

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

N° attribué par la bibliothèque

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'INPG

Spécialité : "Génie Industriel"

préparée au laboratoire GILCO (Gestion Industrielle Logistique et COncption)
dans le cadre de l'Ecole Doctorale "Organisation Industrielle et Systèmes
de production"

présentée et soutenue publiquement

par

Bruno AGARD

Agrégé de Génie Mécanique

le 8 juillet 2002

**CONTRIBUTION A UNE METHODOLOGIE DE
CONCEPTION DE PRODUITS A FORTE DIVERSITE**

Directeur de thèse : Michel TOLLENAERE

JURY

M. Andrew KUSIAK
M. Michel ALDANONDO
M. Alain BERNARD
M. Michel TOLLENAERE
M. David CAVARO
M. Mounib MEKHILEF
M. Bernard PENZ

Président
Rapporteur
Rapporteur
Directeur de thèse
Examineur
Examineur
Examineur

à *Corine*,

à *Adrien*,

Remerciements

Ces travaux de thèse ont été réalisés au sein du laboratoire GILCO (Gestion Industrielle Logistique et CONception) de l'INPG (Institut National Polytechnique de Grenoble), dans le cadre de la formation doctorale OISP (Organisation Industrielle et Systèmes de Production).

Je tiens à remercier Andrew KUSIAK d'avoir accepté la présidence de ce jury. Il m'a permis de faire un séjour dans son laboratoire l' « Intelligent Systems Laboratory » ce qui m'a beaucoup apporté au niveau des méthodes de travail. J'y ai également découvert un domaine de recherche que j'ignorais, le Data Mining.

Merci à Michel ALDANONDO, il m'a apporté une aide précieuse en s'intéressant de près à mon travail et en formulant des critiques pertinentes sur la qualité du document. Un grand merci pour le temps qu'il m'a accordé, et pour les discussions très intéressantes que nous avons eu.

Merci à Alain BERNARD, il a accepté d'être rapporteur. Je le remercie pour le temps qu'il a pu consacrer à cette tâche et pour les remarques enrichissantes qu'il a formulé.

Merci à Michel TOLLENAERE mon directeur de thèse, pour la confiance qu'il m'a accordé. Il a toujours été très ouvert aux idées que j'ai proposées, et m'a toujours encouragé à les développer.

Merci à David CAVARO et Bruno VERCELLI, tous les deux au service Recherche de Valeo. Ils m'ont beaucoup apporté quant à la compréhension des contraintes spécifiques concernant la réalisation des faisceaux électriques. Les critiques qu'ils ont exprimé ont beaucoup apporté à ce travail.

Merci à Mounib MEKHILEF, il m'a fait le plaisir d'accepter d'examiner mon travail de recherche.

Merci à Bernard PENZ, avec qui j'ai pu échanger des idées sur ce travail au cours de ma thèse. Nos discussions ont toujours été très riches. La qualité finale de ce document doit beaucoup aux nombreuses critiques qu'il a exprimées.

Je tiens aussi à remercier Yannick FREIN, directeur du laboratoire GILCO, qui m'a accueilli au sein de son équipe. Il a toujours su y faire régner une ambiance conviviale, sympathique et travailleuse.

Je pense aussi à tous les membres de ce laboratoire avec qui j'ai eu beaucoup de plaisir à travailler.

Cette expérience n'aurait pas été la même sans les élèves de l'ENSGI (Ecole Nationale Supérieure de Génie Industriel) avec qui j'ai partagé une partie de mon temps. Ce fut un plaisir de travailler avec eux. En particulier merci à Guillaume SAPY avec qui j'ai travaillé à l'Intelligent Systems Laboratory.

Je finis cette page de remerciement, en ayant une pensée pour ma femme, Corine, qui m'a toujours soutenu et aidé, et pour mon fils, Adrien, qui donne de la légèreté à ce travail.

Table des matières

Introduction générale	1
Problématique	1
Contribution	2
Plan de lecture de la thèse	4
1 Diversité des produits	7
1.1 Introduction	7
1.2 Origines de la diversité des produits	7
1.2.1 Une réponse à l'évolution du marché	8
1.2.2 Stratégie industrielle	9
1.2.3 Stratégie de Marketing	9
1.2.4 Logiques locales	11
1.3 Problème de la variété optimale	11
1.3.1 Approche marketing	13
1.3.2 Approche économique	13
1.3.3 Approche industrielle	13
1.4 Cas d'étude	14
1.4.1 Schneider Electric : La diversité standardisée	14
1.4.2 Auxitrol : Options et variantes	16
1.4.3 Syléa : Des modules industriels	18
1.5 Conclusion	20
2 Représentation des familles de produits	21
2.1 Introduction	21
2.2 Présentation du problème de modélisation de la diversité	21
2.3 Structuration des données techniques	23
2.3.1 Codification des objets techniques	24
2.3.1.1 La codification unique	24
2.3.1.2 La codification significative	24
2.3.1.3 Les méthodes mnémotechniques	25

2.3.1.4	La codification des exemplaires	26
2.3.2	Classification des objets techniques	26
2.3.2.1	Familles d'objets par héritage	26
2.3.2.2	Bibliothèques de composants	28
2.3.2.3	Classification à facettes	29
2.4	Différents types de liens	29
2.4.1	Lien de composition	30
2.4.2	Lien d'interface	30
2.4.3	Liens inter points de vue	31
2.4.4	Contraintes inter-liens	34
2.5	Modélisation de la diversité	35
2.5.1	Modèles génériques de familles de produit	35
2.5.1.1	Arbres de classification	35
2.5.1.2	Langage de programmation	37
2.5.2	Modèles de configurations	38
2.6	STEP	40
2.6.1	STEP - AP 203	41
2.6.2	STEP - AP 214	42
2.7	Synthèse	44
2.8	Conclusion	45
3	Réalisation des familles de Produit	47
3.1	Introduction	47
3.2	Conception des familles de produits	47
3.2.1	Méthodologies de conception	47
3.2.2	Indicateurs des coûts indirects d'introduction de la variété	52
3.2.3	Gammes génériques d'assemblage	56
3.2.4	Technologies de groupe	57
3.3	Outils pour la différenciation retardée	58
3.3.1	La personnalisation par l'utilisateur	60
3.3.2	La différenciation perceptuelle	60
3.3.3	La différenciation au stade de la distribution	60
3.3.4	La standardisation	61
3.3.5	La conception modulaire	63
3.3.6	La restructuration des processus	65
3.4	Conclusion	67

4	Méthodologie de conception.	69
4.1	Introduction	69
4.2	Contexte	69
4.3	Différents niveaux de diversité	70
4.3.1	La diversité fonctionnelle	71
4.3.2	La diversité technique	72
4.3.3	La diversité process	73
4.3.4	Partage de la représentation	74
4.4	Passage d'un type de diversité à l'autre	75
4.5	Méthodologie de conception de familles de produits	76
4.5.1	Mise en place d'une action « Maîtrise de la diversité »	77
4.5.2	Choix des indicateurs	77
4.5.3	Analyse des besoins fonctionnels	79
4.5.4	Création d'une structure fonctionnelle	81
4.5.5	Création d'une structure technique	82
4.5.6	Création des ensembles de process	83
4.5.7	Recherche des solutions	84
4.5.8	Choix d'une solution	85
4.6	Contribution du <i>Data Mining</i> à la démarche	85
4.6.1	Principes généraux	86
4.6.1.1	Processus d'utilisation du <i>Data Mining</i>	86
4.6.1.2	Tâches du <i>Data Mining</i>	87
4.6.2	Applications pour la Conception	89
4.6.2.1	Analyse des besoins fonctionnels	89
4.6.2.2	Analyse des besoins techniques	91
4.6.2.3	Analyse des besoins process	91
4.7	Conclusion	93
5	Application Industrielle	95
5.1	Introduction	95
5.2	Problématique	95
5.2.1	Contexte de conception	95
5.2.1.1	Le donneur d'ordres	97
5.2.1.2	Le fournisseur	98
5.2.1.3	Le faisceau électrique	98
5.3	Action maîtrise de la diversité	101
5.4	Découpage en modules	103
5.4.1	Découpage structurel	106

5.4.2	Découpage Fonctionnel	108
5.5	Résultats	109
5.6	Conclusions	112
	Conclusions et perspectives	113
	Bibliographie	119

Table des figures

1	Représentation globale du problème de la diversité.	3
1.1	Variété optimale.	12
1.2	Ancienne politique commerciale Schneider Electric.	14
1.3	Nouvelle politique commerciale Schneider Electric.	15
2.1	Différents niveaux de nomenclatures.	22
2.2	Codification des exemplaires.	26
2.3	Les familles d'objets techniques.	27
2.4	Les caractéristiques des familles et des objets techniques.	27
2.5	L'héritage multiple de caractéristiques.	28
2.6	Le lien de composition.	30
2.7	Le lien d'interface.	31
2.8	Méta-modélisation du concept produit.	31
2.9	Méta-modélisation de l'entité noeud.	32
2.10	Méta-modélisation de l'entité lien.	33
2.11	Liens inter et intra points de vue d'un circuit électrique d'éclairage.	34
2.12	Cardinalités sur relations.	34
2.13	Sémantique des connecteurs.	35
2.14	Product Family Classification Tree (PFCT).	36
2.15	Product Breakdown Structure (PBS).	37
2.16	Processus de configuration.	39
2.17	Evolution du modèle de configuration.	39
2.18	Modèle en trois couches de STEP.	41
2.19	Modélisation de produits génériques avec STEP - AP 203.	43
2.20	Différents types de solutions	44
3.1	Lien fonction/module technique.	48
3.2	Analyse des besoins des clients	49
3.3	Méthodologie de négociation.	51
3.4	Mesure de $D1$	53

3.5	Mesure de $D2$.	53
3.6	Mesure de $D3$.	53
3.7	Diagramme coût-importance.	54
3.8	Différenciation retardée.	58
3.9	Commonalité entre deux produits.	62
3.10	La standardisation des composants.	63
3.11	Emplois multiples de composants modulaire.	63
3.12	Décomposition matricielle.	64
3.13	Restructuration d'un processus - Différer une partie d'une étape.	66
3.14	Restructuration d'un processus - Inversion de deux opérations.	66
4.1	Diversité fonctionnelle.	71
4.2	Diversité technique.	72
4.3	Diversité du process.	73
4.4	Partage de la représentation du produit.	74
4.5	Domaine d'étude.	75
4.6	Taux de monte.	80
4.7	Corrélation.	80
4.8	Création d'une structure fonctionnelle.	81
4.9	Création d'une structure technique.	83
4.10	Recherche des solutions.	84
4.11	Processus général d'utilisation du Data Mining.	87
4.12	Origine des informations dans une entreprise intégrée.	89
5.1	Contexte industriel.	96
5.2	Besoins en composants.	96
5.3	Faisceau électrique.	99
5.4	Stratégie choisie.	103
5.5	Propositions de découpage.	105
5.6	Description structurelle d'un faisceau électrique.	107
5.7	Découpage structurel d'un faisceau générique.	107
5.8	Description fonctionnelle d'un faisceau électrique.	108
5.9	Evolution de la stratégie structurelle.	110
5.10	Evolution de la stratégie fonctionnelle.	110
5.11	Découpage structurel.	111
5.12	Découpage fonctionnel.	111
5.13	Comparaison des deux découpages modulaires.	112
5.14	Démarche méthodologique.	115

Liste des tableaux

2.1	Exemple de codification significative.	25
2.2	Cardinalités sur relations.	34
2.3	Sémantique inter-liens.	35
2.4	Exemple de modélisation générique.	38
3.1	Cardinalités du lien fonction/module technique.	48
3.2	Classification de la différenciation retardée.	59
4.1	Déclinaison d'un type de diversité à l'autre.	76
4.2	Méthodologie de conception.	76
4.3	Indicateurs pour la « Maîtrise de la diversité».	78
5.1	Algorithme de découpage modulaire.	106

Introduction générale

Problématique

Dans un marché concurrentiel, les fabricants sont amenés à répondre à des besoins fonctionnels variés par des réponses individuelles, de manière à diversifier et élargir leur clientèle et se réserver des parts de marché. Il en est advenu un marché de plus en plus segmenté dans lequel les fabricants se doivent d'innover et d'adapter chaque produit aux besoins spécifiques de chaque client (Tarondeau [96]).

Les fabricants sont donc conduits à fournir une grande quantité de produits différents pour satisfaire un ensemble de besoins clients. Pour le fabricant, cette diversité commerciale doit être maîtrisée pour ne pas mener à une augmentation des coûts dans toutes les activités de l'entreprise (MacDuffie *et al.* [68]), de la conception à la production (Ben Aissa [13]), en passant par le service commercial et le soutien logistique. Nécessairement, la diversité commerciale ne peut être supportée durablement que si elle s'appuie sur une faible diversité technique, qui garantit des coûts de développement et de gestion acceptables (Child *et al.* [23]).

Les industriels sont confrontés à un dilemme : la diversité ou les économies d'échelle (Kekre *et al.* [55]). Pour répondre aux besoins spécifiques de chaque utilisateur, il est possible soit de faire des produits sur-mesure, ce qui augmente les coûts et se répercute sur les prix de vente, soit au contraire, afin de diminuer les prix, il est possible de standardiser la production pour profiter des économies d'échelle (effets d'apprentissage, coûts fixes diminuant, ...). En revanche l'accroissement de la standardisation augmente les coûts enveloppe, c'est-à-dire qu'il existera dans les produits finaux des fonctions non utilisées.

Un compromis judicieux doit être recherché entre la standardisation des produits et processus, pour diminuer les coûts de fabrication, et la fabrication sur mesure (à la commande), pour satisfaire individuellement chaque demande.

Une solution apportée par les industriels est d'utiliser des familles de produits qui permettent un certain degré de standardisation, et laissent encore de la flexibilité aux produits pour pouvoir s'adapter à différents usages. Ces familles de produits se déclinent ensuite par une combinaison d'options et variantes choisies en partie par le client final de manière à créer un produit personnalisé selon les besoins et désirs de chacun.

La philosophie actuelle étant de remplacer les anciens produits par de nouvelles versions, soit d'un produit amélioré soit d'une nouvelle variété du produit, la différenciation des produits est d'une importance croissante en marketing. La compétition

n'est plus seulement sur le prix mais aussi sur la variété et la vitesse de mise sur le marché. Les consommateurs demandent à la fois une haute qualité, des prix bas et des produits personnalisés, régulièrement actualisés par les progrès techniques.

Lors de la conception du produit, il s'avère donc nécessaire de modéliser les interactions entre la diversité commerciale et la diversité technique.

La gestion de la diversité des produits est un point important qui se trouve à l'interface de plusieurs secteurs dans une même entreprise :

- une grande diversité du produit fini est souhaitée par le service commercial qui vise la satisfaction du consommateur,
- une faible diversité est souhaitée par les services achats pour les produits stockés afin de profiter d'économies d'échelle et de pouvoir plus facilement mettre en concurrence un ensemble de fournisseurs,
- une faible diversité ou une standardisation est souhaitée par les services de gestion de manière à diminuer le nombre de références traitées,
- en conception on préfère raisonner en terme de familles de produits, pour réutiliser les conceptions précédentes et réduire ainsi le nombre de simulations et d'informations de conception à maintenir,
- enfin, au niveau de la production, on désire réduire la diversité process et les changements de production, à l'origine de coûteuses surcapacités de production.

Contribution

Dans un contexte de conception de produits, ce travail porte sur la réalisation d'une grande diversité de produits à moindre coût. Pour cela, notre contribution tente de répondre aux deux questions suivantes :

- Quelle diversité proposer ?
- Comment gérer cette diversité ?

Une étude de l'existant dans le domaine a dégagé les différentes propositions faites en matière de modélisation et de réalisation des familles de produits. Cette étude a permis de constater : premièrement que la modélisation des familles de produits a un impact sur la diversité du fait qu'elle structure la définition même des familles de produits ; deuxièmement qu'il existe un certain nombre d'outils, soit au niveau du produit, soit au niveau du process, permettant la réalisation de familles de produits ; finalement le manque actuel de démarche globale dans l'approche et la résolution des problèmes de conception de produits à forte diversité.

Notre contribution porte sur la proposition d'un modèle servant de support à une méthodologie globale de conception de produits à forte diversité. L'apport essentiel de notre travail réside donc plus précisément :

1. d'une part, dans une séparation entre les différents types de diversité nécessaires à la description du cycle de mise sur le marché d'une famille de produits ;

2. d'autre part dans la déclinaison d'un type de diversité à l'autre en s'appuyant sur les outils disponibles actuellement dans la littérature ;
3. et enfin dans la proposition d'une démarche de conception produit/process dans le cas de la conception de produits à forte diversité.

Notre contribution est récapitulée de manière schématique par la figure 1. Cette figure montre tout d'abord les trois niveaux de diversité qui ont été considérés (diversité fonctionnelle, diversité technique et diversité process). Elle montre ensuite l'existence d'outils et méthodologies de conception de produits et de process permettant le passage de la diversité fonctionnelle à la diversité technique ainsi que le passage de la diversité technique à la diversité process. Cette figure souligne enfin l'absence d'outils et de méthodes globales de conception produit/process prenant en compte les trois types de diversité. C'est ici que se situe notre apport principal qui s'appuie sur un cas industriel réel dans le domaine des faisceaux électriques, à partir duquel le problème nous est apparu.

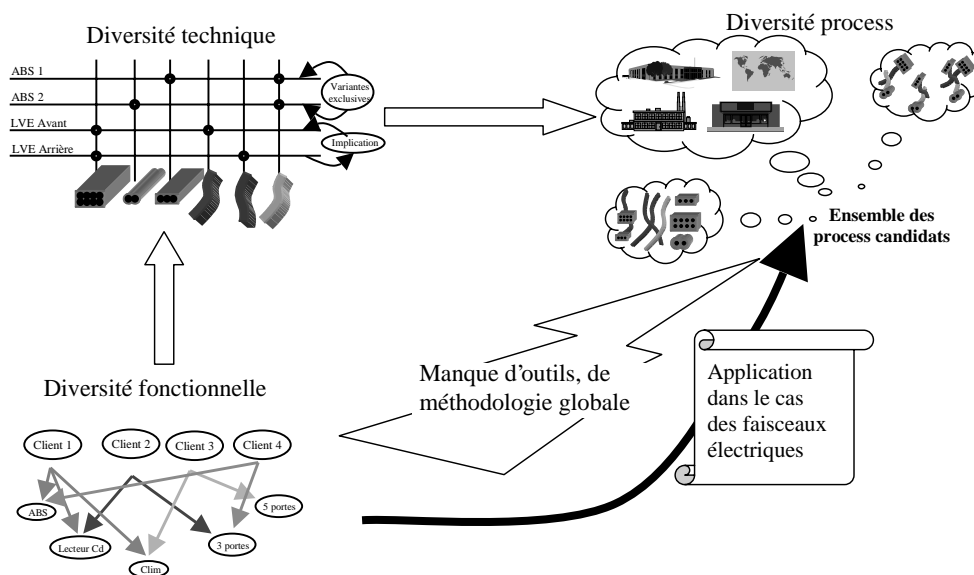


FIG. 1 – Représentation globale du problème de la diversité.

Ce travail de thèse est complété par la proposition d'un outil d'aide à la décision pour la conception de faisceaux électriques automobiles. En effet, nos travaux ne se sont pas limités à une définition conceptuelle de la gestion de la diversité, mais un outil-prototype a été développé qui permet de concevoir des modules industriels permettant d'assurer une diversité fonctionnelle totale des produits finis dans lesquels ils sont assemblés, en s'appuyant à la fois sur la description du produit et du process¹. Un compromis est recherché entre le nombre de modules industriels à réaliser et les coûts de production permettant l'assemblage final des produits sous une contrainte

1. Les produits et process en question seront détaillés au chapitre 5.

de temps. Cet outil veut répondre au besoin des concepteurs qui est celui de vouloir optimiser la conception des faisceaux électrique sur toute la chaîne allant de la conception à la livraison synchrone chez le client donneur d'ordres.

Les mots clés attachés à ce travail de thèse sont :

- diversité produit,
- familles de produits,
- conception modulaire,
- différenciation retardée,
- data mining,
- faisceaux électriques.

Plan de lecture de la thèse

La thèse comprend les 5 chapitres suivants :

1. Étude sur la diversité des produits.
2. Étude sur la représentation des familles de produits.
3. Étude sur la réalisation des familles de produits.
4. Proposition d'une méthodologie de conception des familles de produits.
5. Application industrielle.

Au cours du premier chapitre, l'intérêt porte tout d'abord sur l'origine de la diversité des produits, afin de savoir où prend racine cette diversité des produits mis sur le marché et pourquoi on observe une diversité croissante. Ce chapitre pointe ensuite sur l'existence d'une diversité optimale, enfin il considère trois cas d'études industriels.

Le second chapitre s'intéresse à la représentation des familles de produits dans un contexte de forte diversité, en considérant dans un premier temps la structuration des données techniques, puis les différents types de liens existants, les modèles génériques, enfin un intérêt particulier sera donné à la norme STEP.

Le troisième chapitre présente différentes propositions pour la réalisation des produits à forte diversité. En premier lieu sont présentées des méthodologies de conception, ensuite des outils pour la différenciation retardée.

Le quatrième chapitre fait la synthèse de la littérature vis-à-vis de la diversité en montrant comment se situe l'ensemble des travaux dans la chaîne globale de réalisation de produits à forte diversité. Trois types de diversité sont différenciés, les liens qui les unissent sont décrits puis une démarche de conception de produits à forte diversité est proposée. Afin d'aider à l'acquisition des données nécessaires à la conception, les outils de *Data Mining* sont introduits.

Le cinquième chapitre met en oeuvre nos propositions sur un cas industriel réel dans un contexte client–fournisseur où le fournisseur doit livrer en synchrone à son donneur d'ordres un produit à diversité totale, c'est-à-dire ne contenant aucun élément non nécessaire.

Enfin, en conclusion, nous dégagerons les perspectives de recherches ouvertes sur ce thème.

Chapitre 1

Diversité des produits

1.1 Introduction

Le but de ce chapitre est de donner une vision d'ensemble sur la problématique de diversité des produits industriels que ce travail de thèse aborde. Pour cela, ce chapitre est divisé en trois sections. Chaque section a pour objectif de mettre en relief un point particulier de la problématique.

La première section (1.2) éclaire quelles sont les origines de la diversité des produits industriels mis sur le marché en s'appuyant sur différents points de vue.

La section 1.3 s'interroge sur l'existence d'une variété optimale. Différentes approches sont présentées qui proposent une réponse à cette question.

La section 1.4 présente trois cas d'étude pour mettre en relief la problématique de diversité. L'intérêt porte principalement sur les solutions proposées par les industriels à chaque cas.

1.2 Origines de la diversité des produits

La diversité des produits industriels a été étudiée sous divers aspects depuis de nombreuses années.

Un des challenges majeurs pour les responsables produit est la gestion de la prolifération des produits. Cette prolifération des produits rend difficile la prévision précise de la demande et par conséquent mène à des coûts de stockage d'anticipation élevés pour un faible service apporté au consommateur (Lee [62]).

Fisher et Ittner [34] se sont interrogés sur les impacts de la variété des produits par rapport aux performances d'une usine automobile d'assemblage. Ils se sont basés sur des données empiriques et sur des résultats de simulation. Ils ont montré que la variété des options augmente le temps total d'heures travaillées par voiture produite. Ils ont aussi indiqué que borner la variété permet de réduire la quantité dans les stocks et que la variation aléatoire de l'apparition des options est plus nuisible que l'existence même de cette variété.

Ben Aissa [13] a mis en évidence comment le nombre de variantes d'un composant provoque des difficultés au moment de l'assemblage.

Tout ceci montre donc que la diversité des produits à fabriquer a un coût pour le fabricant. Nous avons donc cherché quelles étaient les origines à la diversité qui justifient ou non ces surcoûts de production.

1.2.1 Une réponse à l'évolution du marché

Ciavaldini et Loubet [24] ont réalisé une étude historique de la diversité. Ils se sont intéressés à la diversité dans l'industrie automobile française avec un double regard d'historien et de gestionnaire.

