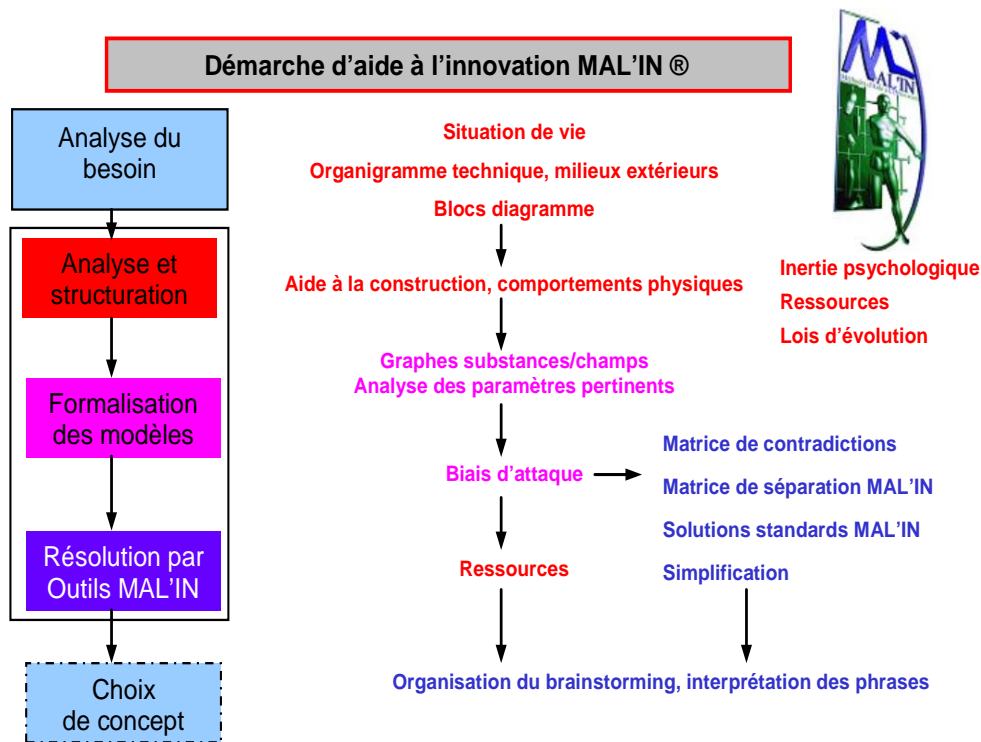


Figure 46. Principe de résolution de la méthode MAL'IN (TREFLE, 2004)

Comme montre la Figure 46, la conduite d’une action de recherche de nouveaux concepts part d’une analyse fonctionnelle. Cette analyse fonctionnelle est ici réduite pour le moment à la fonction spécifique que nous ne savons pas réaliser ou que nous voulons remettre en cause. Nous allons donc soit partir de l’analyse de l’existant Marquet que l’on remet en cause, soit partir d’un existant d’un procédé concurrent, soit d’un procédé manuel. Souvent le problème à résoudre est résolu par un procédé manuel que l’on remet en cause.

Cette analyse va nous permettre d’identifier les fonctions de service et les fonctions contraintes associées au système global et aux différentes situations de vie, ainsi que de déterminer à quel niveau systémique se pose le problème.

A l’issue de cette phase, nous listons les comportements physiques associés et les paramètres physiques pertinents à l’origine du problème à résoudre. Pour cela, il s’agit d’écrire les relations liant les paramètres pertinents de la réalisation d’une action selon Nadeau et al. (Nadeau 1 & Pailhès, 2007) et Sallaou et al. (Pailhès, Sallaou, Nadeau, & Fadel, 2010) :

- La loi de conservation de l'énergie,
- La relation fonctionnelle,
- Les effets produits,
- Les effets induits.

On peut ainsi voir exhaustivement l'influence des comportements physiques et des paramètres pertinents. Cette analyse va conduire à l'expression de biais d'attaque de type "contradiction technique", "contradiction physique" et "simplification" (Pailhès a & Nadeau, 2007)

Toutes ces données vont aussi permettre la formulation fonctionnelle graphique du problème à l'aide du Bloc Diagramme Fonctionnel puis, par déduction, la formulation du graphe des associations Substances/Champs : La substance est définie comme étant tout élément à masse non nulle et/ou volume non nul (composants, milieux extérieurs). Le champ est l'effet physique réalisant l'action, il est l'expression d'un flux. L'effet peut être utile, nuisible ou utile insuffisant (Figure 47).

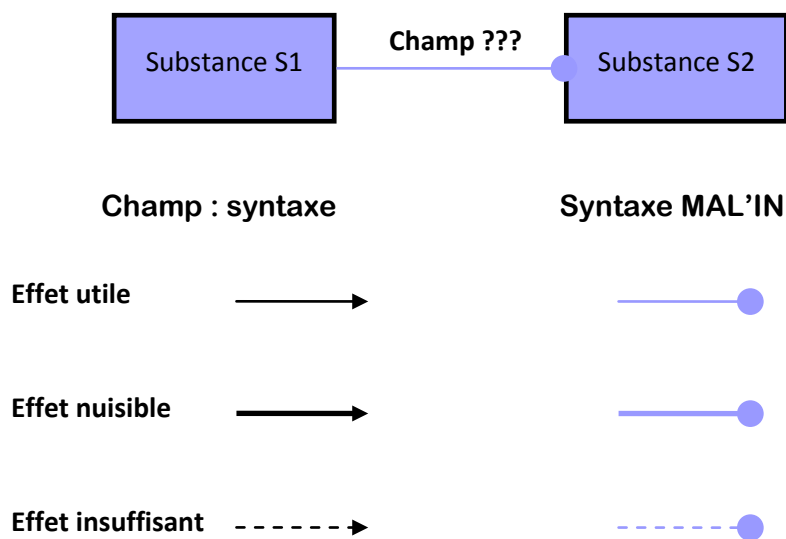


Figure 47. Association Substance/champs selon la syntaxe MAL'IN

Le Bloc Diagramme Fonctionnel mis en place par l'Analyse de la Valeur, met en évidence sur une représentation unique les flux qui existent entre les composants du système, ainsi qu'avec les milieux extérieurs. Le graphe Substances/Champs (Figure 48) se distingue par l'expression d'un verbe d'action (champ) et par une substance émettrice et une substance réceptrice. Le champ va traduire les flux fonctionnels souhaités pour la réalisation des

fonctions ainsi que les flux liés aux effets produits et induits. La Figure 48 présente un exemple de graphe substances/champs d’une ligne de conditionnement.

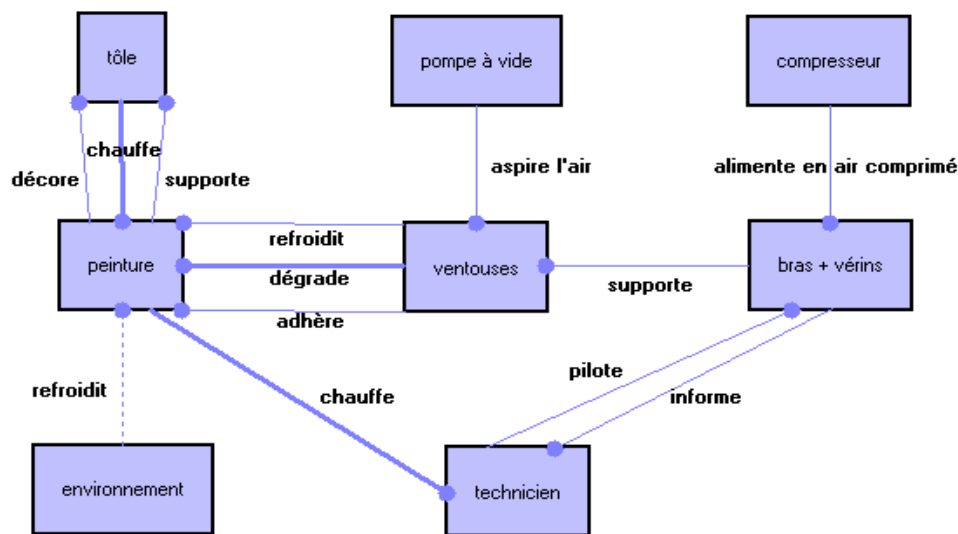


Figure 48. Graphe substances/champs d’une ligne de conditionnement de carrosserie de congélateurs, syntaxe MAL’IN

L’analyse du graphe des substances/champs permet aussi de dégager les biais d’attaque du problème (Annexe 1). Bien évidemment, on retrouve les biais d’attaque obtenus par l’analyse des comportements physiques.

Le graphe permet aussi de définir des biais d’attaque particuliers quand une substance ou un champ nécessaire ne sont pas connus ou définis, on parle alors d’association insatisfaisante et on utilise un logigramme adapté de la théorie TRIZ.

La définition des biais d’attaque et les outils de résolution associés sont exprimés ci-dessous :

- **Contradiction physique** : Une contradiction physique est l’opposition de deux requêtes formulées par le système. Une substance ou un champ doivent présenter des caractéristiques opposées. Ces caractéristiques opposées sont facilement perceptibles lors de l’analyse physique.

Dans ce cas, la résolution consiste à séparer les exigences contradictoires selon la matrice des séparations MAL’IN.

- Contradiction technique : Une contradiction technique est une situation dans laquelle l'amélioration d'une action ou d'un paramètre en dégrade un autre.
Dans ce cas, la résolution consiste à reporter sur la matrice des contradictions de TRIZ en ordonnées, le paramètre de conception à améliorer et, en abscisse, le paramètre dégradé. A l'intersection ligne/colonne, on accède aux principes d'innovation les plus employés pour résoudre le problème.
- Association insatisfaisante : Nous cherchons dans ce cas à améliorer l'association en suivant les solutions standards proposées dans la théorie TRIZ. La complexité des phrases a été réduite pour les rendre plus accessibles. MAL'IN propose un logigramme pour le choix de solutions standards, qui permet d'aller rapidement vers des classes ou sous classes de solutions standards en répondant aux questions posées.
- Simplification, élimination de substances : Le but est d'éliminer une substance dont la fonction est redondante tout en assurant ses autres fonctions utiles par d'autres substances. L'élimination de substances rend l'association incomplète donc insatisfaisante. On cherche alors à la reconstruire en faisant réaliser les actions utiles par d'autres composants ou substances, par la substance source ou réceptrice elle-même, par des ressources existantes ou par l'environnement (milieux extérieurs).
Un nouveau graphe est alors réalisé et peut conduire aux trois méthodes de résolution. Le logigramme peut être utilisé directement.

La résolution des biais d'attaque par les méthodes préconisées par MAL'IN donnera lieu à plusieurs idées qui seront récapitulées et/ou combinées en une liste de concepts. Développer plusieurs concepts est une solution coûteuse. Sélectionner un seul concept pour qu'il fasse l'objet de développement est moins onéreux, mais risqué. Pour cette raison, l'outil MAL'IN fournit également des outils de qualification des différents concepts de solution obtenus.

Pour un concept choisi à partir de la liste de concepts obtenus par MAL'IN, nous poursuivons notre démarche de recherche de solutions techniques (phase 4 dans le synoptique Figure 31) par une phase d'étude de faisabilité technique ainsi qu'une phase de prototypage dans la PME MARQUET, qui est équipée d'une machine de frittage laser par poudre polyamide. Si le concept choisi est satisfaisant, il définira alors une nouvelle solution technique qui sera intégrée dans notre base de connaissances. Dans le cas où le concept n'est

pas satisfaisant, le concepteur en choisira un autre parmi la liste de concepts obtenus grâce à MAL'IN.

4.5.3 Synoptique de recherche de solutions techniques

Pour résumer, la Figure 49 illustre le déroulement de la recherche de solutions techniques, proposée dans notre processus de conception. Il inclut la réutilisation de connaissances pour les solutions déjà connues à partir d'une base de connaissances, présentée dans le chapitre 3. Il inclut également une recherche de solutions industrielles extérieures à la base, ainsi qu'un processus itératif guidé par l'outil MAL'IN pour les nouvelles fonctions ou lorsque les solutions proposées par la base de connaissances sont non satisfaisantes.

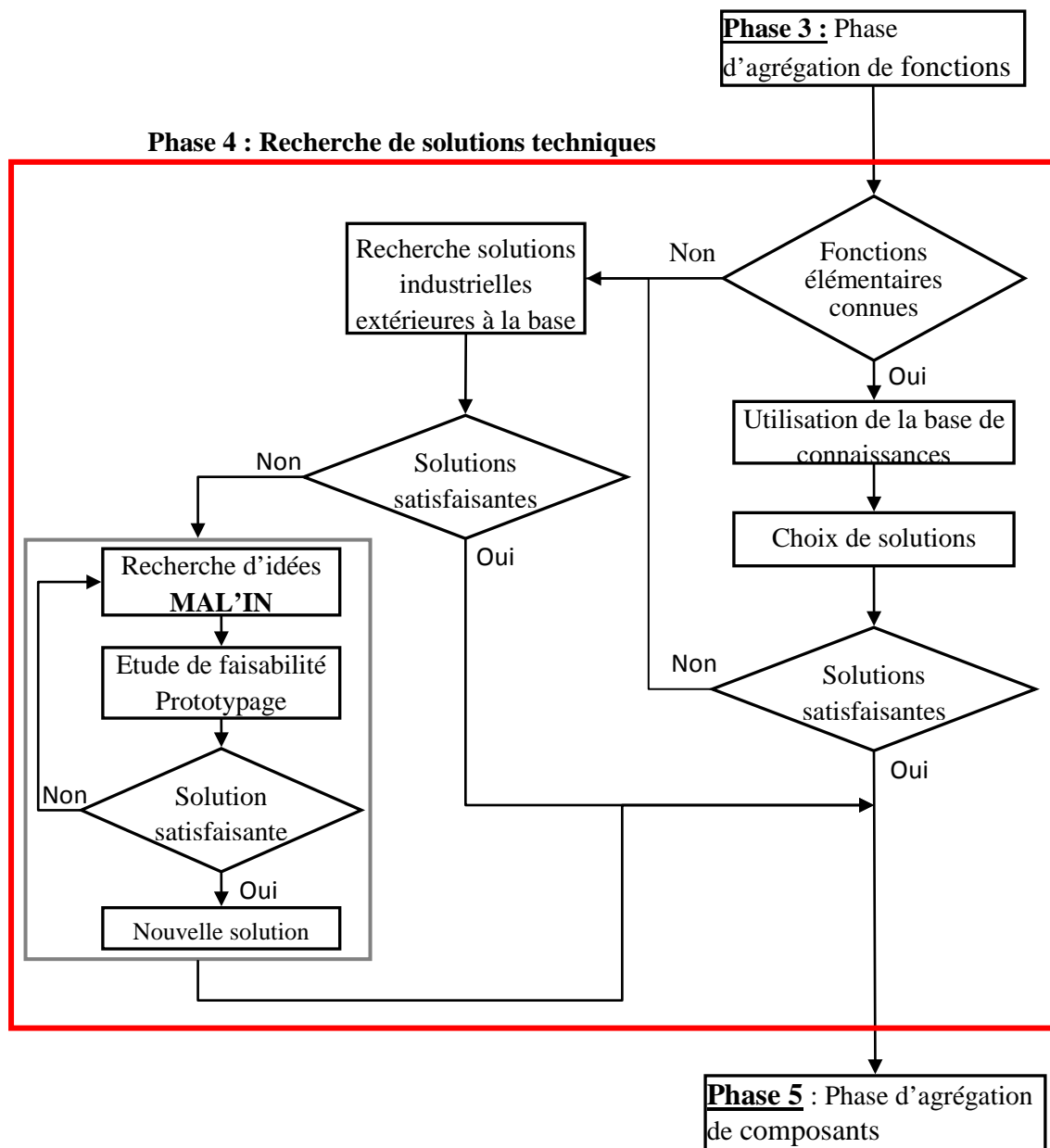


Figure 49. Synoptique de recherche de solutions techniques : Phase 4 du processus de conception

4.6 Phase 5 : Agrégation de composants

Généralement, dans les démarches de conception, la phase qui succède le choix des solutions techniques est la phase d'assemblage afin d'obtenir le système complet (Pahl & Beitz, 1988). Dans ce cas, les solutions techniques choisies ne sont pas remises en cause et le concepteur ne cherche qu'à mieux les définir, les assembler et les faire communiquer via leurs interfaces. Son but est de trouver l'architecture qui répond à ses critères de conception.

En général, les liaisons entre les composants "solutions", l'étude de dépendance entre eux ainsi que les possibilités d'agrégation ne sont pas toujours évoquées dans la littérature.

Afin de tenir compte de ces différents points, nous proposons dans notre démarche de conception une deuxième phase d'agrégation. Nous cherchons à étudier les liens entre les composants dans le but de diminuer leur nombre et de faciliter par la suite la phase d'agencement de solutions.

Une solution technique dans notre vision énergétique est représentée par une chaîne CTOC. En se basant sur cette approche, nous proposons des heuristiques d'agrégation internes dans la chaîne CTOC et d'autres externes (de plusieurs chaînes CTOC).

4.6.1 Agrégations internes dans la chaîne CTOC

Les agrégations internes dans la chaîne CTOC sont liées à chaque type de composant (Convertisseur, Transmetteur, Opérateur, Contrôle).

L'heuristique 3, déjà énoncée dans le chapitre 3, concerne les évolutions des systèmes CTOC.

Heuristique 3 : Les systèmes CTOC évoluent de la manière suivante :

- *Le Transmetteur disparaît en laissant place simplement à une interaction directe entre Convertisseur et Opérateur,*
 - *Les Convertisseur et Opérateur se jumellent et forment un bloc fonctionnel compact qui assure directement l'action voulue. L'ensemble est vu comme un Convertisseur,*
 - *Si l'énergie nécessaire n'a pas besoin de transformation, il n'y a donc pas de convertisseur. L'ensemble est vu comme un Transmetteur.*
 - *La position du contrôle doit être optimisée et le système de contrôle/commande peut aller jusqu'à un asservissement.*
-

La quatrième heuristique d'agrégation concerne les convertisseurs et les transmetteurs. En effet, si une même énergie est nécessaire dans la réalisation de deux ou plusieurs fonctions alors cette énergie peut être fournie par le même convertisseur ou transmise par le même transmetteur.

A partir de ce constat, une heuristique d'agrégation de convertisseur et de transmetteur est proposée.

Heuristique 4 : *Les composants convertisseurs ou transmetteurs peuvent être agrégés s'ils produisent ou transmettent des flux fonctionnels de même nature.*

L'application de cette heuristique consiste à limiter au maximum les types d'énergies utilisées, ce qui permet d'agréger au maximum les convertisseurs/transmetteurs ou de limiter leur nombre.

La cinquième heuristique d'agrégation proposée est liée aux composants de contrôle. Elle est une conséquence de l'heuristique 4. L'agrégation des composants a pour conséquence une agrégation du contrôle. En effet, si nous diminuons le nombre de convertisseurs ou de transmetteurs par agrégation, nous diminuons le nombre de contrôle/commande liés à ces composants.

D'autre part, l'agrégation de composants vers un composant multifonction permet d'agréger tous les composants de contrôle/commande dans le même composant multifonction (un robot par exemple).

Dans la conception de la machine d'assemblage (Figure 42), l'utilisation du robot a permis de se servir de ses programmes pour le contrôle/commande des fonctions agrégées qu'il réalise (encollage, dépilage, déplacement).

Heuristique 5 : *L'agrégation de composants permet d'agréger les composants de contrôle/commande.*

La sixième heuristique proposée concerne le composant Opérateur. Ce dernier est généralement un outillage. Or dans le domaine de la chaussure, le nombre d'outillage est important du fait de la variabilité des pointures, des modèles ainsi que de la contrainte du pied gauche et pied droit.

Cette heuristique 6 est primordiale car elle va conduire à une réduction par agrégation du nombre d'outillages. L'agrégation va jouer sur l'effet de gamme ou sur l'utilisation de symétrie.

Heuristique 6 : *Si une fonction impose une solution technique avec adaptation d'outillages, il faut réduire leur nombre par agrégation.*

L’heuristique 6 a déjà été appliquée pour plusieurs procédés de la PME MARQUET. Dans un procédé d’assemblage par exemple, la fonction « positionner semelle gauche » était réalisée initialement par usinage du périmètre de la semelle gauche sur un plateau. Une empreinte de faible hauteur était usinée sur un plateau dont la forme et les dimensions correspondaient à celles de la semelle gauche. De même, la fonction « positionner semelle droite » a été réalisée avec un plateau similaire. Pour une série de pointure de 36 à 41 et pour un seul modèle de chausson, nous avons donc 12 plateaux à gérer.

En appliquant l’heuristique 6, nous avons agrégé les deux plateaux en jumelant la semelle gauche et la semelle droite sur un même plateau. Nous avons agrégé toutes les pointures en intégrant les empreintes des semelles les unes dans les autres. Ainsi nous sommes passés de 12 plateaux à un seul plateau.

Pour quelques modèles de chaussons, l’application de cette heuristique a même conduit à avoir une semelle à pied unique et donc utiliser le même plateau quelle que soit la semelle.

A partir de l’expérience acquise, nous proposons la fiche heuristique 6, disponible en annexe N°2, et liée à la conception d’un outillage.

4.6.2 Agrégations externes de chaînes CTOC

Les agrégations externes de chaînes CTOC concernent l’agrégation des solutions techniques en tant que bloc fonctionnel. Il s’agit d’étudier la dépendance entre différentes solutions. L’étude de dépendance dans notre cas permet de connaître la solution technique imposée par un choix précédent.

L’utilité de proposer l’heuristique 7 est d’inciter le concepteur à vérifier durant cette phase du processus s’il y a des dépendances entre solutions.

L’heuristique 7 sera accompagnée d’une liste de solutions et leurs dépendances issues des procédés MARQUET, c’est le cas par exemple d’un robot et d’un système de vision. En effet, le positionnement des pièces par un robot peut imposer un système de vision.

Heuristique 7: *Une solution technique donnée peut imposer une autre solution ou un contrôle particulier.*

Les heuristiques d'agrégation de composants seront à la disposition du concepteur pendant la phase 5 du processus de conception, accompagnées de tous les exemples d'application rencontrés dans les procédés MARQUET.

4.7 Phase 6 : Agencement et qualification du système

4.7.1 Agencement

Les problèmes d'agencement ont fait l'objet de nombreuses études dans la littérature. Les complexités de ces problèmes sont dues aux nombreuses variantes qui peuvent générer des modélisations et des méthodes de résolution différentes. De surcroît, les contraintes et les objectifs peuvent varier, nécessitant des adaptations, voire des refontes complètes des modèles.

Les problèmes d'agencement sont généralement présentés comme des problèmes multi-objectifs avec des objectifs contradictoires (Jacquenot, 2010). Toutefois, la plupart des méthodes de résolution proposées transforment les problèmes d'optimisation multi-objectif en une optimisation mono-objectif non contrainte, où objectifs et contraintes sont agrégés dans une seule et même fonction (Cagan, Shimada, & Yin, 2002).

Dans le cas de conception de systèmes complexes, nous retrouvons principalement les problèmes d'agencement tridimensionnel (Jacquenot, 2010). Ils sont caractérisés par des composants de géométrie complexe, des formulations d'objectifs difficiles, des temps de calculs longs liés à l'évaluation des objectifs et des contraintes.

De nombreux exemples d'agencement 3D sont traités dans la littérature avec des méthodes spécifiques (Cagan, Clark, Dastidar, & Szykman, 1996), (Yin, 2000), (Yin a, Cagan, & Hodges, 2004). Il n'existe pas donc de méthodes standards valables pour tout problème d'agencement. D'autres part, les méthodes proposées sont complexes et sont basées sur des algorithmes et des outils de calculs lourds à mettre en place dans le cadre d'une PME.

Pour ces raisons, nous pensons pour la PME MARQUET qu'il est judicieux d'utiliser des heuristiques d'agencement afin de trouver un ou plusieurs architectures de procédé possibles.

A cette fin, nous définissons un problème d'agencement comme étant à la fois un problème de placement et de liaison. Un positionnement relatif des solutions techniques par rapport à une référence ainsi qu'une liaison entre elles sont recherchés. Prenant en compte également les problèmes liés à l'environnement et à l'interaction homme-machine, nous cherchons à identifier les objectifs ou les contraintes permettant à l'élaboration des heuristiques d'agencement.

La Figure 50 présente une modélisation d'un problème d'agencement de solutions techniques : le système est composé de n composants reliés entre eux et avec une référence. La disposition des composants entre eux et par rapport à la référence constitue un problème de placement pour lequel nous proposons des heuristiques de placement.

Des heuristiques d'interaction sont également proposées et sont liées aux interactions entre les différents composants. Les interactions concernent aussi les milieux extérieurs.

L'homme, c'est-à-dire l'utilisateur est un milieu extérieur particulier, son interaction avec le procédé va imposer la maîtrise de la sûreté de fonctionnement et de l'interface homme/machine. L'environnement du procédé va être affecté (ou inversement) par le fonctionnement du procédé et imposer des contraintes de développement durable. La prise en compte de l'homme et de l'environnement lors de la phase d'agencement débouche donc vers des heuristiques de sûreté de fonctionnement et des heuristiques de développement durable.

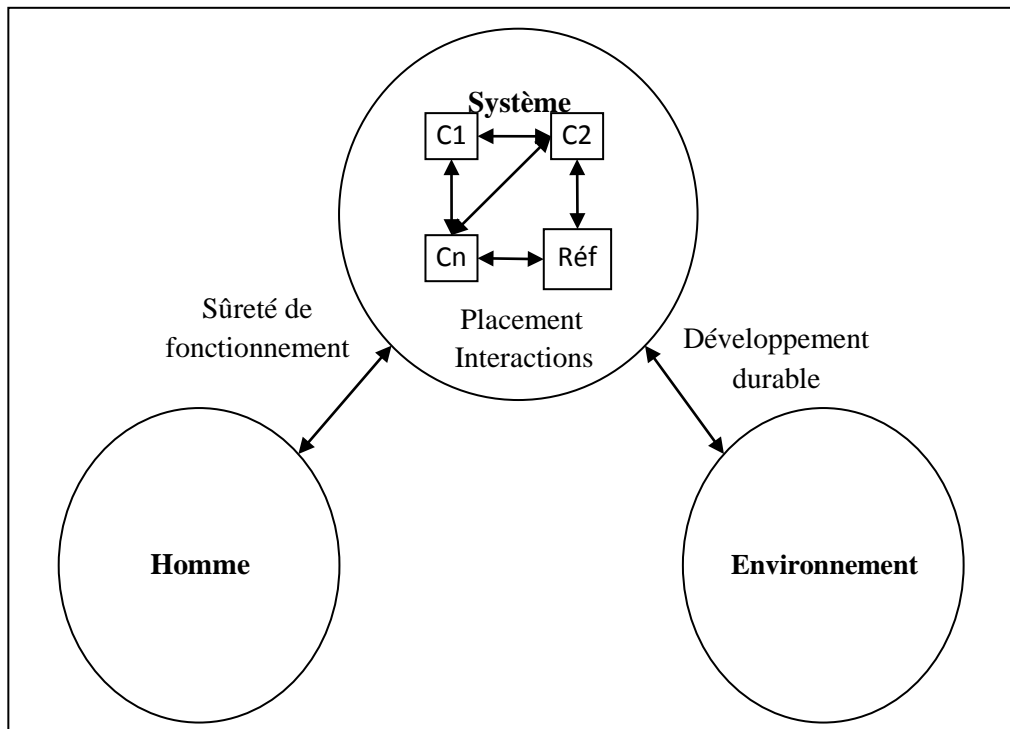


Figure 50 . Modélisation d'un problème d'agencement

4.7.2 Heuristiques de placement

Une référence est un élément physique par rapport auquel l'ensemble des composants doit être positionné. Les composants et la référence sont fonctionnellement et géométriquement reliés entre eux. Des contraintes de non-chevauchement et des interactions entre composants ainsi que des contraintes d'appartenance sont généralement présentes. Ces contraintes définissent les contraintes de placement du problème d'agencement. Nous proposons deux heuristiques liées à ce type de problèmes.

Heuristique 8: *Les composants doivent être positionnés et liés à une référence de façon directe ou indirecte.*

Cette heuristique constitue le point de départ de la phase d'agencement. Il s'agit tout d'abord de définir la référence machine (socle, châssis,...) constituant une référence pour les composants. Les composants doivent être tous liés d'une façon directe ou indirecte à cette référence. Si la référence est un socle ou un châssis, le procédé réalisé aura une cohérence et son indépendance. C'est le but de l'entreprise MARQUET qui change souvent la disposition des machines en fonction des produits à fabriquer.

Heuristique 9: *L'encombrement de la machine doit être réduit en adoptant des architectures évoluant selon la logique : 1D → 2D → 3D → 4D.*

L'évolution de la conception d'une machine va la faire passer par tous les stades de 1D à 4D. La vision séquentielle et les systèmes classiques de manutention et de déplacement conduisent naturellement à une évolution dans une seule direction avec des positions successives dans une seule direction (1D).

La réduction des parcours va imposer des déplacements en rotation et tout naturellement les positionnements se feront dans un plan (2D).

La maîtrise de l'encombrement est liée à des déplacements dans l'espace. La machine va intégrer des composants permettant l'évolution dans l'espace, elle devient 3D.

Pour finir, l'agencement de la machine peut évoluer dans le temps selon les moments significatifs ou les types de produits à fabriquer, l'architecture est devenue 4D car elle change dans le temps.

L'application de l'heuristique 9 permet de répondre à un problème de compacité et d'adaptation.

4.7.3 Heuristiques d'interaction

Les interactions entre composants concernent le passage des flux fonctionnels. Ces flux concernent les énergies, les matières et les signaux ou informations. La liaison à la référence est une interaction particulière.

L'analyse des problèmes d'interaction conduits à l'élaboration d'heuristiques particulières.

Heuristique 10 : Les pertes d'énergie doivent être réduites en regroupant les composants utilisant le même type d'énergie.

La maîtrise des pertes est liée à la réduction des trajets énergétiques. Ces trajets seront réduits si les composants utilisant la même énergie sont regroupés.

Heuristique 11 : Les distances entre composants doivent être réduites afin de favoriser le passage des flux de matière.

En réduisant les distances entre tous les composants, la machine devient compacte et le transfert de la matière s'accélère, ce qui diminue évidemment le temps du cycle de fonctionnement et augmente la productivité. L'heuristique 11 est une conséquence de l'heuristique 9.

Heuristique 12 : Les flux de signaux ou d'information doivent être correctement transmis par les composants d'interaction ou les interactions directes.

Le montage de l'ensemble ne doit pas affecter la qualité des contrôles.

Heuristique 13 : Les composants d'interaction doivent être standardisés, réduits, voire éliminés.

Les interactions permettent de réaliser les liens entre les différents composants. Elles peuvent être réalisées directement (cas idéal) ou par un composant d'interaction. Les composants d'interaction assurent le transport de l'énergie entre les composants actifs. Ce sont, par exemple, des câbles lorsqu'il s'agit d'un flux d'énergie électrique, des conduites dans le cas de flux d'énergie hydraulique, des arbres dans le cas d'un flux d'énergie mécanique.

Plus les composants d'interaction sont standards, plus ils seront disponibles (marché, pièces détachées, stocks) et leur changement sera rapide et facile. D'autre part, ces composants représentent une source de pertes d'énergie et c'est pour cette raison qu'on cherche à les réduire et les éliminer.

Heuristique 14 : Le choix des composants d'interaction entre composant/composant et composant/référence est le résultat d'une analyse de l'isostaticité ou l'hyperstaticité de l'ensemble.

Tout composant doit être lié à la référence choisie par des composants d’interaction ou des interactions directes. Le concepteur doit choisir les composants d’interaction avec leurs degrés de liberté. L’ensemble sera isostatique ou hyperstatique.

L’isostaticité est gage de montage facile. Par contre, un ensemble hyperstatique va conduire à un ensemble plus rigide.

Les interactions vont générer des effets induits. Par exemple un montage hyperstatique induit des contraintes et des déformations. Il est donc important de lister les effets induits liés aux interactions (Pailhès, Sallaou, Nadeau, & Fadel, 2010) et d’analyser leur impact sur l’ensemble et la conduite du procédé. C’est le but de l’heuristique 15.

Heuristique 15 : Les effets induits liés aux composants d’interaction ou aux interactions directes doivent être analysés et leur impact sur le fonctionnement réduits ou éliminés.

La fiche « heuristique 15 » propose des listes d’effets associés aux différents type de liaisons.

Le Tableau 31 récapitule les effets produits et induits dans une liaison glissière ou pivot glissant selon la référence (Pailhès, Sallaou, Nadeau, & Fadel, 2010).

Tableau 31. Effets produits/induits associés à une glissière ou pivot glissant

Effets produits	Effets induits
Déformation	Jeu/Bridage/Contraintes/Vibrations
Frottements	Usure/Transferts de chaleur /Dilatation/Rétraction /Jeu /Bridage/Contraintes /Fluage

4.7.4 Heuristiques de sûreté de fonctionnement

Afin de maintenir le bon fonctionnement du procédé de fabrication, le concepteur doit prendre en compte la sûreté de fonctionnement tout au long de son cycle de vie.

A cette fin, nous proposons des heuristiques liées à la sûreté de fonctionnement du système. Ce dernier doit être conçu dans des conditions de fiabilité (assurer la continuité du

service), de maintenabilité (être réparable), de disponibilité (être prêt à l'emploi) et de sécurité (non occurrence d'événements catastrophiques).

Augmenter l'autonomie et la flexibilité du système sont aussi des objectifs à considérer durant la phase d'agencement de composants.

Heuristique 16 : La fréquence d'intervention humaine doit être réduite au maximum.

Heuristique 17: La rencontre entre l'homme et le danger doit être évitée par des séparations matérielles ou virtuelles.

Les heuristiques 16 et 17 s'intéressent à des mesures de sécurité envers l'opérateur. Il faut éviter ou réduire autant de phénomènes dangereux que possible en ajoutant des séparations matérielles ou virtuelles et en choisissant convenablement certaines caractéristiques de conception. Il faut également limiter l'exposition des personnes aux phénomènes dangereux inévitables ou qui ne peuvent pas être suffisamment réduits. Cela s'obtient en réduisant ou éliminant la nécessité d'intervention de l'opérateur dans les zones dangereuses.

Heuristique 18: Les actionneurs doivent être synchronisés ou indexés afin d'augmenter la fiabilité de la machine.

La synchronisation des actionneurs permet de diminuer les temps d'attente et le nombre d'arrêt entre les différentes opérations du cycle et par conséquent augmenter la fiabilité de la machine.

Heuristique 19: Les accès aux composants maintenables ou interchangeables doivent être facilités.

Pour diminuer le temps de maintenance de la machine, il faut avoir absolument un accès facile aux composants maintenables ou interchangeables.

La disponibilité d'un produit dépend de la maîtrise du fonctionnement (déjà précisé par les heuristiques précédentes) mais aussi, pour un procédé de montage, de la présence des matières premières. Cela conduit à proposer l'heuristique 20.

Heuristique 20: L'accessibilité aux zones d'approvisionnement de la machine doit être définie de manière à augmenter son autonomie.

4.7.5 Heuristique de développement durable

Récemment, les enjeux environnementaux ont apporté une raison supplémentaire à l'intérêt scientifique porté aux problèmes d'agencement. La conception actuelle de procédés de fabrication s'inscrit désormais dans une démarche de développement durable où des normes et des réglementations doivent être respectées.

Les guidelines « Conception pour une meilleur éco-efficacité », développés par le World Business Council for Sustainable Development (W.B.C.S.D) donnent des directives générales pour les concepteurs souhaitant développer une démarche de conception environnementale (WBCSD, 1999). Ce guideline propose sept axes d'éco-efficacité. Nous utilisons la lecture qu'en a donnée Samet (Samet, 2010) qui s'adapte à la vision fonctionnelle d'un produit :

- Réduire l'influence matérielle,
- Augmenter l'efficacité énergétique,
- Réduire les risques de toxicité,
- Accroître la recyclabilité et la réutilisation,
- Optimiser l'utilisation des ressources,
- Augmenter la durée de vie et l'estime des produits,
- Augmenter les fonctionnalités et les services.

L'heuristique que nous proposons est déduite de ces axes d'éco-efficacité et appliquée au développement d'un procédé. Les quatre premiers axes sont généraux et s'appliquent directement à la conception d'un procédé.

L'utilisation des ressources est à voir au sens des ressources listées dans la méthodologie MAL'IN. Ces ressources doivent être gratuites et hiérarchisées selon leur renouvelabilité.

L'estime du procédé est plus difficile à cerner. Dans ce cas, l'estime pour l'entreprise, est liée au service rendu, c'est-à-dire la pertinence du produit assemblé qui est directement liée à la durée de vie du procédé.

L'analyse sous-jacente à la dernière règle concerne la flexibilité de la machine. Ce caractère multifonctionnel doit permettre d'utiliser la même machine (ou des éléments de celle-ci) pour plusieurs procédés. Ainsi on diminue le nombre de procédés indépendants dans l'entreprise et, par là même, on réduit l'influence sur l'environnement.

Heuristique 21: Analyser le procédé selon les axes d'éco-efficacité :

- **Réduire son influence matérielle**
 - **Augmenter son efficacité énergétique**
 - **Réduire les risques de toxicité**
 - **Accroître sa recyclabilité et sa réutilisation**
 - **Optimiser l'utilisation des ressources**
 - **Augmenter sa durée de vie**
 - **Augmenter sa flexibilité et ses fonctions**
-

4.7.6 Synthèse sur les heuristiques d'agencement

Les heuristiques d'agencement vont aider le concepteur à définir l'architecture du procédé conçu. Ces heuristiques donnent au concepteur des orientations pour maîtriser les influences de l'agencement sur le fonctionnement du système.

L'heuristique de développement durable met un point d'orgue à ces règles en donnant un filtre global d'analyse de l'agencement et du procédé en termes d'impacts sur l'environnement. Des actions possibles liées à ses axes d'éco-efficacité sont disponibles dans la référence (Samet, 2010).

Des fiches appelées fiches d’heuristiques d’agencement précisent chaque heuristique et sont à disposition du concepteur lors du déroulement du processus de conception (Annexe N°3).

4.8 Synthèse : synoptique global de la méthodologie de conception de procédés de montage ou d’assemblage

La Figure 51 présente le synoptique global de la méthodologie de conception proposée. Il s’agit d’une vue détaillée du synoptique présenté sur la Figure 31.

Notre méthodologie de conception débute par une phase d’analyse fonctionnelle externe. L’analyse du besoin client débouche sur la rédaction du Cahier des Charges Fonctionnel (CdCF) et les exigences qui permettent de définir la Spécification Technique de Besoin (STB).

La fonction globale du procédé définie par la STB est ensuite décomposée en tâches puis en sous-tâches ou fonctions élémentaires. Le but est d’avoir une vision séquentielle du procédé à concevoir. Différents outils sont à la disposition du concepteur pour l’aider lors de cette phase. En effet, nous avons développé dans un premier temps un outil graphique permettant la visualisation de la décomposition, ainsi que la réutilisation des décompositions fonctionnelles de procédés MARQUET existants. Nous avons également proposé une séquentialisation générique des procédés de montage ou d’assemblage. La logique séquentielle laisse la place à l’utilisation de blocs fonctionnels connus et validés réalisant des actions précises et contenus dans la base de connaissances.

Pour diminuer le nombre de fonctions élémentaires et simplifier l’architecture du système, nous avons proposé une phase d’agrégation de fonctions, guidées par deux heuristiques d’agrégation. Ces heuristiques sont basées sur l’expression de la fonction et la sémantique développée par les bases de verbes et de compléments.

En définissant toutes les fonctions, la phase 4 du processus de conception concerne la recherche de solutions techniques. Nous commençons tout d’abord par interroger la base de connaissances. Dans le cas où la base ne contient pas de solutions (nouvelles fonctions), ou bien si les solutions proposées par la base sont non satisfaisantes, une recherche des solutions industrielles ailleurs sera menée. Dans le cas où les solutions industrielles trouvées sont non

satisfaisantes, la recherche de solutions se base sur un processus créatif (Méthode d'Aide à L'INnovation) guidé par le logiciel de conduite d'études MAL'IN. Les sessions créatives seront poursuivies par une phase d'étude de faisabilité technique ainsi qu'une phase de prototypage pour les concepts choisis.

La phase suivante du processus est une phase d'agrégation de composants. Six heuristiques d'agrégation de composants sont définies pour cette phase et sont basées sur notre vision énergétique CTOC. Nous cherchons à étudier les liens entre les composants dans le but de diminuer leurs nombres et de faciliter par la suite la phase d'agencement de solutions, qui est facilitée également par des heuristiques d'agencement.

Le procédé développé est dit qualifié s'il répond aux exigences du cahier des charges. Dans le cas contraire, le concepteur a deux possibilités :

- Soit garder l'agrégation de la deuxième phase et modifier son agencement.
- Soit modifier les agrégations faites dans la phase d'agrégation de composants et chercher ensuite un nouvel agencement. Si aucun agencement trouvé n'est qualifié, le concepteur remonte dans le synoptique vers la phase d'agrégation de fonctions, la phase de la décomposition fonctionnelle et s'il le faut, vers l'analyse fonctionnelle externe.

Le Tableau 32 résume les entrées/sorties de chaque phase du processus de conception ainsi que les méthodes préconisées.

Tableau 32. Les livrables associés aux méthodes préconisées du synoptique de conception

Phase		Entrées	Sorties	Méthodes préconisées
Processus de conception	Analyse fonctionnelle externe	Besoin du client	STB	Méthode APTE
	Décomposition fonctionnelle du procédé	STB	Fonctions+ séquentialités+ transitions	1. Outil graphique, 2. Réutilisation des décompositions de procédés existants, 3. Séquentialisation générique des procédés
	Agrégation de fonctions	Fonctions+ séquentialités+ transitions	Fonctions élémentaires Ou/ et Fonctions agrégées	Heuristiques d’agrégation 1 & 2
	Recherche de solutions	Fonctions élémentaires Ou/ et Fonctions agrégées	Solutions techniques	Base de connaissances + Solutions industrielles ailleurs + outils de créativité (MAL’IN)
	Agrégation de composants	Solutions techniques	Solutions techniques et/ou Solutions agrégées	Heuristiques d’agrégation 3-7
	Agencement de solutions	Solutions techniques et/ou Solutions agrégées	Architecture(s) du procédé	Heuristiques d’agencement 8-21
	Qualification de l’agencement	Architecture(s) du procédé	Agencement(s) qualifié(s)	Critères STB
	Hiérarchisation/ Décision	Agencement(s) qualifié(s)	Agencement(s) hiérarchisé(s)/ Procédé choisi	Fiche de hiérarchisation du projet

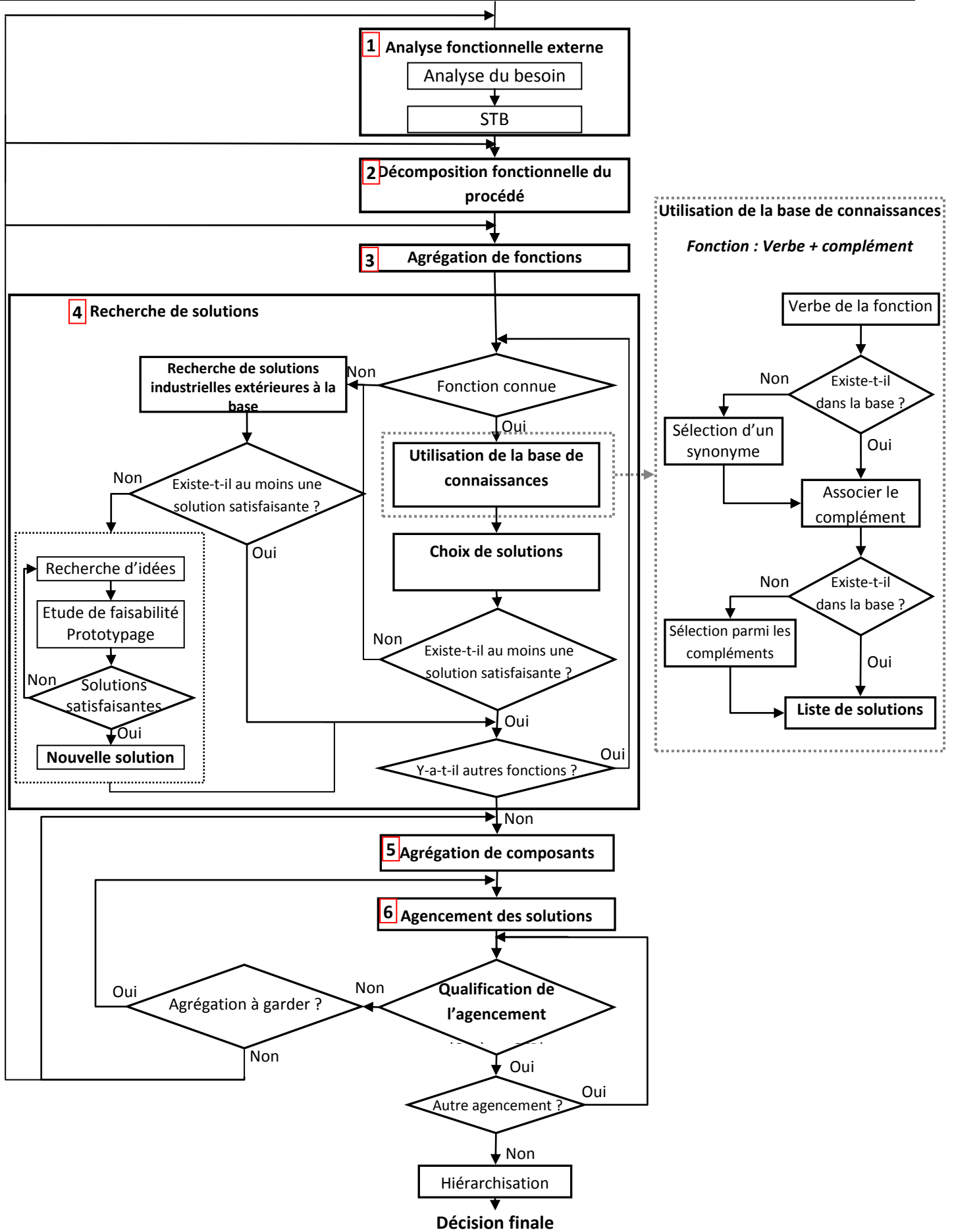


Figure 51. Méthodologie de conception proposée

Chapitre 5 Application industrielle de la méthodologie de conception

La méthodologie de conception proposée au chapitre 4 a été mise en œuvre sur une application concrète de conception d'un nouveau procédé de fabrication pour l'entreprise MARQUET & Cie.

A partir de l'objectif d'automatisation d'un procédé manuel, l'application de différentes phases du synoptique de conception (Figure 51) a débouché sur la conception d'une machine de remplissage automatique produisant deux types de produits, dont un est nouveau pour l'entreprise MARQUET.

Après l'analyse et la formulation du besoin, nous présenterons le déroulement de la conception du nouveau procédé. Cet exemple illustrera le rôle des heuristiques proposées pour la simplification de l'architecture de la machine conçue.

5.1 Présentation du procédé de remplissage manuel

Le secteur industriel de la chaussure utilise un vocabulaire bien spécifique. Pour cette raison, nous présentons dans un premier temps un glossaire des termes métiers qui seront utilisés dans ce chapitre.

5.1.1 Glossaire des termes métiers

Première :

C'est la partie sur laquelle repose le pied (Figure 52). La première peut avoir des pointures allant de 36 à 46 et des formes différentes suivant les modèles de chaussons.

La taille maximale de la première correspond à la pointure 46 homme (longueur 350 mm, largeur 150 mm). Elle peut être en carton rigide, plat d'épaisseur 2 mm ou en mousse souple et compressible d'épaisseur variable de 10 à 20 mm.

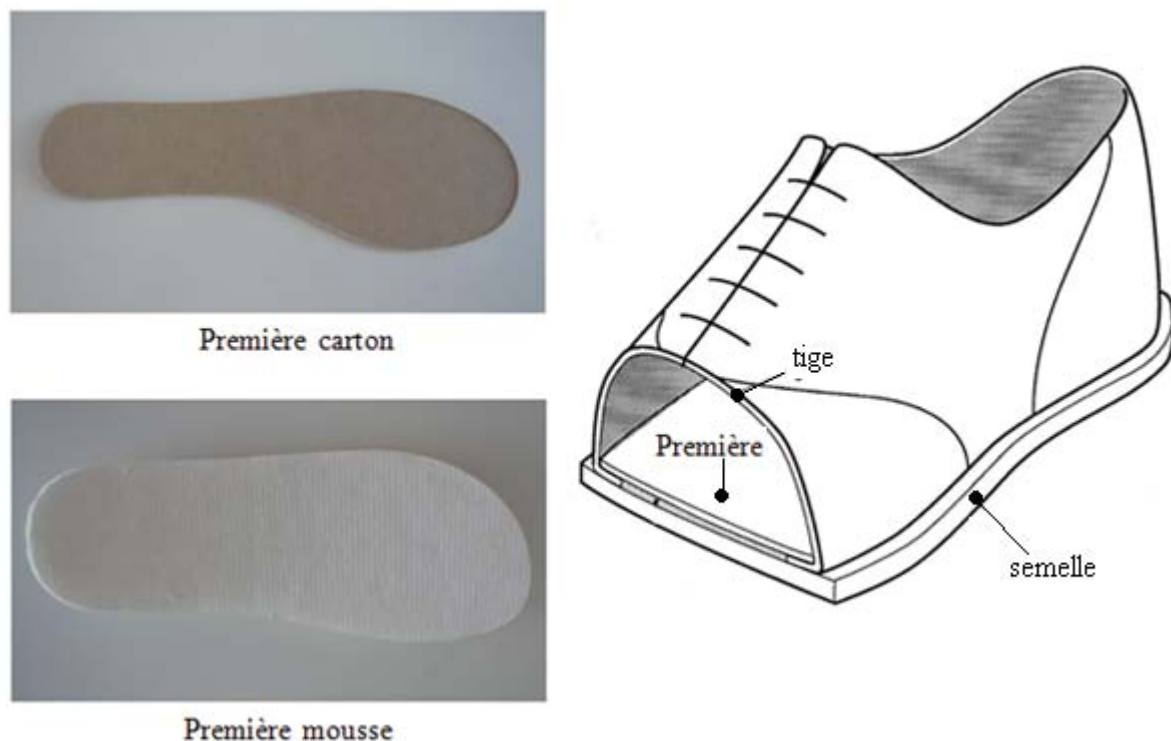


Figure 52. Définition d'une première

Enrobage tissu :

Pièce de tissu de même forme que la première et avec un relarge de 7 mm. Le relarge est un surplus de tissu qui dépasse la première sur tout le long de son périmètre (Figure 53).

Talonnette :

La talonnette est une pièce en mousse que l'on place à l'intérieur de la chaussure, à l'endroit où porte le talon du pied entre l'enrobage tissu et la première (Figure 53).

Une seule forme de talonnette est valable pour toutes les premières cartons, dont les dimensions sont : longueur 100 mm, largeur 50 mm et épaisseur 5 mm.

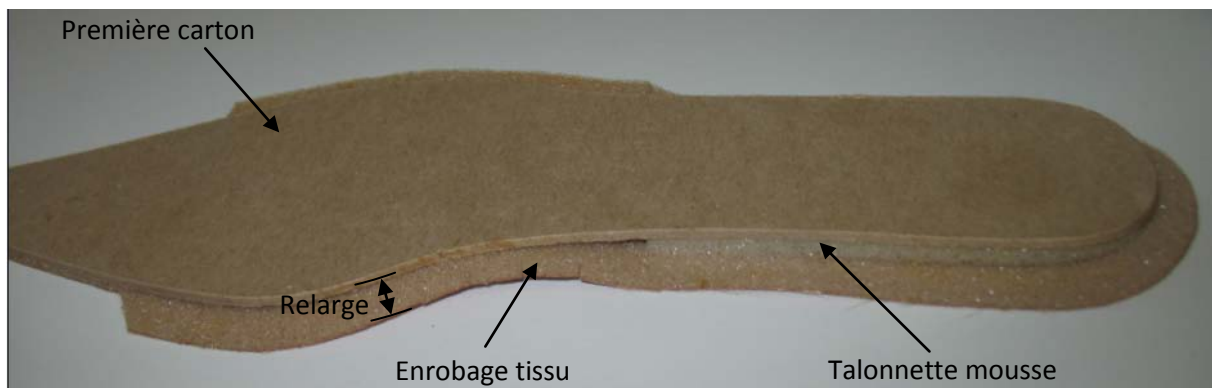


Figure 53. Assemblage de la première carton avec la talonnette et l'enrobage tissu

Remplissage :

Le remplissage consiste à rabattre le relarge du tissu sur la face supérieure de la première, permettant ainsi d'avoir une première enrobée (Figure 54).



Figure 54. Première carton enrobée

5.1.2 Description du procédé d'enrobage manuel

L'enrobage des premières consiste à recouvrir une première par un tissu. Il est réalisé manuellement par deux opératrices. La première opératrice effectue l'assemblage par encollage de la première carton avec l'enrobage tissu; elle encolle la première en la passant

dans une machine d'encollage à rouleau puis elle la positionne et la presse contre le tissu en essayant de garder un surlarge uniforme sur son périmètre (Figure 55).