Il ressort de leur étude que la diversité des produits mis sur le marché dépend de l'équilibre entre l'offre et la demande à l'instant considéré, c'est-à-dire de la maturité du marché sur le segment considéré. Ils affirment que si l'offre ne parvient pas à couvrir la demande alors la volonté de rationalisation des producteurs conduit à une réduction de la variété et au recentrage des activités qui conduisent au produit unique. Ceci s'observe jusqu'à la fin des années cinquante dans le marché automobile où étaient produits en masse par chaque constructeur des modèles uniques ou peu diversifiés.

L'idée d'un tel comportement provient du fait que la rationalisation permet de diminuer les temps de fabrication, ce qui en conséquence diminue les coûts de revient donc les prix de vente, ceci a pour implication de stimuler le marché.

A partir des années cinquante, on observe une évolution du marché. On entre dans une phase de renouvellement des produits. L'évolution du marché automobile a fait apparaître de nouveaux concurrents et chacun va tenter d'attirer de nouveaux clients et de fidéliser sa propre clientèle. Pour cela, un ensemble de modèles susceptibles de correspondre à différentes attentes sera proposé à la clientèle.

Cependant cette multiplication des modèles va être liée à la volonté d'utiliser des composants communs sur plusieurs modèles afin de limiter le plus possible les difficultés techniques propres à la variété.

Cette fois l'offre globale est supérieure à la demande, il convient de diversifier l'offre pour couvrir des demandes diversifiées.

On observe alors une opposition de deux politiques de conception des produits :

- Henry Ford prône une conception fondée sur la faible diversité et fort volume dans une optique de minimisation de coûts (Ford « modèle T »),
- General Motors encourage une conception fondée sur une forte diversité et un plus faible volume dans la perspective de mieux satisfaire les besoins hétérogènes du marché.

La logique du producteur est opposée à la logique marketing. La diversité est inévitable pour contenter le marché alors que le modèle unique est indispensable pour obtenir les meilleurs coûts.

La diversité dans l'industrie automobile commence donc à la fin des années 50 poussée par les commerciaux des groupes automobiles. On peut observer ainsi :

- une multiplicité des produits offerts sur des marchés segmentés de façon de plus en plus étroite,
- une accélération du rythme de renouvellement des produits réalisés par les unités de production.

1.2.2 Stratégie industrielle

Pour Tarondeau [96], l'entreprise industrielle peut envisager sa croissance en agissant soit sur le degré de complexité des produits offerts, soit sur le degré de standardisation des produits.

Les classifications des systèmes industriels montrent que ceux-ci dépendent essentiellement de deux caractéristiques des produits : la diversité et le volume.

« Alors que la flexibilité des produits permet de réduire la diversité de ceux-ci par une multiplication de leurs usages, le produit « sur-mesure » est un produit rigide, qui satisfait les besoins d'un seul consommateur. Son unicité est obtenue par transformation ou par assemblage réalisés selon des spécifications propres au client. [...] Le processus de production ne peut donc être initié avant que la demande effective de chaque client soit connue. Une partie des opérations de production est dépendante de chaque demande particulière. Ceci suppose que le processus industriel dispose d'une flexibilité suffisante pour s'adapter à une multitude de conditions dont la survenue ne peut pas être planifiée. » Source Tarondeau [96].

Observons que les produits aboutissent aux consommateurs grâce à un ensemble de processus au cours desquels ils se transforment et se diversifient. Concevoir le système industriel consistera à définir les structures de produits de telle sorte que la diversification des produits se situe le plus en aval possible dans les processus industriels, on parlera alors de différenciation retardée.

1.2.3 Stratégie de Marketing

Dans Pointet [85], l'auteur nous montre comment en voulant satisfaire au mieux les consommateurs, afin de prendre des parts de marché, les constructeurs automobiles, Renault en l'occurrence, augmentent la diversité de leurs produits en essayant d'anticiper les besoins.

Les constructeurs tentent de mettre sur le marché des produits créatifs, de manière à révéler les besoins, devancer les attentes du consommateur, afin de créer un marché sur lequel ils seront les seuls fournisseurs ou du moins les premiers.

Le contexte de concurrence induit que les concurrents copient la nouveauté afin de ne pas être distancés, non seulement pour leur image de marque, mais aussi dans le

but de faire mieux, il n'y a pas de mimétisme aveugle, mais plutôt une observation de ce que fait la concurrence pour la devancer.

Chaque constructeur a tendance à différencier son produit pour s'approprier un créneau particulier de marché, et imiter le comportement des concurrents pour capter leur clientèle. Il y a une adaptation permanente des processus d'innovation qui a tendance à augmenter la diversité des produits sur le marché et accélérer le renouvellement des produits.

Les constructeurs développent une très grande réactivité par rapport au comportement des concurrents, ainsi qu'une politique d'innovation maximale. Il faut faire évoluer les produits pour satisfaire et devancer les attentes des clients.

Pointet [86] s'interroge sur le dilemme différenciation/mimétisme dans le comportement des firmes automobiles et de leurs produits car cela induit deux comportements opposés qui coexistent : la différenciation qui permet aux entreprises d'ériger des barrières à l'entrée de leur marché et de se constituer un pouvoir de marché et le mimétisme qui permet de ne pas perdre son temps à réinventer ce qui existe déjà, afin de copier pour faire mieux.

Il y a plusieurs origines au mimétisme :

- Ce peut être un choix stratégique d'homogénéiser certaines caractéristiques de produits concurrents leaders, il s'agit alors d'un comportement de veille concurrentielle.
- Ce peut être du mimétisme contraint : lorsqu'un produit innovant est élu par les consommateurs et qu'il devient alors la référence à atteindre.

Le mimétisme va à l'encontre des théories soutenant la différenciation comme moyen d'obtenir un pouvoir de marché. Le mimétisme, dans la déstructuration de ce pouvoir de marché créé par le concurrent mimé, va à l'encontre de la constitution d'un propre pouvoir de marché.

Les raisons du mimétisme sont multiples :

- réduire l'avantage concurrentiel de la firme imitée pour diminuer son pouvoir de marché en se réfugiant dans le marché récemment révélé. Cependant se réfugier dans une niche de marché des concurrents peut s'avérer une erreur conduisant à une impasse concurrentielle,
- attirer des acheteurs potentiels par reprise de certaines caractéristiques des produits concurrents qui font leurs succès commerciaux,
- effets de mode,
- mimétisme, et plus particulièrement auto-mimétisme, permet de bénéficier de l'apprentissage acquis sur le produit que l'on imite,
- manque d'inspiration des imitateurs.

On observe une coexistence des deux phénomènes, un nouveau produit présente des caractéristiques imitées et des caractéristiques différenciées. Pointet [86] s'interroge sur la coexistence du comportement ambivalent entre différenciation et mimétisme. Il y aurait prédominance du mimétisme en phase de maturité du produit, alors qu'il y aurait prédominance de différenciation en phase de renaissance.

En résumé, les industriels tentent d'anticiper, de révéler, de précéder les besoins, dans le but de créer un marché sur lequel ils seront les premiers fournisseurs. Ils tentent de différencier leurs produits pour les adapter à des segments particuliers de marché. D'un autre côté, pour attirer les clients de la concurrence, ils imitent aussi ce qui tend à l'uniformisation des produits.

1.2.4 Logiques locales

Une autre interprétation provient de Kocher et Rolland [56]. L'observation suivante est à l'origine de leur travail : bien qu'il semble que chacun souhaite une diminution du nombre de variantes mises sur le marché, on observe une évolution inverse.

Tout d'abord, dans le domaine de l'automobile, il apparaît que les produits haut de gamme ont une diversité supérieure de celle des véhicules bas de gamme. Ceci s'explique en partie par le fait que leur réalisation est coûteuse et qu'il s'agit donc de l'amortir en touchant le plus large public possible. De plus, dans une même gamme, les produits récents sont beaucoup plus diversifiés que ceux d'anciennes générations.

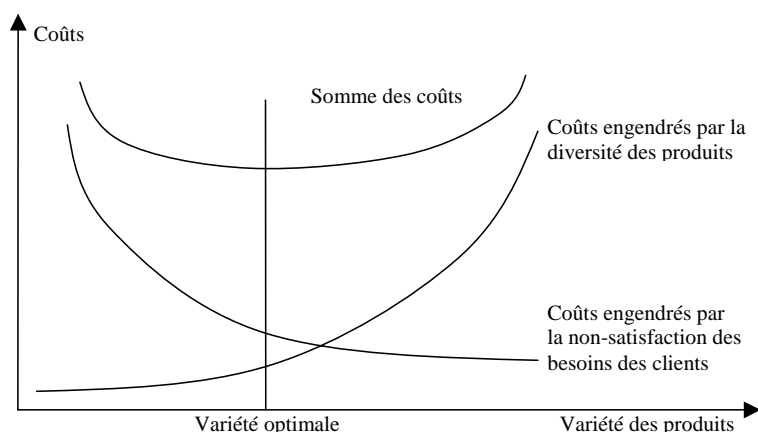
Une étude réalisée au niveau de la conception des véhicules (Kocher et Rolland [56]) fait apparaître que les logiques locales étaient à l'origine d'un tel état de fait. En effet chacun visant à une satisfaction locale (financière, commerciale, de conception, de fabrication, ...), il aura tendance à augmenter l'état de diversité tel qu'il lui a été donné. La combinatoire de l'ensemble provoque une diversité très importante.

Il apparaît ainsi qu'une structure métier classique a tendance à augmenter la diversité, tandis qu'une structure projet veille à maintenir l'évolution de la diversité comme l'a montré Midler [75] à propos du projet TWINGO.

1.3 Problème de la variété optimale

Tarondeau [96] évoque le problème de la diversité optimale. Il s'avère nécessaire de comparer les gains résultants de la variété par rapport aux économies d'échelle. Si aucune économie d'échelle n'est possible alors le choix optimal est le produit « sur-mesure », en revanche si aucun gain ne résulte de la variété, le choix optimal sera de réaliser une seule variante ; or la plupart des cas sont des intermédiaires et il faut trouver un équilibre entre la variété et les économies d'échelle.

Pour cela, il faut rechercher un optimum minimisant la somme des coûts engendrés (Cf figure 1.1 tirée de Tarondeau [96]) par la non satisfaction des besoins des clients — les clients non satisfaits ne reviennent pas, ou vont chez la concurrence d'où perte de parts de marché — et ceux provenant de la diversité des produits — la diversité des produits nécessite des surcapacités de tous ordres qui induisent des coûts pour

FIG. 1.1 – *Variété optimale.*

l'entreprise (niveaux des stocks, polyvalence des opérateurs et des postes, machines flexibles, ...).

Tarondeau note l'apparition d'une nouvelle stratégie industrielle, liée au développement des technologies et des organisations flexibles, qui permet de diversifier l'offre des producteurs jusqu'au «sur-mesure», en laissant le consommateur définir lui-même les caractéristiques des produits ou services qu'il souhaite acquérir.

En cela, il faut voir la différenciation retardée, qui permet une personnalisation par l'utilisateur, pouvant s'effectuer jusqu'au stade de la distribution. Il semble que la conception modulaire soit alors la mieux adaptée en permettant une interchangeabilité facilitée pour l'adaptation aux différents besoins. La modularité multiplie les usages possibles, et la standardisation facilite la production et la gestion.

Kocher et Rolland [56] ont remarqué qu'en pratique, les concessionnaires n'explorent que 10% de la diversité commerciale à leur disposition. De plus, il apparaît que l'ensemble des concessionnaires utilise les mêmes 10%. Ceci traduit le fait qu'ils ont une assez bonne connaissance de leurs clients et que ceux-ci ne sont pas aussi exigeants en terme de diversité que ce que semblent croire les fabricants.

Leur étude souligne que les consommateurs semblent désemparés par une telle diversité de l'offre. Dans 50% des cas, ils se laissent guider dans leur choix par les concessionnaires qui leur proposent ce qu'ils ont en stock soit 10% de la diversité commerciale.

Kocher et Rolland [56] ont pu observer que :

- pour les Peugeot 405 :
 - 20% de la diversité commerciale correspond à 60% des demandes,
 - contre 50% de la diversité commerciale qui correspond à 10% des ventes,
- le cas s'aggrave si l'on considère la Peugeot 306 puisque :
 - 20% de la diversité commerciale correspond à 90% des demandes,

- contre 50% qui correspond à 4% des ventes.

Ceci amène à se demander pourquoi continuer à produire une telle diversité sachant qu'une grande partie de ce qui est conçu ne sera jamais produit ?

Différents points de vue concernant la diversité optimale des produits mis sur le marché sont présentés selon les interlocuteurs :

- les spécialistes du marché se préoccupent de la satisfaction des acheteurs,
- les économistes et sociologues analysent le bien être social,
- les producteurs s'intéressent à la productivité et à la flexibilité.

1.3.1 Approche marketing

Le postulat de base est que les produits sont créés pour satisfaire des besoins. Les méthodes marketing partent du besoin par une étude de marché et en déduisent une définition des produits à réaliser. La différenciation des produits permet de satisfaire les besoins les plus personnels des utilisateurs, ces besoins sont spécifiques, diversifiés et évolutifs.

Les produits sont appréciés en fonction de leurs caractéristiques, des services qu'ils peuvent rendre, l'insatisfaction dépend de la distance entre le besoin et le produit proposé. Pour augmenter la satisfaction de chaque client, il faudrait donc que chaque client trouve un produit qui réponde exactement à ces besoins, ainsi le gain serait maximum. Il faudrait donc multiplier le nombre de variantes de produits pour réduire les écarts entre caractéristiques souhaitées et caractéristiques obtenues.

1.3.2 Approche économique

Les stratégies dites de préemption, visent à assurer des gains par une position dominante sur le marché.

Cette recherche de position dominante incite l'entreprise à créer des barrières à l'entrée pour les autres concurrents sur un même marché. Pour cela, l'entreprise propose un produit avec une diversité supérieure à celle que nécessite le marché de manière à ne pas laisser de place ouverte pour les produits de la concurrence. Dans ces conditions de concurrence où chaque producteur offre indépendamment les uns des autres une diversité maximale, l'équilibre du marché génère alors un nombre de produits supérieur à ce qui est nécessaire pour couvrir l'ensemble de la demande.

1.3.3 Approche industrielle

Concevoir, lancer, produire, distribuer, maintenir des produits engendre des coûts qui dépendent de la diversité du produit de par l'existence de coûts fixes et d'effets d'apprentissage et d'expérience.

Augmenter le nombre de combinaisons possibles autour d'une même famille de produits permet de partager certains coûts fixes pour les variantes de produits qui la composent.

L'augmentation du nombre de combinaisons autour d'un modèle permet d'élargir le marché et d'augmenter les volumes pour ce modèle. Au contraire, augmenter le nombre de modèles implique une diminution des volumes par modèle. Pour Loubet [67], proposer plusieurs variantes permet d'allonger les séries, de rentabiliser la conception sur un plus grand nombre de véhicules, de diminuer les coûts unitaires, et de baisser les prix de vente.

De plus, Ciavaldini et Loubet [24] affirment que le département Produit tente de viser la plus large clientèle possible en proposant une grande diversité de produits finis de peur de rater leur cible.

1.4 Cas d'étude

Nous nous sommes appuyés dans ce travail sur trois cas d'étude réels d'industriels faisant face à la diversité de leurs produits en nous interrogeant sur la manière dont ils traitaient cette problématique.

1.4.1 Schneider Electric : La diversité standardisée

L'Histoire de Merlin-Gerin¹ présentée par B. Lefebvre dans [65], nous montre l'entreprise comme un pôle d'innovations sociales qui s'inscrit dans le creuset grenoblois. De manière à faire face à une diversité de demandes toujours croissante en haute tension, il a été choisi de proposer une offre à diversité standardisée, pour un nouveau matériel électrique (poste de transformation HT / MT : PS200). La méthode proposée intervient dès l'offre commerciale, en agissant sur le comportement des commerciaux vis à vis de la vente d'un nouveau produit.

Dans [38], N. Girard présente le processus mis en oeuvre. Pour le type de matériel énoncé, il a été choisi de standardiser l'offre afin de réduire les coûts de gestion, de production et surtout les coûts d'étude.

L'ancienne politique commerciale est représentée sur la figure 1.2 :

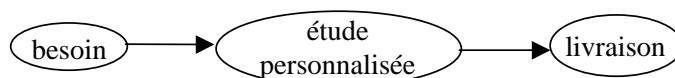


FIG. 1.2 – Ancienne politique commerciale Schneider Electric.

Elle se déroule de la manière suivante :

1. le besoin est défini lors d'un appel d'offre ou par une campagne de recherche des commerciaux, donc par le client et sans tenir compte de l'offre produit,
2. le bureau d'études réalise une étude personnalisée visant à la juste satisfaction du client,

1. Schneider Electric a racheté Merlin-Gerin le 28 avril 1992.

3. la livraison et l'installation sont effectuées sur site.

Cette politique commerciale ne permet pas la standardisation puisque l'on répond à chaque fois à un besoin déterminé et spécifique. De ce fait le produit obtenu est un produit unique qui ne peut être réutilisé ailleurs puisque les besoins différents ne seront pas satisfaits.

De nouveaux objectifs sont alors définis qui visent à couvrir plusieurs besoins avec un même produit pour s'affranchir d'une trop grande diversité de fabrication, et par la même occasion :

- avoir une démarche commerciale unique et bien définie (standardisation de la gamme),
- réduire les délais entre commande et livraison.

La définition d'un nouvel objectif (standardisation) a rendu nécessaire la création de nouveaux outils communs (arbres de décision)². Ces nouveaux outils interviennent sur le processus d'obtention d'une commande, sur son traitement ainsi que sur la fabrication. Trois actions ont été menées :

- réduire la complexité de choix par une standardisation de l'offre,
- réduire voire supprimer les traductions internes en standardisant les outils,
- réduire le nombre de références par une standardisation interne.

Pour répondre à ces nouveaux objectifs, une nouvelle politique commerciale était nécessaire et a été mise en place. Un nouveau marché se déroule de la façon suivante (figure 1.3):

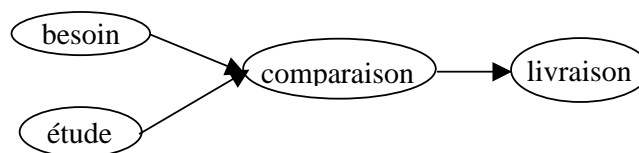


FIG. 1.3 – Nouvelle politique commerciale Schneider Electric.

1. analyse des besoins des clients,
2. comparaison de ces besoins avec l'offre standardisée,
3. proposition d'un produit standardisé s'il en existe au moins un qui correspond (c'est à dire qui satisfasse au minimum à toutes les exigences du client),
4. livraison et installation sur site.

² J.C. Moisdon observe dans [80] que la définition de nouveaux objectifs allait de pair avec l'adaptation ou la création de nouveaux outils.

On observe donc le passage d'une logique de demande vers une logique d'offre. En interne, le nombre de composants standards est limité, mais à l'extérieur l'offre doit paraître diversifiée. La limitation du nombre de références permet entre autre :

- une diminution des coûts de gestion,
- une diminution des délais de livraison,
- une diminution des coûts de recherche d'étude,
- une simplification dans la gestion des produits (approvisionnement, gestion des stocks, ...),
- une simplification de la maintenance.

La méthode de vente a été modifiée. On ne fabrique plus pour un client, mais on réalise un produit qui peut satisfaire plusieurs clients. Les commerciaux n'ont alors plus qu'à « orienter » le besoin du client.

En bref, ceci permet une standardisation industrielle tout en conservant une offre diversifiée. Un produit *adapté* est fabriqué plutôt qu'un produit *catalogué* afin que l'offre corresponde à la demande.

On peut noter ici le rôle fondamental des commerciaux sur qui repose une partie importante de l'offre pour diminuer le nombre de produits spécifiques à fabriquer.

La conception et la gestion de ces transformateurs est tout à fait dans la problématique de gestion de la diversité, en interne le nombre de module est limité, en externe l'offre est diversifiée.

1.4.2 Auxitrol : Options et variantes

La société Auxitrol est spécialisée dans la conception des capteurs de température, parmi lesquels on trouve les thermocouples et les sondes à résistance. Les besoins étant très différents pour chaque client (Renault Sport, Peugeot Sport, Aérospatiale³, GIAT industries⁴, ...), Auxitrol est amené à concevoir un grand nombre de capteurs différents pour satisfaire à toutes les exigences qui lui sont imposées [5].

Cependant, l'expérience a montré qu'une part non négligeable de la production pouvait être standardisée en proposant aux clients des options et variantes sur une gamme de capteurs limitée.

Pour cela, Auxitrol a choisi d'appuyer sa standardisation sur une codification interne des différents composants qui pouvaient être standardisés. Cette codification s'appuie sur les classes de produit, elle est représentée par une chaîne de caractère alphanumérique qui précise le type de technologie, les dimensions du capteur, les matériaux employés, les options et variantes qui composent le capteur en question.

Par exemple un capteur de température pourra avoir la codification suivante :

K G INC 12 PAJFC 900mm + PG2 125 AT .

³. Auxitrol fournit tous les capteurs de température pour Ariane 5.

⁴. Entre autres, Auxitrol équipe les Rafales.

En cela il faut comprendre :

- qu'il s'agit d'un thermocouple nickel chrome / nickel allié (K),
- avec une soudure à la masse (G),
- la gaine de protection est en Inconel 600 (INC),
- le diamètre de la gaine est de 3.17mm (12"),
- l'extrémité de branchement est équipée de prises «MARLIN» mâles et femelles (PAJFC),
- la longueur utile sous fiche est de 900mm (900mm),
- avec en OPTION ('+'),
- un passage étanche fileté process 1/4" NPT (PG2 125 AT).

Ainsi, nous pouvons voir que cette codification permet très facilement de représenter une très grande famille de capteurs. Elle permet aussi de distinguer les options des variantes. En effet, les variantes sont des paramètres obligatoires pour la conception du capteur, et ceux-ci font partie intégrante de la codification de base. Ce sont les paramètres de principes technologiques, de matériaux et de dimensions. Ils sont situés dès le premier caractère et sont séparés des paramètres d'option par un «+» on en connaît l'ordre, la nature, les domaines de validité. Les options sont rajoutées à la codification, et leur ordre n'a pas d'importance. Cependant toutes les contraintes n'apparaissent pas dans la codification comme par exemple l'incompatibilité entre deux options.

Suivant ses besoins, le client est orienté vers une ou plusieurs variantes de base (thermocouple ou sonde à résistance) à laquelle on ajoute des options de manière à mieux cadrer la demande.

Au fur et à mesure que le produit se précise, la codification de celui-ci se met en place. Lorsque le produit est totalement défini et sans ambiguïté, la codification finale obtenue permet d'obtenir automatiquement la gamme de fabrication du produit ainsi que le prix de vente.

Auxitrol a relevé les avantages suivants :

- le calcul du prix est plus précis et plus rapide qu'il ne l'était auparavant (utilisation de la gamme de fabrication et du prix de chaque composant pour le calcul automatisé),
- gain de temps entre commande et gamme de fabrication (la gamme étant générée automatiquement d'après la codification du type de capteur),
- gain de temps en fabrication, car le produit est standardisé par gammes, ce qui permet de réaliser des petites séries,

- gage de qualité :
 - le client peut obtenir immédiatement un prix (le calcul du devis est automatisé),
 - le prix de vente est calculé directement en fonction de la gamme de fabrication et des différents éléments à assembler.

Ainsi en production, il est possible de fabriquer des variantes plus ou moins standardisées (donc de gamme de fabrication a priori déterminée), et d'ajouter ensuite les options que l'on peut produire sur stock.

Finalement, les délais de livraison peuvent être raccourcis, et les coûts de fabrication diminués.

Comme pour le cas précédent, il a été choisi :

1. de proposer une grande diversité extérieure apparente, pour offrir un produit ciblé,
2. de standardiser au maximum en interne pour assurer des coûts de fabrication et de gestion supportables.

Ici encore la même solution a été apportée pour gérer la diversité, c'est-à-dire un nombre limité de composants standardisés paramétrables en interne (les longueurs par exemple) auxquels on ajoute un certain nombre d'options, ceci pour proposer en externe un produit qui convienne au mieux aux exigences des différents clients.

1.4.3 Syléa : Des modules industriels

L'entreprise Syléa⁵ est présentée par C. Cabut dans [18] et [19]. L'entreprise Syléa est un équipementier pour l'automobile. Cette entreprise conçoit et fabrique des faisceaux électriques pour différentes marques (Renault, Peugeot, Citroën, VAG, Ford, Fiat, ...).

Les faisceaux électriques sont les câblages nécessaires à l'alimentation et au fonctionnement de tous les éléments électriques qui entrent dans la composition d'un véhicule. Ce sont des produits soumis à une forte diversité et à une évolutivité importante.

La diversité provient du fait que les constructeurs ont considérablement étendu leur offre pour chaque nouveau véhicule, pour viser la plus large clientèle possible. Nous pouvons noter par exemple :

- les niveaux d'équipements (pack électrique, toit ouvrant, CD, ...),
- les motorisations (Essence, Diesel, 1.5L, 2L, ...),
- les volumes d'habitacles (3 à 5 portes, break, monospace, ...),
- les différentes normalisations des pays d'exportation.

5. L'entreprise Syléa a été rachetée par le groupe VALEO en septembre 2000.

Un argument commercial est que chez tel ou tel constructeur, pour un même type de véhicule, il n'existe pas deux voitures identiques, puisqu'il n'existe pas deux clients identiques.

Sachant que la quasi-totalité des fonctions (climatisation, autoradio, pack électrique, ...) ont un impact sur les faisceaux électriques, nous pouvons noter ici la difficulté que peut éprouver un équipementier pour la gestion et la fabrication d'un tel produit.

En ce qui concerne l'évolutivité, il faut savoir que le rythme de renouvellement de la gamme de véhicules (millésimes, 1/2 millésimes) ainsi que les modifications et évolutions techniques invisibles pour le client ont souvent un impact sur les faisceaux électriques.

A cela, s'ajoute le système de gestion de l'approvisionnement des constructeurs, qui pour limiter leurs stocks et fabriquer le « juste nécessaire » fonctionnent en juste-à-temps. Il faut donc fabriquer un produit de grande diversité et le livrer très rapidement au client.

Jusqu'alors, pour maîtriser ces deux caractéristiques contradictoires (grande diversité et faible délai), Syléa fabriquait des faisceaux enveloppe, c'est-à-dire des faisceaux électriques qui satisfont à des ensembles de besoins, et donc à des fonctions qui ne seront pas systématiquement utilisées.

Suivant une politique de minimisation des coûts, les constructeurs ne veulent plus s'acquitter des fils non utilisés et présents dans les faisceaux électriques, qui représentent pour eux un signe de non qualité (les fils qui bougent, vibrent, font du bruit, ...) et un surcoût non justifié.

L'équipementier ne veut pas prendre en charge ces câbles non utilisés qui coûtent cher (un faisceau électrique est un élément ayant un coût relativement important dans le produit final [9]) et décide alors de fabriquer des faisceaux juste nécessaires tout en respectant de courts délais de livraison.

Pour réaliser ces faisceaux électriques, Syléa dispose de sites de proximités et de sites délocalisés. Les sites dits de proximité sont des sites situés à faible distance du donneur d'ordres (parfois dans les bâtiments mêmes du donneur d'ordres) qui permettent à Syléa d'avoir une très forte réactivité par rapport aux demandes du donneur d'ordres. Les sites délocalisés sont des sites distants avec des coûts de production à meilleur marché.

Suivant une politique de minimisation des coûts, Syléa réalise des modules industriels préassemblés dans ses sites délocalisés. Ces modules industriels sont ensuite acheminés vers les sites de proximité où ils seront assemblés selon les besoins spécifiques de chaque client.

Ceci permet de fabriquer au fur et à mesure des informations reçues par le client, puisque n'intervient plus le temps de fabrication des différents modules mais seulement le temps d'assemblage final. Par la même occasion cela permet de diminuer le délai « réception des informations / mise à disposition du faisceau électrique ».

La conception et la gestion des faisceaux électriques entrent parfaitement dans la problématique de notre travail :

- au niveau des assemblages, chaque faisceau est quasi unique,

- au niveau des composants, il s’agit d’éléments modulaires standards : connecteurs, fils, composants actifs.

Ceci nous amène à nous poser un certain nombre de questions : Vues la quantité et la variété d’options et variantes pouvant se greffer sur le faisceau de base, quel type de représentation est le plus approprié ? Quelle modélisation utiliser ? Quels éléments réaliser dans chaque site, sachant qu’il existe des sites de proximité et des sites délocalisés à coûts de production inférieur ? Comment gérer l’ensemble des configurations possibles tout en évitant les incompatibilités ? Comment assurer la gestion du versionnement des différents constituants, sachant que les impacts sont totalement différents en conception, fabrication, approvisionnement, achat, ...

Notre contribution des chapitres 4 et 5 visera à apporter des éléments de réponse à ces questions.

1.5 Conclusion

L’analyse bibliographique a montré que la diversité des produits a de nombreuses origines et touche plusieurs services d’une même entreprise. Une action allant dans le sens de la maîtrise de la diversité devra donc être une action transversale à l’entreprise et prendre en compte de nombreux paramètres de natures différentes.

Une action de maîtrise de la diversité devra prendre en compte le fait que la variété optimale des produits dépend de plusieurs facteurs marketing, économiques et industriels qui sont fonction de la stratégie de l’entreprise dans son contexte de concurrence sur le marché considéré.

L’analyse des cas industriels montre la complexité du problème et l’absence de méthodes pour l’aborder et encore moins pour le résoudre. Il apparaît tout d’abord que sous une même problématique de diversité se cache en réalité un ensemble de problèmes pour lesquels différentes solutions sont envisageables.

Il apparaît aussi que l’évolution des pratiques vers la prise en compte de la diversité mais aussi vers sa maîtrise peut provenir de paramètres internes (pour Auxitrol et Schneider Electric cela vient d’une volonté de rationaliser) ou de paramètres externes (dans le cas Sylea, la prise en compte de la diversité provient d’une demande externe).

Dans les chapitres 2 et 3 nous nous attacherons à la manière dont la littérature propose de résoudre le problème de diversité. Ceci nous permettra d’introduire un apport méthodologique au chapitre 4, cet apport méthodologique sera ensuite appliqué au cas Sylea au chapitre 5.

Chapitre 2

Représentation des familles de produits

2.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre une étude sur la représentation des familles de produits. Pour cela, nous commençons par une présentation du problème de modélisation de la diversité.

Ensuite, la section 2.3 s'intéresse à la structuration des données techniques en contexte de diversité.

La section suivante pointe sur différentes natures de liens pour représenter des produits à forte diversité en intégrant différentes catégories de contraintes.

Dans la section 2.5 sont montrées les grandes lignes de modèles génériques de familles de produits et de modèles de configuration à travers des travaux représentatifs.

Dans la section suivante, l'intérêt portera sur la norme STEP pour représenter les familles de produits.

Enfin une synthèse fera ressortir les points importants.

2.2 Présentation du problème de modélisation de la diversité

Dans le cas d'un produit unique et non évolutif, on ne rencontre que très peu de difficultés à la représentation des données le concernant. Cependant dans un contexte de forte diversité, il s'avère impossible de représenter explicitement chaque produit par une nomenclature spécifique.

Une solution apportée par les industriels est d'utiliser des familles de produits qui permettent un certain degré de standardisation, et laissent encore de la flexibilité au produit pour pouvoir représenter chaque individu. Ces familles de produits se divisent ensuite en sous-familles (produits) de manière à mieux cibler un marché segmenté, ensuite chaque produit de la sous-famille (instance) peut être personnalisé selon les besoins et désirs de chaque client.

Une modélisation basée sur un partage suivant différents niveaux de la représentation du produit proposée par Agard [6] est présentée figure 2.1. Les niveaux considérés sont : la famille de produit, le type de produit et l'instance de produit qui au niveau des nomenclatures correspondent à nomenclature générique, nomenclature spécifique et nomenclature instanciée, chacune d'entre elles se déclinant en plusieurs vues (fonctionnelle, structurelle, maintenance, ...).

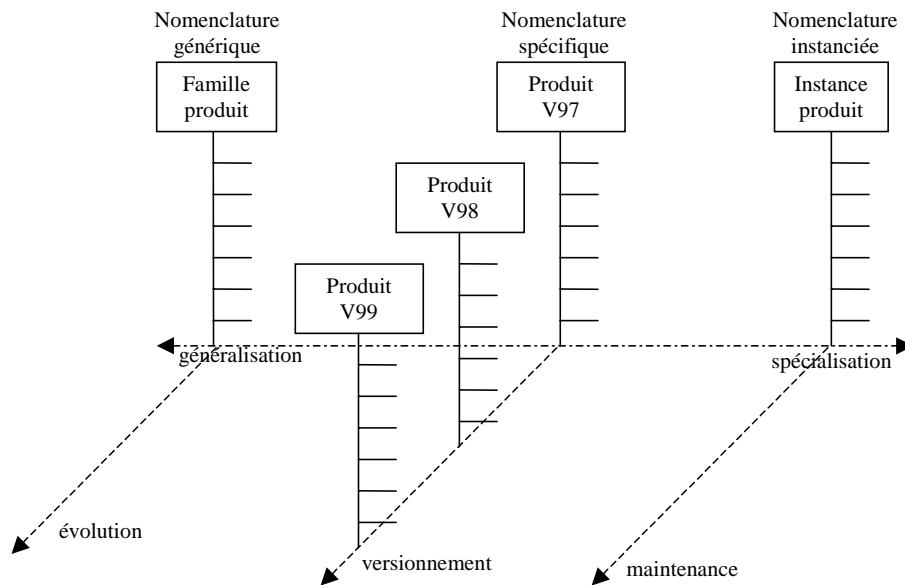


FIG. 2.1 – Différents niveaux de nomenclatures.

- la nomenclature générique : contient les concepts de base, au niveau des nomenclatures, il s'agit du plus haut degré d'abstraction. Ce type de nomenclature contient les familles de produits. Par exemple, la famille des Peugeot 306, la famille des Citroën ZX, la famille des ordinateurs portables, ...
- la nomenclature spécifique : dans ces nomenclatures, sont rangés les types de produit. Nous nous situons donc à un niveau d'abstraction inférieur. Il s'agit à ce niveau des données relatives aux modèles de produit : les Peugeot 306 XT, les Citroën ZX Avantage, ...
- la nomenclature instanciée : ce dernier modèle de nomenclature est celui de plus bas niveau, il contient les données spécifiques à une instance de produit en particulier. On peut trouver par exemple la nomenclature de la voiture Citroën ZX Avantage immatriculée : 702 AZN 38.

Ces trois types de nomenclatures ne se situent pas au même niveau de la représentation des données techniques pour un même produit. Elles ne permettent pas de représenter le même type de données, elles coexistent et se partagent la représentation du produit. Il convient de rattacher les informations au bon niveau. Ces

différents niveaux de représentation du produit proviennent de différents besoins au niveau de la conception :

- Par exemple, la nomenclature générique peut servir en conception pour classer les données relatives aux familles de produits.
- De même, la nomenclature spécifique, permet de structurer les données relatives à la conception d'un type de produit en particulier.
- La nomenclature instanciée, permet quant à elle de suivre l'évolution d'un produit en particulier, cette nomenclature est très utile en maintenance par exemple.

Simultanément, toujours au niveau de la conception, quel que soit le niveau (famille, produit ou instance), il existe suivant un autre axe, un versionnement des constituants et des liens qui permet de caractériser les différentes évolutions du produit.

Par ailleurs, il existe dans l'entreprise différentes formes de représentations du produit (représentations implicites ou explicites de la structure du produit) parmi lesquelles :

- les analyses fonctionnelles,
- les plans, qui contiennent en général les données produit ainsi qu'une structure de produit implicite,
- les nomenclatures, qui contiennent la structure des composants,
- les dessins d'assemblages, qui fournissent une vue structurelle de la décomposition physique,
- la documentation de maintenance,
- les catalogues de produits, ...

Pour une entreprise qui n'est pas totalement intégrée, les types de documents actuels rendent difficile la comparaison entre les variantes de produit, par exemple une même pièce peut avoir différentes codifications selon les représentations. Dans les cas de conception avec réutilisation de solutions existantes, il y a un manque de documents compréhensibles de l'ancienne conception (références croisées entre les documents).

Différents modèles ont donc été proposés dans la littérature. Ils se retrouvent en général sous l'appellation de familles de produit. Ces modèles permettent de représenter des produits génériques ou des composants génériques.

2.3 Structuration des données techniques

Ce chapitre présente différentes propositions de structuration des données techniques tirées de la littérature, en commençant par la codification des objets techniques, puis par la classification.

2.3.1 Codification des objets techniques

D'après Maurino [73], le principe de base de la codification est que tout objet technique est identifié par une référence unique. Cette référence porte suivant les entreprises les noms de code article, numéro de nomenclature, *part-number*, référence composant, ...

Il existe de très nombreux systèmes de codification des objets techniques qui dépendent des entreprises, des secteurs d'entreprise, des projets. Il est cependant possible de les ranger dans quelques grandes classes de codification.

2.3.1.1 La codification unique

Dans ce type de codification, la référence à l'objet technique est unique. Un objet technique entrant dans la composition de plusieurs produits possède donc une seule référence, commune à tous les cas d'emploi de l'objet.

Intérêts de cette unicité :

- éviter la duplication des informations de définition de l'objet technique (éviter les risques de non-intégrité des données dupliquées),
- supporter les efforts de standardisation des produits : il est aisé d'utiliser un produit déjà existant en réutilisant simplement sa codification,
- effectuer le regroupement des besoins en matières, composants, et sous-ensembles entrant dans la composition des différents produits inscrits au plan directeur, selon le principe MRP¹,
- optimiser la gestion des stocks.

2.3.1.2 La codification significative

Le principe de codification significative s'oppose aux méthodes de codification unique de l'objet technique. Elles sont utilisées, en l'absence de systèmes de GPAO², pour gérer manuellement la production. La codification d'un objet n'est pas seulement une référence à celui-ci, mais porte en plus une sémantique qui précise le cas d'emploi. Une codification significative se compose d'un ensemble ordonné de références.

La référence attribuée à un article permet :

- d'identifier l'article lui-même (suffixe de la codification),
- d'identifier l'ensemble dans lequel intervient l'article (racine de la référence).

Comme le montre Maurino [73] dans l'exemple donné en tableau 2.1, la codification d'une pièce précise à quels ensembles (sous-ensembles) de quels produits appartient la pièce.

1. MRP : Material Resource Planning [16, 74].

2. GPAO : Gestion de Production Assistée par Ordinateur [16, 74].

Article	Référence
produit	130
ensemble	130 220
	130 270
sous ensemble	130 270 500
	130 270 580
pièce primaire	130 270 581

TAB. 2.1 – Exemple de codification significative.

Cependant, quelques inconvénients sont à l'origine de la disparition de ce type de codification :

- il existe autant de références que de cas d'emploi. Si le même produit est utilisé dans différents sous-ensembles, il aura différentes codifications,
- elle est un obstacle à la standardisation. La réutilisation de composants dans différents ensembles nécessite la création de nouvelles références,
- il n'y a pas d'optimisation des stocks. En effet, il est difficile de retrouver toutes les références d'un même produit de manière à gérer tous les flux d'entrée et de sortie du composant entrant dans différents ensembles.

Un avantage par rapport à la codification unique est la gestion des liens unissant un ensemble et les articles entrant dans sa composition.

2.3.1.3 Les méthodes mnémotechniques

Elles sont utilisées notamment dans la chimie organique qui dispose d'un moyen très efficace d'organisation de l'information et des données : il s'agit de la molécule, représentée sous forme de dessin.

Le caractère unique de la molécule permet de lui associer de façon biunivoque un numéro qui donne accès à toute l'information concernant cette molécule. Le numéro sert de manière transparente pour l'utilisateur, de clef d'accès aux données et aux informations.

Hors du domaine de la chimie organique, on perd le bénéfice de cette cohérence interne, l'information est alors structurée par sujets, définis de façon plus ou moins arbitraires et variables dans le temps, ceci nécessite l'existence d'index et de thésaurus, complexes à mettre en place et à maintenir.

L'avantage des procédés mnémotechniques est l'accessibilité à l'information.

2.3.1.4 La codification des exemplaires

Lorsque l'on utilise plusieurs exemplaires de la même référence article, il peut sembler utile d'en tenir compte dans la codification de manière à représenter cette similitude. Pour cela il existe deux types de codification :

1. On utilise la référence article à laquelle on ajoute un numéro de série.
Ex: 130 270 580 (code article) + 256 (numéro de série) = 130 270 580 – 256
Cependant cette codification reprend en partie le principe de la codification significative, ce qui pose quelques problèmes en cas de modification.
2. Une autre solution est de créer des références non significatives et de gérer des liens comme représenté sur la figure 2.2. On sait ainsi que les références 65421, 98165 et 1987154 sont des exemplaires de l'article 123456.

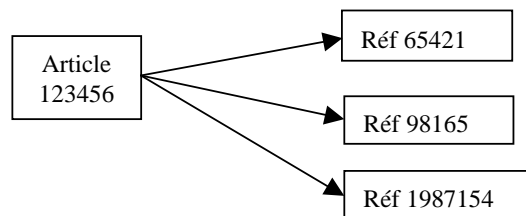


FIG. 2.2 – Codification des exemplaires.

Cette méthode est plus rigoureuse et permet de gérer les modifications, elle est en revanche plus complexe à mettre en oeuvre.

2.3.2 Classification des objets techniques

Le but de la classification est de créer des ensembles (de produits, de composants, ...) partageant certaines caractéristiques. Il est possible de distinguer trois propositions : les familles d'objets, les bibliothèques de composants et la classification à facettes.

2.3.2.1 Familles d'objets par héritage

En associant les points communs à différents articles, les objets techniques peuvent être regroupés en familles. Selon les critères de comparaison des articles, il est possible d'obtenir différentes familles (fonctionnelles, technologiques, ...) que l'on peut classer en arborescences [73].

La structure arborescente des familles est telle que plus on descend dans l'arbre, plus les critères sont précis et inversement plus on monte plus les critères sont génériques (figure 2.3).

Les caractéristiques communes sont attachées aux familles et par héritage aux objets techniques. Ces caractéristiques participent à la définition des familles, et à l'identi-

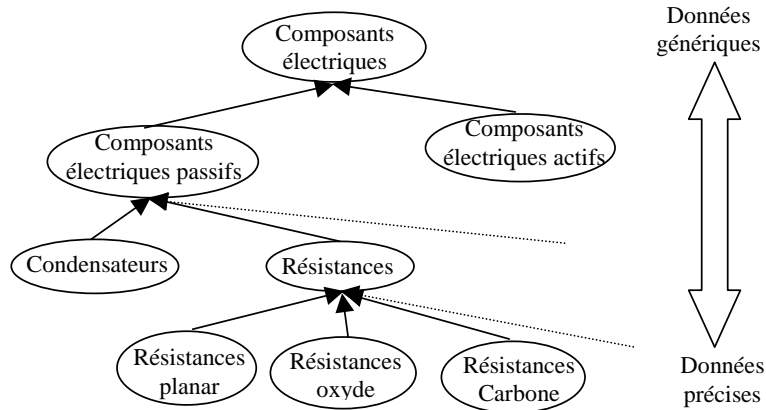


FIG. 2.3 – Les familles d'objets techniques.

fication précise de chaque objet dans une famille déterminée. Une famille peut être générée à partir d'une autre :

- par adjonction de caractéristiques (spécialisation),
- par la définition de valeurs ou de fourchettes de valeurs de certaines caractéristiques (instanciation).

Ceci est représenté sur la figure 2.4.

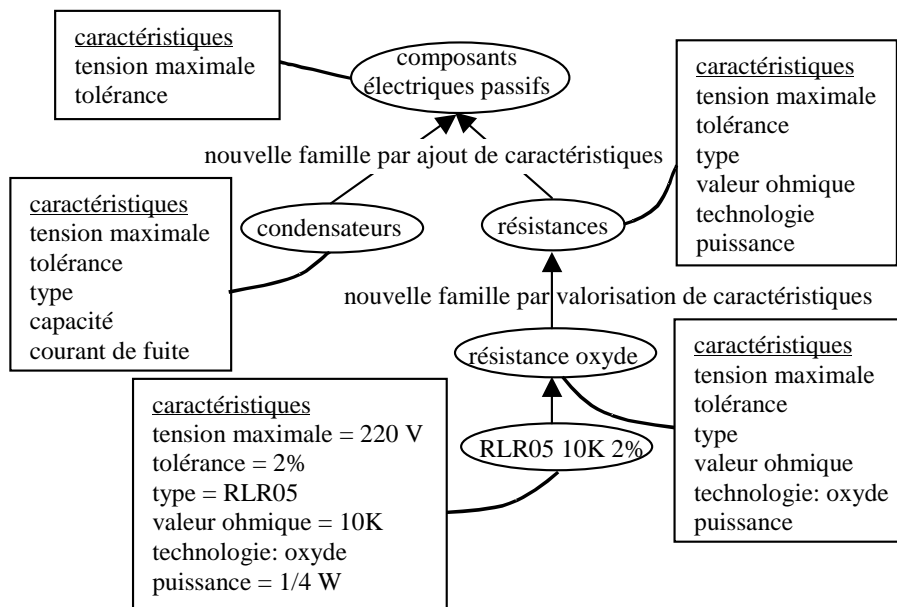


FIG. 2.4 – Les caractéristiques des familles et des objets techniques.

Les caractéristiques se transmettent de père en fils en suivant l'arborescence des

familles et des objets techniques, suivant un phénomène d'héritage. Il existe deux types d'héritage :

- l'héritage simple (Cf figure 2.3), la famille fille hérite les caractéristiques de la famille mère,
- l'héritage multiple (Cf figure 2.5), la famille fille hérite les caractéristiques des familles parentes.

Ces idées sont reprises dans les normes.

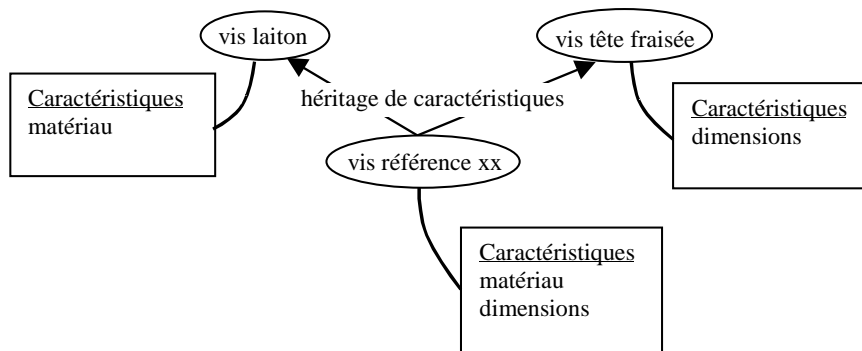


FIG. 2.5 – L'héritage multiple de caractéristiques.

2.3.2.2 Bibliothèques de composants

Il existe différents modèles de classification des composants, qui restent tout de même très proches les uns des autres. Les modèles sont statiques, les familles de pièces sont décrites et définies en leur appliquant des propriétés à un certain niveau de hiérarchie. Il y a donc une définition simultanée des propriétés et des familles, dans une Approche Orientée Objet.

Dietz et Ort dans [27] ont comparés les normes DIN 4000 et ISO 13584.

Approche DIN 4000 Il s'agit de rassembler des objets standardisés ou non, physiques ou non, similaires dans un sens. Pour les décrire, les différents termes suivants sont utilisés : Paramètres, Objets, Groupes d'objets et Liste de paramètres d'objets. Les paramètres sont utilisés pour caractériser des groupes d'objets et sont rassemblés dans une liste de paramètres d'objets. Il faut alors appliquer une valeur à un des paramètres pour décrire un objet de ce groupe d'objets.