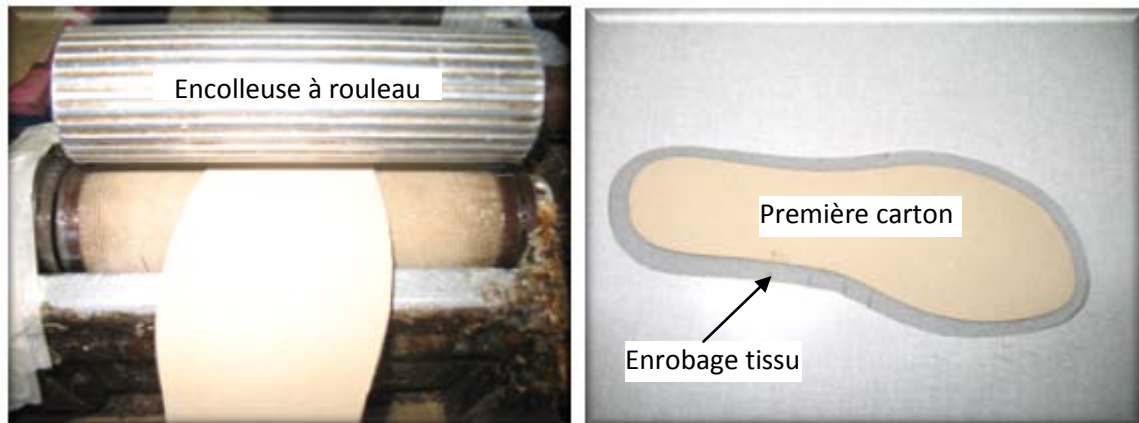


Figure 55. Assemblage de la première carton avec l'enrobage tissu

La deuxième opératrice remplit le tissu à l'aide d'une machine remplieuse électronique (Figure 56). Le bord de l'enrobage tissu est guidé par l'opératrice contre une glissière et sous un pied qui tient le tissu et qui distribue de la colle. Une paire de marteaux replie, presse et transporte la première enrobée. La colle utilisée pour l'encollage et lors du rempliage est une colle thermofusible qui nécessite d'être chauffée avant son utilisation.

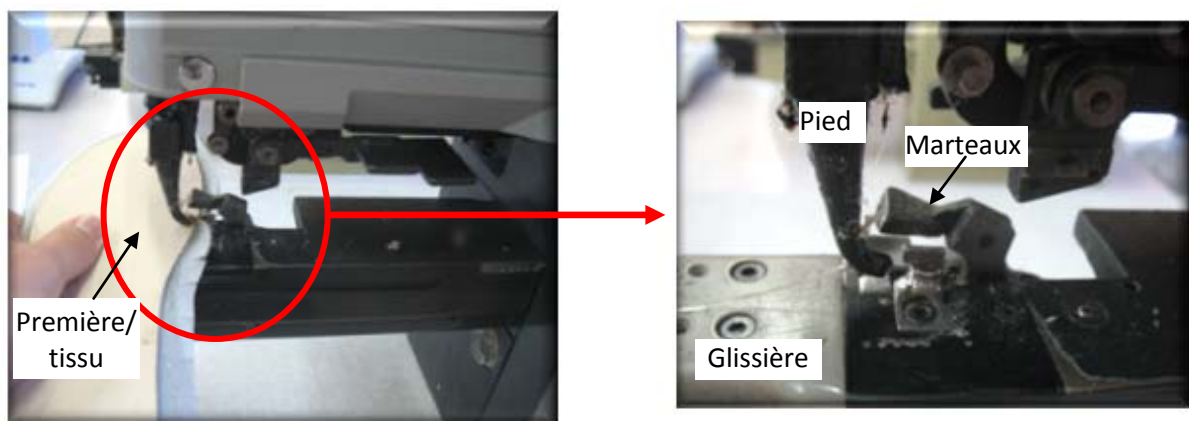


Figure 56. Rempliage avec la remplieuse électronique

Le procédé de l'enrobage manuel ne se fait actuellement dans l'entreprise MARQUET qu'avec des premières cartons. L'entreprise ne sait pas enrober les premières mousses : la

difficulté est liée à la souplesse et la compressibilité de la mousse. Pouvoir enrober des premières mousses permettrait à l'entreprise de concevoir de nouveaux produits (chaussons).

La démarche de conception développée a été appliquée dans le cadre d'une nouvelle conception d'une machine automatisée pour l'enrobage des premières cartons et mousses. Le déroulement de la conception suit l'ordre défini dans le synoptique présenté sur la Figure 51.

5.2 Analyse fonctionnelle externe et cahier des charges fonctionnel

L'analyse fonctionnelle externe est la première phase de notre méthodologie de conception. Cette phase consiste à analyser le besoin de l'entreprise afin de pouvoir élaborer le cahier des charges fonctionnel et rédiger la spécification technique de besoin STB (Figure 57).

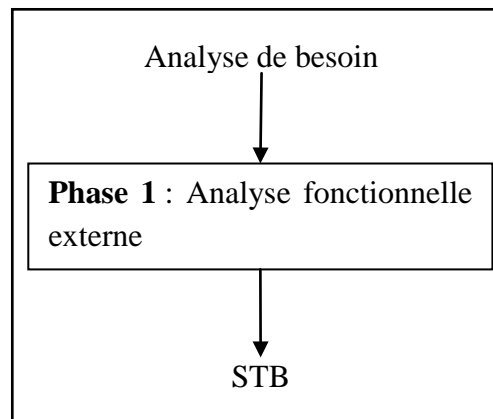


Figure 57. Les entrées/sorties de la phase de l'analyse fonctionnelle externe

5.2.1 Demande initial MARQUET

L'entreprise MARQUET souhaite automatiser le procédé d'enrobage manuel et donc concevoir une machine pouvant enrober non seulement les premières cartons mais aussi les premières mousses. Pour la conception de la nouvelle machine d'enrobage, les exigences suivantes ont été exprimées par l'entreprise MARQUET :

- La machine doit être compacte,
- La mise en route et le dépannage doivent être faciles,
- Les énergies à utiliser sont soit électrique (Monophasé 220 V ou triphasé 380 V), soit pneumatique (air comprimé à 7 bar),

- La machine doit avoir deux cycles de fonctionnement : un cycle pour les premières cartons et un autre pour les premières mousses,
- Le fonctionnement de la machine doit être adapté avec tous les types de enrobages tissus, de la pointure de 36 à 46,
- Le fonctionnement de la machine doit être automatique (minimum d'intervention humaine),
- Tous les réglages de changement de production doivent être faciles à réaliser et seront accessibles par l'opérateur,
- Le déchargement des pièces enrobées doit être automatique dans des caissons de stockage,
- Le travail se déroulera par pointure et par alternance pied gauche / pied droit,
- Le coût doit être le minimum possible,
- Tous les composants seront standards et facilement interchangeables.

5.2.2 Rédaction du cahier des charges fonctionnel

Une situation de vie correspond à une étape du cycle de vie du procédé. Les situations de vie peuvent être classées et hiérarchisées suivant au moins trois points de vue: client, entreprise et conception (Scaravetti, 2004).

Dans sa thèse, Scaravetti a énuméré les situations de vie liées aux étapes du cycle de vie d'un produit (Scaravetti, 2004). Parmi elles, nous citons les situations de vie classiques de conception, de fabrication, d'utilisation, d'arrêt, de stockage. Dans le cas de notre procédé, la situation de vie mise en route est primordiale. Elle fera l'objet d'exigences particulières de l'entreprise.

A chaque situation de vie sont associées des fonctions de service (FS) et des fonctions contraintes (FC). Elles définissent les principales fonctions que doit remplir le système mécanique dans une situation de vie donnée.

La Figure 58 recense les fonctions de la machine à concevoir, pour la situation de vie "utilisation".

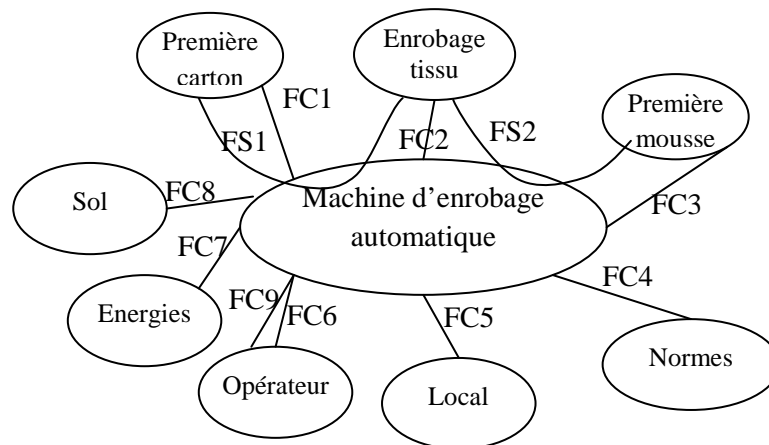


Figure 58. Analyse fonctionnelle externe : analyse systématique des milieux extérieurs, situation de vie utilisation

Fonctions de service

FS1 : Le système permet d'enrober une première carton par un enrobage tissu

FS2 : Le système permet d'enrober une première mousse par un enrobage tissu

Fonctions contraintes

FC1 : Le système doit s'adapter aux premières cartons gauche et droite

FC2 : Le système doit s'adapter aux enrobages tissus gauche et droit

FC3 : Le système doit s'adapter aux premières mousses gauche et droite

FC4 : Le système doit respecter les normes (ISO 9000, ISO 14000)

FC5 : Le système doit pouvoir s'insérer dans l'atelier

FC6 : Le système doit nécessiter peu d'intervention humaine

FC7 : Le système doit utiliser les énergies électrique et pneumatique disponibles

FC8 : Le système doit être lié au sol

FC9 : Le système doit limiter les nuisances

À partir de cette étude, un cahier des charges est établi pour mettre en évidence les caractéristiques et les critères relatifs à chacune des fonctions, pour la situation de vie utilisation (Tableau 33). Les autres situations de vie vont être prises en compte lors de la rédaction de la STB.

Tableau 33. Cahier des charges fonctionnel (CdCF) de la machine d'enrobage pour la situation de vie "utilisation"

Fonction	Critère	Niveau	Flexibilité, limite
FS1 : enrober une première carton par un enrobage tissu	-Rempli uniforme sur la périphérie -Collage uniforme	- 5mm de large - Ø zone non collée	± 2 mm
FS2 : enrober une première mousse par un enrobage tissu	-Rempli uniforme sur la périphérie -Collage uniforme	- 7mm de large - Ø zone non collée	± 2 mm
FC1 : S'adapter aux premières cartons gauche et droite	-Préhenseur unique -Adhésion durant transport		
FC2 : S'adapter aux enrobages tissus gauche et droit	-Préhenseur unique -Adhésion durant transport		
FC3 : S'adapter aux premières mousses gauche et droite	-Préhenseur unique -Adhésion durant transport -Epaisseur de la mousse	7mm<Ep<25mm	± 2 mm
FC4 : Respecter les normes (ISO 9000, ISO 14000)	Directives machines lois et normes		
FC5 : Pouvoir s'insérer dans l'atelier	Longueur x largeur x hauteur	L< 3m50 l< 3m50 H< 7 m	± 0.5 m
FC6 : nécessiter peu l'intervention humaine	-Temps préparation préalable de production -Accessibilité outillage -Stock première	T< 15 min -autonomie en fonctionnement= 4h	± 5 min ± 30 min
FC7 : Utiliser les énergies électrique et pneumatique disponibles	Electrique : Tension T, Fréquence F Pneumatique : Pression P, Débit Q	T= 230/400 V F= 50 hz 5 bar<P< 7 bar 1l/s< Q< 12 l/s	± 10% ± 0.1 % ± 1 bar ± 2 l/s
FC8 : Lier au sol	Immobilisation réglable	Pieds réglables	± 3 cm
FC9 : Limiter les nuisances	-Niveau de bruit -Poussière -Vapeur colle	85 dB	+5dB

5.2.3 Rédaction de la Spécification Technique de besoin (STB)

Afin de qualifier le système conçu, la STB complète le CdCF en spécifiant les exigences ci-dessous listées dans le paragraphe §4.2.

5.2.3.1 Exigences fonctionnelles

Ces exigences sont énumérées dans le cahier des charges fonctionnel (Tableau 33).

5.2.3.2 Exigences de sûreté de fonctionnement

- *Fiabilité*
 - Tous les réglages de changement de production doivent être faciles à réaliser et seront accessibles par l'opérateur,
 - Diminuer les temps d'arrêt,
 - Tous les programmes de production doivent être sauvegardés sur des CD-ROM.
- *Maintenabilité*
 - Diminuer le nombre de composants,
 - Tous les composants doivent être standards et facilement interchangeables,
 - Utilisation de composants ayant des durées de vie élevées sans entretien,
 - Conception de mécanisme sans entretien périodique,
 - Les dépannages doivent être faciles,
 - Affichage des états de fonctionnement de la machine doit être affiché sur un écran,
 - Diminuer le nombre d'outillages,
- *Sécurité*
 - Minimiser l'intervention humaine,
 - Les zones d'accès doivent être protégées,
- *Disponibilité*
 - La mise en route doit être rapide,
 - La mise en température doit être rapide.

5.2.3.3 Exigences de conception et de production

- Les premières doivent être approvisionnées dans la machine par pointures et par paires (pied gauche et pied droit)

- Comme les premières, les enrobages tissus doivent être approvisionnés dans la machine par pointures et par paires (pied gauche et pied droit),
- Le préhenseur pour la prise des premières doit être adapté au pied gauche et pied droit,
- Les enrobages tissus doivent avoir les mêmes pointures que les premières lors de l'approvisionnement.
- Le préhenseur pour la prise des enrobages tissus doit être adapté au pied gauche et pied droit.
- Les enrobages tissus doivent pouvoir être déplacés ou pris quelque soit la porosité du tissu.

5.2.3.4 Exigences de qualification et d'acceptation

- Chaque solution technique doit être testée et ses performances validées,
- Des prototypes doivent être réalisés pour toute nouvelle solution,
- Elaboration et présentation de toutes les études mécaniques et électriques, plans d'implantations et d'ensemble des éléments hors standards

5.3 Décomposition fonctionnelle du procédé d'enrobage

La décomposition fonctionnelle du procédé à concevoir est la deuxième phase de notre processus de conception. Il s'agit de diviser la fonction globale du procédé d'enrobage "enrober les premières" en tâches puis en fonctions élémentaires afin d'avoir une représentation hiérarchique de la machine à concevoir (Figure 59).

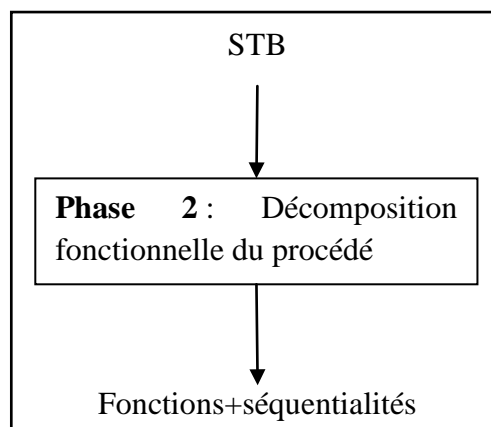


Figure 59. Les entrées/ sorties de la phase de décomposition fonctionnelle du procédé d'enrobage

Nous utilisons l’outil graphique (cf. §3.1.3) pour représenter la décomposition fonctionnelle du futur procédé d’enrobage. Nous intéressons à un cycle de fonctionnement composé d’une paire de premières, soit l’enrobage du pied gauche et du pied droit.

A partir de la décomposition fonctionnelle du procédé d’enrobage manuel réalisée lors de la capitalisation de connaissances, nous avons divisé la fonction globale du procédé "enrober première" en quatre tâches principales qui sont : "assembler première/tissu gauches", "remplir première gauche", "assembler première/tissu droits" et "remplir première droite".

Comme montre la Figure 60, les tâches $S_{1,2}$ "remplir première gauche" et $S'_{1,2}$ "assembler première droite/ tissu droits" se font en parallèle, ce qui veut dire que l’assemblage de la première droite avec le tissu droit se fait en temps masqué, ce qui permet d’augmenter la productivité de la machine.

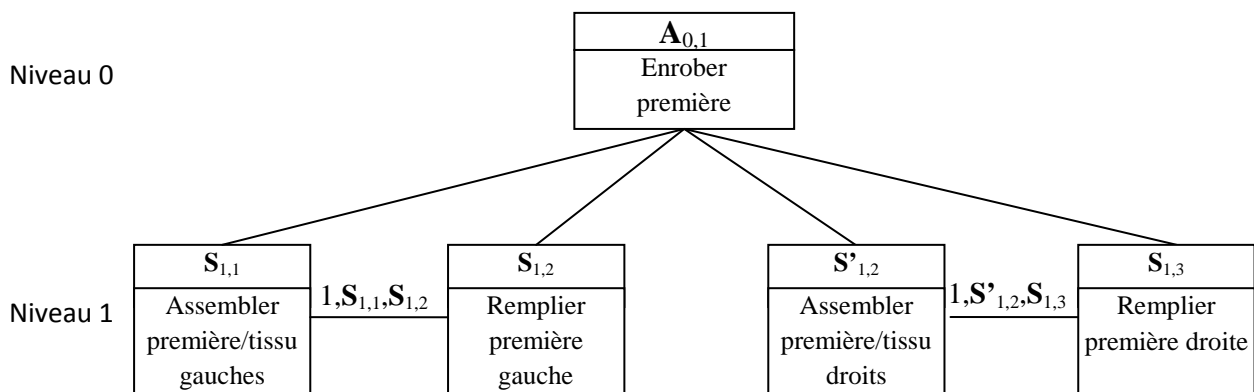


Figure 60. 1^{er} niveau de la décomposition fonctionnelle du procédé d’enrobage automatique

Basé sur le procédé d’enrobage manuel, la tâche $S_{1,1}$ "assembler première/tissu gauches" se décompose en deux sous-tâches "encoller tissu gauche" et "lier première gauche au tissu gauche". De même, la tâche $S'_{1,2}$ "assembler première/tissu droits" se décompose en deux sous-tâches "encoller tissu droit" et "lier première droite au tissu droit" (Figure 61).

D’autre part, la tâche "remplir première" d’une manière automatique ($S_{1,2}$ ou $S_{1,3}$) est une nouvelle fonction, non connue par l’entreprise MARQUET. Pour cette raison, nous utilisons les séquences génériques mères pour la décomposer. On peut ainsi définir une séquence générique mère pour la fonction "remplir première gauche" à partir des verbes de père "déplacer":

[Prendre première/enrobage gauche] puis [déplacer première/enrobage gauche] puis [positionner première/enrobage gauche] puis [**rabattre tissu gauche**] puis [Evacuer première/enrobage gauche].

La fonction "remplir première droite" est décomposée de la même façon que la fonction "remplir première gauche". La Figure 61 présente les deux niveaux de décomposition du procédé d'enrobage. Pour simplifier la figure, nous n'avons pas représenté les transitions entre les fonctions.

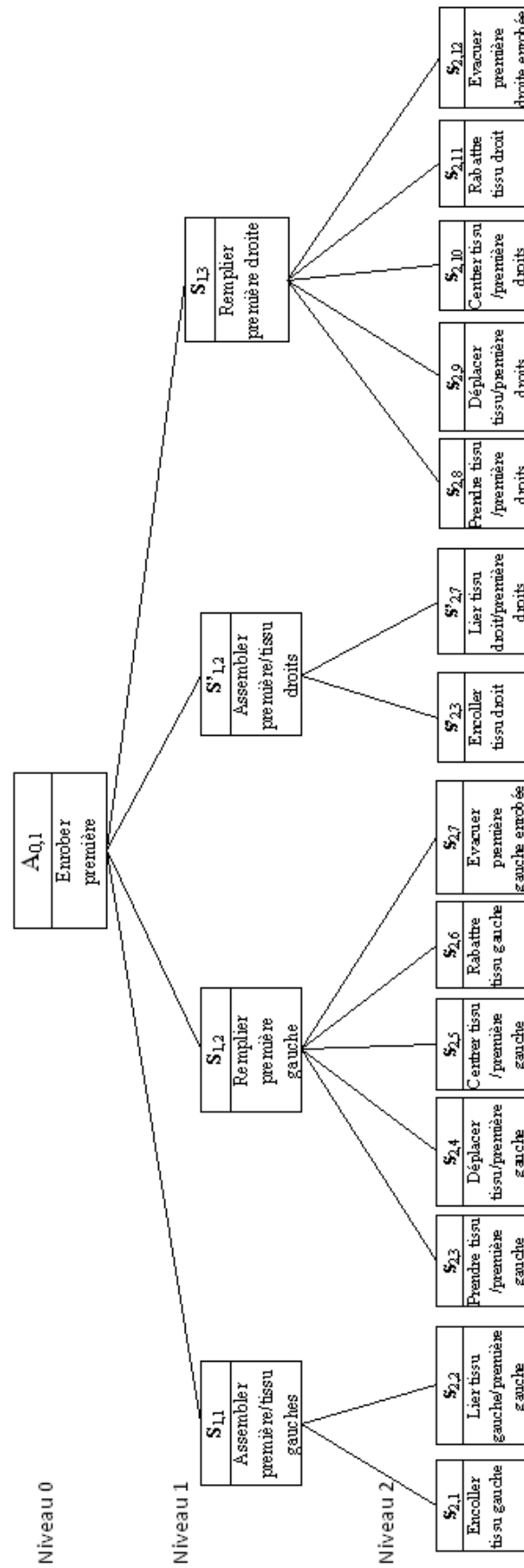


Figure 61. Deuxième niveau de la décomposition fonctionnelle du procédé d'enrobage

Les fonctions $S_{2,1}$ "encoller tissu gauche" et $S'_{2,3}$ "encoller tissu droit" peuvent être décomposées en reprenant la même séquentialité rencontrée dans le procédé de montage de chaussons étudié au chapitre 4 (Figure 37). Comme le tissu est souple et difficile à manipuler, nous avons choisi que le tissu soit fixe et la buse de colle soit mobile. La Figure 62 présente la décomposition fonctionnelle de la fonction $S_{2,1}$ "encoller tissu gauche".

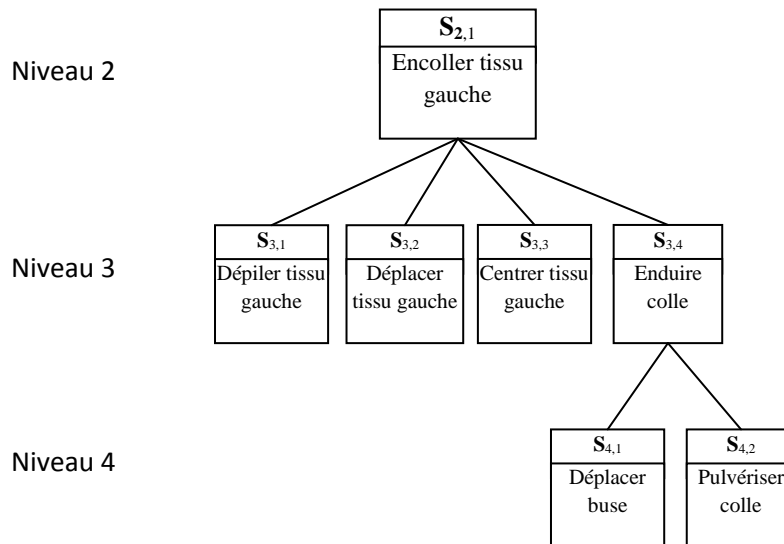


Figure 62. Décomposition fonctionnelle de la fonction $S_{2,1}$ "encoller tissu gauche"

Pour la fonction $S_{2,2}$ "Lier tissu/première gauches", nous avons défini une séquence générique mère construite avec des verbes de la famille « déplacer » :

*[Dépiler première gauche] puis [déplacer première gauche] puis
 [Centrer première gauche] puis [poser première gauche] puis
 [Presser première gauche].*

De même, nous proposons une séquence générique mère liée à la fonction $S'_{2,7}$ "Lier tissu/première droits" qui s'écrit :

*[Dépiler première droite] puis [déplacer première droite] puis
 [Centrer première droite] puis [poser première droite] puis [Presser
 première droite].*

La décomposition fonctionnelle globale du procédé d'enrobage est présentée sur la Figure 63 .

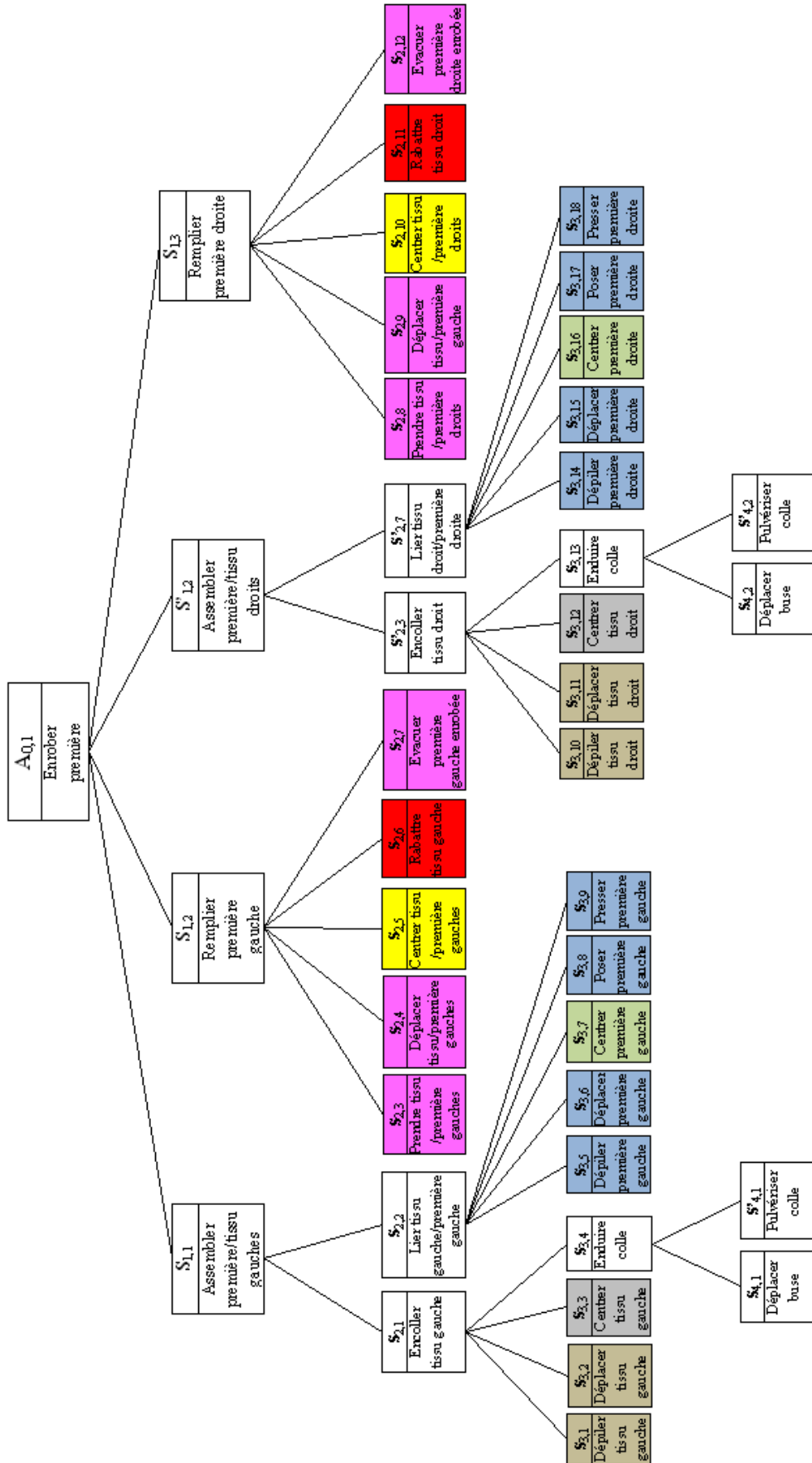


Figure 63. Décomposition fonctionnelle du procédé d’enrobage automatique

5.4 Agrégation de fonctions

Cette troisième phase de la méthodologie de conception consiste à trouver des agrégations de fonctions dans le graphe de la décomposition fonctionnelle du procédé d'enrobage automatique présenté sur la Figure 63. Notre but à l'issue de cette phase est de réduire le nombre de fonctions par agrégation (Figure 64) et par conséquent diminuer le temps de recherche de solutions techniques ainsi que le nombre de composants.