Approche ISO 13584 Il s'agit ici de Modélisation Orientée Objet. Le vocabulaire utilisé n'est donc plus le même : Propriétés (caractérisent les familles, simples et génériques), Pièces, Famille simple, Famille générique et Hiérarchie. Les familles sont structurées en hiérarchies en utilisant l'héritage des caractéristiques des familles parentes. Les familles sont caractérisées par des propriétés.

Dans les deux cas, les méthodes proposées sont des méthodes a posteriori, qui fonctionnent d'après le schéma suivant :

1. sélection de l'ensemble des produits concernés (domaine d'étude),
2. regroupement en fonction de leurs points communs,
3. création d'une classe de produit pour chaque ensemble.

Les modèles de représentations s'appuient ensuite soit sur une architecture « une sorte de » : DIN 4000, soit sur un modèle objet permettant de définir des hiérarchies et des héritages de propriétés : ISO 13584.

2.3.2.3 Classification à facettes

La classification à facettes provient de S.R. Ranganathan [36, 37]. Dans le domaine de la classification bibliographique, Ranganathan a introduit en 1967 le schéma de classification à facettes qui consiste en une collection de « petites » hiérarchies de classification orthogonales les unes aux autres. L'un de ses avantages, par rapport à une classification hiérarchique classique, est qu'elle offre une meilleure compréhension de l'ensemble de données considéré en séparant mieux les diverses relations (par exemple l'héritage, mais il y en a d'autres) qui peuvent unir deux classes.

Contrairement aux autres classifications qui sont monohiérarchiques, la classification à facettes s'appuie sur des principes de division applicables à l'ensemble des objets à classer. On parle alors de « divisions analytiques », de « divisions communes » ou de « traits universels ».

Une classification à facettes se caractérise principalement par la division des termes en sous-classes, ou facettes, utilisant une seule caractéristique (ou un seul principe) de division à la fois pour produire des groupes homogènes qui s'excluent mutuellement. Tous les domaines reposent sur une structure sous-jacente de catégories fondamentales représentées dans les facettes analysées.

Cette classification est synthétique dans la mesure où elle prévoit la structuration des concepts dans une liste de sujets qui ne seraient pas cette fois énumérés du plus générique au plus spécifique et elle est analytique parce qu'elle est structurée de manière à ce que ressorte des indices de classification, la représentation de concepts simples, organisés en catégories rigoureusement établies par ce qu'on appelle l'analyse par facettes.

2.4 Différents types de liens

Afin de représenter des familles de produits, de nombreux modèles de représentation s'appuient sur des liens représentant une relation particulière entre les différents objets concernés.

Parmi ces différentes relations quelques sémantiques particulières méritent notre attention, nous allons les décrire ici succinctement.

2.4.1 Lien de composition

Maurino [73] déclare :

« La structure du produit représente les niveaux successifs de décomposition du produit en objets techniques ; elle est constituée des liens de composition (également appelés liens composé–composant) unissant un objet technique aux objets entrants dans sa composition. »

Le lien de composition a pour rôle principal de décrire une relation : « X est un composant de Y ». Cela permet entre autre de décrire les assemblages. Généralement, les liens de composition sont porteurs d'un ensemble de propriétés supplémentaires permettant de décrire plus précisément la relation de composition (Cf figure 2.6 tirée de [73]).

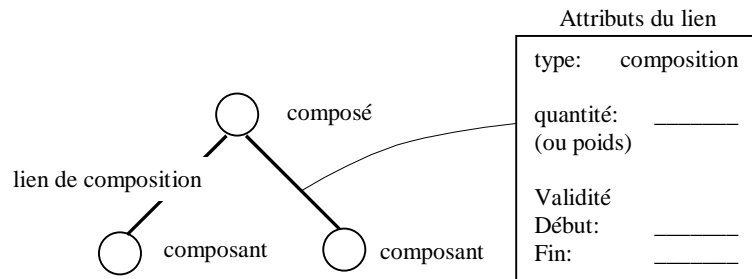


FIG. 2.6 – Le lien de composition.

Les propriétés suivantes apparaissent très souvent :

- identification du lien : nature (composition), type de structure (fonctionnelle, technique, industrielle, ...), type de configuration décrite (de référence, produite, en service, ...),
- la quantité de composants entrant dans le composé (pour un lien entre article ou entre exemplaires), elle peut être exprimée en unité, volume, masse, ...
- une relation d'ordre permettant de trier des différents liens d'un assemblage,
- une liste de positionnement (repère topologique, matrices de positionnement, ...) permettant de localiser géographiquement des composants dans un assemblage,
- la validité du lien (date de création, date de péremption, ...).

De nombreuses autres sémantiques sont utilisées.

2.4.2 Lien d'interface

Les liens d'interface associent de façon transversale plusieurs objets techniques au sein d'une même structure du produit (figure 2.7). Ces liens permettent de :

- formaliser les relations de dépendance entre fonctions ou entre organes,

- exprimer la compatibilité entre différents articles pour un produit,
- pondérer la dépendance relative des deux objets associés par le lien.

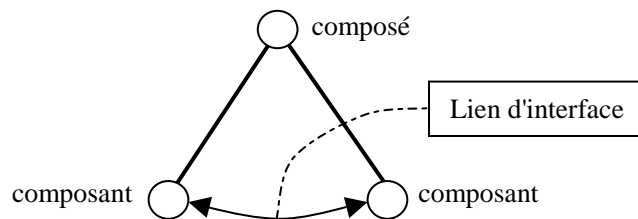


FIG. 2.7 – Le lien d'interface.

Ce type de lien permet de représenter les contraintes existantes entre différents composants ou assemblages par exemple.

2.4.3 Liens inter points de vue

Le travail présenté par Harani [46] avait pour but de capitaliser les connaissances liées à la description du produit et celles liées au déroulement de son processus de conception. Pour cela, deux modèles ont été proposés : un modèle produit et un modèle processus de conception.

Le modèle produit proposé (figure 2.8³) est de type nomenclature de composition et contient deux points de vue (structurel et fonctionnel), afin de permettre deux approches complémentaires (approche produit et approche métier).

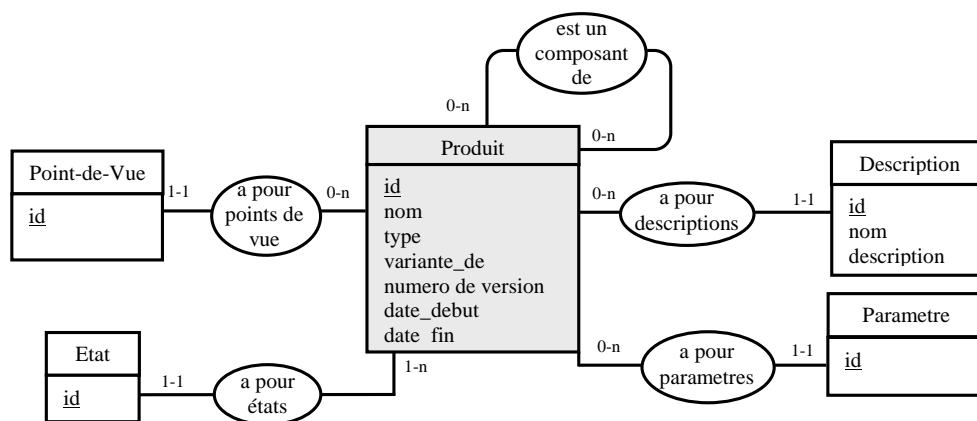


FIG. 2.8 – Méta-modélisation du concept produit.

De manière à rendre l'opération de consultation des informations attachées à un produit possible, il a été choisi d'utiliser les points de vue. En effet, cette notion a

3. Dans ces différents modèles, Harani a utilisé la modélisation Entité-Association.

pour principal objectif la description d'une entité complexe ayant plusieurs facettes. Ainsi une multitude de « grappes » d'information peuvent être définies. Les points de vue permettent :

- de structurer la connaissance relative au produit en blocs homogènes (gestion de la complexité),
- d'enrichir la spécification technique du produit en définissant de nouveaux points de vue si nécessaire,
- d'établir des liens entre points de vue assurant ainsi la complémentarité des points de vue.

En résumé, les points de vue permettent de structurer l'information (à partir de différents critères soit métiers, soit produits) pour la rendre plus représentative, plus compréhensive et donc exploitable.

Le travail d'Harani part des postulats suivants :

- tout point de vue peut être représenté à l'aide d'une structure de graphe,
- chaque graphe est constitué par un ensemble de noeuds et de liens entre noeuds,
- les noeuds sont destinés à renfermer des informations. Ces informations peuvent être des noms de paramètres, de descriptions, de variables d'où la nécessité de définir une entité noeud (figure 2.9),

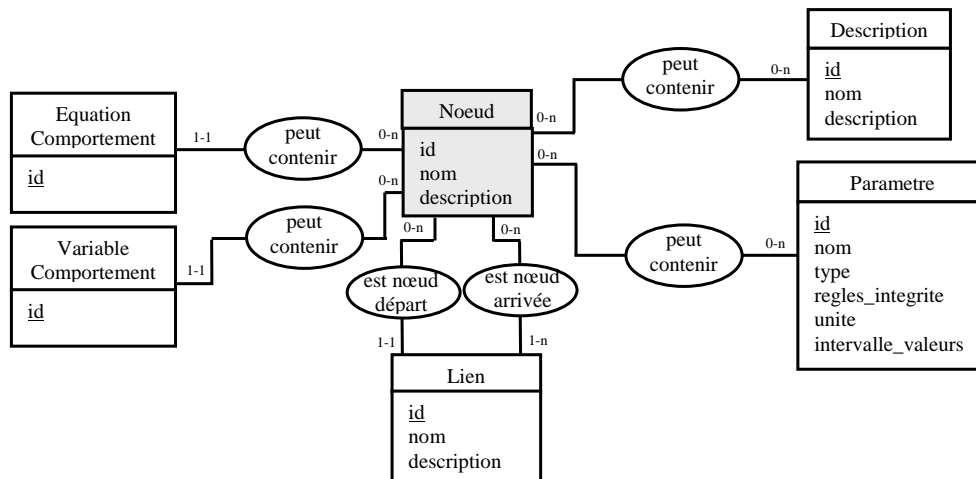


FIG. 2.9 – Méta-modélisation de l'entité noeud.

- les noeuds sont reliés entre eux par des liens. Les liaisons ne sont pas forcément d'une cardinalité 1-1 mais peuvent parfois être de l'ordre de 1-n ou même n-m entre les noeuds,

- les liens entre les noeuds sont particuliers car ils sont porteurs d'une sémantique (figure 2.10). En effet, deux noeuds peuvent être reliés entre eux pour différentes raisons : pour exprimer un lien de composition, de spécialisation, d'appartenance, ou autre. Plusieurs types de liens sont donc nécessaires.

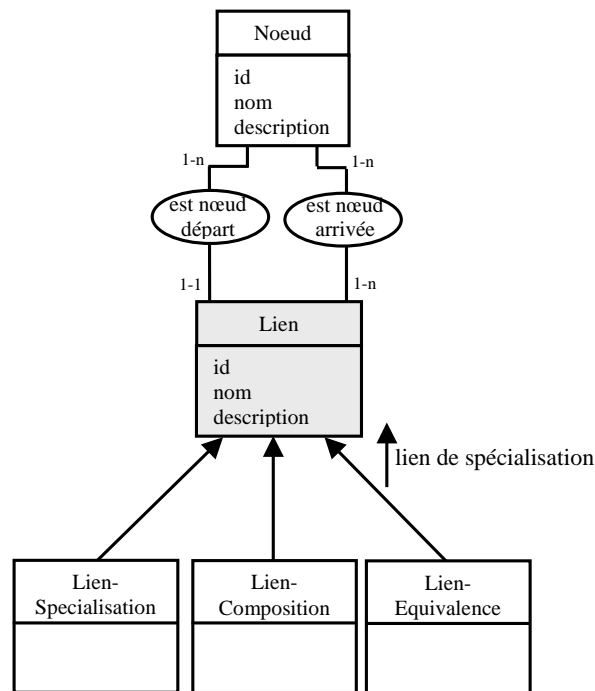


FIG. 2.10 – Méta-modélisation de l'entité lien.

- les liens ne concernent pas uniquement l'établissement de liaisons entre noeuds d'un même graphe et donc d'un même point de vue. En effet, l'apport sémantique attaché aux liens leur permet d'exprimer aussi une relation entre noeuds de deux ou plusieurs graphes différents. Il est alors possible d'exprimer un lien tel que, par exemple, l'équivalence fonctionnelle spécifiant qu'il s'agit d'un même noeud perçu différemment d'un point de vue à l'autre.

Un exemple fourni figure 2.11 concerne la représentation d'un circuit d'éclairage.

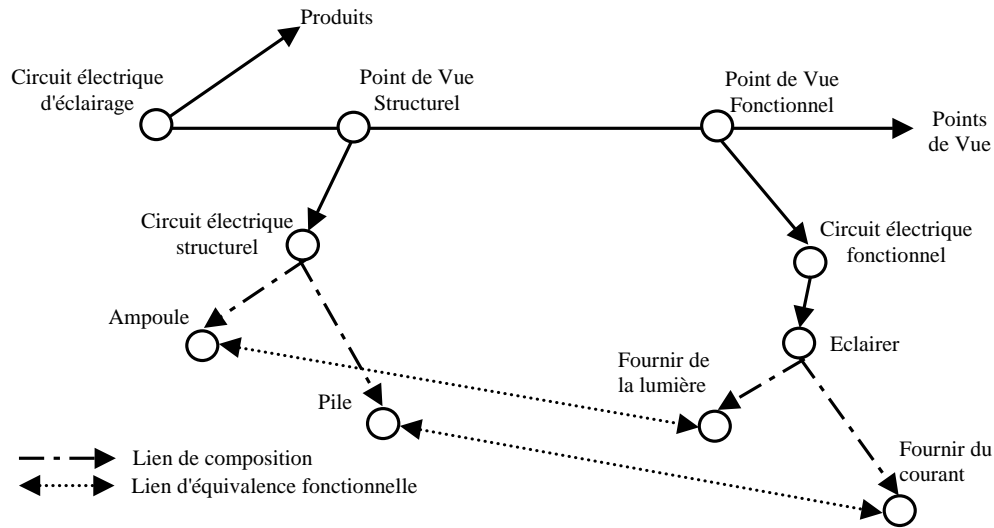


FIG. 2.11 – Liens inter et intra points de vue d'un circuit électrique d'éclairage.

2.4.4 Contraintes inter-liens

Sellini [87] propose d'utiliser des cardinalités sur les relations ainsi que des connecteurs sur relation. Bien que ce travail ne soit pas dédié à la représentation de la diversité mais à la conception, les cardinalités (figure 2.12) permettent de distinguer les options et variantes (tableau 2.2), alors que les connecteurs sur relation (figure 2.13) permettent de poser des contraintes entre les différents composants.

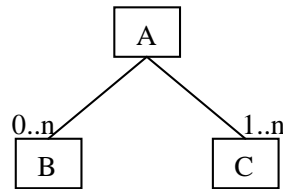


FIG. 2.12 – Cardinalités sur relations.

1..n	le lien a un caractère obligatoire (variantes)
0..n	le lien est optionnel (options)

TAB. 2.2 – Cardinalités sur relations.

Quatre sémantiques sont définies pour les relations inter-liens (contraintes) et explicités dans le tableau 2.3.

Le modèle inclut un mécanisme de vérification de la cohérence de l'ensemble et de simplification du modèle, d'interdiction, de fusion, de non redondance, de non sens et d'incohérence.



FIG. 2.13 – Sémantique des connecteurs.

Connecteur	Symbole	Définition
ET-Equivalent	+	A est nécessairement composé de B, de C et de D
Au moins 1	1+	A nécessairement composé d'au moins un élément B, ou C, ou D, ou les deux, ou les trois.
Exclusion mutuelle	*	A nécessairement composé d'un seul des éléments. Le choix de B interdit C et D.
Implication	→	Selon le sens de l'implication, le choix de C entraîne obligatoirement l'existence de B mais B peut exister sans C

TAB. 2.3 – Sémantique inter-liens.

2.5 Modélisation de la diversité

Ce chapitre présente des modèles génériques de familles de produits ainsi que des modèles de configuration.

2.5.1 Modèles génériques de familles de produit

Une modélisation en familles de produits permet de structurer la diversité. Les familles de produits permettent d'augmenter la variété commerciale en limitant les efforts de développement, fabrication et maintenance. Les familles de produit sont basées sur la technique de réutilisation.

2.5.1.1 Arbres de classification

O'Donnel *et al.* [82] proposent une méthodologie *a posteriori* qui vise principalement à ranger la production existante, dans une petite entreprise, de manière à concevoir un produit nouveau à partir des composants standards utilisés dans les autres produits. Il s'agit de lier deux modèles pour représenter une famille de produit générique en croisant un modèle d'arbre de classification de famille de produit (PFCT : Product Family Classification Tree) : arbre « *a kind of* » avec une nomenclature (PBS : Product Breakdown Structure) : arbre « *a part of* ».

Une méthodologie de structuration de produit permet d'aider les concepteurs à gérer le processus de définition de configuration d'un nouveau produit. Le processus de configuration doit être itératif et doit permettre un changement de décision. De plus,

l'information du produit doit être gérable c'est-à-dire les composants, relations et autres données produites doivent être organisés de manière à permettre un accès et une manipulation facile. Enfin, la configuration des solutions doit être uniforme, c'est-à-dire que le travail de gestion de configuration est de maintenir cette uniformité entre les décisions et les éléments sélectionnés.

Modélisation des connaissances sur la structure produit :

Le but principal est de produire une nomenclature pour un nouveau produit qui soit une combinaison d'éléments sélectionnés parmi une série de décisions de conception. Les éléments d'une nomenclature peuvent être spécifiques ou abstraits. Les éléments abstraits peuvent être spécifiés plus tard par un module ou un sous-système une fois qu'il sera prêt à être spécifié.

Arbres de classification de famille de produit :

Une étendue de produits peut être rangée dans un arbre de classification de famille de produit (Cf figure 2.14).

- Chaque noeud de l'arbre représente un produit ou une classe de modules avec ses composants.
- Les relations entre deux classes sont de type : « *une sorte de* » (« *a kind of* »). Chaque classe d'entité a son propre PFCT. L'association d'une nomenclature abstraite avec un noeud du PFCT distingue ce type d'arbre des autres familles d'arbres.

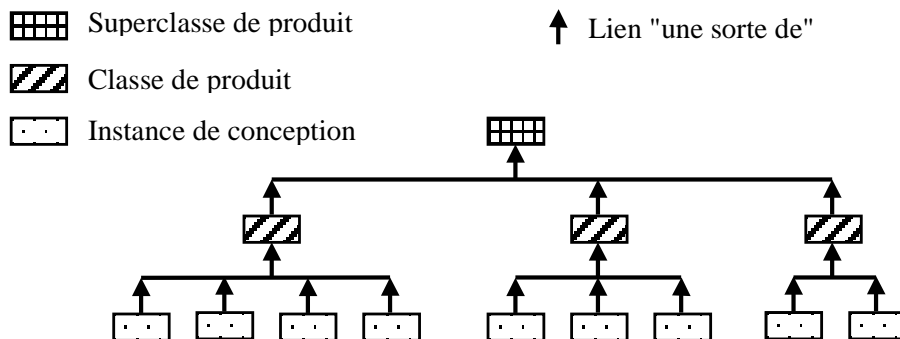


FIG. 2.14 – *Product Family Classification Tree (PFCT).*

Deux types de contraintes de conception peuvent être représentées :

- L'une représente les dépendances le long du PFCT.
- L'autre représente un ensemble de limitation des combinaisons possibles pour les sous systèmes, composants, éléments.

Exemple de dépendance logique entre les arbres des familles Heater et Motor :

*IF Direct Heater or Indirect Heater is chosen.
THEN Small Motor will be chosen for its Motors part.*

On peut utiliser les relations AND, OR et NOT pour réduire l'ensemble des possibles.

Le PBS représente une liste d'éléments dans une structure hiérarchique (figure 2.15). Il faut noter la différence de signification des liens « *a part of* » et « *a kind of* ». Tous les attributs, caractéristiques et propriétés des éléments sélectionnés sont enregistrés dans la liste des éléments. Le PBS est représenté par un arbre hiérarchique « *ET* ».

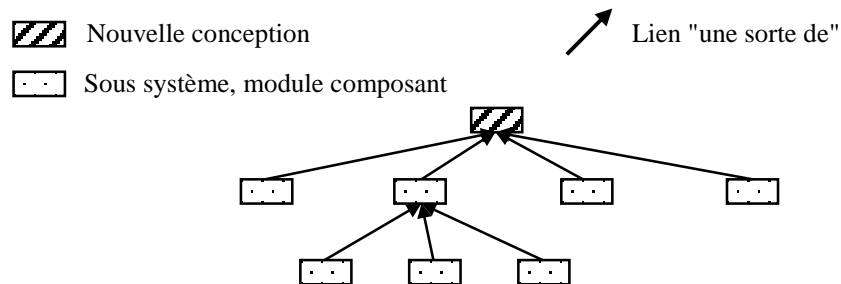


FIG. 2.15 – *Product Breakdown Structure (PBS)*.

Méthodologie de description :

Le but est de fournir un modèle de représentation de structure de produits variés pour un produit existant. La méthodologie se compose de quatre étapes :

1. Créer le PFCT : Regrouper les produits en catégories, le PFCT représente l'étendue et la variété des produits.
2. Réaliser le PBS : Le but est d'analyser la structure de chaque produit.
3. Comparer les PBS : Identifier la variété, approche modulaire, matrice de comparaison.
4. Créer un modèle produit générique.

2.5.1.2 Langage de programmation

Olsen *et al.* [83] proposent une procédure orientée nomenclature de produit générique. L'approche conventionnelle est de représenter une nomenclature pour chaque variante de produit, ce qui est impossible quand le nombre de variantes devient trop important. Il est préférable de décrire et de maintenir une seule structure, générique, qui contient toutes les variantes d'un produit. Cette structure pourra alors être utilisée pour générer la nomenclature de chaque variante particulière.

Leur proposition est une structure générique basée sur une notation de langage de programmation. Ceci permet de décrire l'ensemble des variantes possibles pour un produit par manipulation des relations structurelles et fonctionnelles entre les composants. L'utilisateur peut construire n'importe quelle variante de produit. Les spécifications sont données dynamiquement pendant que la nomenclature générique est exécutée.

<pre> Component §200 is – Name(«stool»); End component; Body §200 is – Include §400; – Include §500; End body; Component §400 is – Name(«seat»); – Seatcolor(red blue white); – Texture(wool vinyl leather); End component; </pre>	<p style="text-align: center;"><u>contraindre un élément</u></p> <pre> Body §200 is – Include §400; – Constrain §400 with – – color(red); – End constrain; – Include §500; End body; </pre>
--	---

TAB. 2.4 – Exemple de modélisation générique.

Un exemple de modélisation est donné dans la table 2.4.

Cette modélisation signifie que le composant §200 est une chaise (« stool »), qu'il est constitué des composants §400 et §500. Le composant §400 est l'assise du siège (« seat »), il peut être rouge, bleu ou blanc et est constitué de laine, de vinyl ou de cuir. Le langage permet de contraindre un élément, dans l'exemple le composant §400 est contraint à « rouge ».

Le modèle est bien sûr plus complet et intègre des branchements conditionnels (**Case §200 is ... End case;**), le versionnement (**Component §400 is ... versionNumber(1|2|3|4); ... End component;**), il est aussi possible de définir des valeurs par défaut, ...

2.5.2 Modèles de configurations

Tiihonen *et al.* [99] ont réalisé une analyse à partir de 10 cas industriels qui montre que les industriels sont sensibilisés au problème de configuration de produit. Ils notent que les entreprises manquent de méthodes et d'outils pour représenter les modèles. Les nomenclatures génériques et structures équivalentes ne sont pas utilisées.

Certaines entreprises ont testé les configurateurs de produit, mais ne les utilisent pas quotidiennement. Elles souhaitent un outil pour les aider mais pas quelque chose de totalement automatique qu'elles ne maîtrisent pas.