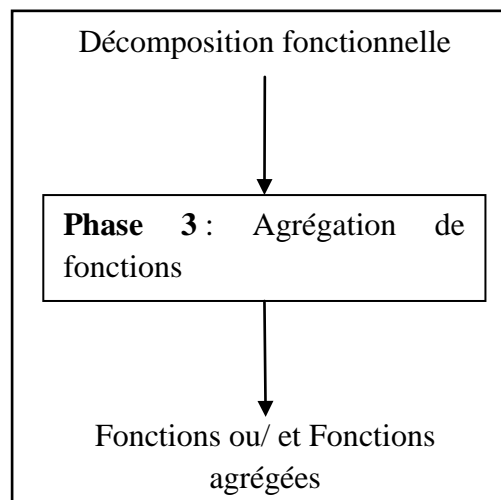


Figure 64. Les entrées/ sorties de la phase d'agrégation de fonctions

Puisque les tâches $S_{1,2}$ et $S'_{1,2}$ sont en parallèles, nous allons alors chercher à trouver des agrégations entre les fonctions filles des tâches d'assemblage $S_{1,1}$ et $S'_{1,2}$ ainsi qu'entre les fonctions filles des tâches de remplissage $S_{1,2}$ et $S_{1,3}$ (Figure 63). Nous commençons la phase d'agrégation à partir des fonctions du troisième niveau puisque les fonctions du quatrième niveau sont issues de deux fonctions $S_{3,4}$ et $S_{3,13}$ identiques (Figure 63).

5.4.1 Architecture de la machine avant l'agrégation de fonctions

Sans agrégation de fonctions, chaque fonction du graphe de décomposition fonctionnelle (Figure 63) est réalisée par une solution technique. La Figure 65 présente un exemple de conception de la machine d'enrobage automatique sans réalisation de phases d'agrégation.

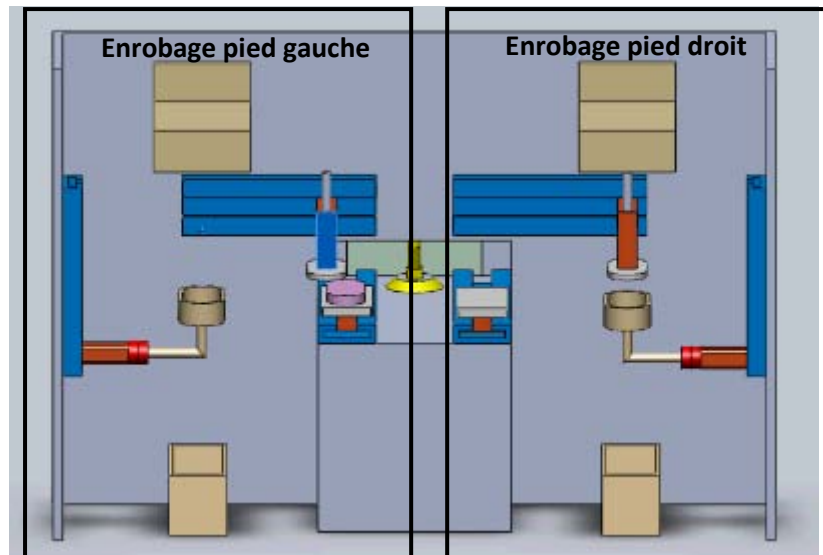


Figure 65. Un exemple de conception de la machine d'enrobage automatique sans réalisation de phases d'agrégation

Nous visualisons sur cette figure deux postes symétriques qui correspondent respectivement à l'enrobage du pied gauche et du pied droit. Chacune des fonctions de déplacements (vingt au total) est réalisée par un vérin linéaire. Le choix des vérins repose sur le fait qu'ils sont des composants standards disponibles sur le marché, maintenables et facilement interchangeables. Nous retrouvons alors dans la machine vingt vérins et par conséquent beaucoup de composants de contrôle et de commande liés à ces vérins. La synchronisation du fonctionnement de ces composants est très compliquée et risquée. Ces systèmes classiques de manutention et de déplacement conduisent naturellement à une évolution dans une seule direction avec des positions successives dans une seule direction (1D).

Afin de diminuer le nombre de fonctions et par conséquent le nombre de composants, l'application d'agrégation de fonctions est primordiale.

5.4.2 Agrégation des fonctions filles des tâches d'assemblage ($S_{1,1}$ et $S'_{1,2}$)

5.4.2.1 Application de l'heuristique 1

Heuristique 1 : *Les fonctions relevant d'un même verbe père de classe 2 ou de classe 3 associées au même complément ou aux compléments de même caractéristiques physiques, peuvent être agrégées et réalisées par un composant unique.*

Les verbes des fonctions $S_{3,1}$, $S_{3,2}$, $S_{3,10}$, $S_{3,11}$ (fonctions représentées en marron sur la Figure 63) sont issus du même verbe père "déplacer" et sont associés aux compléments de mêmes caractéristiques physiques (tissu gauche, tissu droit). En appliquant l'heuristique d'agrégation 1, ces fonctions peuvent être agrégées en une seule fonction qu'on appelle "déplacer tissu".

De même, les fonctions $S_{3,5}$, $S_{3,6}$, $S_{3,8}$, $S_{3,9}$, $S_{3,14}$, $S_{3,15}$, $S_{3,17}$ et $S_{3,18}$ (fonctions représentées en bleu sur la Figure 63) sont exprimées par des verbes issus du même verbe père "déplacer" et associés aux compléments de mêmes caractéristiques physiques (première gauche, première droite) donc elles peuvent être agrégées en une seule fonction qu'on appelle "déplacer première".

Finalement, les fonctions $S_{3,3}$ "centrer tissu gauche" et $S_{3,12}$ "centrer tissu droit" (fonctions représentées en gris sur la Figure 63) ont des verbes relevant du même verbe père "positionner" et des compléments de mêmes caractéristiques physiques. D'après l'heuristique 1, ces fonctions peuvent être agrégées en une seule fonction qu'on appelle "positionner tissu". De même, l'application de l'heuristique 1 permet également d'agréger les fonctions $S_{3,7}$ "centrer première gauche" et $S_{3,16}$ "centrer première droite" (fonctions représentées en vert sur la Figure 63) en une seule fonction qu'on appelle "positionner première".

5.4.2.2 Application de l'heuristique 2

Heuristique 2 : *Des fonctions relevant d'un même verbe père mais de compléments différents, peuvent être agrégées à un composant unique par un composant d'interaction ou un outillage adéquat.*

En appliquant l'heuristique 2, les fonctions agrégées "déplacer tissu" et "déplacer première" sont exprimées par le même verbe "déplacer" mais avec des compléments différents donc elles peuvent être agrégées à un composant unique par un composant

d'interaction ou un outillage adéquat. Comme il s'agit d'une agrégation de douze fonctions de déplacement, le choix d'un robot est recommandé. L'outillage ou le préhenseur fixé au bras du robot doit être adapté à la prise et au défilage du tissu et de la première, que ce soit pied gauche ou pied droit. Nous interrogeons par la suite la base de connaissances pour trouver une solution technique permettant la prise à la fois du tissu ou de la première.

D'autre part, la fonction $S_{3,4}$ (respectivement $S_{3,13}$) "Enduire colle" se décompose en deux fonctions simultanées $S_{4,1}$ "déplacer buse" et $S'_{4,1}$ "pulvériser colle" (respectivement $S_{4,2}$ et $S'_{4,2}$) dont leurs verbes sont issus du même verbe père de classe 2 "déplacer". Cependant, les compléments associés aux verbes pour l'expression de ces fonctions sont différents et n'ont pas les mêmes caractéristiques physiques. Vu que les fonctions "déplacer buse" et "pulvériser colle" sont exprimées par des verbes issus du même verbe père que les fonctions de déplacement déjà agrégées, l'application de l'heuristique 2 conduit à l'agrégation de ces deux fonctions au robot par un support adéquat permettant la fixation de la buse de colle au bras du robot.

5.4.2.3 Première évolution de la machine d'enrobage

L'application des deux heuristiques d'agrégation de fonctions a permis de réduire le nombre de fonctions du 3^{ème} niveau de dix-huit fonctions à trois fonctions qui sont : "*déplacer tissu ou première*", "*positionner tissu*" et "*positionner première*". En plus, nous avons pu à partir de cette phase gagner du temps au niveau de recherche de concepts par le choix d'un robot pour toutes les fonctions de déplacement et d'une buse de colle fixée à son bras pour la fonction d'encollage. Il reste à trouver des solutions techniques pour la prise du tissu et de la première, le positionnement du tissu et le positionnement de la première.

La Figure 66 présente une évolution de la machine d'enrobage présentée sur la Figure 65. Cette nouvelle machine est conçue en prenant en compte les agrégations présentées dans les paragraphes §5.4.2.1 et §5.4.2.2.

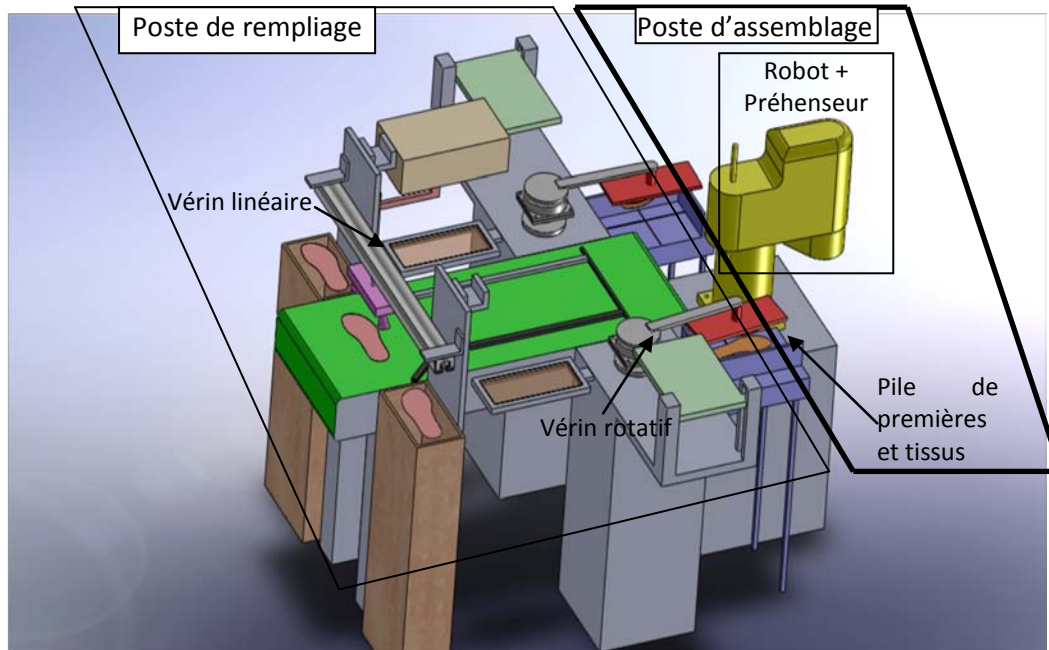


Figure 66. Première évolution de la machine d'enrobage automatique

Comme nous l'avons déjà mentionné, les douze fonctions de déplacements de premières et de tissus ainsi que la fonction d'encollage ont été agrégées et réalisées par un robot avec préhenseur. Nous retrouvons alors un seul poste (poste d'assemblage) où le robot est installé et dans lequel va se faire l'assemblage de la première avec son enrobage tissu. Les six fonctions de déplacement qui restent et qui sont liées à l'opération de remplissage sont réalisées par des vérins linéaires et rotatifs (cf. poste de remplissage sur la Figure 66). La réduction des parcours en utilisant le robot et les déplacements en rotation font évoluer la machine (Figure 65) d'une architecture 1D à une architecture 2D plus compacte (Figure 66).

5.4.3 Agrégation des fonctions filles des tâches de remplissage ($S_{1,2}$ et $S_{1,3}$)

5.4.3.1 Application de l'heuristique 1

Heuristique 1 : *Les fonctions relevant d'un même verbe père de classe 2 ou de classe 3 associées au même complément ou aux compléments de même caractéristiques physiques, peuvent être agrégées et réalisées par un composant unique.*

Les fonctions $S_{2,3}$, $S_{2,4}$, $S_{2,7}$, $S_{2,8}$, $S_{2,9}$ et $S_{2,12}$ (fonctions représentées en rose sur la Figure 63) sont exprimées par des verbes relevant du même verbe père de classe 2 "déplacer" et associés aux compléments de mêmes caractéristiques physiques (tissu/première gauches, tissu/première droits) donc, d'après l'heuristique d'agrégation N°1, ces fonctions peuvent être agrégées et réalisées par un composant unique. En se référant aux solutions techniques associées à cette heuristique (§4.4.2), ce composant unique peut être un robot avec un préhenseur adéquat.

D'autre part, l'heuristique d'agrégation N°1 peut être également appliquée pour les fonctions $S_{2,5}$ "Centrer tissu/première gauches" et $S_{2,10}$ "Centrer tissu/première droits" (fonctions représentées en jaune sur la Figure 63). En effet, ces fonctions se relèvent d'un même verbe père de classe 2 "positionner" et sont associées aux compléments de même caractéristiques physiques (tissu/première gauches, tissu/première droits) donc elles peuvent être agrégées en une seule fonction appelée "*positionner première/tissu*".

Finalement, les fonctions $S_{2,6}$ "rabattre tissu gauche" et $S_{2,11}$ "rabattre tissu droit" (fonctions représentées en rouge sur la Figure 63) ont le même verbe et associées aux compléments de mêmes caractéristiques physiques. D'après l'heuristique N°1, ces fonctions peuvent être agrégées en une seule fonction qu'on appelle "*rabattre tissu*".

5.4.3.2 Deuxième évolution de la machine d'enrobage

Lors de l'agrégation des fonctions filles des tâches de rempliage $S_{1,2}$ et $S_{1,3}$, nous avons ramené le problème de dix fonctions à trois fonctions qui sont : "*déplacer tissu/première*", "*positionner tissu/première*" et "*rabattre le tissu*". En plus de l'agrégation de fonctions, l'application des heuristiques d'agrégation de fonctions a conduit au choix d'un deuxième robot pour la fonction agrégée "*déplacer tissu/première*".

Il nous reste à définir et trouver des solutions techniques pour les deux fonctions "*positionner tissu/première*" et "*rabattre le tissu*".

Une deuxième évolution de la machine d'enrobage automatique est présentée sur la Figure 67. La conception de cette machine tient en compte des agrégations mentionnées dans le paragraphe 5.4.3.1. Ainsi, la machine est conçue autour de deux robots : le premier robot occupe le poste d'assemblage et le deuxième robot est responsable des opérations de rempliage. Ce deuxième robot a remplacé les vérins linéaires et rotatifs utilisés dans la

conception de la machine présentée sur la Figure 66. Par conséquent, la machine est devenue plus compacte.

L'ajout d'un deuxième robot a favorisé les déplacements dans l'espace et a fait évoluer la machine (Figure 66) d'une architecture 2D à une architecture 3D (Figure 67).

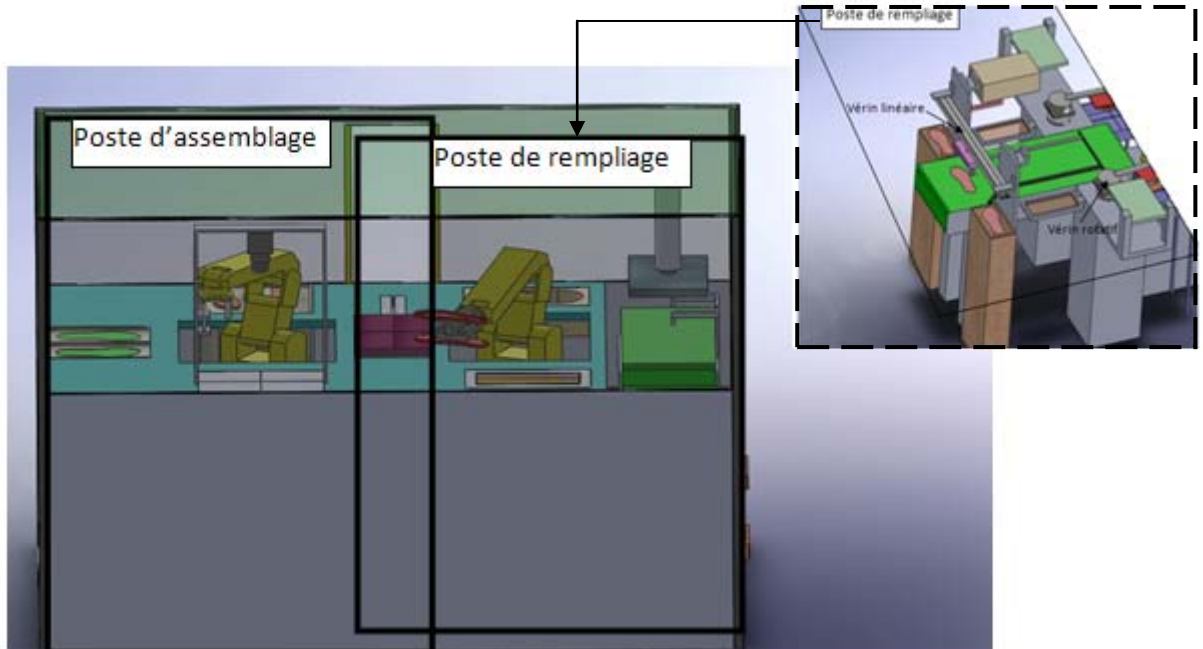


Figure 67. Deuxième évolution de la machine d'enrobage automatique

5.4.4 Synthèse de la phase d'agrégation de fonctions

Grâce à la phase d'agrégation, le nombre de fonctions a été réduit et des solutions techniques ont été choisies. Nous représentons sur la Figure 68 les fonctions du procédé d'enrobage ainsi que les solutions techniques choisies à l'issue de la phase d'agrégation de fonctions.

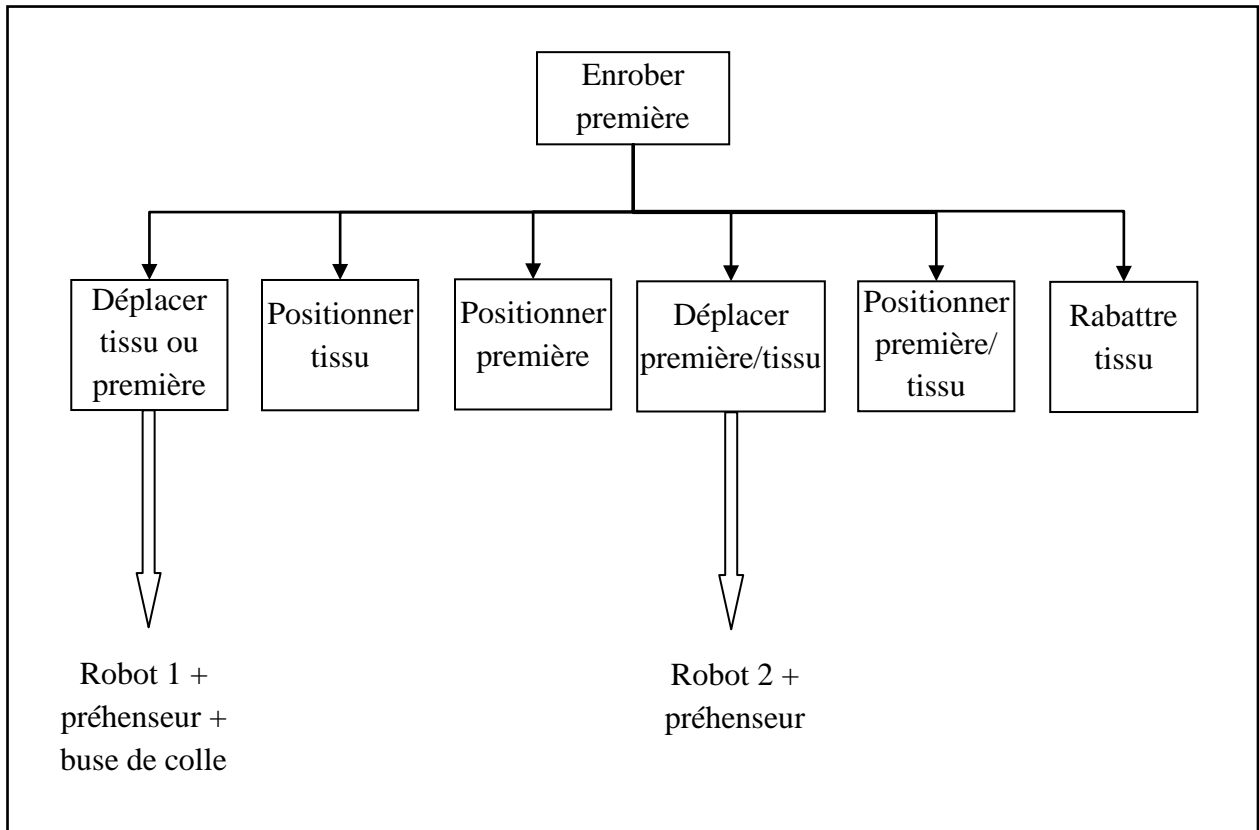


Figure 68. Fonctions et solutions techniques du procédé d'enrobage à l'issue de la phase d'agrégation de fonctions

5.5 Recherche de solutions techniques

La phase de recherche de solutions techniques est la quatrième phase de notre méthodologie de conception. Il s'agit de suivre le synoptique présenté Figure 49 pour la recherche de solutions techniques.

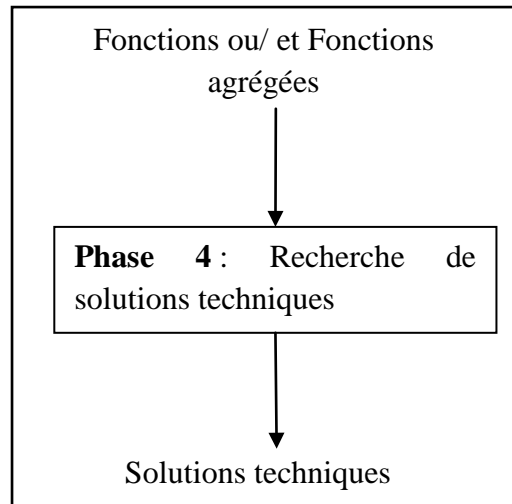


Figure 69. Les entrées/ sorties de la phase de recherche de solutions techniques

Nous commençons d'abord par interroger la base de connaissances sur des solutions possibles.

D'après la Figure 68, nous cherchons des solutions techniques pour la réalisation des fonctions "positionner tissu, positionner première, positionner tissu/première et rabattre tissu.

Afin de définir le préhenseur du premier robot, nous devons également chercher des solutions techniques pour la fonction "dépiler tissu ou première".

5.5.1 Utilisation de la base de connaissances

Pour la fonction "positionner première" par exemple, l'interrogation de la base de connaissances est définie par le synoptique présenté à droite de la Figure 70. Nous saisissons tout d'abord le verbe "positionner". Puisque ce dernier existe dans la base, nous ajoutons le complément "première" qui existe aussi dans la base. Ainsi, la base de connaissances propose toutes les solutions techniques permettant la réalisation de la fonction "positionner première" et qui sont :

- Projection laser du périmètre de la première
- Usinage de la forme de la première sur un posage
- Système de vision pour acquisition de position
- Doigt orienteur et tapis roulant

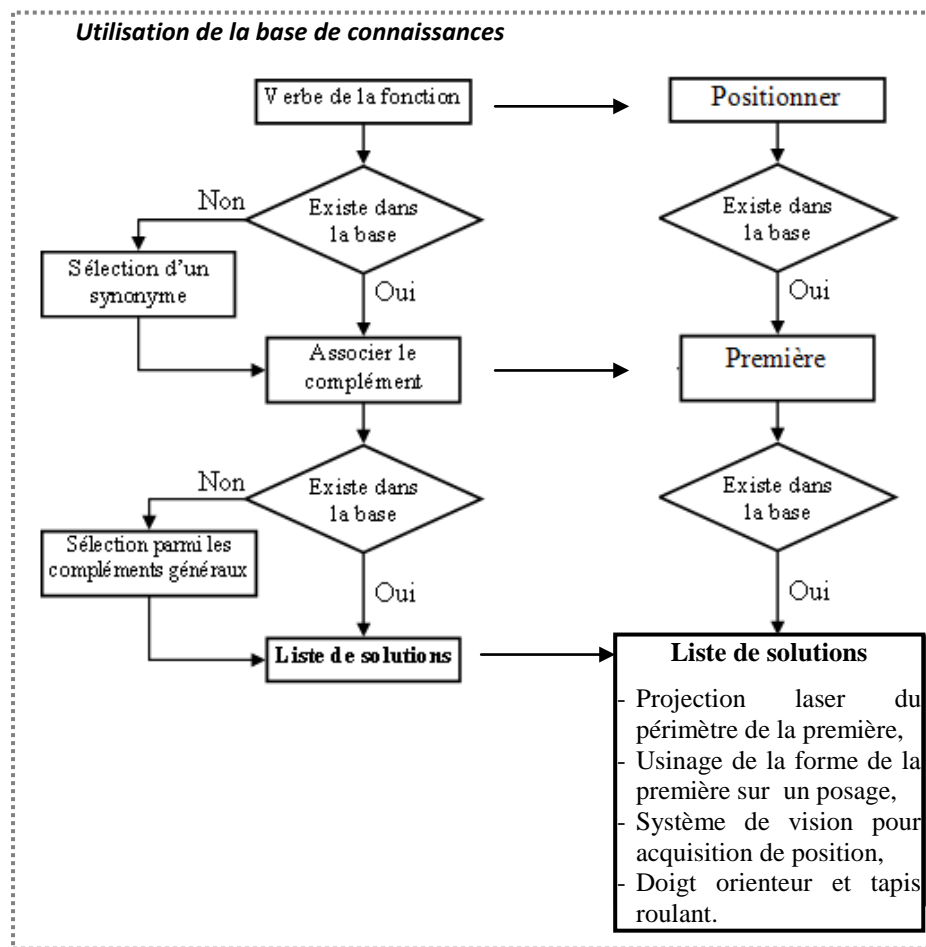


Figure 70. Interrogation de la base de connaissances pour la fonction "Positionner première"

Pour chaque solution technique sont associés les effets produits et les effets induits ainsi que la fiche de critères de pertinence donnée par le Tableau 8. Comme les mouvements de déplacement seront automatisés et effectués par un robot, nous avons choisi le système de vision comme solution technique pour le positionnement des premières.