A travers un ensemble de travaux [77, 78, 79, 84, 98, 99], le Product Data Management Group (T. Männistö, R. Sulonen, H. Peltonen, J. Tiihonen, T. Soinen, T. Lehtonen et A. Pulkkinen), propose une structure de produit générique (SPG) à laquelle s'ajoute un modèle de configuration. Leur SPG représente l'ensemble des alternatives, elle se compose d'un modèle explicite et d'un modèle implicite :

- Le modèle explicite contient les composants, la hiérarchie, les options et variantes,

- Le modèle implicite contient les connaissances sur les compatibilités entre les composants et les contraintes.

A ce modèle, s'ajoute un modèle de configuration qui contient les exigences des clients (mapping des spécifications techniques exprimées dans un langage compréhensible dans le process de configuration). Ils définissent un processus de configuration (figure 2.16) qui à partir de la SPG et des exigences client fournit une structure de produit spécifique.

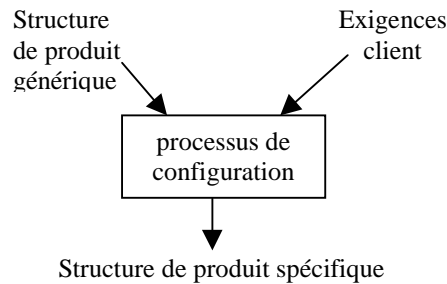


FIG. 2.16 – *Processus de configuration.*

Pour représenter un produit configurable, une nomenclature de produit ordinaire est étendue par des parties optionnelles et alternatives ainsi que par des composants paramétrables.

Un produit configurable est une famille de produits, il s'agit pour eux d'un ensemble de produits appelés les variantes d'un produit configurable. Chaque variante est construite individuellement pour chaque consommateur.

Le processus de configuration est une évolution du modèle de configuration (produit générique) vers une configuration spécifique (produit spécifique) qui représente une seule variante à travers les choix du consommateur parmi l'ensemble des configurations valides du modèle de configuration (figure 2.17).

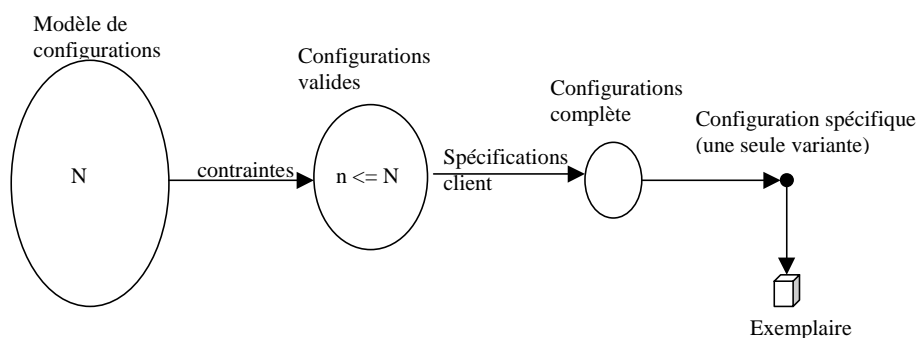


FIG. 2.17 – *Evolution du modèle de configuration.*

Le modèle de configuration décrit l'ensemble des variantes possibles et décrit comment créer une variante appropriée à une spécification du consommateur. Il se compose d'une structure explicite à laquelle s'ajoutent des contraintes.

Trois niveaux de configurations sont définis [84, 98] :

- « *configuration solution knowledge* » décrit une configuration. Deux sous cas sont possibles :
 - la configuration est incomplète, elle décrit alors un ensemble de produits individuels possibles,
 - la configuration est spécifique et décrit une variante unique.
- « *configuration model knowledge* » décrit l'ensemble des configurations correctes,
- « *requirement knowledge* » décrit les besoins de la configuration à construire.

Un exemplaire est une description individuelle, correspondant à un unique exemplaire physique et contenant des informations supplémentaires nécessaires et créées pendant le processus de fabrication. C'est à ce niveau que se situe la reconfiguration. Il y a reconfiguration lorsque les composants évoluent indépendamment des produits dans lesquels ils interviennent.

2.6 STEP

La norme STEP⁴ est une norme internationale de l'ISO⁵ référencée ISO 10303 [1] et subdivisée en sous-parties. Elle est développée au sein du groupe ISO/TC184/SC4⁶. Le but est la construction d'un standard permettant de traiter la représentation et l'échange de modèles de produits en couvrant tout leur cycle de vie.

La norme STEP s'appuie sur un modèle en trois couches représenté figure 2.18 :

- le modèle *utilisateur* décrit ce que voit l'utilisateur,
- le modèle *informatique* représente la structure de données,
- le modèle *physique* est la base de données.

L'origine de cette normalisation vient d'un besoin industriel d'échange de données entre les différentes applications informatiques intervenant tout au long du cycle de vie du produit, ainsi que dans un but d'archivage à long terme [11, 21].

Partant de ces objectifs, nous nous sommes intéressés à la manière dont STEP permet de modéliser des structures de produits génériques. Pour cela nous avons considéré deux protocoles d'application (AP 203 et AP 214) applicables aux produits mécaniques. Les protocoles d'application préconisent un emploi pour la norme dans un contexte particulier, ils définissent des méthodes d'implémentation pour l'échange et la manipulation des informations.

4. STEP : STandarts for Exange of Product model data.

5. ISO : International Organization for Standardization.

6. <http://www.nist.gov/sc4/>

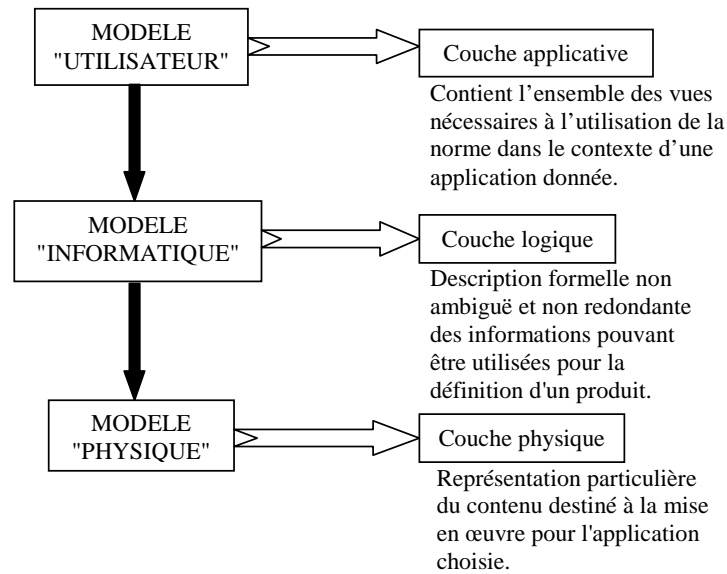


FIG. 2.18 – Modèle en trois couches de STEP.

2.6.1 STEP - AP 203

Le protocole d'application 203 [3] se focalise sur le domaine de la conception 3D d'ensembles mécaniques avec gestion de configuration. Il a pour objectif de couvrir les données associées à un produit lors de sa phase de conception, ceci concerne les données de type géométrique mais aussi la définition et le contrôle de la configuration de ces produits.

La norme considère les trois critères d'abstraction suivants (chacun pouvant être appliqué de manière récursive) :

- la *classification* qui consiste à regrouper les objets en fonction de leurs propriétés. Des classes sont ainsi fabriquées, dont on essaie d'obtenir qu'elles soient, pour un même niveau, exclusives, exhaustives et homogènes de manière à éviter les ambiguïtés d'appartenance. Cette notion conduit souvent à des *hiérarchies*.
- la *décomposition* qui consiste à relier un objet à ses composantes ou parties élémentaires. Inversement *l'agrégation* consiste à recomposer des éléments simples pour obtenir un objet plus complexe. Appliquée récursivement, la décomposition revient à *affiner* un élément par *approches successives*.
- la *généralisation* qui consiste à relier les objets semblables à un autre objet plus général de niveau plus élevé. Elle revient à élargir le champ du modèle, le but étant de minimiser les informations à stocker, les propriétés associées au type d'objet le plus général étant alors héritées par les types plus spécialisés. Inversement la *catégorisation* a pour but de séparer les objets en différents groupes selon certains critères.

La description des structures de données couvre deux types de données :

- les pièces (les données géométriques, créées par un outil de CFAO),
- les assemblages (les données de structuration de produit et de gestion de configuration).

Elle permet la structuration par domaine et par technologie (« vues »), le modèle proposé gère :

- les nomenclatures avec options et variantes,
- les versions,
- la traçabilité (diffusions, modifications, validités),
- le workflow (approbations, spécifications des clients, certifications, confidentialité, ...).

Männistö *et al.* [76] étudient la modélisation STEP afin de modéliser des structures de produits génériques. Ces méthodes sont importantes pour de nombreux produits complexes, parmi lesquels les produits configurables sont un exemple. Ils notent deux types de liens qui permettent de décrire des produits non complètement instanciés. Le lien « *est une sorte de* » permet la classification et donc le partage d'information à travers l'héritage. Le lien « *est un composant de* » quant à lui permet de décrire les assemblages.

Une structure de produit explicite qui s'appuie sur les deux types de liens énoncés et supporte les éléments optionnels « *optional part* » et les variantes « *alternative part* » est complétée par une structure de produit implicite qui donne les conditions supplémentaires qui doivent être respectées par un produit valide. Par exemple la structure de produit implicite peut interdire la combinaison de certaines options. Cette condition peut être exprimée par une règle EXPRESS⁷ comme celle ci :

```
NOT('option 1' IN 'types of components(SELF)' AND 'option 2' IN 'types of components(SELF)')
```

qui signifiera que le produit considéré ('*types of components(SELF)*') ne pourra contenir à la fois *option 1* et *option 2*.

Un exemple de modélisation explicite est montré figure 2.19.

2.6.2 STEP - AP 214

Le protocole d'application 214 [4] est un protocole d'application pour l'automobile destiné à décrire l'ensemble des données techniques générées lors de l'étude d'un véhicule et de ses composants, pièces et outils de fabrication, et plus largement les produits à forte diversité fabriqués en grande série.

Dans le cas de l'industrie automobile, la combinatoire des options et variantes pour un produit devient trop importante pour permettre la représentation de toutes les

7. Le langage EXPRESS est une norme (ISO 10303-11 [2]) de représentation formelle de données.

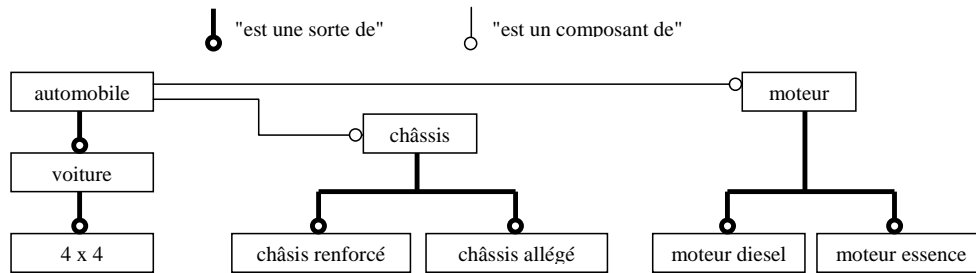


FIG. 2.19 – Modélisation de produits génériques avec STEP - AP 203.

nomenclatures explicites. Dans Chambole [22] la gestion de la diversité véhicule est alors présentée à travers la nomenclature variationnelle qui permet de décrire le produit avec des spécifications structurées par catégories. Une spécification peut être utilisée par plusieurs produits. Une pièce pouvant être composée d'autres pièces, il est alors possible de les structurer au moyen d'une structure explicite d'assemblage. Les produits sont caractérisés par des attributs de conception, gestion, personnalisation, descriptifs à l'aide de l'entité '*specification*'. Ces caractéristiques sont regroupées par classes ('*category*'). Par exemple, vitre électrique a pour classe VE et pour attributs 00 pour les véhicules dépourvus de vitre électrique et 01 pour ceux qui en ont.

Ainsi un produit se compose de quelques attributs de base. Ceci permet d'obtenir un titre étendu du produit sur lequel reposeront les nomenclatures des produits. Il est alors possible de définir des règles d'utilisation de ces classes/attributs. Par exemple une règle peut être :

Si Pack électrique alors Vitre électrique et Fermeture centralisée,

qui se traduit par :

SI PA01 ALORS (VE01 ET FC01)

Des attributs supplémentaires permettent de spécifier d'autres natures de contraintes au niveau de la nomenclature :

- l'attribut *mandatory* permet de spécifier si l'utilisation d'une classe est obligatoire (*TRUE*) ou optionnelle (*FALSE*),
- l'attribut *association type* permet de préciser si l'attribut d'un véhicule est monté en standard et peut être remplacé (*replaceable standard*), monté en standard et ne peut pas être remplacé (*non replaceable standard*), disponible (*availability*) ou optionnel (*option*),
- l'attribut *implicit exclusive condition* a pour rôle d'autoriser (*FALSE*) ou non (*TRUE*) le choix de plusieurs attributs dans une classe.

Afin de faciliter l'organisation et la structuration des informations et pièces d'un véhicule, deux découpages sont proposés :

- le découpage dit organique (*'product component'*) qui est une vue structurelle du véhicule. Il s'agit d'une structure hiérarchique dont les noeuds sont des organes tels qu'une boîte de vitesse.
- le découpage dit fonctionnel (*'product function'*) qui est une vue fonctionnelle du véhicule. Il s'agit aussi d'une structure hiérarchique mais les noeuds sont ici des fonctions telles que le freinage.

La diversité des solutions peut être structurée à l'aide de *'alternative solution'* qui peut être de différents types (Cf figure 2.20) :

- les solutions techniques (*'technical solution'*) permettent l'identification de techniques différentes remplissant un même besoin fonctionnel,
- les solutions fournisseur (*'supplier solution'*) identifient les solutions par fournisseur (ex : projecteur VALEO),
- les solutions dites finales (*'final solution'*) permettent d'identifier les solutions de bases auxquelles des caractéristiques *'sensitives'* ont été ajoutées (des pièces colorées par exemple).

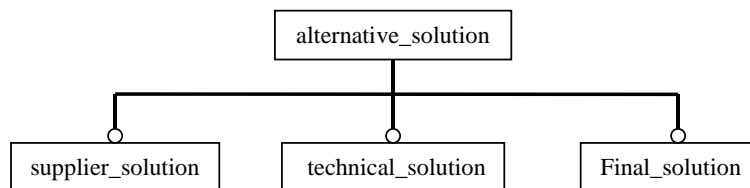


FIG. 2.20 – *Différents types de solutions*

2.7 Synthèse

A travers cette étude bibliographique concernant la représentation des familles de produits, nous n'avons pas cherché à être exhaustifs dans les différents modèles présentés. Notre but était de montrer l'étendue des différentes représentations. Cette recherche en largeur permettra au lecteur de sélectionner un modèle général apte à représenter le problème qui le concerne.

Cependant à travers l'analyse de la littérature présentée, certains points particuliers méritent d'être mis en relief. Tout d'abord notons les principaux points de consensus :

1. Structuration : Dans les différents travaux présentés, il est apparu que la structuration des données est mieux gérée par les liens. Les liens étant porteurs d'une sémantique plus ou moins complexe.

2. Sémantique associée aux liens : Quels que soient les travaux sur la structuration des données présentés ici, les liens sont toujours porteurs d'une sémantique, c'est au niveau de cette sémantique que repose toute l'information de structuration. Il faut noter les exemples de sémantique suivants : « *a part of* », « *a kind of* », « *OR* », *composition*, *spécialisation* et *appartenance* qui sont apparus assez souvent et à travers différents travaux. Certaines modélisations proposent de faire porter aux liens les informations nécessaires à la traçabilité des évolutions, la norme STEP [1, 2, 3, 4] en est le meilleur exemple et le plus complet.
3. Familles de produit : De manière à modéliser les produits à forte diversité, les différents travaux ont proposé de regrouper les produits en fonction de leurs points communs, qui peuvent apparaître dans plusieurs vues et dépendre de critères assez différents. Après cette étape de comparaison, les produits sont rangés dans des « familles » qui permettent de partager certaines caractéristiques. Principalement deux méthodes de représentations des familles ont été utilisées, les arbres « OU » qui proposent une architecture de type explicite, et une modélisation de type Objet en s'appuyant sur le concept d'héritage. Une famille de produit identifie les points communs et les différences entre les produits individuels qui forment une gamme de produits. Le concept de familles de produit permet donc de :
 - représenter une grande variété de produits à partir d'un ensemble restreint d'éléments,
 - limiter les coûts de développement et fabrication par réutilisation d'éléments communs à tout un ensemble de produit.

Enfin vis à vis du problème auquel nous nous sommes attachés, l'état de l'art montre qu'une modélisation de type famille de produit est la mieux adaptée à la représentation des variantes de produits.

Dans la modélisation des familles de produit, il faudra s'intéresser à savoir quelle est la dynamique de versionnement des liens et constituants et comment elle se propage dans les différentes nomenclatures de produits. Männistö [79] présente clairement cette problématique et catégorise différents types de versionnement selon l'étendue de la propagation du versionnement, mais il ne résout pas le problème.

Les process ne sont pas représentés, il serait intéressant d'enrichir la représentation du produit par les séquences d'assemblage.

2.8 Conclusion

Dans ce second chapitre, nous avons abordés les travaux existants qui traitent de la représentation des familles de produits.

Nous avons tout d'abord présenté le problème de modélisation de la diversité. Ensuite nous avons considéré la structuration des données techniques en contexte de diversité à travers la codification et la classification des objets techniques.

Nous avons pointé sur les liens qui supportent un ensemble de sémantiques permettant de représenter des familles de produits en gérant différentes natures de contraintes comme les incompatibilités de composants par exemple.

Puis les grandes lignes des modèles génériques de familles de produits et des modèles de configuration ont été présentées à travers des travaux représentatifs.

Un intérêt particulier a été accordé à la norme STEP pour représenter les familles de produits. Enfin une synthèse a fait ressortir les points importants.

Chapitre 3

Réalisation des familles de Produit

3.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les méthodologies et outils disponibles dans la littérature pour la réalisation des familles de produit.

Ce chapitre est divisé en deux sections. La première section (3.2) pointe sur la conception des familles de produits, elle s'appuie sur les travaux qui nous ont semblé les plus représentatifs du domaine. Le lecteur y trouvera des méthodologies de conception, un ensemble d'indicateurs pour évaluer les familles de produits dont un indicateur pour l'évaluation des coûts indirects de la variété et des méthodologies de fabrication.

Après une brève description et une catégorisation de la différenciation retardée, la section 3.3 montrera les outils disponibles pour mettre en oeuvre cette différenciation retardée.

3.2 Conception des familles de produits

3.2.1 Méthodologies de conception

La littérature propose un ensemble de travaux pour développer une architecture de familles de produits qui rationalise le développement de produits pour la customisation de masse. L'idée de base est de passer de la conception d'un produit unique à la conception d'une famille de produits, en utilisant une architecture générique qui permette d'obtenir une famille de produits robuste¹.

Le postulat de ces travaux est qu'une architecture de produit :

- créé un environnement stable où chaque composant peut être développé en parallèle avec des risques managés,
- permet de remplacer un composant par un autre composant ayant une interface identique, dans le but de satisfaire les besoins des consommateurs. Certains

1. Dans le sens d'être capable de satisfaire une large variété de besoins sans modifier ses propres caractéristiques.

composants n'ont pas de variantes et sont alors communs pour la famille de produit, ces composants sont un facteur relativement stable dans la conception,

- est généralement plus stable que les composants qui la composent. Ceci peut être utilisé pour créer une nouvelle version d'un produit en remplaçant des composants par une version plus récente.

La majorité des travaux repose sur une séparation des aspects stables et variables de la conception pour assurer la robustesse de la famille de produits. Néanmoins les travaux divergent quelque peu sur la façon de traiter cette séparation.

Pour Erens et Verhulst [31] comme pour Jiao et Tseng [53] la méthodologie proposée s'appuie sur le couplage entre les domaines fonctionnel et technique. Les auteurs considèrent aussi un domaine physique qui correspond à la réalisation physique des différents composants, mais la structure de famille de produits ne se base pas sur ce domaine.

Erens et Verhulst [31] représentent le couplage entre fonctions et modules techniques à l'aide du lien fonction/module technique (figure 3.1). Les différentes cardinalités de ce lien données dans le tableau 3.1 permettent de représenter l'ensemble des cas possibles.

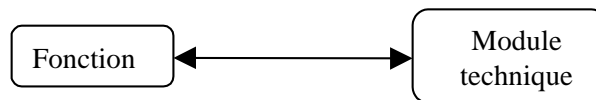


FIG. 3.1 – *Lien fonction/module technique.*

cardinalités	description	définition
1 : 1	1 fonction est affectée à 1 module technique	conception modulaire
1 : N	1 fonction est réalisée par N modules techniques	conception intégrée avec distribution d'une fonction sur plusieurs modules
N : 1	N fonctions sont réalisées par 1 module technique	conception intégrée avec partage des fonctions
N : M	fonctions distribuées et partagées	intégration

TAB. 3.1 – *Cardinalités du lien fonction/module technique.*

Les cardinalités 1:1 représentent une conception stable et optimisée.

En ce qui concerne N:1, un grand nombre de fonctions sont réalisées par un petit nombre de modules, les coûts initiaux pour une conception multi-fonctionnelle sont supérieurs aux coûts d'une conception modulaire, mais les coûts opérationnels (fabrications, utilisation) sont relativement faibles.

Dans les cas 1:N et N:M, il y a ambiguïté sur la part de la fonction réalisée par chaque module technologique, il est alors préférable de transformer ces conceptions

de manière à se ramener à des cardinalités en 1:1 ou N:1 dans des niveaux plus faibles de la hiérarchie du produit

La variété d'un produit dépend de la variété de ses composants. Une famille de produit est caractérisée par des relations 1:1 et N:1 entre domaines, la diversité dans une famille de produit est plus petite dans les domaines technologiques et physiques (ce qui satisfait le fabricant) que dans le domaine fonctionnel (ce qui satisfait le client). Au contraire les relations de type 1:N et N:M disqualifient de famille de produits, la distribution d'une fonction sur différents modules techniques implique que les modules techniques peuvent seulement être choisis ensemble avec d'autres modules techniques.

Baucoup de produits ne respectent pas strictement la définition de famille de produits, les variantes n'ont pas une interface identique dans les trois domaines. Cependant une large variété de produits peut être réalisée à partir d'un nombre limité de composants. Certains composants ne peuvent pas être combinés pour créer de nouvelles variantes de produit. Ce cas se présente lorsqu'une fonction variable est distribuée sur différents composants.

Pour Erens et Verhulst [31], l'aspect stable est pris en compte pour augmenter le ratio performance/coût, l'aspect variable pour augmenter le ratio variété/coût. Pour Jiao et Tseng [53], la variété fonctionnelle plus rattachée à la satisfaction du consommateur, doit être encouragée dans le développement du produit, alors que la variété technique mêlée à la fabrication et aux coûts doit être réduite.

A travers un ensemble de travaux [39, 41, 102, 103, 104], l'Engineering Design Research Laboratory (K. Otto, J.P. Gonzalez-Zugasti, E. Zamirowski, J.S. Yu et J. Baker) a cherché à réaliser une structure de famille de produits à partir de l'analyse des besoins. Ils déduisent de l'analyse des besoins des clients une liste d'exigences pour le produit à réaliser.

Afin de connaître les besoins des clients (ou d'un groupe de clients ciblés), il est demandé plusieurs fois dans le temps à ces clients cibles de définir les valeurs qu'ils souhaiteraient sur des caractéristiques particulières de produits donnés (Cf figure 3.2).