Nous retrouvons quasiment les mêmes solutions en interrogeant la base de connaissances sur la réalisation des fonctions "positionner tissu" et "positionner tissu/première". Pour les mêmes raisons, nous avons choisi pour la réalisation de chacune de ces fonctions un système de vision.

Pour la fonction "dépiler première", la base de connaissances propose les solutions suivantes:

- Ventouse + air sous pression
- Rampe d'aspiration à plusieurs trous

- Plateau d'aspiration
- Aiguille inclinée

La solution choisie va être montée au bras du robot. Elle doit permettre la prise de la première ou du tissu et le maintien des pièces prises pour pouvoir les déplacer. La solution doit pouvoir dépiler les premières mousses ou des enrobages tissus quelle que soit leur porosité. En tenant compte de ces contraintes et en comparant les différentes solutions proposées, nous avons choisi la rampe d'aspiration à plusieurs trous. Ces trous vont être de petits diamètres afin d'avoir des contacts ponctuels avec le tissu pour pouvoir prendre un seule tissu de la pile d'enrobages tissus.

Pour la dernière fonction "rabattre tissu", la base de connaissances propose seulement comme solution la remplieuse électronique. Cette solution n'est pas automatisée et donc ne peut pas être envisageable dans le cas de la conception de la machine d'enrobage automatique.

La Figure 71 récapitule les solutions choisies par la réutilisation de connaissances pour chaque fonction du procédé d'enrobage.

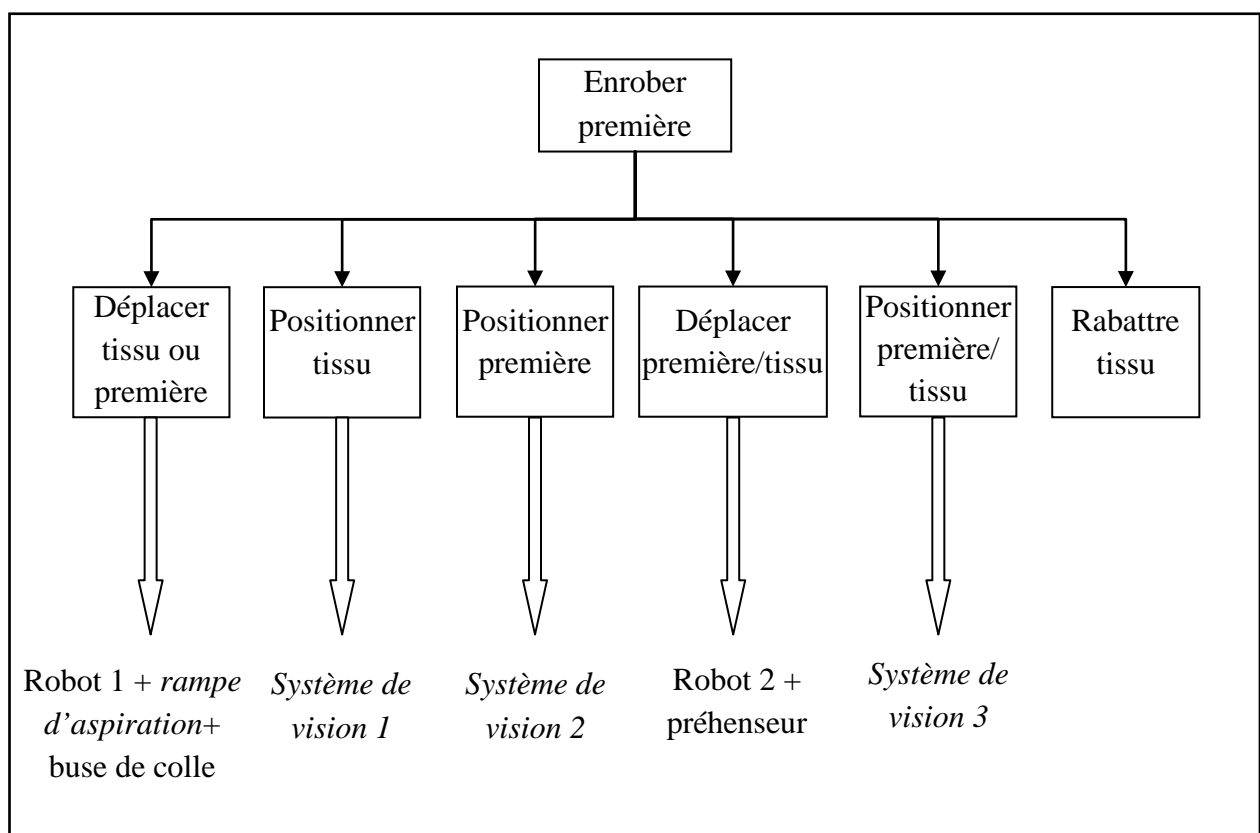


Figure 71. Fonctions et solutions techniques du procédé d'enrobage à l'issue de l'interrogation de la base de connaissances

Pour la fonction "rabattre tissu", nous avons mené une recherche de solutions industrielles extérieures à la base de connaissances (synoptique Figure 49). Nous n'avons trouvé que des solutions mécaniques très complexes, à base de mini vérins nécessitant des réglages difficiles et lents pour chaque pointure et chaque modèle de chaussons. Ces solutions ont été remises en cause, elles ont suscité de nouvelles recherches de solutions innovantes en suivant un processus créatif (Méthode d'Aide à L'INnovation).

5.5.2 Recherche de solutions innovantes pour la fonction "rabattre tissu"

5.5.2.1 Cas de première mousse

Le chausson avec des premières mousses enrobées de tissu est un produit nouveau, que l'entreprise MARQUET a déjà essayé de fabriquer avant le début de la thèse mais sans succès. La difficulté est liée à deux problèmes. Le premier problème constaté concerne la première mousse elle-même. En effet, la souplesse et la compressibilité de la mousse rend la première difficilement manipulable. Le deuxième problème concerne le procédé de remplissage de premières mousses. En effet, la remplieuse électronique utilisée pour remplir les premières cartons ne permet pas d'enrober les premières mousses.

Pour résoudre ces problèmes, nous avons suivi la méthode d'aide à l'innovation guidé par le logiciel de conduite d'études MAL'IN. La méthode est basée sur la succession de 3 étapes (§4.5.2): une phase d'analyse et de structuration, une phase de formalisation du problème sous forme de biais d'attaque du problème et une phase de résolution à partir des outils classiques TRIZ. Cette méthode a été appliquée pour résoudre le premier problème puis le deuxième.

5.5.2.1.1 Conduite d'action pour résoudre le problème lié à la matière mousse

- Analyse et structuration du problème

Cette analyse part d'une analyse de l'existant MARQUET que l'on remet en cause. L'existant consiste à pouvoir enrober des premières en carton ayant une épaisseur de 3 mm et qui sont à plat et rigides. L'évolution de cet existant consiste à pouvoir enrober des premières en mousse ayant une épaisseur de 20 mm et qui sont en forme et souples. La Figure

73 présente la formulation fonctionnelle graphique, à l'aide du graphe des associations Substances/Champs, du problème du manque de rigidité des premières mousses. La première est modélisée comme étant l'association d'un avant, d'un chant et d'un arrière (Figure 72).

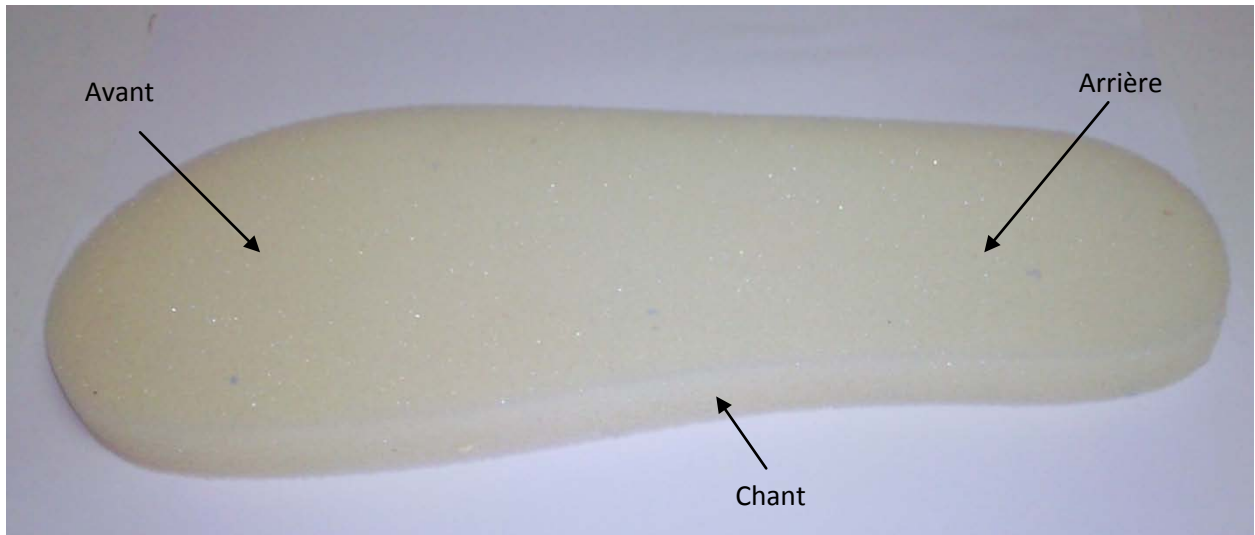


Figure 72. Première mousse

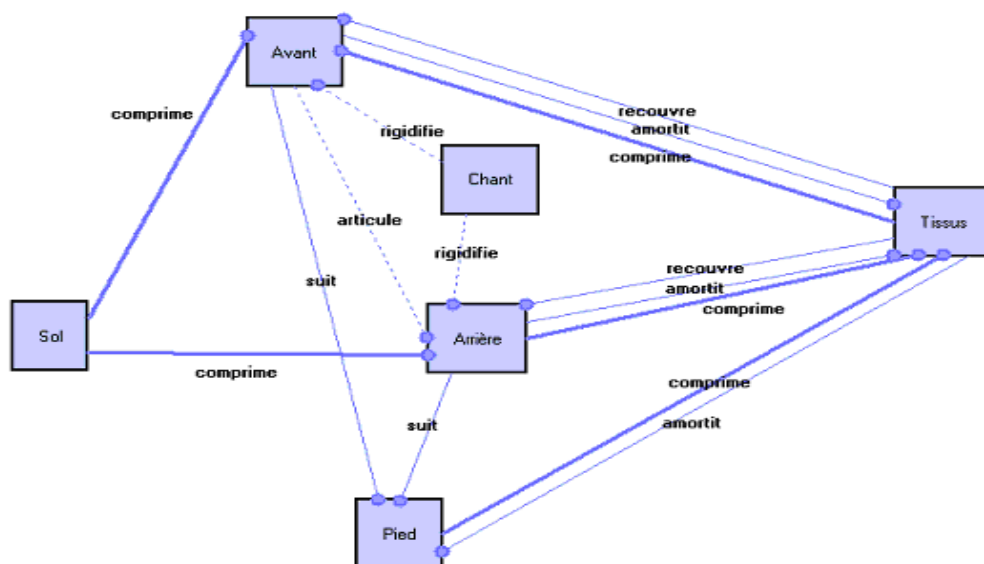


Figure 73. Graphe substances/champs du problème de remplissage de première mousse, syntaxe MAL'IN

L'analyse du graphe des substances/champs (Figure 73) va permettre de dégager les biais d'attaque du problème et par conséquent résoudre le problème.

- Biais d'attaque

Les biais d'attaque de ce problème sont liés à des contradictions physiques.

Contradiction 1

La semelle doit être souple pour amortir et suivre le pied et rigide pour tenir le pied et pour être enrobable.

Contradiction 2

La semelle doit être recouverte pour la propreté (face sup) et pour l'esthétique et pas recouverte pour éviter l'enrobage.

- Résolution de problème

La résolution des biais d'attaque est effectuée par la méthode de séparation dans l'espace en agissant sur la substance. Les principes d'innovation mis en jeu sont : la segmentation, l'extraction et la qualité locale.

Un brainstorming a été organisé avec des membres de l'entreprise MARQUET afin d'interpréter ces principes d'innovation et trouver la solution qui permet d'avoir une première souple pour le confort et l'amortissement et au même temps rigide pour être enrobable. La solution retenue est de se servir d'une couronne comme outillage, ce qui permet de rigidifier la première mousse et de la rendre manipulable (Figure 74). Cette solution a permis aussi de débiter l'opération de remplissage du tissu sur le chant de la première.

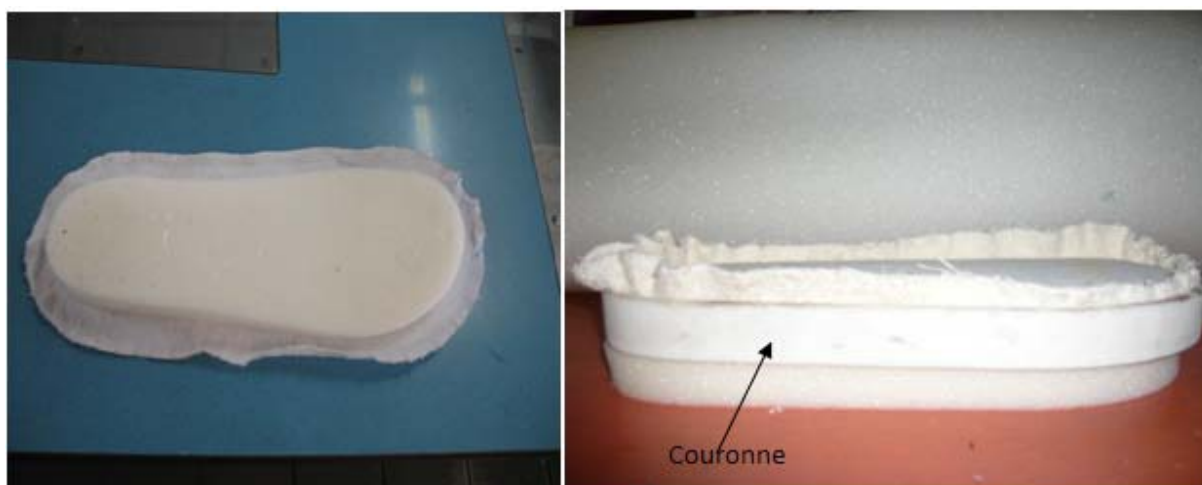


Figure 74. Couronne pour première mousse

5.5.2.1.2 Conduite d'action pour résoudre le problème lié au remplissage de première mousse

- Analyse et structuration du problème

Il s'agit de remettre en cause le procédé de remplissage manuel pour résoudre le problème. Le remplissage manuel consiste à remplir une première en carton en utilisant une remplieuse électronique (Figure 56). Cette dernière sert à replier et, en même temps, à coller le bord de l'enrobage tissu sur le carton. La première est guidée par l'opérateur contre une glissière et sous une tige qui tient le bord du tissu et qui distribue la colle. Une paire de marteaux replie les bords, presse et transporte la première carton. La Figure 75 présente la formulation fonctionnelle graphique du procédé de remplissage manuel à l'aide du graphe des associations Substances/Champs.

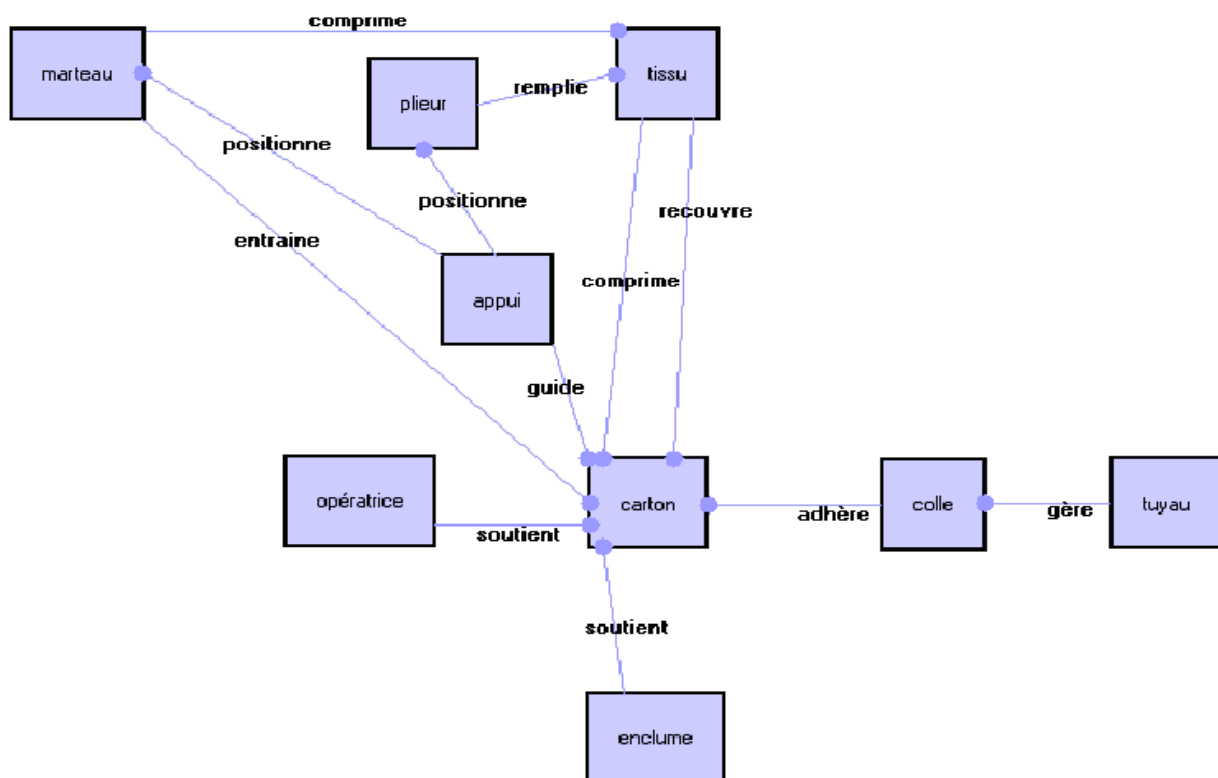


Figure 75. Formulation fonctionnelle graphique du procédé de remplissage manuel

Le procédé existant pour le remplissage des premières en carton (Figure 75) ne peut pas être utilisé pour le cas des premières en mousse. En effet, l'épaisseur de la mousse et sa

déformation lors du contact avec le plieur et le système de marteaux rend ce système inapplicable pour le cas des premières en mousse. Pour faire évoluer ce procédé existant, nous représentons sur la Figure 76 la formulation graphique du problème fonctionnel de remplissage dans le cas de première mousse.

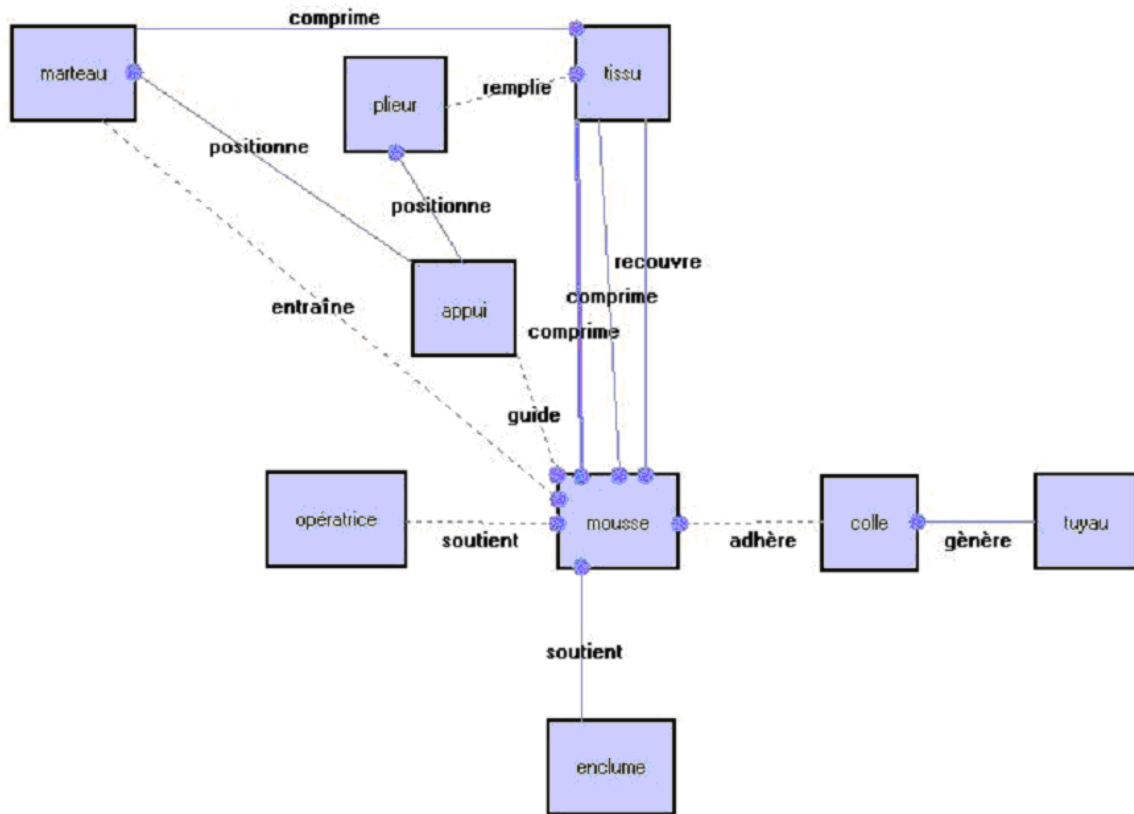


Figure 76. Graphe substances/champs du problème de remplissage de première mousse, syntaxe MAL'IN

Lors de l'analyse du graphe des substances/champs (Figure 76), une idée est apparue : il s'agit d'utiliser une membrane élastique qui permet en une seule opération de rabattre les bords du tissu qui sont levés par l'enfoncement de l'ensemble première/tissu dans la couronne (Figure 74).

Plusieurs prototypes ont été conçus et testés en utilisant la membrane élastique. Dans tous essais effectués, nous avons rencontré le problème suivant: des plis dans les parties avant et arrière de la première. En analysant les comportements physiques de la membrane au moment du contact avec le tissu et la couronne, nous avons pu trouver les biais d'attaque du problème.

- Biais d'attaque

Les biais d'attaque de ce problème sont liés à des contradictions techniques et physiques.

Contradiction technique

Contradiction 1

La membrane doit être souple pour épouser la couronne et rigide pour retourner et coller les bords du tissu

Paramètre à améliorer : résistance

Paramètre à ne pas dégrader : la forme

Principes d'innovation : (10) Anticipation, (30) le déformable, (35) le changement de propriétés, (40) les matériaux composites

Contradiction physique

Contradiction 2

La membrane doit être absente au moment du positionnement de l'ensemble couronne-première pour ne pas plier les bords du tissu et présente pour retourner les bords.

Séparation dans l'espace : Agir sur la substance

Principes d'innovation : (1) segmentation, (2) extraction, (3) la qualité locale

- Résolution de problème

Un brainstorming a été organisé et a conduit à plusieurs idées. Celle qui a été retenue a été testée et validée. Il s'agit d'une membrane préformée, collée sur la circonférence intérieure d'un caisson (Figure 77). Dans un premier temps, l'aspiration permet de plaquer la membrane ce qui facilite le positionnement de la couronne (contenant l'ensemble tissu/première) à l'intérieur du caisson. Dans un second temps, le gonflage de la membrane va la pousser à épouser la forme de la couronne, ce qui permet de rabattre correctement le tissu.

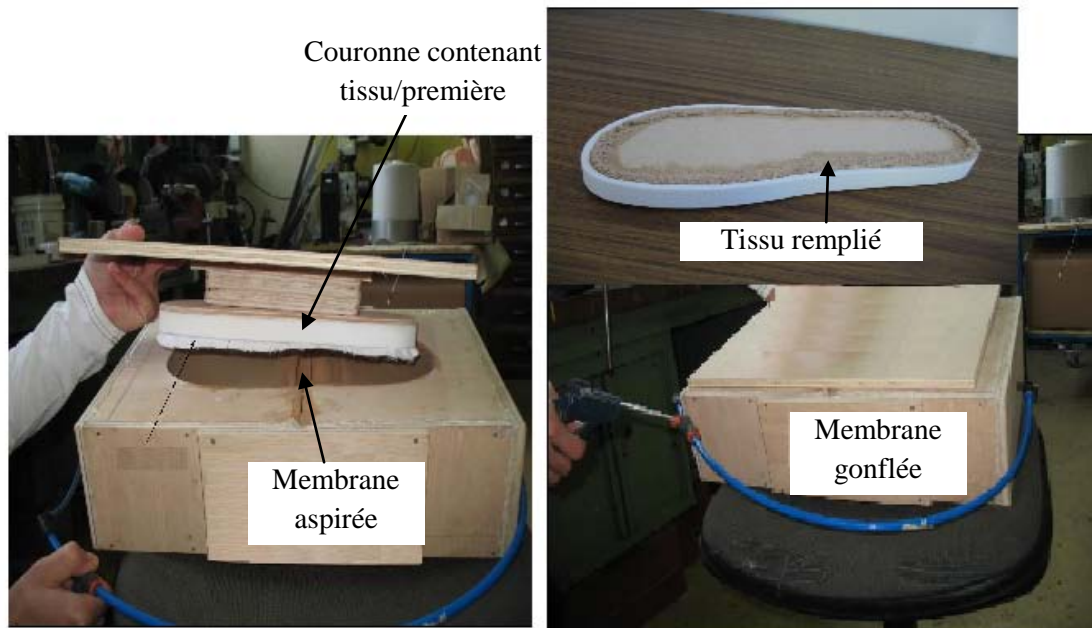


Figure 77. Principe de remplissage de première mousse : prototype réalisé

5.5.2.2 Cas de première carton

On s'est inspiré de la solution de remplissage mise en place pour les premières mousses pour trouver une solution technique pour le remplissage de premières cartons. Profitant de la rigidité du carton, nous avons éliminé les couronnes et nous avons gardé le principe de la membrane qui permet de remplir en une seule opération. Dans ce cas, l'ensemble première/tissu est pris par un outillage spécial qui sera fixé au bras du deuxième robot et enfoncé dans une membrane collée à plat (Figure 78). En créant du vide comme montre la Figure 78 entre le plateau et la membrane, cette dernière va épouser la forme de l'outillage, ce qui va permettre de rabattre le tissu sur tout le périphérique de la première.