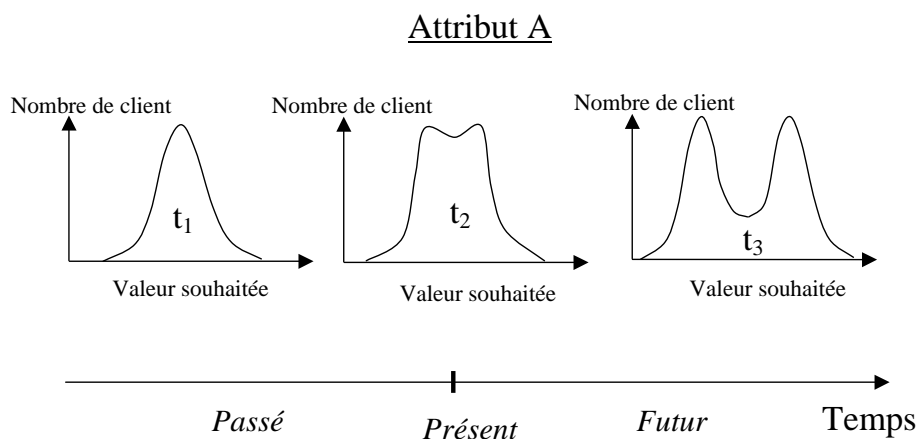


FIG. 3.2 – Analyse des besoins des clients

A partir de ces données, deux distributions sont constituées :

- la première, $\sigma_a(i)$ représente l'étendue des valeurs des attributs pour chaque caractéristique i à un instant t_i donné,
- la seconde $\sigma_t(i)$ considère l'évolution des attributs en fonction du temps (t_1, t_2, t_3) pour chaque caractéristique i .

L'architecture de famille de produit doit permettre de suivre ces deux variations (diversité des besoins des clients et variation dans le temps), des règles de conception sont alors définies :

- si les deux distributions sont étroites ($\sigma_a(i)$ et $\sigma_t(i)$ faibles) réaliser un produit unique,
- si la distribution est large mais constante dans le temps ($\sigma_a(i)$ grand et $\sigma_t(i)$ faible) concevoir des familles de produits avec variantes (les variantes intègrent $\sigma_a(i)$),
- si la distribution de la population change dans le temps ($\sigma_t(i)$ grand), isoler la caractéristique évolutive et faire correspondre un module qui suivra cette évolution dans le temps.

Suite à cela Zamirovski et Otto [103] ainsi que Dahmus *et al.* [25, 26] proposent une méthodologie pour développer une structure de famille de produits à partir des besoins du consommateur et des fonctions du produit sur ces indices :

1. analyse des besoins des consommateurs et des usages des produits au niveau des fonctions à réaliser,
2. compilation des différentes fonctions du produit dans toutes les utilisations dans une structure de fonction commune,
3. regroupement des fonctions stables,
4. regroupement des fonctions qui varient.

Les points 3 et 4 isolent la variété, ceci permettant de définir de nouvelles règles de conception :

- pour les caractéristiques qui varient prévoir une conception modulaire, ou alors des solutions technologiques robustes,
- pour les caractéristiques qui ne varient pas développer une plate-forme commune et intégrer au maximum les fonctions.

Gonzalez-Zugasti *et al.* [40, 42] proposent une méthodologie pour concevoir une plate-forme de produits et les variantes qui en dérivent en prenant en considération à la fois les performances techniques individuelles souhaitées et le coût global de la famille de produit, une application à la conception d'une familles de satellites est présentée.

Il s'agit d'un problème d'optimisation où les avantages liés à la conception d'une plate-forme commune doivent équilibrer les contraintes de chaque variante individuelle et les contraintes de la famille de produits dans son ensemble.

La méthodologie schématisée figure 3.3 est basée sur un modèle de négociation qui se déroule en quatre étapes [42] :

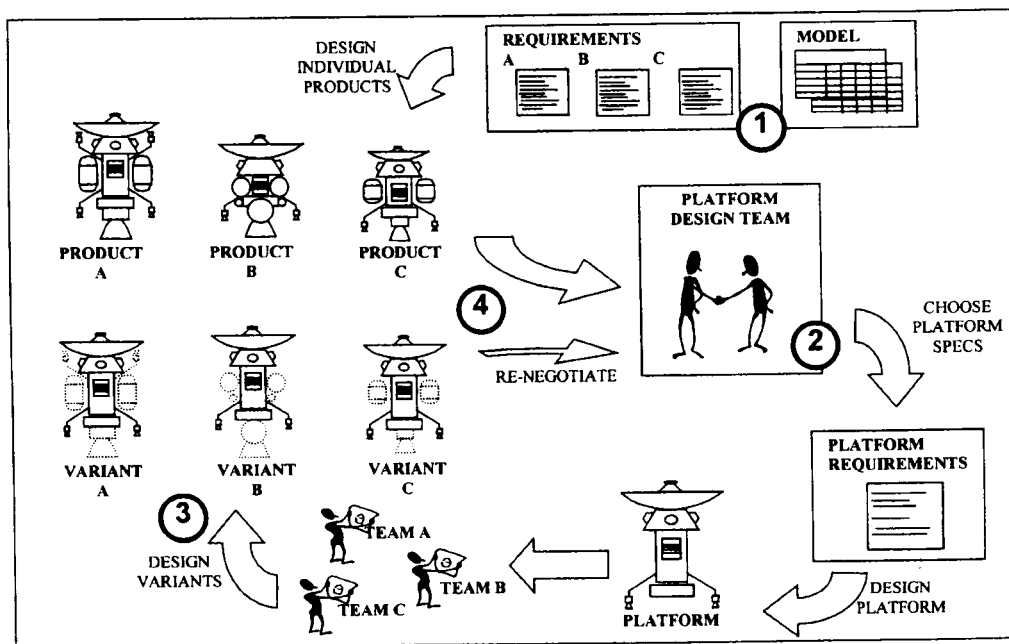


FIG. 3.3 – Méthodologie de négociation.

1. Les besoins et contraintes de chaque variante de produits (A, B et C) sont définis indépendamment les uns des autres. Ces contraintes contiennent entre autres les performances souhaitées, les coûts des modèles, ...
2. A partir des besoins semblables, une plate-forme commune est définie qui essaye de satisfaire au mieux chaque variante,
3. Autour de la plate-forme définie, les équipes A, B et C conçoivent leurs variantes respectives,
4. Si la plate-forme n'est pas acceptable pour une des variantes, il y a renégociation de la plate-forme et rebouclage sur les variantes une nouvelle fois.

Martin et Ishii [71, 72] proposent une méthodologie pour développer une architecture de famille de produits robuste dans le but de réduire les efforts de conception et de diminuer le temps de mise sur le marché des différentes variantes.

Leur méthodologie s'appuie sur deux indices qui mesurent l'effort de reconception nécessaire pour adapter un composant aux différentes variantes (GVI: Generational

Variety Index) et le couplage entre les composants (CI: Coupling Index). Ces indices permettent de distinguer les raisons externes des modifications (GVI) et leur propagation dans le produit (CI), raisons internes à la conception.

A partir de là, comme dans les travaux précédents, les aspect stables et variables sont séparés en évaluant les deux indicateurs GVI et CI. CI est découpé en CI-R et CI-S selon qu'il subit (R: Receiving) ou cause (S: Supplying) la reconception. Les composants avec d'importants GVI, CI-R ou CI-S doivent être reconcus pour diminuer la note, tous les composants avec une note proche de zero sont des éléments stables sur lesquels reposera la structure de la famille de produits.

Nous ne présentons pas ici l'évaluation des notes GVI et CI des composants, le lecteur pourra se reporter à [71] ou [72] selon le niveau de détail souhaité.

3.2.2 Indicateurs des coûts indirects d'introduction de la variété

Le Manufacturing Modeling Laboratory (Stanford University) a proposé un outil destiné aux managers de produits pour les aider à évaluer les coûts indirects d'introduction de la variété dans une ligne de produits.

Le modèle distingue :

- Les décisions stratégiques de diversité qui concernent le nombre et l'étendue de la variété offerte aux clients, en répondant à la question : quels types de produits offrir ? Il s'agit ici de ce qui est visible par le client.
- Les décisions tactiques de diversité qui s'attachent aux aspects non visibles par le client. Ces décisions portent sur les choix dans l'utilisation de produits ou process communs sur différents produits. Leur travail adresse ce type de décisions.

Le modèle n'adresse pas les coûts directs (investissements matériels et humains, heures de conception nécessaires pour la mise au point de la nouvelle variante, achats de matériaux, certifications, tests, ajout d'un fournisseur, ...) évaluables par des méthodes classiques telles que Activity Based Costing [66].

Le modèle initial [52] offre une première mesure qui s'appuie sur deux valeurs X et Y . X est un indicateur de l'importance pour le consommateur ($X \in [0, 1]$), Y est un indicateur des coûts indirects de la diversité ($Y \in [0, 1]$), il s'appuie sur la mesure de trois indices : la *commonalité*², le point de différenciation et les coûts de changement. Y se calcule de la manière suivante :

$$Y = 1 - D_1 * D_2 * D_3$$

2. Commonalité : généralisation de l'utilisation d'un composant à plusieurs produits finis.

Avec :

- D_1 : représente le nombre de variantes.
 $D_1 \in [0, 1]$, D_1 diminue si le nombre de variantes augmente (figure 3.4),

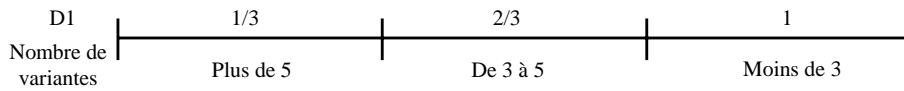


FIG. 3.4 – *Mesure de D1.*

- D_2 : mesure l'étape de fabrication au niveau de laquelle apparaît la différenciation
 $D_2 \in [0, 1]$, plus la différenciation a lieu tôt dans le process plus D_2 est faible (figure 3.5),

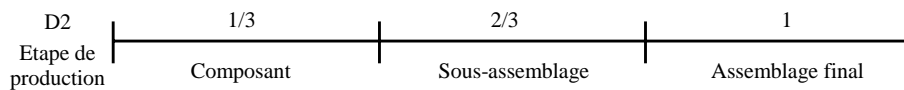


FIG. 3.5 – *Mesure de D2.*

- D_3 : mesure l'effort nécessaire pour le changement de production d'une variante à l'autre
 $D_3 \in [0, 1]$, D_3 diminue si le temps de changement augmente (figure 3.6).

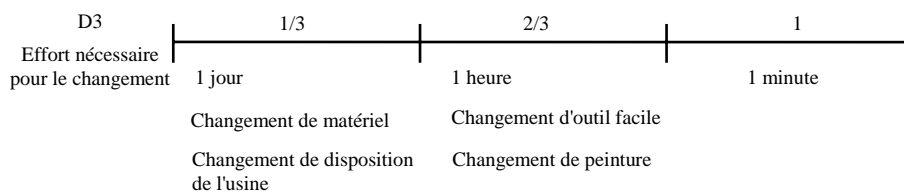


FIG. 3.6 – *Mesure de D3.*

En plaçant les points représentant chaque produit (ou sous-produit) dans le graphique 3.7, ceci permet de discriminer quelles variétés sont effectivement pertinentes ou non.

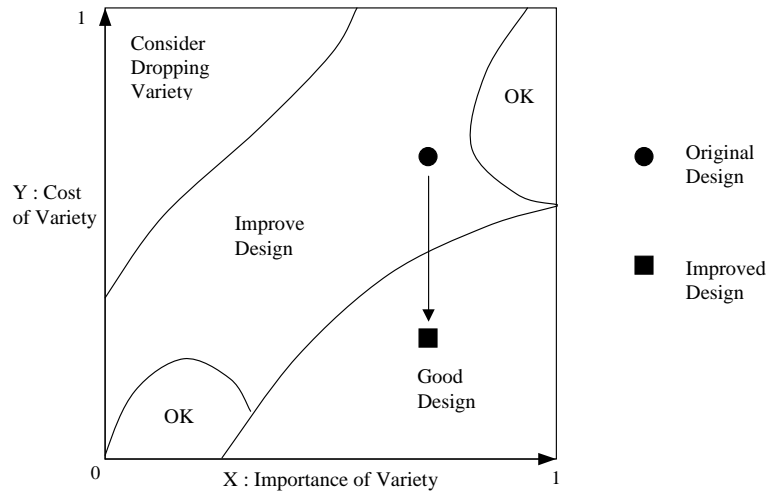


FIG. 3.7 – Diagramme coût-importance.

Ce modèle a ensuite été amélioré dans [69] par la définition de nouveaux indices CI , DI et SI et complété dans [70]:

- CI est un indicateur de commonalité (de même nature que D_1)

$$CI = \frac{u}{\sum_{j=1}^{v_n} P_j}$$

Avec :

- u : nombre de pièces uniques,
- P_j : nombre de pièces dans le modèle j ,
- v_n : nombre de produits finaux différents,
- $CI \in [0, 1]$, CI diminue si la standardisation augmente.

- DI est un indicateur de différenciation retardée (de même nature que D_2)

$$DI = \frac{\sum_{i=1}^n d_i \cdot v_i \cdot a_i}{n \cdot d_1 \cdot v_n \cdot \sum_{i=1}^n a_i}$$

Avec :

- n : nombre de process,
- v_i et v_n permettent de prendre en compte les coûts de stockage,
 - v_i : nombre de pièces différentes au process i ,
 - v_n : nombre de produits finaux différents,

- d_i et d_1 : prise en compte de la position de la différenciation dans l'ensemble du process,
 - d_i : temps moyen entre le process i et la sortie du produit final,
 - d_1 : temps moyen de traversée de l'ensemble du process,
 - a_i : valeur ajoutée au process i , permet de prendre en compte la valeur ajoutée à chaque process,
 - $DI \in [0, 1]$, plus DI est faible, plus la différenciation a lieu tard dans le processus.
- SI indicateur de coût de changement (de même nature que D_3)

$$SI = \frac{\sum_{i=1}^n v_i \cdot c_i}{\sum_{j=1}^{v_n} C_j}$$

Avec :

- v_i : nombre de pièces différentes au process i ,
- v_n : nombre de produits finaux différents,
- c_i : coût de changement au process i ,
- C_j : coût total du j^{eme} produit,
- $SI \in [0, 1]$, SI doit être le plus faible possible.

A partir de ces nouveaux indices, les coûts indirects provenant de la diversité sont alors donnés par :

$$\Psi = \beta_0 + \beta_1 \cdot CI + \beta_2 \cdot DI + \beta_3 \cdot SI$$

Les β_i sont à définir pour chaque cas particulier.

Ce dernier modèle a ensuite été complété par des indicateurs qualitatifs [70]. Ces indicateurs qualitatifs se présentent comme cela a déjà été vu figure 3.7 pour chacun des trois indices. Ceci a pour but de permettre une diminution sélective de chaque indice en proposant les comportements à adopter dans chaque cas.

Simpson *et al.* [89] proposent de réaliser une plateforme de produits paramétrables pour en dériver l'ensemble de la famille de produits. Ils illustrent leur application à la conception de moteurs électriques universels.

3.2.3 Gammes génériques d'assemblage

Stadzisz et Henrioud [90, 91, 92, 93] se sont intéressés à l'assemblage multi-produits, plus précisément au cas où une famille de produits doit être réalisée sur un même système d'assemblage dans le but de l'intégration des activités de conception des processus d'assemblage et de conception des familles de produits. Leur objectif était de prendre en compte la manière dont les produits seront assemblés au moment de la conception des familles de produits et des systèmes d'assemblage.

La partie qui nous a le plus intéressés vis à vis de notre problématique de maîtrise de la diversité est celle qui concerne la génération et la sélection des gammes génériques d'assemblage. Une gamme générique d'assemblage est définie comme une suite ordonnée d'opérations génériques décrivant un processus d'assemblage de l'ensemble des types de produits d'une famille donnée.

L'obtention d'une gamme générique d'assemblage passe par plusieurs étapes :

1. La première étape est la modélisation des gammes génériques d'assemblage. Pour cela, ils proposent un modèle de représentation qui utilise le formalisme des réseaux de Petri prédicat/événement. La modélisation se compose d'un modèle fonctionnel générique qui contient la description fonctionnelle (fonctions, paramètres, contraintes) et d'un modèle matériel générique.
2. A partir de la modélisation précédente, ils proposent une méthode de génération de l'ensemble des gammes d'assemblage génériques admissibles pour une famille de produits donnée. Une gamme admissible correspond à une stratégie (un ensemble ordonné d'opérations) d'assemblage dont la réalisation est faisable d'un point de vue strictement technique. Ceci leur permet d'obtenir une représentation d'un processus générique d'assemblage qu'ils nomment Réseau Générique d'Assemblage.
3. La dernière étape concerne l'évaluation des gammes d'assemblage génériques, qui permettra d'évaluer les différentes gammes génériques du réseau générique d'assemblage.

Le choix de la gamme définitive dépend de plusieurs facteurs :

- critères opératoires : maintenabilité, accessibilité, précision de positionnement
- critères logistiques : degré de parallélisme, nombre de changement d'orientation,
- besoin de flexibilité : niveau d'adaptation du processus d'assemblage rendu nécessaire par la variabilité existante à l'intérieur d'une famille. Différentes natures de flexibilité sont prises en compte, par exemple l'indice de variabilité *IV* est lié au fait que l'on s'intéresse à des familles de produits

$$IV_i(F) = \frac{2}{np \cdot (np - 1)} \sum_{j=1}^{np-1} \sum_{k=j+1}^{np} v_{jk}$$

avec :

- $IV_i(F)$ = indice de variabilité associé à la famille F selon la gamme i
- np = nombre de types de produits dans la famille F
- $v_{jk} = \frac{non-com_{jk}}{total_{jk}}$
 - $non-com_{jk}$ = nombre d'opérations non communes entre les types de produits j et k
 - $total_{jk}$ = nombre total d'opérations dans l'assemblage des types de produits j et k

Ceci pouvant servir à comparer deux alternatives de conception de familles de produits.

3.2.4 Technologies de groupe

La technologie de groupe [51] est une méthode stratégique qui mène à la standardisation et à la simplification. Elle consiste à grouper des pièces, des produits, des opérations, des procédés aux différents stades de leur élaboration : conception, production, industrialisation, montage, afin de profiter avantageusement de leurs similitudes pour les industrialiser économiquement.

Les objectifs sont de :

- réduire les coûts de création des nouvelles gammes,
- réduire le temps de chiffrage des devis,
- réduire les en-cours,
- archiver le savoir du personnel.

Le principe est le suivant :

1. Regroupement des activités similaires. Pour cela, deux étapes sont proposées :
 - inventaire de la morphologie et des dimensions des pièces
 - classement des pièces à partir de critères de forme, de dimension, de matière, de traitement, ...
2. Utilisation de gammes types (ou gammes mères) qui contient la liste ordonnée des phases. L'ordre opératoire est optimisé globalement, mais tous les degrés de complexité des pièces ne sont pas analysés dans le détail.

3.3 Outils pour la différenciation retardée

L'augmentation de la diversité des produits limite la capacité d'anticipation du producteur et engendre une demande de flexibilité qui nécessite des surcapacités de tous ordres. Si on admet que la diversité des produits au niveau du marché dépend des attentes des clients, celle-ci devient une donnée pour l'industriel, dans ce cas le domaine de contrôle de la diversité pour le producteur se situe au niveau des produits intermédiaires. Pour une diversité donnée des produits finis, il s'agit alors de concevoir ceux-ci de telle sorte que soit minimisée la variété des produits intermédiaires aux différents niveaux du processus de production (figure 3.8).

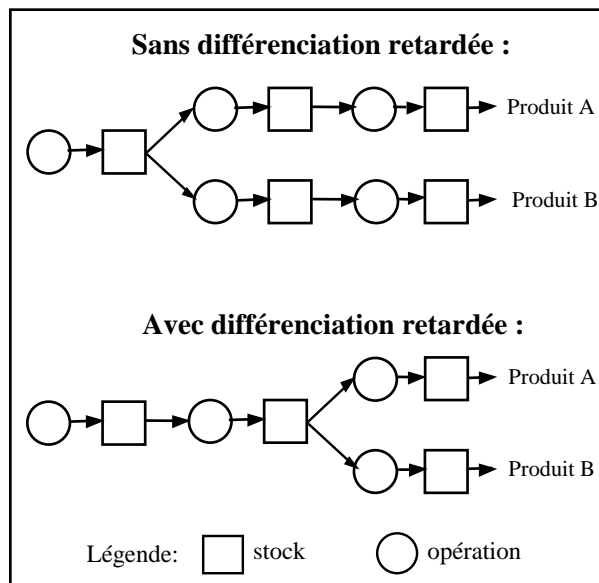


FIG. 3.8 – *Différenciation retardée.*

D'après Tarondeau [96], la réduction de la variété des produits intermédiaires diminue le coût des stockages intermédiaires et des lancements. La localisation optimale des stocks intermédiaires, c'est-à-dire le niveau optimal d'anticipation, se déplace vers l'aval du processus de production réduisant ainsi l'importance du segment avec surcapacités. De plus, cela permet d'augmenter les volumes de production sur les processus amont et donc de réaliser des économies d'échelle, de diminuer les coûts fixes et de favoriser les effets d'apprentissage. Tarondeau conclut : « la réduction de variété des produits intermédiaires permet d'augmenter la productivité du système de production en limitant les surcapacités engendrées par les besoins de flexibilité. »

Tous ces paramètres permettent d'augmenter la productivité du système industriel. Il apparaît donc comme très avantageux de repousser le plus en aval possible la différenciation de la production (on parle alors de différenciation retardée).

La différenciation retardée permet de réconcilier les objectifs de la politique produit en marketing, qui implique une forte diversité instantanée et dynamique des produits finis, et ceux des producteurs et distributeurs qui peuvent minimiser les exigences de

flexibilité que cela impose en réduisant la variété des produits aux stades intermédiaires de la production et de la distribution.

La différenciation retardée consiste donc à retarder le point de différenciation du produit ou du process (à partir duquel chaque produit acquiert sa propre identité au sein d'une gamme) dans le but d'approvisionner des produits semi-finis plutôt que des produits finis. Le but est de produire un maximum d'éléments standards et de repousser le plus longtemps possible le point où chaque produit est différent des autres et a besoin d'être identifié comme tel.

Compte tenu des nombreux impacts de la différenciation retardée sur toute la chaîne de réalisation du produit, de nombreux travaux ont proposé des outils supportant la différenciation retardée dans des contextes donnés.

De nombreux auteurs emploient le terme « postponement » comme un synonyme de la différenciation retardée [105, 63, 95]. En d'autres termes, il s'agit de postponement dans le cas où l'assemblage d'un produit n'est pas terminé avant que la commande client arrive. De ce fait la gestion des stocks est moins dépendante de la variabilité de la demande.

Contrairement à Lee [63] qui définit le type de la différenciation retardée selon l'outil qui sert à la réaliser, c'est à dire la standardisation, la conception modulaire et la restructuration du processus, Zinn [105] donne sa propre classification. Elle est résumée dans le tableau 3.2.

Différenciation d'étiquetage	L'entreprise vend un même produit sous différentes marques. Les étiquettes indiquant la marque ne sont mises que quand une commande arrive.
Différenciation de packaging	Le distributeur se charge du packaging adapté à chaque client [100].
Différenciation d'assemblage	L'assemblage du produit commence au moment où la commande client arrive.
Différenciation de fabrication	La réalisation du produit commence au moment où la commande client arrive, mais la gamme de fabrication n'est pas toujours identique.

TAB. 3.2 – *Classification de la différenciation retardée.*

L'industriel dispose de plusieurs stratégies possibles pour mettre en oeuvre cette différenciation retardée :

- personnalisation par l'utilisateur,
- différenciation perceptuelle,
- différenciation au stade de la distribution,
- standardisation,
- conception modulaire,
- restructuration des processus.

3.3.1 La personnalisation par l'utilisateur

L'utilisateur est créateur de la variété des produits par la diversité des usages qu'il en fait. De ce fait, il réduit les exigences de flexibilité du producteur qui ne peut prévoir tous les cas d'usage. L'industriel peut aller jusqu'à favoriser cette activité créatrice des utilisateurs, en fabriquant des produits facilement adaptables par les utilisateurs.

C'est la capacité d'adaptation du produit à des usages variés qui répond à la variété des besoins à satisfaire. De plus, cette capacité d'adaptation permet à l'industriel une moindre anticipation des besoins spécifiques des consommateurs, ainsi qu'une plus faible flexibilité de son système de production.

Dans ce cas, la différenciation retardée est à son maximum puisque c'est l'utilisateur même qui différencie le produit pour répondre à son propre besoin.

Pour cela :

- le produit doit présenter une bonne capacité d'adaptation : le nombre de ces états potentiels doit être élevé,
- les technologies de création de variété par l'utilisateur doivent être simples et peu coûteuses.

La première condition peut être facilement réalisée en accordant au produit une forte combinaison possible de produits élémentaires de plus faible diversité. Les meubles modulaires sont un exemple qui à l'aide d'un certain nombre d'éléments standard permettent, à moindre coût pour l'utilisateur, de réaliser un grande combinaison de montages différents.

3.3.2 La différenciation perceptuelle

La différenciation des produits se situe ici au stade de la consommation des produits, la création de variété ne porte pas sur la production ni sur la distribution des produits. Elle porte sur la perception des individus, les moyens de différenciation appartiennent donc à la politique de communication de l'entreprise (publicité, promotion, politiques de distribution et de prix, les services associés).

L'entreprise essaie de faire percevoir comme différents des produits essentiellement semblables. La variété des perceptions répond à la variété des besoins et limite, par conséquent, la variété des objets réalisés par le système industriel.

Pour cela il est tout de même nécessaire que le produit dispose d'une certaine flexibilité qui permettent la politique de différenciation des perceptions.

3.3.3 La différenciation au stade de la distribution

Le distributeur a pour rôle de faire passer les produits finis de leur état de production à celui d'acquisition ou de consommation. Pour cela il peut avoir besoin de réaliser trois types d'actions :

- déplacer le produit du lieu de fabrication au lieu de consommation,

- déconnecter les flux de production et de consommation (en utilisant des stocks intermédiaires),
- transformer les produits, dans le sens de l'adaptation aux besoins du client (le produit devient spécifique par l'adjonction de services, modification des caractéristiques du produit, personnalisation, ...).

On peut faire ressortir de cela deux rôles différents pour les distributeurs :

- tout d'abord, un rôle de déconnection de la production aux variations des besoins dans l'espace et le temps,
- puis, faire correspondre l'offre de la production au mode de consommation des utilisateurs.

En intervenant sur l'adaptation du produit aux besoins des utilisateurs, les distributeurs se font créateurs de variété. Le distributeur favorise les stratégies de différenciation retardée en impliquant l'utilisateur du produit.

3.3.4 La standardisation

D'après Tarondeau [96], la standardisation est le processus par lequel un produit interchangeable est changé en module. Elle permet de multiplier les usages d'un produit.

La standardisation a permis des gains considérables dans la productivité des entreprises et la diminution des stocks.

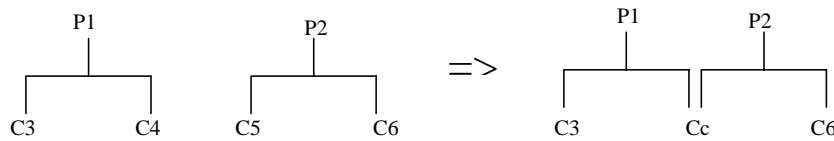
La standardisation permet par un produit unique de satisfaire plusieurs besoins. Pour cela il est souvent nécessaire de surdimensionner le produit offert. Le surcoût provoqué par le surdimensionnement est très largement compensé par les gains de productivité et de gestion induits.

La standardisation consiste donc en un problème d'optimisation économique. Il s'agit de déterminer les produits à standardiser, leurs caractéristiques et le nombre de classes de produit qui permettent de satisfaire une variété d'usage suffisamment importante.

La standardisation consiste à utiliser un composant ou un processus commun à un ensemble de produits. L'objectif est de diminuer le nombre de références à gérer et d'augmenter les quantités de chaque composant avec les conséquences de réduction de la complexité dans le système de fabrication. Cependant, cela nécessite d'augmenter les fonctionnalités de chaque composant.

Les profits d'un tel exercice dépendent de l'investissement nécessaire à la standardisation des composants et des profits résultants des économies d'échelle. Lee and Tang [63] ont développé un instrument mathématique permettant de trouver le meilleur compromis.

De même, une analyse des effets de la commonalité sur les stocks a été effectuée par Fouque [35]. Il s'est intéressé à déterminer quelle augmentation maximale Cc^* du

FIG. 3.9 – *Commonalité entre deux produits.*

coût du composant C_c est acceptable, C_c pouvant être soit une généralisation dans l'utilisation du composant C_4 ou C_5 ou soit un nouveau composant (figure 3.9).

Fouque a mis en évidence une série de situations favorables à cette augmentation :

- le niveau de service des produit P1 et P2 augmente,
- la corrélation sur la demande de P1 et P2 diminue,
- l'incertitude sur la demande des produits augmente,
- la différence des variances de P1 et P2 diminue,
- les coûts des composants C_4 et C_5 sont proches l'un de l'autre,
- la demande moyenne des produits P1 et P2 est faible.

Dans les cas cités, la mise en commun des composants permet l'agrégation du risque, l'incertitude sur la demande moyenne est alors plus faible, ce qui augmente le taux de service et permet de diminuer le niveau des stocks de sécurité. De plus la commonalité permet d'augmenter la qualité et l'utilisation des ressources (apprentissage, grande série).

Lee et Tang [63] ont illustré cela par un exemple industriel représenté figure 3.10 où deux types de cartes électroniques pour imprimantes ont été réunies en une seule.

Erol [32] propose une formulation mathématique pour la standardisation des composants de faible valeur qui se présente sous la forme d'un problème d'optimisation non linéaire en nombre entiers. Ce problème est résolu dans Dupont *et al.* [29] par une implantation d'un algorithme génétique et par une linéarisation de la fonction objectif. La standardisation a conduit à des gains considérables dans la productivité des entreprises et la diminution des stocks [28].

Kota *et al.* [57] proposent une mesure qui capture le niveau de commonalité dans une famille de produits, afin de juger de la capacité de la famille à partager des éléments et réduire le nombre total de pièces. A l'aide de cette mesure, les concepteurs peuvent comparer des alternatives de conception et garder celle qui offre la plus grande commonalité.

Thoteman et Brandeau [97] présentent une approche pour déterminer le niveau optimal de commonalité des composants dans un sous-produit qui ne différencie pas les modèles du point de vue du client. En considérant un cas d'application sur les faisceaux électriques automobiles, ils ont montré qu'une conception optimale (d'un point de vue financier) peut être obtenue en recherchant la commonalité optimale des composants.

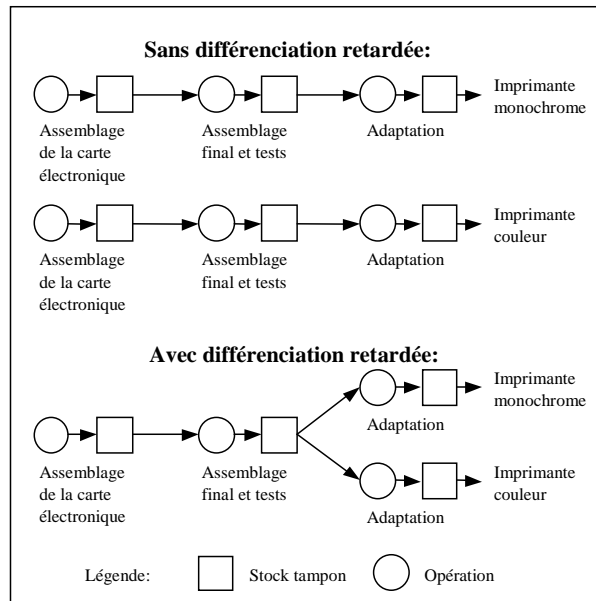


FIG. 3.10 – La standardisation des composants.

3.3.5 La conception modulaire

Lorsque la création de variété ne peut être reportée vers le consommateur ou le distributeur, le producteur s'en chargera. Pour cela, il fera appel à des éléments communs à différents produits.

Ces éléments communs à plusieurs produits (que nous appellerons modules ou composants modulaires) sont donc destinés à des emplois multiples, ils doivent satisfaire un ensemble de besoins relatifs à chacun de leur cas d'emploi. Le but est d'utiliser un minimum de composants différents pour réaliser un maximum de produits différents (figure 3.11).

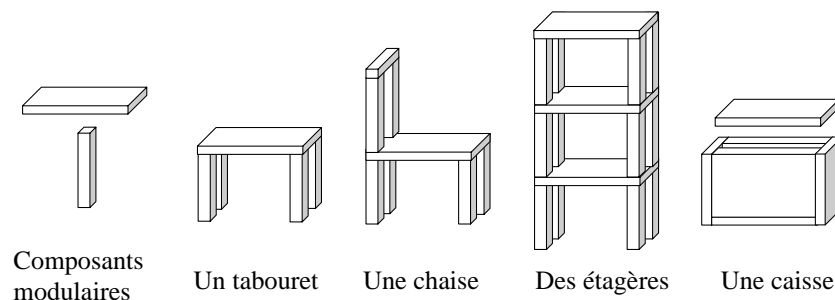


FIG. 3.11 – Emplois multiples de composants modulaire.

La conception modulaire consiste à décomposer un produit en sous-éléments plus ou moins indépendants appelés modules. Il est alors possible de réaliser les différents modules indépendamment. La différenciation des produits finis s'effectue au moment

de l'assemblage par le choix des modules utilisés et par leur position dans le produit final.

On appelle « cas d'emploi » d'un module m l'ensemble des produits dans lesquels m entre comme élément de composition. La modularité mesure le nombre de cas d'emploi.

On voit facilement qu'augmenter la modularité permet de réduire la variété des états d'un produit, et inversement une très forte combinaison de produits finis peut être obtenue avec un nombre assez faible de modules.

Kusiak et Huang [61, 49] se sont intéressés à la conception modulaire dans le but de produire une large variété de produits à moindre coût. Pour cela une représentation matricielle du produit montre les relations entre les composants utilisés dans le produit en ligne et les fonctions réalisées par ce même produit en colonnes, ensuite une approche par décomposition matricielle (figure 3.12) permet d'extraire les éléments interchangeables, standardisés et indépendants en regroupant les interactions par modules.

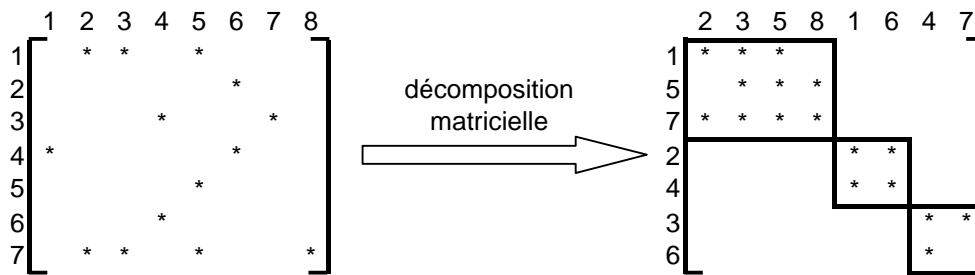


FIG. 3.12 – Décomposition matricielle.

Quatre types de modules sont alors définis :

- module de base : contient les fonctions de base, en principe non variables et fondamentales pour le produit ou le système,
- module auxiliaire : fonctions auxiliaires utilisées en conjonction avec les modules de base pour créer des produits variés,
- module adaptatif : module qui permet d'adapter une pièce ou un système à un autre produit ou système,
- non-module : contient des fonctions spécifiques au consommateur, ces modules sont conçus individuellement pour satisfaire aux besoins spécifiques des clients.

De même trois types de modularité :

- échange de composants : se rencontre lorsque deux modules alternatifs de base ou plus peuvent être assemblés avec le même module en créant différentes variantes de produits appartenant à la même famille de produit,

- partage de composants : cas complémentaire du précédent, avec différents modules assemblés au même composant de base en créant différentes variantes de produits appartenant à différentes familles de produits,
- « bus modularity » : est utilisé quand un module avec au moins deux interfaces peut être partagé avec n'importe quel composant d'un ensemble de composants de base. L'interface du module accepte n'importe quelle combinaison de composants de base.

Ils soutiennent aussi que la modularité dépend de deux caractéristiques de conception des composants, qui sont :

1. la similitude entre les architectures physique et fonctionnelle,
2. la minimisation des interactions entre les composants physiques.

En raison du grand nombre d'implications de la conception modulaire sur toutes les activités de fabrication du produit, une grande quantité de travaux sont venus apporter de la consistance dans la conception du produit et du process. Il est possible de citer par exemple les travaux de He et Kusiak [48], qui proposent un algorithme de recherche Taboo dans le but de concevoir un système d'assemblage pour des produits modulaires de manière à équilibrer les lignes d'assemblage. De même, Huang et Kusiak [50] ont travaillé sur le développement de produits modulaires en s'intéressant à la minimisation des coûts de tests sur le produit final. Il est possible de trouver de nombreux autres exemples d'application des concepts de conception modulaire dans [58].

3.3.6 La restructuration des processus

Il s'agit de modifier le processus de réalisation du produit pour retarder l'étape qui provoque la différenciation.

Deux exemples sont présentés (figure 3.13 et 3.14). Dans le premier (figure 3.13), l'étape qui entraîne la différenciation est retardée à la fin du processus, c'est au moment de la distribution que s'effectue la différenciation par le regroupement des éléments nécessaires.

Dans le second exemple (figure 3.14), il s'agit d'une inversion de deux opérations. Lee et Tang [64] ont examiné sous quelles conditions il est profitable de permuter deux opérations d'un même processus, leur modèle a été illustré sur le cas Benetton. Benetton connu pour sa production de pull-overs en laine en couleur unie, à commencé dans les années quatre-vingt à les offrir dans une variété importante de couleurs. Très vite, il s'avéra que les préférences de couleurs de leur clientèle cible, les jeunes, changeaient trop vite et il devenait de plus en plus difficile de les deviner avant le début de la saison. Pour cela, il a été mis en place une solution bien adaptée qui consiste au lieu de faire tricoter les pull-overs à partir de la laine teintée de stocker des vêtements en couleur nature et de les teinter après que les commandes des distributeurs soient arrivées. Ce type de différenciation retardée associé à un système

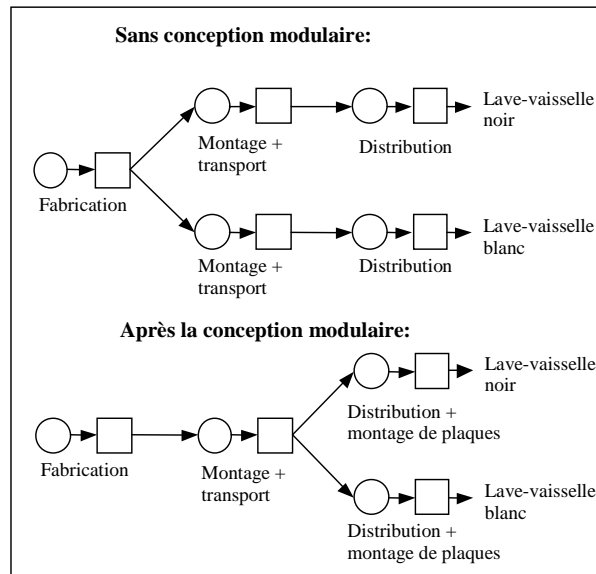


FIG. 3.13 – Restructuration d'un processus - Différer une partie d'une étape.

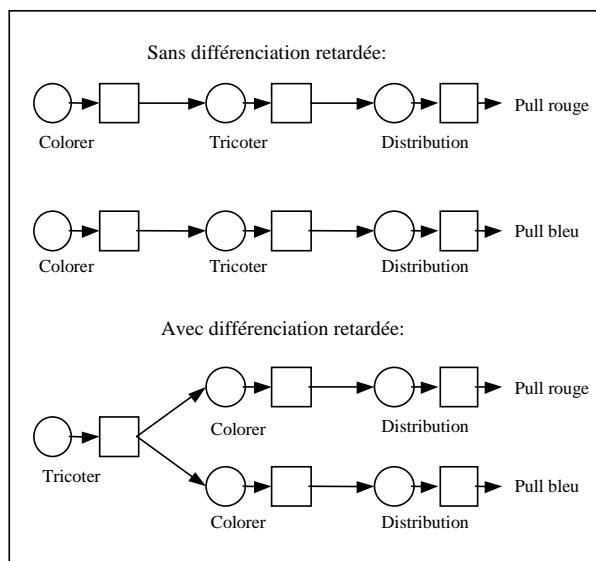


FIG. 3.14 – Restructuration d'un processus - Inversion de deux opérations.

logistique sophistiqué a permis Benetton de connaître une croissance exceptionnelle dans les années quatre-vingt [17].

Alors que Lee et Tang traitent uniquement du problème de la restructuration de processus, Gupta et Krishnan [43] vont plus loin dans leur recherche. Dans leur modèle, ils cherchent non seulement la meilleure séquence d'étapes d'assemblage, mais ils ont aussi développé un algorithme pour trouver les produits génériques (sous-

ensembles) optimaux.

Par une série de travaux, qui porte sur un cas d'application de la différenciation retardée sur une ligne d'assemblage d'ordinateurs chez IBM, Swaminathan et Tayur [94, 95] fournissent un outil mathématique contenant deux sous-modèles : le « Assembly Sequence Design Model » qui permet de trouver l'enchaînement des étapes d'assemblages à un coût minimal et le « Vanilla Configuration Model » qui cherche le meilleur ensemble de « Vanilla Boxes³ » pour une certaine gamme de produits.

He *et al.* [47] proposent une implémentation de la différenciation retardée qui a pour but d'aider au choix des alternatives de conception en ayant comme contrainte d'améliorer les performances du système de fabrication. Les performances considérées sont le nombre de pièces différentes dans la chaîne d'assemblage et le temps de cycle. Minimiser le nombre de pièces différentes permet de minimiser les coûts indirects (coûts des stocks, temps de conception, mise au points, contrôles qualité), et minimiser le temps de cycle permet de maximiser la production.

3.4 Conclusion

L'étude bibliographique concernant la réalisation des familles de produits a fait ressortir un certain nombre de propositions pour aider soit à la conception des familles de produits, soit à la fabrication de ces familles de produits.

Les propositions concernant la conception des familles de produits se présentent sous forme de méthodologies qui séparent les aspects stables et les aspects variables dans le but de proposer une architecture de famille de produits rigide se basant sur les aspects stables tandis que les aspects variables seront développés de manière modulaire en utilisant des interfaces standards.

Un ensemble d'indicateurs appuient ces méthodologies en évaluant la variabilité des fonctions à satisfaire. Des distinctions sont faites par cause de variabilité, on distingue l'étendue des besoins des clients, l'évolution des besoins des clients et la propagation des évolutions.

Un indicateur a été présenté pour évaluer les coûts indirects de la variété des produits. Si cet indicateur est représentatif de la mesure souhaitée, en revanche son application à des cas pratiques semble difficile à mettre en oeuvre.

Une proposition concernant la conception automatique des gammes d'assemblage dans le cas des familles de produits a aussi attiré notre attention.

Parmi les travaux portant sur la fabrication des familles de produits, les outils permettant de mettre en oeuvre la différenciation retardée sont présentés. Rappelons qu'il existe différentes stratégies (différenciation d'étiquetage, de packaging, d'assemblage, de fabrication) pouvant être mises en oeuvre à différents moments (par l'utilisateur, le distributeur, le fabricant, le concepteur). Les outils comprennent la standardisation des composants, la conception modulaire et la restructuration des processus.

3. Les « Vanilla Boxes » sont des pré-assemblages neutres utilisés par IBM, pour réaliser leurs produits finaux dans des délais de livraison très courts, au moment où la commande client arrive.

Chapitre 4

Méthodologie de conception des familles de produits

4.1 Introduction

Pour faire face à une diversité client qui augmente, les constructeurs cherchent à standardiser leurs produits et process en interne. Ceci leur permet de rationaliser leur production et d'optimiser soit les produits, soit les processus, parfois les deux, et de profiter ainsi d'une meilleure productivité garante des coûts de production. Pour cela, ils cherchent à repousser le plus loin possible le point à partir duquel chaque produit acquiert sa propre identité, ce qui est connu dans la littérature sous l'appellation « *différenciation retardée* ».

Cependant les outils et méthodes proposés dans la littérature ne nous ont pas semblé remplir totalement ce pour quoi nous les attendions.

Il en va ainsi tout d'abord de l'existence de différents types de diversité qui apparaissent souvent mélangés et que nous tenterons de mettre en relief dans la section 4.3.

En revanche, la littérature fournit de nombreux outils permettant le passage plus ou moins structuré d'un type de diversité à l'autre. Ces outils se présentent sous forme de méthodologies de conception ou d'indicateurs que nous essayerons de structurer en section 4.4.

Dans la section 4.5 nous proposons une méthodologie de conception produit/process pour les familles de produits qui prendra en compte les trois types de diversité définis en section 4.3 et s'appuiera très fortement sur la littérature quant aux outils utilisés.

Enfin dans la section 4.6 nous montrons comment les outils de *Data Mining* peuvent être utilisés en conception de familles de produits.

4.2 Contexte

Dans un marché concurrentiel où les capacités de production sont supérieures à la demande, les fabricants se doivent, soit de recentrer leur activité sur une fonction stratégique afin de diminuer leurs coûts et devenir plus compétitifs, soit de diversifier

leur production pour embrasser un ensemble plus large de besoins et être ainsi au plus proche des désirs des clients [68].

Nous nous plaçons dans le cas où la seconde option a été choisie. Dans cette perspective, nous considérerons qu'il existe un ensemble de besoins différents à satisfaire.

Pour satisfaire des besoins diversifiés, différentes solutions sont disponibles. Un extrême étant la standardisation, qui rend possible la satisfaction d'un ensemble de besoins avec un produit unique par exemple en électroménager ou dans le domaine du logiciel. Un autre extrême consiste en la fabrication sur mesure visant à la satisfaction stricte de chaque besoin, c'est le cas des barrages par exemple.

La majorité des produits industriels se situe à un stade intermédiaire entre ces deux solutions et possède des éléments standards et des éléments personnalisés assemblés de manière plus ou moins personnalisée. Les solutions intermédiaires peuvent utiliser la conception modulaire et/ou la différenciation retardée.

Le contexte dans lequel nous nous situons consiste en une production de masse de produits à forte diversité. Plus précisément, nous nous intéressons au cas où un produit est réalisé à partir de l'assemblage d'un grand nombre de composants.

Parmi les composants à assembler une certaine quantité peut être facultative (les options), une autre obligatoire mais qui peut posséder différentes caractéristiques variables (les variantes).

En s'intéressant aux caractéristiques des produits à la sortie du système de production, assemblés à partir d'un ensemble (limité) de composants sélectionnés ou non et avec des paramètres variables, il apparaît qu'il est alors possible de réaliser une grande diversité de produits différents due à la combinatoire engendrée.

A partir de n composants différents, on est capable théoriquement de produire $2^n - 1$ produits différents. Cette valeur théorique n'est en fait jamais atteinte car il existe de nombreuses contraintes de natures différentes entre les composants.

Cependant la diversité potentielle réalisable est déjà immense en comparaison de la production effectivement réalisée (liée à la fois aux cadences de production et à la demande). Ainsi, bien que produit en masse, la production réelle ne représente qu'une faible consommation de chaque possibilité. On parle alors de production quasi-unitaire.

4.3 Différents niveaux de diversité

Partant de l'idée de la classification de la diversité des produits selon différents niveaux proposée par Ciavaldini et Loubet dans [24], en nous plaçant au niveau de la conception des produits et des process, nous avons été amenés à considérer les trois types de diversité suivants :

- la diversité fonctionnelle,
- la diversité technique,
- la diversité process.

Nous allons décrire ces différents types de diversité afin de voir quels en sont les paramètres et comment ils évoluent.

4.3.1 La diversité fonctionnelle

La diversité fonctionnelle provient de l'ensemble des besoins à satisfaire pour acquérir des parts de marché sur la concurrence. Elle est liée à la diversité commerciale offerte aux clients. La diversité fonctionnelle dépend des situations de vie, des usages, elle contient des interdépendances et des contraintes.