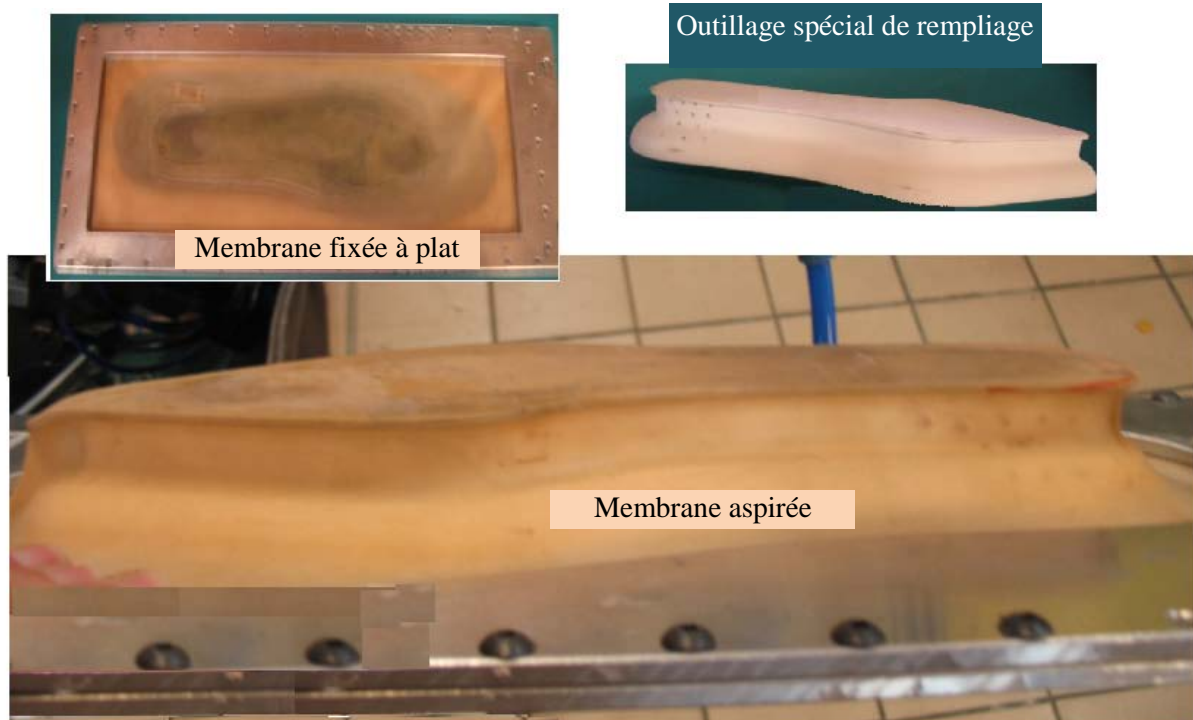


Figure 78. Principe de remplissage de première carton : prototype réalisé

5.6 Agrégation de composants

L'agrégation de composants est la cinquième phase de notre méthodologie de conception. A partir des solutions techniques choisies dans la phase de recherche de solutions, nous cherchons à trouver des agrégations de composants en appliquant les heuristiques d'agrégation 3, 4, 5, 6 et 7.

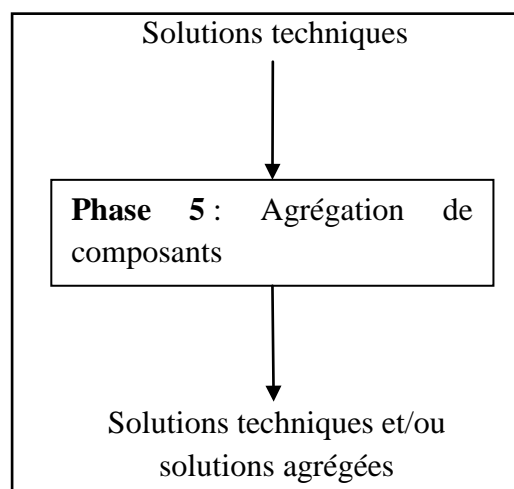


Figure 79. Les entrées/ sorties de la phase d'agrégation de composants

Pour étudier les liens et trouver des agrégations entre les solutions techniques choisies, nous représentons sur la Figure 80 les fonctions du procédé d'enrobage et les solutions choisies à l'issue de la phase de recherche de solutions. Cette figure va nous permettre d'avoir une vision claire de toutes les solutions et les possibilités d'agrégation.

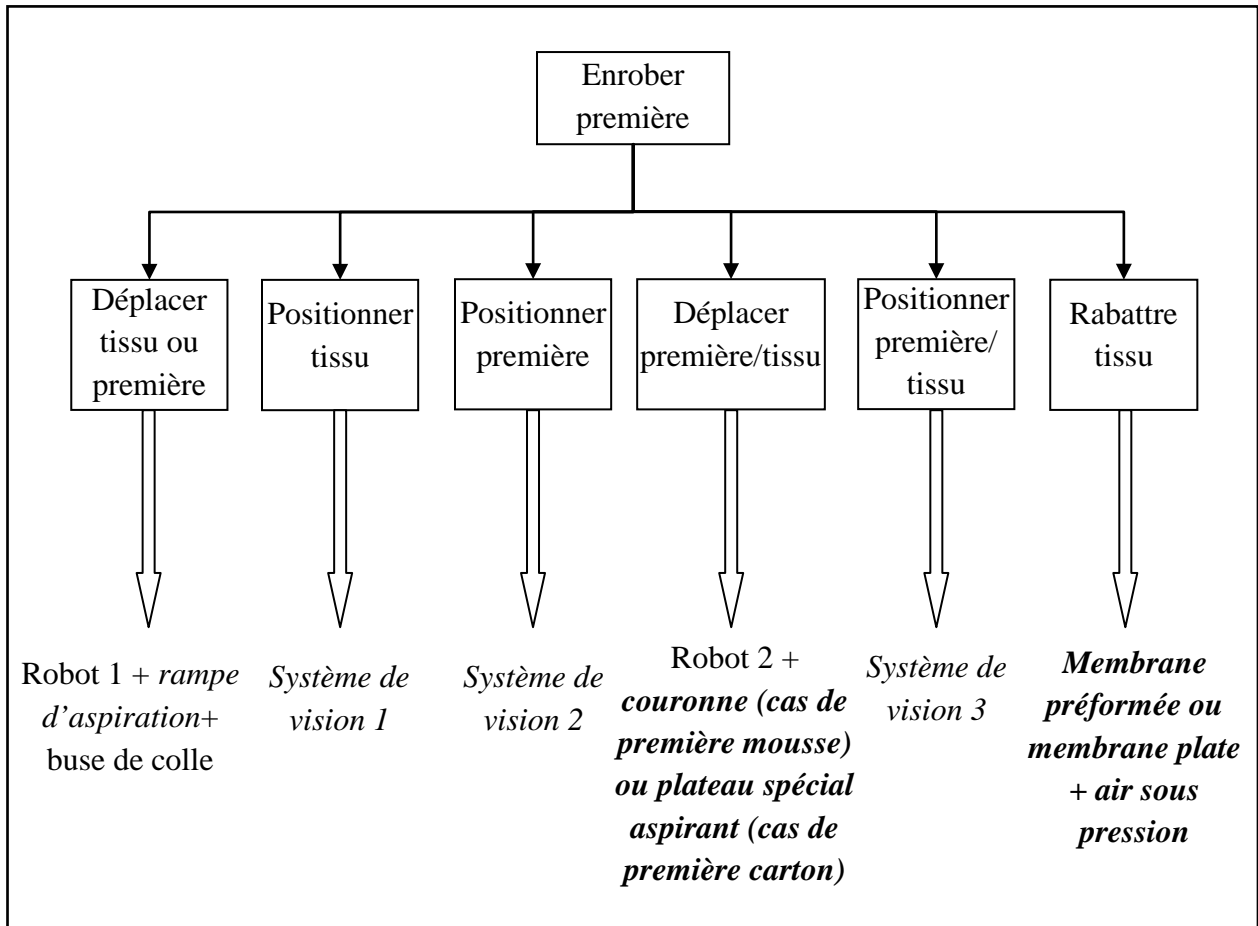


Figure 80. Fonctions et solutions techniques du procédé d'enrobage automatique à l'issue de la phase de recherche de solutions

Heuristique 4 : Les composants convertisseurs ou transmetteurs peuvent être agrégés s'ils produisent ou transmettent des flux fonctionnels de même nature.

En appliquant l'heuristique 4, nous pouvons agréger les systèmes de vision 1, 2 et 3. Dans ce cas, toutes les fonctions de positionnement seront réalisées avec un seul système de vision. Il suffit d'adapter le programme de la caméra pour les différentes pointures, couleurs et matières de tissus.

Heuristique 5 : L'agrégation de composants permet d'agrèger les composants de contrôle/commande.

L'application de l'heuristique 5 est une conséquence de l'heuristique 4. En effet, en agrégeant les systèmes de vision en un seul, nous aurons qu'une seule commande et qu'un seul contrôle de la caméra à mettre en place.

Heuristique 6 : Si une fonction impose une solution technique avec adaptation d'outillages, il faut réduire leur nombre par agrégation.

Les couronnes servant à rigidifier les premières mousses et nécessaires pour le remplissage sont spécifiques à chaque modèle de chaussons et nécessitent pour chaque pointure deux couronnes, une couronne pour le pied gauche et une couronne pour le pied droit. D'après l'heuristique 6, il faut chercher des agrégations pour réduire le nombre de ces outillages. A cette fin, nous avons lié ensemble, pour une même pointure, la couronne du pied gauche avec la couronne du pied droit formant ainsi un seul outillage. Par accord avec l'entreprise, nous avons modifié la gamme de pointures en les assemblant par paires (36/37, 38/39, 40/41). Ainsi, nous ramenons le nombre d'outillages pour un modèle de chausson de dix outillages à trois.

L'heuristique 6 est appliquée de la même façon pour les plateaux aspirant nécessaires pour le remplissage et la prise de l'ensemble tissu/première carton. Nous avons assemblé en un même outillage le plateau pied gauche avec le plateau pied droit. Nous avons conçu des plateaux valables pour toute la gamme de pointures de 36 à 41.

Heuristique 7: Une solution technique donnée peut imposer une autre solution ou un contrôle particulier.

Finalement, en vérifiant la liste de solutions techniques et leurs dépendances associée à l'heuristique 7, nous remarquons que le robot impose un système de vision pour le positionnement, ce qui le cas de notre choix. L'heuristique 7 est donc appliquée.

La Figure 81 présente les fonctions et les solutions techniques du procédé d'enrobage automatique à l'issue de la phase d'agrégation de composants. Ces solutions seront agencées dans la phase suivante afin de définir l'architecture de la machine.

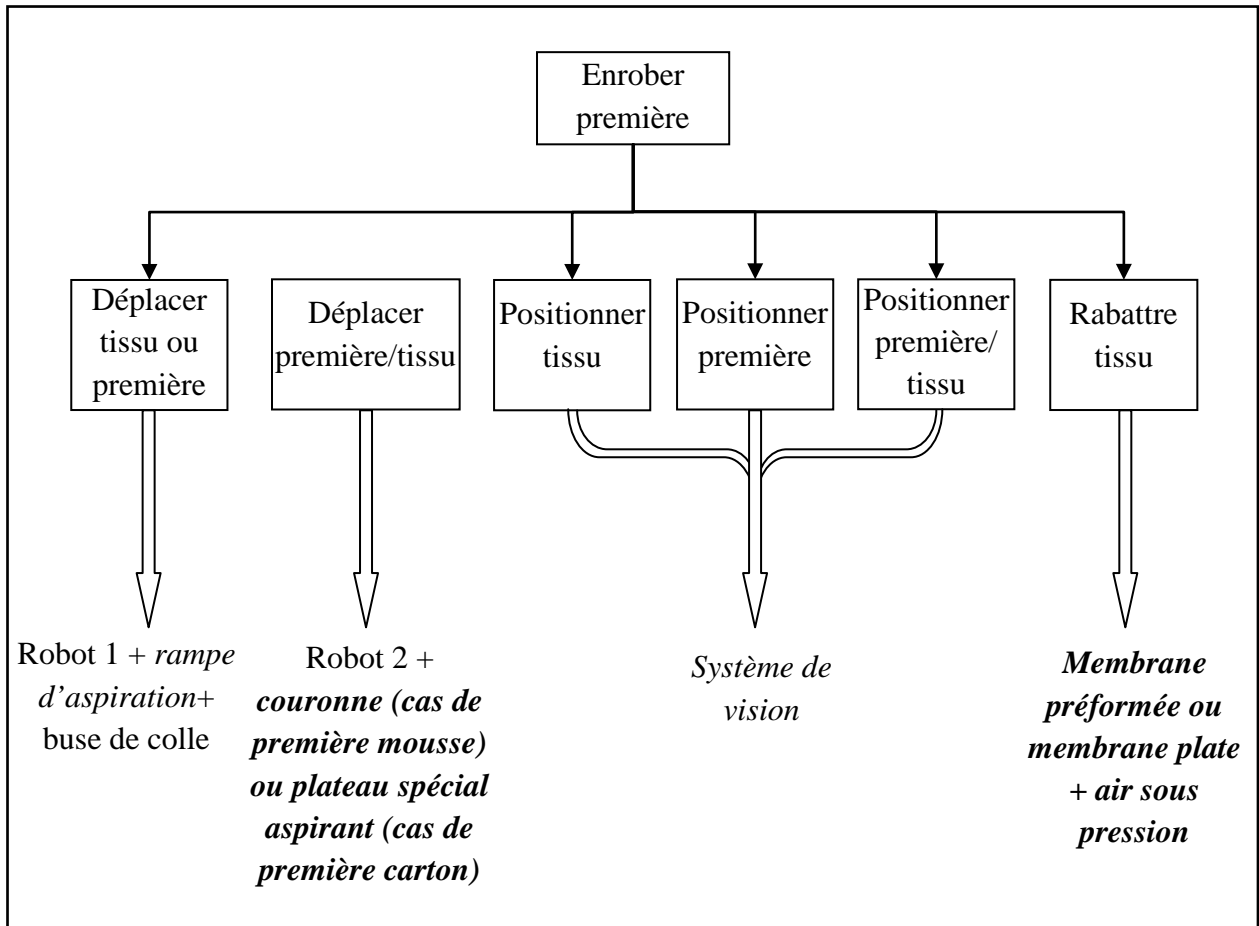


Figure 81. Les fonctions et les solutions techniques du procédé d'enrobage automatique à l'issue de la phase d'agrégation de composants

5.7 Agencement de solutions techniques

La phase d'agencement est la dernière étape de notre processus de conception. Nous utilisons les heuristiques d'agencement définies au paragraphe §4.7 pour définir l'architecture finale de la machine.

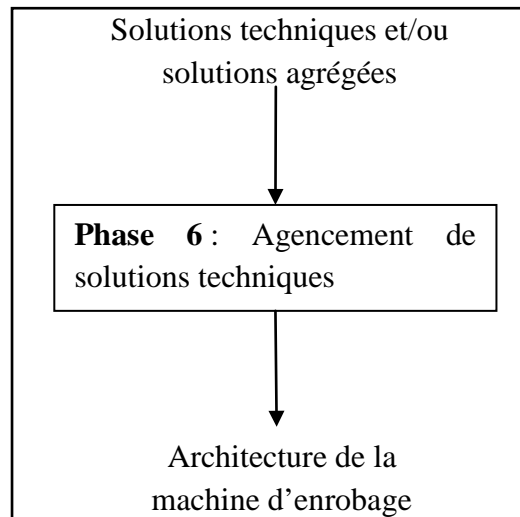


Figure 82. Les entrées/ sorties de la phase d'agencement

5.7.1 Application des heuristiques de placement

Heuristique 8: Les composants doivent être positionnés et liés à une référence de façon directe ou indirecte.

Basé sur l'heuristique 8, nous avons conçu un socle, représentant la référence machine, qui sera transportable sur des roulettes et sur lequel vont être fixés tous les composants. Par le biais de ce socle, la machine aura son indépendance et l'entreprise aura plus de facilité pour positionner la machine dans l'atelier.

Heuristique 9: L'encombrement de la machine doit être réduit en adoptant des architectures évoluant selon la logique : 1D→2D→3D→4D.

Par l'application des heuristiques d'agrégation de fonctions et de composants, la machine a évolué d'une configuration 1D (Figure 65) à une configuration 3D (Figure 67). Le choix de deux robots permet des déplacements dans l'espace, ce qui a conduit à réduire l'encombrement de la machine et à satisfaire la contrainte de compacité exigée par l'entreprise MARQUET. Ainsi, l'heuristique 9 est appliquée.

La machine peut évoluer davantage en 4D en changeant pendant son fonctionnement la disposition des bacs d'approvisionnement de premières et d'enrobages tissus.

5.7.2 Application des heuristiques d'interaction

Heuristique 10 : Les pertes d'énergie doivent être réduites en regroupant les composants utilisant même type d'énergie.

Afin d'étudier les interactions entre les composants, nous avons analysé la demande en énergie des principaux composants de la machine. A partir de cette analyse et en se basant l'heuristiques 10, nous envisageons de placer les deux robots à proximité puisqu'ils fonctionnent à l'énergie électrique et nécessitent des conduites d'air sous pression pour leurs préhenseurs (rampe d'aspiration, buse de colle, outillages de rempliage). Les caissons de membranes nécessitent de l'énergie pneumatique sous forme d'air sous pression et par conséquent, ils doivent donc être placés ensemble.

Heuristique 11 : Les distances entre composants doivent être réduites afin de favoriser le passage des flux de matière.

Dans le but de diminuer le temps de cycle, les piles de premières et d'enrobages tissus doivent être placées du côté du premier robot et à proximité du système de vision (caméra). Le poste où s'effectuera l'encollage du tissu et son assemblage avec la première doit être accessible d'une part, au premier robot afin de pouvoir positionner, encoller et assembler les pièces et d'autre part au deuxième robot afin de transporter l'ensemble premières/tissu au poste de rempliage.

Les caissons membranes doivent être installés du côté du deuxième robot responsable de l'opération de rempliage. L'évacuation des premières enrobées sera aussi de ce même côté.

A partir de ces constatations (applications des heuristiques 10 & 11), un croquis de l'architecture de la machine d'enrobage automatique est présenté sur la Figure 83.

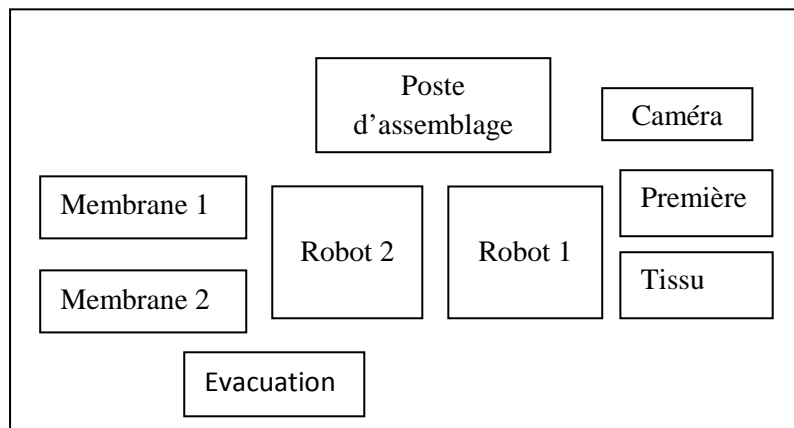


Figure 83. Croquis de l'architecture de la machine d'enrobage

Heuristique 12 : Les flux de signaux ou d'information doivent être correctement transmis par les composants d'interaction ou les interactions directes.

L'acquisition de positions par le système de vision (caméra) est transmise directement au robot 1 afin de pouvoir placer les premières ou les enrobages tissus. Le transfert d'informations doit être effectué par un composant d'interaction adéquat n'affectant pas la qualité de transmission.

Le fonctionnement de la buse de colle est commandé par le programme du robot 1. La liaison entre la commande de la buse et le robot doit être effectuée par un câble électrique adapté aux différents mouvements dans l'espace du robot.

Heuristique 13 : Les composants d'interaction doivent être standardisés, réduits, voire éliminés.

L'interface et les liens entre les différents composants seront réalisés avec des composants standards facilement interchangeables et disponibles dans le marché.

Heuristique 14 : Le choix des composants d'interaction entre composant/composant et composant/référence est le résultat d'une analyse de l'isostaticité ou l'hyperstaticité de l'ensemble.

L'heuristique 14 n'est pas appliquée dans cet exemple de conception car l'utilisation des robots n'impose pas de montage spécifique.

Heuristique 15 : Les effets produits et induits liés aux composants d'interaction ou aux interactions directes doivent être analysés et leur impact sur le fonctionnement doit être réduit ou éliminé.

Les effets qui peuvent avoir lieu sont :

- Des problèmes de Compatibilité Electromagnétique (CEM) due à l'utilisation de l'énergie électrique : Comme les robots respectent le niveau de compatibilité électromagnétiques imposé par les diverses réglementations, il faudra juste ajouter des blindages pour les câbles.
- De l'usure et des fuites dans les membranes : Il faut prévoir des membranes de rechange et respecter lors du gonflage l'élasticité de la membrane utilisée.
- De la pollution de la caméra : prévoir une cage de protection
- Un écrasement préhenseur/tissu : il faut tenir compte, lors de la programmation, du type de tissu.

5.7.3 Application des heuristiques de sûreté de fonctionnement

Heuristique 16 : La fréquence d'intervention humaine doit être réduite au maximum.

Le fonctionnement de la machine est entièrement automatique. L'opérateur n'est présent que lors de changement d'outillages ou de chargement de premières et d'enrobages tissus.

Heuristique 17: La rencontre entre l'homme et le danger doit être évitée par des séparations matérielles ou virtuelles.

La machine doit être entièrement fermée par une enceinte de sécurité.

Des portes d'accès avec contacts de sécurité doivent toutefois être prévues pour le changement d'outillages ou pour le chargement de premières et de tissus.

Heuristique 18: Les actionneurs doivent être synchronisés ou indexés afin d'augmenter la fiabilité de la machine.

Afin de diminuer les temps d'attente et le nombre d'arrêt entre les différentes opérations, le fonctionnement du premier robot va être en temps masqué : L'assemblage de la première droite avec le tissu droit va se faire au même temps que le rempliage du tissu gauche par le robot 2. Comme le temps d'assemblage est quasiment égal au temps de rempliage (~15 sec), les deux robots vont être synchrones.

Heuristique 19: Les accès aux composants maintenables ou interchangeables doivent être facilités.

Des portes d'accès doivent être prévues pour le chargement de premières et de tissus ainsi que devant les bras des robots pour le changement d'outillages.

Heuristique 20: L'accessibilité aux zones d'approvisionnement de la machine doit être définie de manière à augmenter son autonomie.

Afin d'augmenter l'autonomie de la machine, nous envisageons de mettre des caissons contenant plusieurs piles de premières et de tissus. D'autre part, nous comptons également augmenter le nombre de pièces par pile. En revanche, l'augmentation du nombre de pièces bloque l'accès de la rampe d'aspiration aux dernières pièces de la pile. A cette fin, nous ajoutons un vérin qui sera fixé au bras du robot et sur sa tige sera montée la rampe d'aspiration.

5.7.4 Application des heuristiques de développement durable

Heuristique 21: Analyser le procédé selon les axes d'éco-efficacité :

- **Réduire son influence matérielle**
 - **Augmenter son efficacité énergétique**
 - **Réduire les risques de toxicité**
 - **Accroître sa recyclabilité et sa réutilisation**
 - **Optimiser l'utilisation des ressources**
 - **Augmenter sa durée de vie**
 - **Augmenter sa flexibilité et ses fonctions**
-

Prenant en compte également l'environnement et le développement durable (heuristique 21), nous avons choisi une colle aqueuse sans solvant. Cette colle présente l'avantage d'être beaucoup moins toxiques que les colles à base solvants, et d'être ininflammables à l'état liquide.

5.7.5 Architecture finale de la machine d'enrobage

L'architecture de la machine d'enrobage définie suite à la phase d'agencement est présentée sur la Figure 84. Cette architecture est le résultat de l'application de notre méthodologie de conception. Elle vérifie toutes les exigences et contraintes définies dans la STB.

La machine est conçue autour de deux robots placés l'un à côté de l'autre. Conformément aux heuristiques de placement, tous les composants sont liés à un même châssis. Le choix de deux robots a permis d'avoir une architecture machine dans l'espace (3D) et ainsi augmenter sa compacité. Cette architecture peut évoluer dans le temps aux nouveaux besoins (4D). En effet, nous avons libéré le côté droit de la machine pour avoir plus de flexibilité et laisser la possibilité d'intégrer d'autres fonctionnalités, comme par exemple l'utilisation des robots pour l'assemblage de la première enrobée avec le dessus du chausson.

L'emplacement de différents composants est en adéquation avec le croquis présenté sur la Figure 83. Les robots sont proches l'un de l'autre, les bacs d'approvisionnement ainsi

que la caméra sont placés du côté du robot 1. Les membranes de rempliage et les bacs de premières enrobées sont agencés du côté du deuxième robot. Les distances entre les différents composants sont réduites au maximum (heuristique 11), menant à une machine plus compacte que celle présentée sur la Figure 67.

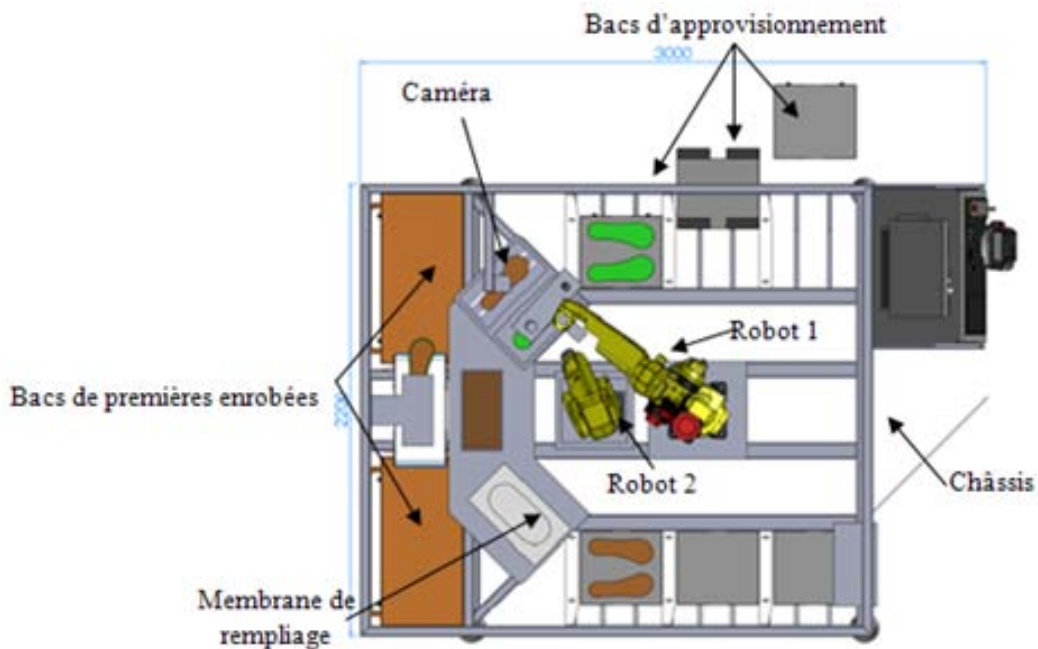


Figure 84. Vue de dessus de la machine d'enrobage automatique

Comme il a été préconisé par les heuristiques de sûreté de fonctionnement, la machine est entièrement fermée par une enceinte de sécurité (Figure 85). Des portes d'accès sécurisées sont installées face aux bras des robots pour le changement d'outillage et aussi devant les bacs d'approvisionnement. Un écran d'affichage est lié à la machine pour gérer l'interface homme/machine et faciliter tous les réglages de changement de production.

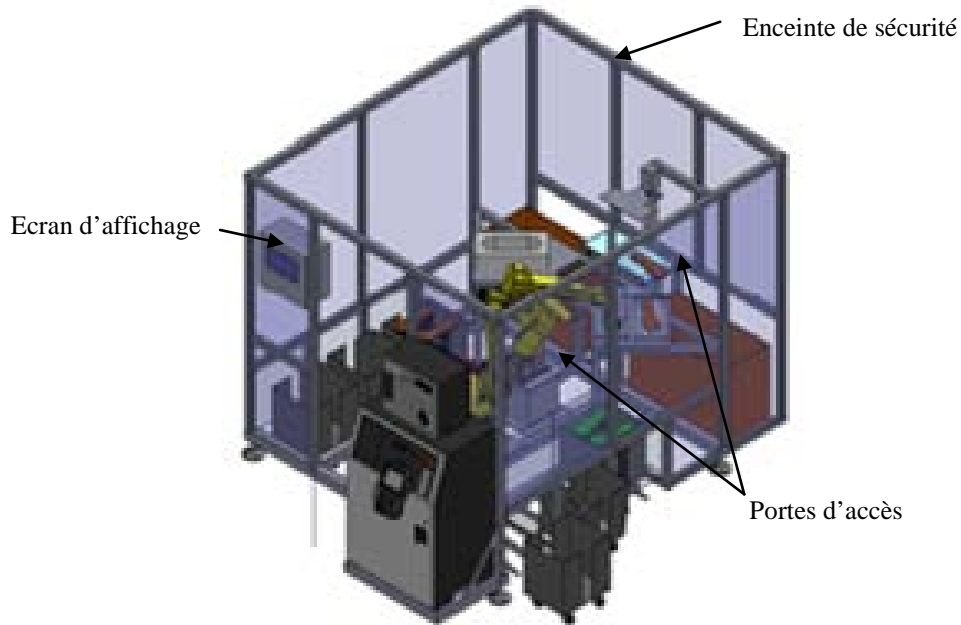


Figure 85. Vue globale de la machine d'enrobage automatique

Plusieurs bacs d'approvisionnements ont été envisagés afin d'augmenter l'autonomie de la machine.

Cette machine automatique, plus productive que le procédé d'enrobage manuel, va remplacer le travail manuel réalisé par deux personnes. Elle permet d'enrober en automatique des premières en cartons et des premières en mousses, base d'un nouveau produit dans la PME MARQUET.

5.8 Synthèse de la méthodologie de conception

Dans ce chapitre, nous avons appliqué le processus de conception complet qui part de l'analyse du besoin jusqu'à la définition de l'architecture de la machine.

Ce processus s'accompagne, à chaque étape, d'outils support permettant l'analyse, favorisant la réflexion et donnant des éléments de prise de décision.

L'utilisation dans le cadre de la conception de la machine d'enrobage des premières montre la pertinence du processus proposé et de ses outils associés. Le lecteur a pu remarquer l'évolution de la définition de la machine d'enrobage depuis la vision organique des tâches et

leur réduction séquentielle jusqu'à le raffinement des solutions techniques et de leur agencement.

L'utilisation des séquences génériques et des heuristiques ont montré leur efficacité. Cependant, l'emploi des heuristiques demande un apprentissage préalable qui sera facilité par l'outil informatique.

La réalisation du procédé conçu est actuellement en instance de décision après un chiffrage des différents composants.

L'utilisation réelle de la méthode permet d'affirmer qu'elle peut être appliquée pour la conception de procédés de montage ou d'assemblage.

Conclusion générale et perspectives

Dans cette ultime partie, nous apportons des conclusions à ce travail de recherche-action effectué au sein de l'entreprise MARQUET & Cie, en partenariat avec le laboratoire TREFLE de l'école Arts et Métiers ParisTech de Bordeaux.

Nous évoquerons les contributions apportées au cours de cette expérience très enrichissante, aussi bien en termes de recherche, que d'un point de vue industriel. Puis, nous exprimerons les perspectives envisagées concernant le processus d'innovation et de conception présenté dans le quatrième chapitre et notamment la nécessité de l'expérimenter dans des secteurs industriels autre que celui de la chaussure.

Contexte, genèse de la thèse

A partir de la définition d'un besoin sous forme fonctionnel, un processus de conception consiste à suivre une séquence d'activités conduisant à la définition d'une ou de plusieurs architectures du procédé. Pour chaque phase de conception, différents outils supports et méthodes de résolution sont proposées dans la littérature. En analysant les méthodes de résolution existantes, nous avons observé que, dans la majorité de cas, il n'est pas évident qu'une petite entreprise non spécialiste à la conception de procédés de fabrication, puisse appliquer et exploiter tous ces supports.

L'entreprise MARQUET & Cie est une PME fabriquant des articles chaussants. Elle a choisi de briser sa dépendance envers les intégrateurs extérieurs, aussi bien pour la conception que pour la maintenance de machines spéciales, qui sont proposées à des prix très élevés. L'entreprise a décidé de mettre en place un processus d'innovation et de conception lui permettant de concevoir en interne ses nouveaux procédés de fabrication. Le manque de

compétences techniques et de ressources humaines au sein de la PME a conduit à orienter ce travail de thèse vers la formalisation d'un processus de conception de procédés de fabrication, intégrant des phases d'innovation et de réutilisation de la connaissance et compatible avec les ressources d'une PME. .

En effet, la recherche de nouvelles solutions à des problèmes techniques tient une place non négligeable dans le processus de conception. Généralement, les concepteurs se basent sur les connaissances possédées afin de proposer des solutions : la résolution de problèmes est opérée par la réutilisation de connaissances. Par contre, s'il n'existe pas de solution existante satisfaisante au problème, la résolution de problème ne peut se faire que par la créativité technique.

Vu que la plupart des méthodes de gestion de connaissances existantes sont très lourdes à mettre en œuvre dans le cadre d'une petite entreprise qui a peu de moyens et de personnel qualifié, l'entreprise MARQUET s'est trouvée face à une difficulté pour capitaliser et préserver ses connaissances, afin de pouvoir les réutiliser ultérieurement dans le processus de conception. Cette PME ne disposant pas d'outils, ni de méthodes ou de personnel dédié pour gérer, capitaliser et archiver ses connaissances, ses procédés de fabrication ont été conçus et réalisés à l'extérieur de la PME, laquelle ne dispose pas forcément des données de conception.

Contributions

Afin de favoriser la réutilisation de connaissances, nous avons développé une méthode de capitalisation de connaissances, qui a débouché sur la construction d'une base de connaissances. La méthode proposée repose sur trois étapes :

- Durant la première étape 1 d'analyse de l'existant, nous adoptons une vision fonctionnelle. Un procédé de fabrication est décrit par une décomposition hiérarchique en tâches, jusqu'aux fonctions élémentaires. Un outil graphique a été développé pour représenter cette décomposition fonctionnelle qui prend en compte l'allocation des tâches et des fonctions, la succession temporelle ainsi que les conditions de contrôles et de transitions. Cette représentation graphique facilite la conception fonctionnelle de procédés nouveaux. De plus, des processus complets de fabrication existants peuvent être archivés par le biais de cet outil.

- La deuxième étape d'extraction des connaissances est basée sur une vision énergétique utilisée pour la description de solutions techniques. Les solutions techniques mises en place pour la réalisation des fonctions sont décrites à partir de la classification CTOC (Convertisseur/Transmetteur/Opérateur/Contrôle).
Pour chaque solution technique, nous avons également capitalisé toutes les connaissances permettant sa qualification. Il s'agit de critères de qualification technologiques, économiques et des critères de qualification au niveau de la société ou du marketing. Nous avons proposé un tableau récapitulatif qui constitue un guide pour la qualification d'une solution technique : il spécifie, par exemple, pour un critère de qualification donné, la variable de critère correspondante et la façon de l'exprimer.
- La troisième étape consiste à la construction de la base de connaissances. A partir de bases fonctionnelles existantes (Hirtz, Stone, McAdams, Szykman, & Wood, 2002), (Sallaou, 2008), nous avons développé une base de verbes et une base de compléments, prenant en compte les termes propres aux métiers de l'entreprise. Ces bases ont été structurées afin de définir une façon standard pour l'expression des fonctions et pour l'interrogation de la base de connaissances. Pour une fonction donnée, exprimée par une association compatible de verbe-complément, la base proposera au concepteur toutes les solutions techniques capitalisées liées à cette fonction, ainsi que leurs qualifications.
Une façon simple et rapide d'interrogation de la base de connaissances a été également définie. Cette démarche peut être adaptée à chaque entreprise, qui devra entrer ses propres verbes et compléments métiers, ainsi que les solutions techniques associées.

Nous avons proposé également dans ce mémoire un processus de conception et d'innovation complet, basée sur la créativité et la réutilisation de l'existant dans la recherche de solutions. Ce processus de conception concerne, d'une manière générale, les procédés de montage ou d'assemblage.

Conscients des difficultés d'appropriation en PME, nous proposons pour chaque phase de notre processus, des outils de résolution adaptés au contexte d'une petite entreprise. Les grandes phases de notre méthodologie de conception sont les suivantes :

- La première phase d'analyse du besoin permet l'expression du besoin client sous forme d'un cahier des charges fonctionnel et des exigences techniques (STB).
- La deuxième phase de décomposition fonctionnelle débouche sur une représentation séquentielle hiérarchique du procédé à concevoir. Pour cette phase, le concepteur dispose d'un outil graphique, des décompositions fonctionnelles des procédés existants ainsi que des séquences génériques.
- Durant la troisième phase d'agrégation de fonctions, un regroupement des fonctions est opéré, afin de diminuer leur nombre et par conséquent le nombre de composants. Cette phase est guidée par deux heuristiques d'agrégation de fonctions.
- La quatrième phase consiste en une recherche de solutions techniques. Cette phase est basée sur la réutilisation de connaissances à partir de l'interrogation de la base de connaissances développée et sur un processus créatif guidé par le logiciel MAL'IN.
- La cinquième phase d'agrégation de composants mène à une étude des liens entre les composants dans le but de diminuer leur nombre et de faciliter ensuite la phase d'agencement de solutions. Cinq heuristiques sont proposées pour guider le concepteur dans cette phase.
- Enfin, la sixième phase d'agencement de solutions permet de définir l'architecture du procédé, grâce à 14 heuristiques d'agencement. Ces heuristiques constituent un support à la résolution d'un problème d'agencement, qui consiste à :
 - Résoudre un problème de placement,
 - Gérer les interactions entre composants,
 - Satisfaire les contraintes de sûreté de fonctionnement,
 - Satisfaire les contraintes liées au développement durable.

Application

La méthodologie de conception proposée a été mise en oeuvre sur une conception complète d'un nouveau procédé de fabrication que l'entreprise MARQUET & Cie souhaitait développer. Il s'agissait d'automatiser un procédé manuel d'enrobage de premières.

L'application de la méthodologie proposée a contribué à la conception d'une machine automatique produisant deux types de produits, dont un est nouveau pour l'entreprise

MARQUET. Par ailleurs, cette machine répond à toutes les exigences et contraintes définies dans le cahier des charges fonctionnel et la spécification technique du besoin.

La réutilisation de connaissances et de solutions techniques éprouvées a permis à raccourcir les délais de recherche de solutions.

A l'issue de cette application industrielle du processus de conception proposé, l'entreprise MARQUET & Cie a atteint ses objectifs : D'une part le procédé d'enrobage jusque là manuel sera automatisé, et d'autre part les coûts de production seront réduits de 30% par rapport aux coûts actuels à la production manuelle. Enfin, la maîtrise de l'enrobage des premières mousses va permettre à l'entreprise MARQUET de produire une nouvelle gamme de chaussons et de se différencier de la concurrence nationale.

Perspectives

Perspectives de recherche

Les séquences génériques proposées dans la phase de la décomposition fonctionnelle sont construites avec comme base les verbes de la famille "déplacer". Nous souhaitons augmenter la généricité de ces séquences génériques et les faire évoluer pour d'autres classes de verbes.

Lors des phases d'agrégation et d'agencement, nous avons cherché à construire des heuristiques avec des phrases précises. Ces phrases peuvent être mal comprises par un concepteur. Nous pensons alors qu'il est nécessaire d'une part, de faire évoluer l'expression des heuristiques, et, d'autre part, de prévoir des formations et des exemples didactiques associés. Les heuristiques d'agencement doivent être plus documentées afin d'être efficace même au stade de la conception détaillée.

Le lien entre les classes de verbes et les heuristiques d'agrégation mérite d'être approfondi. Nous l'avons appliqué dans notre cas particulier de conception de procédés de montage ou d'assemblage. Il est possible d'augmenter la généricité de notre processus en analysant d'autres types de procédés, et dans d'autres secteurs industriels.

Enfin, les pistes à explorer concernent aussi à la transposition de cette démarche à la conception, non plus de procédés mais de produits. Le processus proposé est basé sur la définition d'un procédé comme étant une succession de tâches. Un processus de conception

de même type est-il possible pour la conception de produits ? Peut-on construire des séquences génériques permettant de traduire la STB afférente à la conception de produits ? Cela repose le problème de la construction des séquences à partir des classes des verbes. Une idée intéressante serait de se baser sur l'analyse CTOC qui donne une séquentialité de base avec les verbes de première classe.

Perspectives Industrielles

La première perspective que nous pouvons envisager est de finaliser l'implémentation de la base de connaissances dans un outil informatique, qui est à ce jour en cours de réalisation. L'utilisation de cet outil est conçue de manière à ce qu'elle soit ergonomique et facilement manipulable par le personnel de la PME, non spécialiste de la conception et de la capitalisation. Cet outil support de la base de données va faciliter la recherche de solutions techniques éprouvées, en relation avec une fonction à réaliser. Par ailleurs, la base informatisée comportera des fonctionnalités de mise à jour, afin de pouvoir l'enrichir avec les solutions techniques nouvelles, validées par l'entreprise.

La base pourra également être complétée par de nouveaux verbes ou compléments métiers. Ces actions de mise à jour seront accessibles seulement aux utilisateurs autorisés. Les bases fonctionnelles seront à compléter dans chaque contexte d'entreprise, avec les termes propres à leur activité industrielle.

D'autre part, nous souhaitons assurer la formation des personnes, porteurs de projets en PME, sur l'utilisation de la base de connaissances et de la méthodologie proposée. Il est nécessaire, pour prouver la viabilité de nos outils et les faire évoluer, de les expérimenter sur la conception d'autres procédés de fabrication par le personnel de la PME..

Enfin, nous souhaitons participer à la phase de fabrication de la machine d'enrobage conçue. Nous concentrerons nos efforts sur la mise au point de la machine afin de s'assurer qu'elle sera parfaitement opérationnelle lors de la production.

Bibliographie

Abdul-Nour, G., Drolet, J., & Lambert, S. (1999). Mixed production, Flexibility and SME. Computers & Industrial Engineering , 429-432.

Adams, R., Bessant, J., & Phelps, R. (2006). Innovation management measurement: A review. International Journal of Management Reviews , 8 (1), 21.

AFNOR. (1991). Association française de normalisation. Paris: Groupe AFNOR.

Alter, N. (1999). Organisation et Innovation – une rencontre conflictuelle, Les Organisations – Etats des savoirs. Editions Sciences Humaines.

Altshuller I, G. (1964). Bases of the inventive process. Voronezh: Tsentralnochernozemnyi Publishing House.

Altshuller a, G. (1984). And suddenly the inventor appeared. Technical Innovation Center.

Altshuller, G. (1999). TRIZ The innovation algorithm ; systematic innovation and technical creativity, Traduit par Lev Shulyak et Steven Rodman. Technical Innovation Center Inc., Worcester, MA.

Altshuller, G., & Shapiro, R. (1956). About the Psychology and innovation creativity. Voprocyy Psychologii.

Aoussat a, A. (1996). Contribution à la modélisation du processus de conception de produits industriels. institut national polytechnique de Grenoble: Rapport de synthèse en vue d'obtenir l'Habilitation.

Aoussat, A. (1990). La pertinence en Innovation : nécessité d'une approche plurielle. ENSAM, Paris: thèse de doctorat.

Baizet, Y. (2004). La Gestion des Connaissances en Conception ; Application à la simulation numérique chez Renault – DIEC. L'Université Joseph Fourier- Grenoble1: thèse de doctorat en génie mécanique.

Barney, J. (1991). Firm resources and sustained competitive advantage. International Journal of Management , 17 (1), 99-120.

- Ben Sta, H. (2006). Contribution de la modélisation conceptuelle à l'ingénierie du knowledge management: application dans le cadre de la mémoire de projet. Ecole centrale de Lilles: Thèse de doctorat.*
- Blouin, M., & Bergeron, C. (1997). Dictionnaire de la réadaptation. Québec : Les Publications du Québec: tome 2 : termes d'intervention et d'aides techniques.*
- Bo, Y., & Salustri, F. (1999). Function Modelling Based on Interactions of Mass, Energy and Information. Proceeding of the Twelfth International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference, American Association for Artificial Intelligence (www.aaai.org), , (pp. 384-388).*
- Boly, V., Renaud, J., Lopez Monsalvo, C., & Guidat, C. (1998). L'incertitude dans le contexte des projets innovants en PME : définition, limite de la gestion de projet, première approche méthodologique. Congrès International sur la PME. Metz, France.*
- Booz, Allen, & Hamilton. (1968). Management of new Products. Chicago: Booz, Allen et Hamilton Inc.*
- Bouti, A., & Aït-Kadi, D. (1994). State of the Art Revue of FMEA/FMECA. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering , 1, 515-543.*
- Caldwell, B. (2009). An evaluation of Function-Based Representation and Information Archival in Engineering Design. Clemson University: Thèse de doctorat.*
- Carmel, E., & Nicholson, B. (2005). Small Firms and Offshore Software Outsourcing: High Transaction Costs and Their Mitigation . Journal of Global Information Management , 13 (3), 33.*
- Chanel, V. (1995). Le management de l'innovation de produits industriels : mise en œuvre d'une démarche de diagnostic pour améliorer notre compréhension du processus. Ecole Supérieure des affaires de Grenoble: thèse de Doctorat en Science de Gestion.*
- Choulier, D., & Drăghici, G. (2000, mai). TRIZ : une approche de résolution des problèmes d'innovation dans la conception de produits. Récupéré sur http://www.mec.utt.ro/~draghici/draghici_mef00.pdf.*
- Chouteau, M., & Viévard, L. (2007). L'innovation, un processus à décrypter. Millénaire, le Centre Ressources Prospectives du Grand Lyon.*
- Cooper, R. (1983). A process model for industrial new product management. IEEE Transactions on Engineering Management , EM-30 (1), 02-11.*
- Coste, M. S. (2000). Le petit livre blanc du management des connaissances.*
- Crandall, J. W., & Goodrich, M. A. (2003). Measuring the Intelligence of a Robot and its Interface. Proceeding of the Performance Metrics for Intelligent System Workshop.*
- Darroch, J., & McNaughton, R. (2002). Examining the link between knowledge management practices and types of innovation. Journal of Intellectual Capital , 3 (3), 210- 222.*
- Davidson, P., & Griffin. (2003). Management: An Australasian Perspective (2nd edn.). Brisbane, Australia. RW: John Wiley & Sons.*

Deneux, D., Lerch, C., Euzenat, J., & Barthès, J. (2002). Pluralité des connaissances dans les systèmes industriels. chapitre 6 dans [Soënen & Perrin 02].

Dictionnaire Robert Grand & Collins. (2009). <http://rc2009.bvdep.com.rp1.ensam.eu/login.asp>.

Dieter, G. E. (2000). Engineering Design- A materials and processing approach. 3rd ed, Mc Graw-Hill International Editions.

Dodgson, M. (2000). The Management of Technological Innovation. Oxford: Oxford University Press.

Doré 2, R. (2004). Intégration des sensations utilisateur en conception préliminaire. centre de Bordeaux: thèse de doctorat, ENSAM.

Doré, R., Pailhès, J., Fischer, X., & Nadeau, J.-P. (2007). Identification of design variables and criterion variables towards the integration of user requirements into preliminary design. International Journal of Product Development , 4 (5), 508-529.

Doré-1, R., Pailhès, J., Fischer, X., & Nadeau, J. (2006). Identification of Sensory Variables towards the integration of User Requirements into Preliminary Design. International Journal of Industrial Ergonomics , 37 (1), 1-11.

Edwards, T., Delbridge, R., & Munday, M. (2005). Understanding innovation in small and medium-sized enterprises: a process manifest. Technovation , 25, 1119-1127.

Ermine, J., Chaillot, M., Bignon, P., Charreton, B., & Malavieille, D. (1996). MKSM : Méthode pour la gestion des connaissances. Ingénierie des systèmes d'information , 4 (4), 541- 575.

Evangelista, P., Esposito, E., Lauro, V., & Raffa, M. (2010). The Adoption of Knowledge Management Systems in Small Firms. Electronic Journal of Knowledge Management , 8 (1), 33 - 42.

Fiksel, J. (1996). Design for environment: creating eco-efficient products and processes. McGraw-Hill.

Forest, J., Micaelli, J.-P., & Perrin, j. (1997). Innovation et conception : pourquoi une approche en terme de processus. Deuxième Congrès International Franco-Québécois de Génie Industriel. ALBI.

Freel, M. S., & Robson, P. (2004). Small Firm Innovation, Growth and Performance . International Small Business Journal , 22 (6), 561-575.

Fricke, G. (1998). Successful Industrial Product Development, Designers – The key to successful product development. Springer.

Frochot, D. (2003). <http://www.les-infostrategies.com>.

Giget 1, M. (1994). L'innovation dans l'entreprise. Techniques de l'Ingénieur.

Giget, M. (1998). La dynamique stratégique de l'entreprise, innovation, croissance et redéploiement à partir de l'arbre des compétences. paris: Dunod, ISBN 2 10- 003727-7, p346.

- Goel, A. (1996). Meta cases: Explaining case-based reasoning. *Berlin: In Smith, I. and Faltings, B., editors, Proceedings of the Third European Workshop on Case-Based Reasoning - EWCBR-96, pages 150{163, Lausanne, Suisse. Lecture Notes in Artificial Intelligence, volume 1168, Springer Verlag, .*
- Golbreich, C. P., Delouis, I., & Scapin, D. L. (1989). Un outil d'acquisition et de representation des taches oriente-objet. *rapport de recherche INRIA no 1063, Programme 8 : Communication Homme-Machine.*
- Gonard, T., & Louazel, M. (1997). Comprendre les processus d'innovation technique à l'aide du concept de réseau : un programme de recherche. *Montréal: acte de la 2nde Conférence de l'Association Internationale du Management Stratégique (AIMS).*
- Graugnard, G., & Quiblier, V. (2006). Introduction à la capitalisation d'expériences. *formation et note de synthèse réalisées par le CIEDEL .*
- Grenouilleau, J.-C., Desroches, A., Dejax, P., & Peres, F. (1999). *Analyse des risques opérationnels liés à la gestion des éléments de rechange d'un système spatial complexe en phase de conception. Le risque, la sûreté de fonctionnement, la fiabilité en phase de conception des produits et des systèmes, journée PRIMICA. Paris.*
- Grundstein, M. (2000). *Repérer et mettre en valeur les connaissances cruciales pour l'entreprise. Paris: Actes du 10ème Congrès International de l'AFAV.*
- Halilem, N., & St-Jean, E. (2007). *L'innovation au sein des PME : Proposition d'un cadre conceptuel. 5ème Congrès international de l'Académie de l'Entrepreneuriat.,*
- Hatchuel b, A., & Weil b, B. (2003). *A new approach of innovative design: an introduction to C/K theory. ICED. Stockholm.*
- Hatchuel, A., & Weil a, B. (2002). *La théorie C-K :Fondements et usages d'une théorie unifiée de la conception. Colloque « Sciences de la conception ». Lyon.*
- Hatchuel, A., Le Masson, P., & Weil, B. (2005). *Activité de conception, organisation de l'entreprise et innovation. G. Minguet et C. Thuderoz (éds.), Travail, entreprise et société: manuel de sociologie pour ingénieurs et scientifiques, Presses universitaires de France.*
- Henderson, M. R., & Taylor, L. E. (1993). *A meta-model for mechanical products based upon the mechanical design process. Research in Engineering Design , 5, 140-160.*
- Hirtz, J., Stone, R., McAdams, D., Szykman, S., & Wood, K. (2002). *A Functional Basis for engineering Design: Reconciling and Evolving Previous Efforts. Research in Engineering Design , 13. (2), 65-82.*
- Hoffman, K., Parejo, M., Bessant, J., & Perren, L. (1998). *Small firms, R&D, technology and innovation in the UK: A literature review. Technovation , 18 (1), 39.*
- Holsapple, C., & Joshi, K. (2001). *Description and Analysis of Existing Knowledge Management Frameworks. In Proc. Of 32nd International Conference on System Sciences, IEEE. Hawaii.*

- Houe Ngouna, R. (2006). Modélisation des connaissances normatives en vue l'évaluation de la recyclabilité d'un produit en conception : des normes aux contraintes. L'institut National Polytechnique de Toulouse: Thèse de doctorat.*
- Hundal, M. (2000). Design For Recycling and Remanu-facturing. International Design Conference - DESIGN 2000. Dubrovnik.*
- Hyvärinen, L. (1993). Manager participation in innovation activities of small and mediumsized. Aldershot, Avebury: Entrepreneurship and Business.*
- Ishii, K. (1998). Design for Environment and Recycling: Overview of Research in the United States. CIRP 5th International Seminar on Life-cycle Engineering. Stockholm.*
- ISO. (2002). Application of the ISO 14000 family, Environmental Management.*
- Johansson, G. (1997). Design for disassembly - A framework. Linköping Universitet, Linköping (Suède): Graduate School of Management and Industrial Engineering.*
- Julien, P.-A., & Carrier, C. (2002). Innovation et PME », dans P.-A. Julien (dir.) Les PME: Bilan et perspectives, (3e éd.), . Cap-Rouge (Québec): Presses Inter-Universitaires.*
- Julien, P.-A., St-Pierre, J., & Beaudoin, R. (1996). Innovation dans les PME, nouvelles technologies, et leur financement : une synthèse des travaux récents; l'Administration. Revue Canadienne des Sciences de , 4 (13), 332-246.*
- Ki Moon, S., Simpson, T., Shu, J., & Kumura, S. (2009). Service representation for capturing and reusing design knowledge in product and service families using object-oriented concepts and an ontology. Journal of Engineering Design, Taylor & Francis Eds , 20 (4), 413-431.*
- Kim, K. S., Knotts, T. L., & Jones, S. C. (2008). Characterizing viability of small manufacturing enterprises (SME) in the market. Expert Systems with Applications, , 34 (1), 128-134.*
- Kline, s., & Rosenberg, N. (1986). An overview of innovation", Landau R., Rosenberg N. (eds), The Positive Sum strategy. Washington: National Academy Press.*
- Kota, S., & Ward, A.-C. (1991). Functions, structures and constraints inconceptual design. University of Michigan: Ed. A.-C Ward.*
- Lai, H., & Chu, T. (2000). Knowledge Management: A Review of Theoretical Frameworks and Industrial Cases. In Proc. Of the 33rd International Conference on System Sciences, IEEE. Hawaii.*
- Lampe, A. (2006). Méthodologie d'évaluation du degré d'autonomie d'un robot mobile terrestre. L'institut Nationale Polytechnique de Toulouse: thèse de doctorat.*
- Lattuf, J. A. (2006). Aide au pilotage d'une démarche d'innovation en conception de produits:Vers un cahier des charges « Augmente ». CER de Paris: ENSAM.*
- Le Duff, R. (1999). Encyclopédie de gestion et de management. PARIS: DALLOZ.*
- Le Meur, Y. (2000). Introduction à la méthode TRIZ. Conférence aux Rencontres Pédagogiques TRIZ. Angers.*

- Lerch, C., & Schenk, E. (2009, décembre). Créativité et résolution de problèmes : la conception de nouveaux produits par les PME. Récupéré sur <http://hal.archives-ouvertes.fr/>.
- Longueville, B., Le Cardinal, J., & Bocquet, J.-C. (2001). *La gestion des connaissances pour les projets de conception de produits innovants*. Septième Colloque sur la Conception Mécanique Intégrée. PRIMECA'2001.
- Mack, M. (1995). L'organisation apprenante comme système de transformation de la connaissance en valeur, Organisations et Savoirs. *Revue Française de Gestion*.
- Manuel de Frascati, OCDE. (1994). La mesure des activités scientifiques et technologiques. PARIS: Méthode type proposée pour les enquêtes sur la recherche et le développement expérimental.
- manuel d'Oslo, OCDE . (2005). Guidelines for Collecting and Interpreting Innovation Data . PARIS: Oslo Manual, OCDE and Eurostat,.
- Marquis, D., & Meyers, S. (1969). Successful industrial innovation. U.S: National Science Foundation, Government Printing Office.
- Martinet, A. (2003). Stratégie et innovation. *L'encyclopédie de l'innovation, Economica*.
- Matta, N., Ermine, J., Aubertin, G., & Trivin, J. (2001). *Knowledge Capitalization with a knowledge engineering approach: the MASK method*. proceedings of IJCAI'2001 Workshop on Knowledge Management and Organizational Memory.
- McAdam, R., & Reid, R. (2001). *SME and large organization perceptions of knowledge management: Comparisons and contrast*. Journal of Knowledge Management , 5 (3), 231-241.
- Merlant, P. (1993). Histoire(s) d'innover. Paris: InterÉditions.
- Ministère de l'industrie. (1996). Guide : Les principales aides aux PMI.
- Moisdon, J., & Weil, B. (2000). La capitalisation technique pour l'innovation : expérience dans la conception automobile. paris: Annales de l'École des Mines, Innovation produit, innovation process et recherche appliquée.
- Monchy, F. (2000). Maintenance-Méthodes et organisation. Paris: Dunod Editeur.
- Moore, I., & Garnsey, E. (1993). *Funding for innovation in small firms : The role of government*. Policy Research , 22 (5,6), 507-520.
- Mori, G., Paterno, F., & Santoro, C. (2002). *CTTE: Support for Developing and Analyzing Task Models for Interactive System Design*. IEEE Transactions On Software Engineering , 28 (8).
- Nadeau, J., & Pailhès, J. (2007). *L'analyse des phénomènes physiques, éléments essentiels vers la résolution de problèmes industriels*. Mécanique et industrie , 8 (3), 165-171.
- Nadeau, J., Pailhès, J., & Olivares, P. (2004). MAL'IN Logiciel de conduite d'études, Méthodes d'Aide à L'INnovation. Paris: diffusion SERAM.

- Nadeau, J., Pailhès, J., Dore, R., & Scaravetti, D. (2005). *Analyser, qualifier et innover en conception par les lois d'évolution TRIZ*. 6ème Congrès International de Génie Industriel. Besançon.
- Nadeau, J.-P., & Pailhès, J. (2007). *Analyse et structuration du problème lors d'une séance de créativité*. 10ème Colloque National AIP PRIMECA. La Plagne.
- Nadeau, J., Pailhès, J., & Scaravetti, D. (2006). *Des outils de l'analyse fonctionnelle vers la créativité technique*. International Journal Of Design and Innovation , 3 (3/4), 87-106.
- Nazarenko, A. (2003). *Rapport d'analyse de l'existant et des besoins*. Unité MIG-INRA et LIPN-CNRS/Univ Paris13.
- Neau, E. (2003). *L'innovation et l'information stratégique*. Récupéré sur <http://erwan.neau.free.fr/>.
- Ngassa, A., Thouvenin, E., Millet, D., & Truchot, P. (2000). *Intégration de nouvelles ressources dans l'entreprise pour innover. Problématique de cette intégration. Application à la méthode TRIZ et à la veille technologique*. 3ème Conférence internationale sur la conception et la fabrication intégrée en mécanique ,IDMME . Montréal.
- Nonaka, I., & Takeuchi, H. (1995). *The knowledge creating company, How Japanese companies Create the Dynamics of Innovation*. Oxford University Press.
- OCDE. (1997). *Manuel d'Oslo- 2ème édition*.
- O'Regan, N., Ghobadian, A., & Galleary, D. (2006). *In search of the drivers of high growth manufacturing SMEs*. Technovation , 26 (1), 30-41.
- Pahl, G., & Beitz, W. (1984). *Engineering Design*. London.: Ed. Ken Wallace. Publ. The design council.
- Pahl, G., & Beitz, W. (1996). *Engineering Design: A systematic approach*. Londres: second Edition, Springer-Verlag.
- Pailhès, J., & Nadeau, J. (2007). *Innover en conception par les Méthodes d'Aide à L'INnovation MAL'IN*. 7ème Congrès International de Génie Industriel. Troisrivières, Canada.
- Pailhès, J., Sallaou, M., & Nadeau, J. (2007). *Knowledge base formulation for aided design tool*. Trends and Recent Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering II, edited by Serge Tichkiewitch, Michel Tollenaere et Pascal Ray,.
- Pailhès, J., Sallaou, M., Nadeau, J., & Fadel, G. M. (2010). *Taxonomy of preliminary design knowledge from an energy based standpoint*. Journal of Mechanical Design, (papier soumis).
- Penalva, J. M. (1993). *SAGACE method: the modelling of human designed systems*. COMETT'93. Rome, Italie.
- Perrin, J. (2001). *Concevoir l'innovation industrielle : Méthodologie de conception de l'innovation*. CNRS Editions.
- Polanyi, M. (1996). *The Tacit Dimension*. London, UK: Routledge and Jegan Paul.

- Prax, J. (2000). Le guide du Knowledge management : concepts et pratiques du management de la connaissance. Edition Dunod.*
- Prevost, M., & Waroquier, C. (1994). L'analyse du besoin logistique et son enregistrement. Paris: Techniques et documentation Lavoisier.*
- Rasovska, I., Chebel-Morello, B., & Zerhouni, N. (2008). A mix method of knowledge capitalization in maintenance. Journal of Intelligent Manufacturing , 19 (3), 347-359.*
- Reymen, I. M. (2001). Improving design processes through structured reflexion- A domain independent Approach. Eindhoven, The Netherlands: Ph.D thesis.*
- Rochford, L., & Rudelius, W. (1992). How involving more functional areas within a firm affects the new product process. International Journal of Product Innovation Management , 9 (3), 287-299.*
- Roozenburg, N., & Eekels, J. (1995). Product Design :Fundamentals and Methods. John Wiley & Sons.*
- Roulet, N. (2006). Modélisation du processus d'innovation technologique en PME-PMI: application à la conception d'une nouvelle technologie de fabrication basée sur la technique LASER. Paris: Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers.*
- Sallaou, M. (2008). Taxonomie des connaissances et exploitation en conception préliminaire, application à un système éolien. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers: Thèse de doctorat.*
- Samet, W. (2010). Evolution des outils d'aide à l'innovation MAL'IN dans une vision design, développement durable et écoconception. Bordeaux: L'école Arts et Métiers ParisTech.*
- Savransky, S. D. (2000). Engineering of creativity: Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving. CRC Press.*
- Scaravetti, D. (2004). Formalisation préalable d'un problème de conception, pour l'aide à la décision en conception préliminaire. Ecole Nationale Supérieur des Arts et Métiers: thèse de doctorat en génie mécanique.*
- Scherer, F. M. (1991). « Changing perspectives of the finn size problem ». In Innovation and technological change: An international comparison, sous la direction de Z. Acs et D. Audretsch. University of Michigan Press.*
- Schreiber, A. T., Akkermans, J. M., Anjewierden, A. A., De Hoog, R., Shadbolt, N. R., Van de Velde, W., et al. (1999). Knowledge Engineering and Management The CommonKADS Methodology. MIT Press.*
- Schumpeter, J. (1939). Business cycles, a theoretical, historical, and statistical analysis of the capitalist process. New York and London: McGraw-Hill Book Company.*
- Scozzi, B., Garavelli, C., & Crowston, K. (2005). Methods for modeling and supporting innovation processes in SMEs. European Journal of Innovation Management , 8 (1), 120-137.*

- Sen, C., Caldwell, B., Summers, J., & Mocko, G. (2010). *Evaluation of the functional basis using an information theoretic approach*. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 24, 87–105.
- Shahin, T., Andrews, P., & Sivaloganathan, S. (1999). *A design reuse system. Part B: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. *Journal of Engineering Manufacture*, 213 (6), 621-627.
- Simon, H. (1991). *Sciences des systèmes, Sciences de l'artificiel*. DUNOD.
- Simoni, G. (2001). *Capitaliser les connaissances générées dans les projets R&D. séminaire de thèse*.
- Smida, A. (2006). *Complexité de L'innovation Technologique (Vol. X IV). espagne: REVISTA FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS, Investigación y Reflexión*.
- Sriram, D., Stephanopoulos, G., Logcher, R., Gossard, D., Groleau, N., Serrano, D., et al. (1989). *Knowledge-based System applications in engineering design: Research at MITT*. *AI Magazine*, 10 (3).
- Steels, L. (1993). *corporate knowledge Management, management of industrial and corporate memory*. proceedings of ISMICK'93. Compiègne.
- Sternberg, R. J., Pretz, J. E., & Kaufman, J. C. (2003). *Types of Innovations*. USA: *The International Handbook on Innovation*.
- Stone, R. (1997). *Towards a theory of modular design*. *Thesis of Faculty of the Graduate School of The University of Texas at Austin*.
- Stone, R., Wood, K., & Crawford, R. (2000). *A heuristic method for identifying modules for product architectures*. *Design Studies*, 21, 5-31.
- Storey, D. J. (1994). *Understanding The Small Business Sector*. LONDON: *Routledge*, 355 p.
- St-Pierre, J., & Mathieu, C. (2003). *L'innovation de produit chez les PME manufacturières: organisation, facteur de succès et performance*. *Trois-Rivières: Rapport de recherche, Ministère des Finances, de l'Économie et de la Recherche*.
- Suh, N. P. (1990). *The principles of design*. New York: *Oxford University Press*.
- Szykman, S., Racz, J. W., & Sriram, R. D. (1999). *The representation of function in computer-based design*. *Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conferences*. Las Vegas.
- Thiebaud, F. (2003). *Formalisation et développement de la phase de résolution de problème en conception industrielle*. *Université Louis Pasteur Strasbourg I: thèse de doctorat en génie industriel*.
- Thouvenin, E. (2002). *Modélisation des processus de conception de produits et développement de la capacité d'innovation : application au cas des PME-PMI*. *Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers: thèse de doctorat en génie industriel*.
- Tödting, F., Lehner, P., & Kaufmann, A. (2009). *Do different types of innovation rely on specific kinds of knowledge interactions?* *Technovation*, 29 (1), 59-71.

Torres. (1997). Pour une approche contingente de la spécificité de la PME. *Récupéré sur <http://www.oliviertorres.net/travaux/pdf/ot12ripme.PDF>.*

Trefle, S. W. (2004). site ENSAM, Valorisation, MALIN. *Récupéré sur <http://www.trefle.u-bordeaux1.fr/malin>.*

TREFLE, S. W. (2004). site ENSAM, Valorisation, MALIN. *Récupéré sur <http://www.trefle.u-bordeaux1.fr/malin>.*

TRIZ, j. (2000). *Récupéré sur <http://www.triz-journal.com/>.*

Truchot, P., Suchamp, R., & Guidat, C. (1997). *L'approche pluridisciplinaire de la conception de produits : une science de l'innovation*. Deuxième Congrès International Franco-Québécois de Génie Industriel. ALBI.

Tsuchiya, S. (1995). Commensurability, a key concept of business reengineering, 3rd international symposium of the management of information and corporate knowledge. *Compiègne: institut national pour l'intelligence artificielle*.

Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (1999). *Product Design and Development*. McGraw-Hill Education, 2ème édition.

Ventere, J.-P. (1997). *Conception écologique des produits (Vol. G1). Techniques de l'ingénieur*.

Vernat, Y. (2004). *Formalisation par contraintes en conception inversée intégrée ; application aux problèmes aéronautiques*. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers-Bordeaux: Thèse de doctorat.

WBCSD, W. B. (1999). *Eco- efficiency Indicators: A Tool for Better Decision-Marketing*. Technical Report.

Wolff, J. A., & Pett, T. L. (2006). *Small-Firm Performance: Modeling the Role of Product and Process Improvements*. *Journal of Small Business Management* , 44 (2), 268.

Zwingmann, X. (2005). *Modèle d'évaluation de la fiabilité et de la maintenabilité au stade de la conception*. Université Laval Québec & Université Louis-Paster Strasbourg, France.

Annexes

- I.** Aide à la construction du Graphe des associations Substances-Champs et à l'identification des flux physiques (méthodes et outils MAL'IN[®])
- II.** Fiche heuristique 6 d'agrégation de composants
- III.** Fiche d'agencement
- IV.** Tableau de compatibilité Verbes-compléments

Annexe I

Aide à la construction du Graphe des associations Substances-Champs et à l'identification des flux physiques (méthodes et outils MAL'IN[®])

▪ Préalable à la construction du graphe :

On a défini le niveau systémique.

Par l'analyse fonctionnelle, on connaît les fonctions de service et les fonctions contraintes associées au système global.

On connaît la fonction machine (fonction utile principale) réalisée par le bloc fonctionnel incriminé ou à réaliser.

▪ Construction du graphe fonctionnel :

La logique proposée part du bloc diagramme fonctionnel, s'il n'est pas réalisé, suivre la démarche suivante :

- Enumérer les composants du bloc fonctionnel
- Enumérer les milieux extérieurs
- Enumérer les flux fonctionnels : fonctions de service et fonctions contraintes
- Réaliser le graphe de contact entre les composants du bloc fonctionnel et les milieux extérieurs, c'est-à-dire entre les sous-systèmes du système :



- Placer les flux fonctionnels :



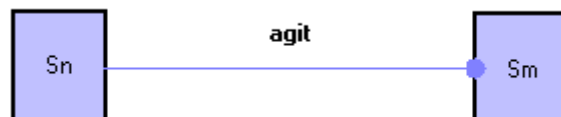
▪ **Construction du graphe des associations substances-champs :**

- Exprimer le flux de contact (action mécanique) ou le flux fonctionnel par un verbe qualifiant l'action d'un composant (substance) sur l'autre :

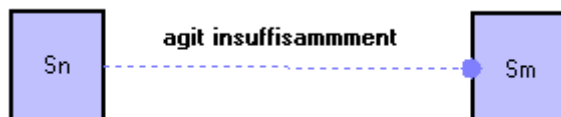


- Cet effet est il utile, insuffisant ou néfaste (nuisible) ?

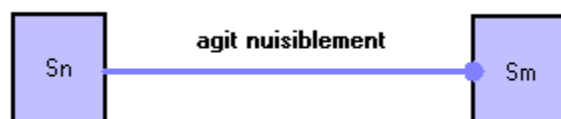
. Effet utile



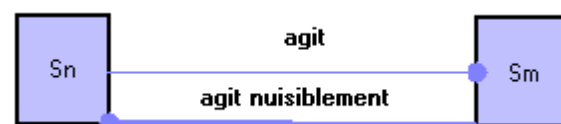
. Effet utile insuffisant



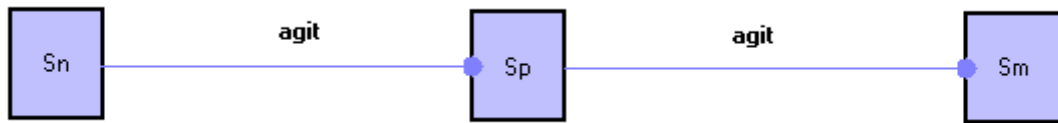
. Effet nuisible



. Des effets nuisibles sont-ils générés par les flux fonctionnels déjà identifiés ?



- Est-il intéressant d'ajouter des éléments transportés par les flux de matière (ex : fluides, poudre, poussière,...) ?



- Est-il intéressant de prendre en compte les différents composants de ces flux de matière (air humide = air sec + vapeur d'eau) ?



▪ Aide à l'identification de flux

- Flux générés par des gradients de paramètres

. Les gradients des paramètres d'état ou pertinents des composants (substances) peuvent-ils générer des flux :

Paramètres	Effet produit	Caractérisation	Nom de la loi
Température	Flux de chaleur conductif	Solides en contact	Fourier
	Flux de chaleur convectif	Interface solide/fluide	Newton
	Flux de chaleur rayonnant	Solides en regard, milieu intermédiaire transparent	Stéphan-Boltzmann
	Flux d'électrons	Soudure/Solides conducteur	Seebeck
Pression	Débit de fluide	Dans un fluide	
	Migration de fluide dans le solide : Fluide continu Capillarité	Dans un solide dit capillaro-poreux	Darcy
Pression partielle ou Concentration	Diffusion d'un composant dans l'autre (et inversement)	Dans un mélange de fluides	Fick
Potentiel électrique	Flux d'électrons	Dans les fluides ou solides conducteurs	Ohm
	Champ magnétique	Dans les fluides ou solides	Biot Savart
Champ magnétique	Flux d'électrons	Dans les fluides ou solides conducteurs	Faraday
Potentiel chimique	Flux de matière (électrolyse)	Entre solides, milieu conducteur	

Ces effets générés par les gradients de paramètres sont-ils utiles ou nuisibles ? Voulez-vous en tenir compte ?

. Les effets générés par les gradients de paramètres induisent d'autres effets :

Paramètres	Effet produit	Effet induit
Température	Flux de chaleur	Dilatation/Rétraction/Jeu/Bridage Fluage
	Flux d'électrons	Charge/Décharge électrique
Pression	Débit de fluide	Fuites
	Migration de fluide dans le solide	Dilatation/Rétraction/Jeu/Bridage Pollution, Encrassement
Pression partielle ou Concentration	Diffusion d'un composant dans l'autre (et inversement)	Pollution, Dépôt, Encrassement Givrage, Prise en glace
Potentiel Electrique	Flux d'électrons	Charge/Décharge électrique
	Champ magnétique	Polarisation
Champ magnétique	Flux d'électrons	Charge/Décharge électrique
Potentiel chimique	Flux de matière (électrolyse)	Corrosion

Ces effets induits sont-ils utiles ou nuisibles ? Voulez-vous en tenir compte ?

- Effets mécaniques générés par des flux de contact

Les contacts réels sont générateurs d'effets locaux :

Surfaces en contact	Effet produit	Caractérisation	Nom de la loi
Zone de contact localisée	Champ de pression	Vitesse relative nulle : adhérence Vitesse relative non nulle : frottement	Hertz (action normale) Coulomb
	Flux d'énergie thermique	Vitesse relative non nulle : frottement	
	Flux d'énergie sonore	Vitesse relative non nulle : frottement	
	Flux d'énergie de déformation	Déformation du solide	Energie de déformation
Zone de contact surfacique étendue	Champ de pression	Vitesse relative nulle : adhérence Vitesse relative non nulle : frottement	Matage (action normale) Coulomb
	Flux d'énergie thermique	Vitesse relative non nulle : frottement	
	Flux d'énergie sonore	Vitesse relative non nulle : frottement	
	Flux d'énergie de déformation	Déformation du solide	Energie de déformation

Ces effets sont-ils utiles ou nuisibles ? Voulez-vous en tenir compte ?

- Effets mécaniques générés par des mouvements de solides

Le système comporte-t-il des entités en mouvement qui génèrent des effets d'inertie (forces centrifuge, masses inertielles) ? Ces effets sont-ils utiles ou nuisibles ? Voulez-vous en tenir compte ?

- Effets dus à des champs ou à des substances distantes

Des champs immatériels sont-ils présents ? Ces effets sont-ils utiles ou nuisibles ? Voulez-vous en tenir compte ?

- Attractions (pesanteur, aimants)
- Sons, Ultrasons
- Optique
- Electriques
- Rayonnements
- Magnétiques, etc.

Annexe 2

Fiche heuristique 6 d'agrégation de composants

Heuristiques d'agrégation

Heuristiques d'agrégation de composants

Heuristique 6 : *Si une fonction impose une solution technique avec adaptation d'outillages, il faut réduire leur nombre par agrégation.*

La réduction du nombre d'outillage permet :

- De diminuer le nombre de références et d'identification,
- De diminuer le volume de zones de stockage,
- De diminuer les risques de se tromper de références,
- De diminuer les coûts de conception et de réalisation,
- D'améliorer la flexibilité de la machine,
- D'améliorer la précision,
- De simplifier la mise en œuvre,
- De simplifier la gestion de l'automatisation.

L'agrégation d'outillages peut se faire par :

- L'utilisation de la symétrie ou l'asymétrie,
- La standardisation des géométries (dimensions, formes, épaisseur),
- La standardisation des interactions.

Annexe 3

Fiche heuristique 9 d'agencement

Heuristiques d'agencement

Heuristiques de placement
<p>Heuristique 9: <i>L'encombrement de la machine doit être réduit en adoptant des architectures évoluant selon la logique : 1D → 2D → 3D → 4D.</i></p>
<p>L'évolution de la conception d'une machine va la faire passer par tous les stades de 1D à 4D.</p>
<p>Vision 1D</p> <p>La vision séquentielle et les systèmes classiques de manutention et de déplacement conduisent naturellement à une évolution dans une seule direction avec des positions successives dans une seule direction (1D).</p>
<p>Vision 2D</p> <p>La recherche de la réduction des parcours impose des déplacements en rotation et tout naturellement les positionnements se feront dans un plan (2D).</p>
<p>Vision 3D</p> <p>La maîtrise de l'encombrement est liée à des déplacements dans l'espace. La machine doit intégrer des composants permettant l'évolution dans l'espace, elle devient 3D.</p>
<p>Vision 4D</p> <p>L'agencement de la machine peut évoluer dans le temps selon les moments significatifs ou les types de produits à fabriquer, l'architecture est devenue 4D car elle change dans le temps.</p>

ADAPTATION ET MISE EN PLACE D'UN PROCESSUS D'INNOVATION ET DE CONCEPTION AU SEIN D'UNE PME

RESUME : Le contexte global de ce travail de recherche concerne la structuration de l'innovation technologique en PME, pour la définition de procédés de fabrication. Cela passe par la mise en place d'un processus de conception basé sur la réutilisation des connaissances, ainsi que sur la recherche de concepts nouveaux.

La méthodologie de conception et la base de connaissances proposées sont destinées à devenir un outil d'aide à la conception et à la mise en place de nouveaux procédés de montage ou d'assemblage. Toutefois, faciliter l'application du processus de conception, il a été nécessaire d'identifier des heuristiques permettant d'accompagner le concepteur. Par ailleurs, les méthodes actuelles de capitalisation de connaissances sont difficilement accessibles aux petites entreprises, du fait de leur manque de ressources et de la complexité des outils.

Ainsi, nous avons développé une méthodologie et des outils d'utilisation simple et rapide, accessibles à un personnel non spécialiste de la conception, de la capitalisation ou de l'innovation. La structuration de la connaissance est proposée autour d'une logique fonctionnelle. La démarche de conception est également basée sur la décomposition fonctionnelle du système et intègre la simplification de l'architecture de système dès les premières phases du processus. A cette fin, des phases d'agrégation puis d'agencement sont proposées et sont guidées par des heuristiques.

La capitalisation de la connaissance a été réalisée dans la PME MARQUET & Cie. La conception d'une machine automatisée d'assemblage de chaussons, illustre le processus global et les outils proposés.

Mots clés : innovation, conception, PME, capitalisation de connaissances, bases fonctionnelles, agrégation, heuristiques.

ADAPTATION AND IMPLEMENTATION OF A PROCESS OF INNOVATION AND DESIGN WITHIN A SME

ABSTRACT : The global context of this research work concerns the structuring of the technological innovation in SME, for the design of manufacturing processes. It passes by the implementation of a process of conception based on the re-use of the knowledge, as well as on the search for new concepts.

The design methodology and the proposed knowledge base are intended to become a design tool for the implementation of new assembly processes. However, in order to facilitate the application of this process, it was necessary to identify heuristics to assist the designer. Besides, the current methods of knowledge capitalization are difficult to use in small firms, because of their lack of resources and the complexity of tools.

Thus, we developed methodology and tools for a simple and fast use, accessible to a personal which is non-specialist in design, capitalization or innovation. The structuring of knowledge is proposed around a functional logic. The design methodology is also based on the functional decomposition of the system, and integrates the simplification of the architecture system, from the first phases of the process. For this purpose, phases of aggregation and embodiment are proposed and guided by heuristics.

The knowledge capitalization was performed within the enterprise MARQUET & Cie. The design of an automatic assembly machine illustrate the whole process and the proposed tools.

Keywords : innovation, design, SME, knowledge capitalization, functional bases, aggregation, heuristics.