Il s'agit du type de diversité le plus apparent pour le client, car c'est au niveau des fonctions qu'il choisira, le plus souvent, ce qu'il souhaite ou ne souhaite pas et avec quelles caractéristiques (figure 4.1).

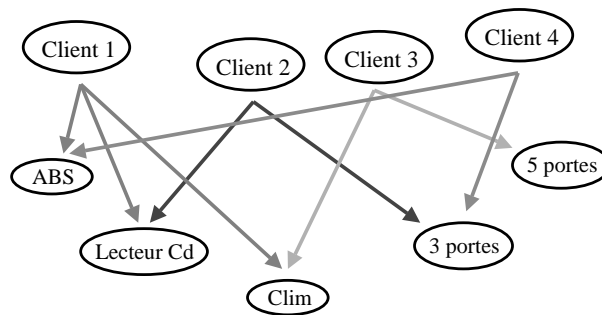


FIG. 4.1 – Diversité fonctionnelle.

S'agissant d'aspects commerciaux, les départements Produits, Marketing et Style y sont très impliqués afin de répondre aux goûts et aux besoins du client et même les anticiper. La stratégie de l'entreprise y prend aussi une part importante car il s'agit de limiter et de cibler l'ensemble de l'offre répondant au mieux à l'attente des clients. L'étendue de la diversité fonctionnelle provient à la fois de la disparité des besoins des clients, mais aussi de leur différence de perception d'un même besoin (niveau de qualité, prix, utilité, ...).

L'entreprise étant soumise à la concurrence et fournissant ses produits à des clients exigeants, on observe que la diversité fonctionnelle évolue dans le temps pour deux raisons principales :

- l'évolution des produits ou l'apparition de nouveaux produits sur le marché fait apparaître de nouveaux besoins (ex : le GPS utilisé initialement pour le repérage de position devient un outil d'orientation routière),
- l'évolution des perceptions des clients (le niveau de vie évolue, les effets de modes, la situation familiale évolue, ...) fait évoluer les critères de satisfaction des besoins.

Ciavaldini et Loubet [24] parlent alors de :

- « *diversité congénitale* » : elle représente la diversité mise en oeuvre lors du lancement d'un nouveau modèle,

- « *diversité thérapeutique* » : elle apparaît en cours de vie du modèle afin d'adapter et de faire évoluer le produit par rapport à la concurrence, ou de s'ouvrir de nouvelles niches de marché.

La diversité fonctionnelle se décline en :

- familles : nombre et renouvellement,
- versions : silhouettes, motorisation, niveaux,
- variantes : combinatoire d'options.

4.3.2 La diversité technique

La diversité technique concerne les réalisations techniques capables de satisfaire la diversité fonctionnelle (figure 4.2). Il s'agit de la traduction sur le plan technique de la diversité fonctionnelle.

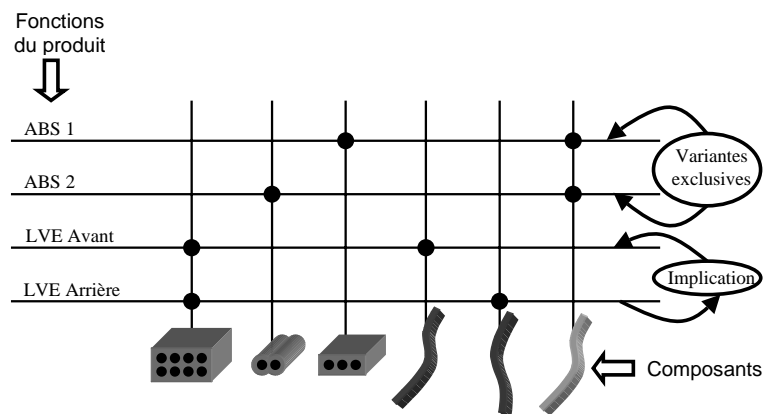


FIG. 4.2 – *Diversité technique.*

L'origine est cette fois centrée sur les Etudes, le Style et les Achats. On cherchera à réutiliser au maximum les éléments déjà existants afin de réduire le nombre de références.

Il faut noter qu'une option apparemment anodine peut avoir des répercussions importantes sur le plan technique et nécessiter plus ou moins de pièces spécifiquement conçues. Par exemple, choisir l'option toit ouvrant provoque l'impossibilité de placer une antenne de toit à l'avant, il faudra donc soit placer une antenne de toit à l'arrière et passer d'autres fils de connection plus long, soit fixer l'antenne sur l'aile du véhicule et encore une fois modifier les fils de connection. Ici ce n'est encore qu'un exemple ayant peu de répercussions, le changement de puissance du moteur peut quand à lui nécessiter un nouveau système de refroidissement, de nouveaux amortisseurs, de nouveaux pneus, ...

La diversité technique dépend des compétences de l'entreprise, ce que l'entreprise sait faire, des connaissances disponibles au moment de la conception, mais aussi

du matériel à disposition, de la charge de travail et du réseau de sous-traitants qui entoure l'entreprise, des progrès de la science, ...

Tous ces paramètres évoluant indépendamment la diversité technique évolue dans le temps :

- par l'évolution des technologies (de l'entreprise, des sous-traitants, de la concurrence),
- par l'amélioration des solutions existantes, l'entreprise apprend sur ses produits tout au long de son cycle de vie (retours d'expériences). Les solutions existantes peuvent être améliorées pour des raisons de coûts, de productivité, de qualité, ...
- par l'évolution des connaissances de l'entreprise sur son produit, sur ses processus, sur ses clients.

Tout ceci provoque donc des évolutions au niveau technique de la satisfaction des besoins fonctionnels, cette évolution au niveau technique provoque le versionnement.

4.3.3 La diversité process

La diversité process (ou diversité industrielle) concerne la manière dont seront réalisées les solutions techniques, elle se retrouve sur les lignes de fabrication (Méthodes, Usines, Achats). Il s'agit de l'ensemble des process capables de réaliser une solution technique donnée dans un contexte industriel donné (figure 4.3).

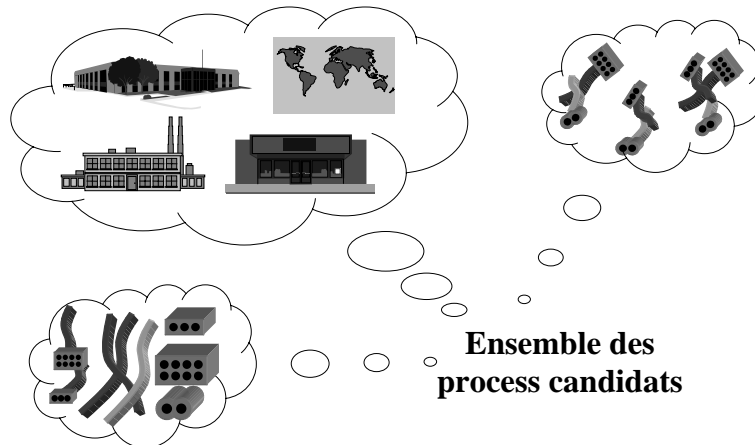


FIG. 4.3 – *Diversité du process.*

La diversité process évolue :

- par l'introduction de nouvelles machines,
- par l'évolution du réseau de fournisseurs,

- par l'évolution des méthodes de gestion de production, gestion des stocks, ...

La diversité process provoque des problèmes de qualité, de gestion des stocks et d'organisation. Cette catégorie de diversité est très coûteuse, il va donc s'agir de la limiter au maximum pour limiter les surcoûts de production dus à l'introduction de la diversité.

4.3.4 Partage de la représentation

Partant de la diversité fonctionnelle (souhaitée en marketing) jusqu'à la diversité produite (et mise sur le marché), on observe donc trois niveaux de diversité qui coexistent et se partagent la représentation du produit et du process (figure 4.4).

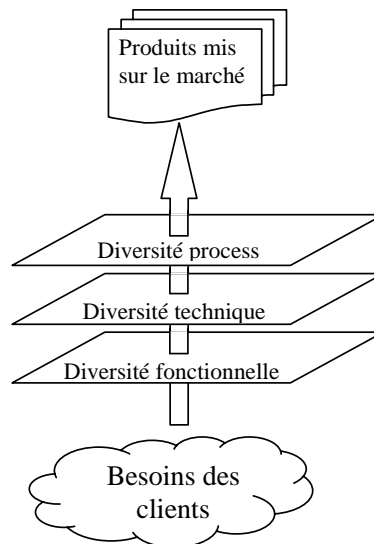


FIG. 4.4 – Partage de la représentation du produit.

La diversité des besoins des clients devra subir différentes déclinaisons, différentes traductions pour être convertie en besoins satisfaits :

- comment s'effectue le passage d'un type de diversité à l'autre?
- comment est outillé le passage d'un type de diversité à l'autre?

En utilisant les dénominations de Martin et Ishii [69] nous ne traitons pas les choix stratégiques de diversité (quels types de produit fabriquer?), nous nous intéressons aux décisions tactiques (qui concernent les aspects non visibles par le client) afin d'aider dans le choix des produits et process communs entre différents produits.

Nous ne traitons pas l'acquisition des besoins et désirs des clients. Dans le travail présenté ici, l'ensemble des fonctions à réaliser sera une donnée de même que les quantités de ventes escomptées de chaque produit, sous-produit, fonction selon le

cas. Dans le cas de données floues ou incomplètes des propositions de solutions seront faites soit pour se passer de ces données soit pour les acquérir (voir section 4.6).

De même, nous ne traitons pas les aspects de différenciation perceptuelle des produits [96] : offres de services, offres promotionnelles, politiques commerciales.

Nous nous ramenons donc au cas représenté figure 4.5.

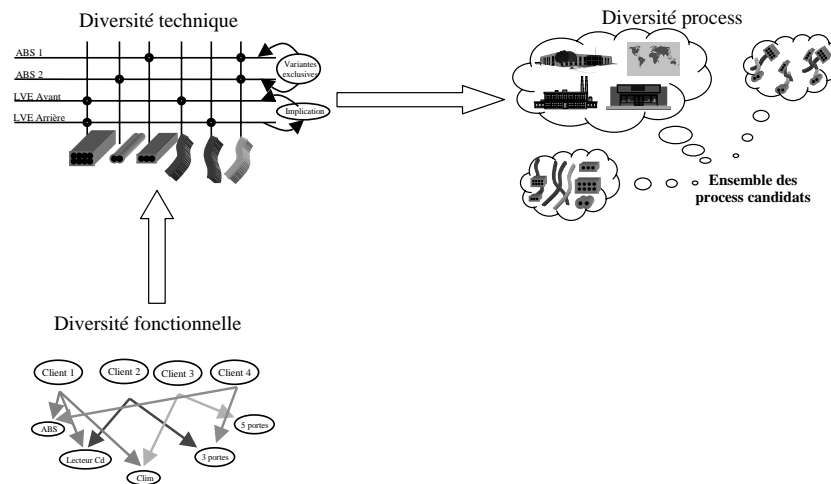


FIG. 4.5 – *Domaine d'étude.*

4.4 Passage d'un type de diversité à l'autre

L'étude bibliographique présentée dans l'état de l'art montre qu'il existe des liens entre la diversité fonctionnelle et la diversité technique de même qu'entre la diversité technique et la diversité process. Les outils proposés permettent le passage maîtrisé d'un type de diversité à l'autre (Tableau 4.1).

Cependant la littérature ne dispose pas de processus global, ni au niveau des outils, ni au niveau de la démarche qui propose le passage d'un ensemble de besoins clients à satisfaire aux produits mis sur le marché. Nous nous trouvons donc dans un processus de conception qui dispose de deux démarches locales, l'une au niveau du produit (passage fonctionnel — technique), l'autre au niveau du process (passage technique — process) alors qu'il s'avère cependant nécessaire de lier les informations processus et produits sur tout le cycle de conception des produits pour garder la cohérence de l'ensemble et contrôler toute la chaîne globale de diversité, afin de produire à diversité donnée ou tout du moins maîtriser l'évolution de la diversité.

Notre contribution consiste à proposer une démarche méthodologique globale de conception des familles de produits. Cette démarche suit un cadre général de maîtrise de la diversité et se base sur un certain nombre d'outils et d'indicateurs pour la gestion de la diversité en s'appuyant très largement sur la littérature afin de maîtriser l'évolution de la diversité.

Déclinaison	Outils
fonctionnelle technique	Personnalisation par l'utilisateur Différenciation perceptuelle Standardisation des composants Conception modulaire des produits Composants paramétrables Standardisation des produits Méthodologies de conception pour la diversité
technique process	Standardisation des process Différenciation au stade de la distribution Resséquencement Restructuration des processus Technologies de groupe Gammes génériques d'assemblage

TAB. 4.1 – *Déclinaison d'un type de diversité à l'autre.*

4.5 Méthodologie de conception de familles de produits

Maîtriser la diversité est une option stratégique pour une entreprise afin d'améliorer sa compétitivité par une réduction de ses coûts de conception et de production. Ce ne peut être une action locale ou la démarche d'une personne isolée, il faut considérer la diversité dans sa globalité. La maîtrise de la diversité doit s'inscrire dans une démarche transversale qui vise un ensemble de paramètres.

La méthodologie proposée présente les étapes clés afin de maîtriser la diversité, il ne s'agit en aucun cas d'un outil automatique ou d'une démarche automatique, il faudra spécifier dans chaque cas particulier en utilisant les variables et paramètres les mieux adaptés au cas d'étude considéré.

Notre méthodologie comporte 8 points à traiter (tableau 4.2), nous allons détailler ces différents points.

Méthodologie
1. Mise en place d'une action « Maîtrise de la diversité »
2. Choix des indicateurs
3. Analyse des besoins fonctionnels
4. Création d'une structure fonctionnelle
5. Création d'une structure technique
6. Création des ensembles de process
7. Recherche des solutions
8. Choix d'une solution

TAB. 4.2 – *Méthodologie de conception.*

Une action « Maîtrise de la diversité » peut concerner un produit nouveau que l'on envisage de fabriquer ou bien s'attaquer à la production actuelle dans le but de rationaliser le fonctionnement de l'entreprise.

4.5.1 Mise en place d'une action « Maîtrise de la diversité »

La mise en place d'une action « Maîtrise de la diversité » doit montrer clairement que l'entreprise s'engage fortement dans la direction de la maîtrise de la diversité.

Pour cela, il est souhaitable de monter une équipe projet qui fasse appel à des intervenants des différents secteurs concernés, pour à la fois gérer les contraintes globales et montrer l'engagement transversal d'une telle action.

Cette équipe projet peut contenir entre autre :

- un chef de projet qui aura pour mission principale le suivi de l'action « Maîtrise de la diversité », qui devra aider à trancher en cas de conflit,
- un commercial ou tout autre personne qui prendra en charge de représenter les clients,
- un acheteur afin de prendre en compte les volumes et méthodes d'approvisionnements et s'intéresser ainsi aux économies d'échelle,
- un fabricant s'intéressera au plus prêt aux processus de réalisation des produits,
- un responsable de production sera en charge de vérifier la faisabilité du point de vue charge de travail (égalisation des charges des lignes d'assemblages par exemple),
- un concepteur représentera l'aspect technique de l'action.

La liste n'est bien sûr pas limitée à ces personnes et selon le cas tel ou tel spécialiste du produit, de l'entreprise ou du marché peut se joindre au projet. Des intervenants différents peuvent intervenir selon l'étape d'avancement de l'action « Maîtrise de la diversité ».

La première tâche de l'équipe « Maîtrise de la diversité » sera de définir des objectifs et de les chiffrer (il faut donc que les objectifs soient mesurables). Les objectifs doivent être déterminés en fonction de la stratégie de l'entreprise, et validés par la hiérarchie qui s'engage ainsi dans la direction désirée.

Toute l'équipe « Maîtrise de la diversité » doit valider les objectifs définis en commun pour montrer l'aspect transversal de l'action et l'engagement des différents secteurs concernés.

4.5.2 Choix des indicateurs

Afin de mener à bien une action de ce type, il est nécessaire de pouvoir mesurer un certain nombre d'indicateurs (Cf tableau 4.3) qui permettront à la fois de mesurer

l'état actuel (avant le démarrage de l'action « Maîtrise de la diversité ») et de suivre l'évolution de l'action.

Les indicateurs doivent être choisis en fonction de la stratégie de l'entreprise afin de refléter celle-ci au mieux. Il sera généralement nécessaire d'utiliser différents indicateurs pour mener à bien une action « Maîtrise de la diversité », il faudra alors veiller à ceux-ci soient complémentaires, justes et fidèles.

Il faut s'intéresser à des caractéristiques mesurables et les indicateurs doivent être représentatifs des caractéristiques choisies afin de les représenter. Parmi les indicateurs possibles, ceux présentés dans le tableau 4.3 sont envisageables.

Indicateur de	Exemple
Coût	Coût global de production Coût du produit Coût des modules Coût des fonctions Coût des stocks Coûts de gestion Coûts indirects induits : <i>CI, DI, SI</i>
Quantité	Nombre de modules par produit final Nombre de fonctions par composant ou par module Nombre de composants différents entre deux variantes d'une même famille Plage de fonctions couvertes par un module Niveau de commonalité de la famille de produits Niveau de commonalité des composants dans un sous-produit Nombre de références à gérer
Productivité	Temps d'assemblage final du produit Temps de changement de production d'un produit à l'autre
Autres	Maintenabilité Démontabilité Recyclabilité

TAB. 4.3 – Indicateurs pour la « Maîtrise de la diversité ».

La liste n'est bien sûr pas exhaustive, et il conviendra de trouver à chaque cas les indicateurs qui conviennent le mieux. Les indicateurs peuvent être pondérés de différentes manières : nombre de produits fabriqués, poids du module, intérêt pour le client, le coût ... ou pondérés entre eux. Si le nombre d'indicateurs devient trop important, il faudra créer un indicateur supplémentaire de niveau supérieur qui aura pour but d'agrèger les indicateurs de niveau inférieur.

Le choix des indicateurs étant fondamental dans la suite de l'approche, une négociation des indicateurs par les membres du projet est nécessaire car elle engage fortement la maîtrise de la diversité. Un indicateur peut par exemple contrarier une logique locale tout en étant bénéfique au niveau global pour l'entreprise, il sera donc nécessaire de montrer aux participants les enjeux de chaque indicateur.

Les indicateurs devront ensuite être chiffrés afin de fixer un but à atteindre. Ce chiffrage peut aussi bien être une valeur finale à atteindre, qu'une évolution à observer ou à maintenir (par exemple une diminution de 10% dans le nombre de références à gérer par l'entreprise).

Selon l'état d'avancement de l'action «Maîtrise de la diversité» différents indicateurs pourront être utilisés afin de faire ressortir des points particuliers à chaque étape.

Les différents intervenants peuvent avoir leurs indicateurs propres qui pourront servir à fournir à l'équipe «Maîtrise de la diversité» un autre indicateur qui agrégera des mesures particulières.

4.5.3 Analyse des besoins fonctionnels

Le but est d'analyser la diversité fonctionnelle que l'on souhaite fournir afin de l'exprimer sous forme de fonctions valuées (but à atteindre, intervalle de tolérance).

La diversité provient tout d'abord des besoins hétérogènes des clients, mais aussi de paramètres internes à l'entreprise. Par exemple la stratégie de l'entreprise peut chercher à fabriquer des produits à forte diversité en suivant une logique commerciale cherchant à satisfaire au mieux chaque client, ou bien afin de boucher les niches de marché qui seraient ouvertes à la concurrence.

L'analyse des besoins des clients doit permettre de répondre à la question : quelle diversité fonctionnelle proposer ?

La diversité fonctionnelle s'appuie donc à la fois sur la stratégie de l'entreprise et sur l'analyse des besoins.

Une étude de la demande pourra permettre :

- de construire un client moyen, qui sera la cible à satisfaire,
- de définir plusieurs groupes de clients. Il pourra être judicieux de proposer plusieurs groupes de produits ciblés par groupe de client,
- de sélectionner un ensemble ou sous-ensemble de clients à satisfaire en priorité (ex : faire un produit haut de gamme pour une certaine catégorie de clients),
- de chiffrer les corrélations de demande des clients (analyse de paniers).

Il existe différents moyens d'acquérir les données. Afin d'identifier le besoin, il peut s'agir par exemple d'évaluer la manière dont chaque fonction doit être satisfaite en évaluant par des mesures statistiques :

- la valeur moyenne souhaitée : $m = \frac{\sum_{i=0}^n X_i}{n}$ d'une caractéristique X pour l'ensemble des clients,
- l'écart type de cette valeur moyenne souhaitée $\sigma = \sqrt{\frac{(\sum_{i=0}^n X_i - m)^2}{n-1}}$.

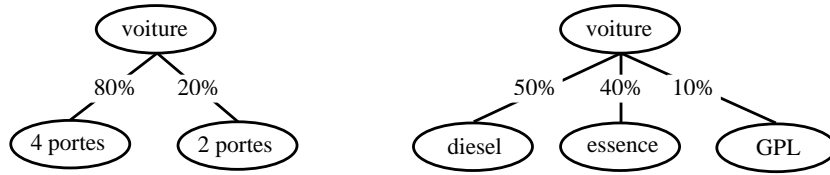


FIG. 4.6 – Taux de monte.

Les statistiques peuvent ainsi fournir les taux de monte de chaque option (figure 4.6), information qui pourra être utilisée afin de dimensionner les pièces, aider au choix des matières et des processus, dimensionner le processus (cadences de production nécessaires, équilibrage des lignes d'assemblage, niveaux des stocks).

Un autre type d'information précieux peut être obtenu à partir de l'analyse des besoins des clients, il s'agit des corrélations entre les fonctions sur la demande des produits.

Les corrélations entre les fonctions peuvent dans certains cas être une information indispensable. Supposons un modèle de voiture pour lequel la combinaison des options « 2 portes » et « moteur diesel » implique une boîte de vitesse particulière. Savoir uniquement les taux de monte de chaque option prise individuellement n'aidera pas à dimensionner le stock de ladite boîte de vitesse. L'information qui est indispensable dans ce cas est de savoir combien il y aura de voitures diesels 2 portes. Il faudra donc s'intéresser aux corrélations entre les fonctions (figure 4.7).

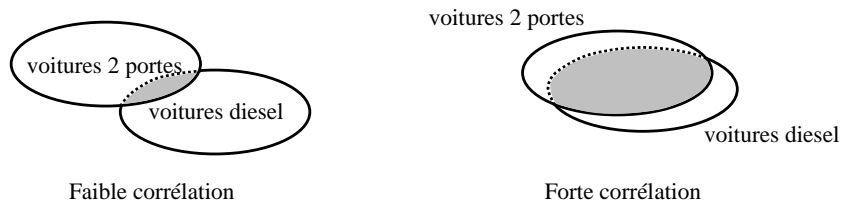


FIG. 4.7 – Corrélation.

De même savoir que certaines options sont fortement corrélées (positivement) peut suggérer de fournir ces options dans le même module si possible.

Pour extraire ce type d'information, dans les problèmes à grande diversité où le nombre de variables est très important, les techniques statistiques ne sont plus adaptées. Il convient alors de se retourner vers un autre type d'outils, à savoir le *Data Mining*. Les utilisations du *Data Mining* pour acquérir des données seront présentées dans la section 4.6.

L'analyse des besoins fonctionnels peut ainsi fournir :

1. une description des fonctions à satisfaire avec une grandeur tolérancée de la cible à atteindre,
2. une estimation chiffrée du taux de monte, pourcentage de vente, ...

3. une estimation chiffrée des corrélations d'apparition des fonctions ensembles,
4. des ensembles de clients à satisfaire spécifiquement,
5. les prix de vente escomptés,
6. des estimations quantitatives prévisionnelles de ventes,
7. un ensemble de contraintes fonctionnelles (commerciales), ...

4.5.4 Création d'une structure fonctionnelle

Suite à l'analyse des besoins des clients, il va s'agir de créer une structure fonctionnelle commune à la famille de produits.

L'étude de la littérature (chapitre 3) a montré qu'il était préférable de dissocier les aspects stables et les aspects variables. Les aspects stables seront développés pour augmenter le ratio performance/coût en intégrant au maximum les fonctions, ce qui permet aussi de rationaliser les moyens de production. Les aspects variables devront être conçus en suivant un ratio variété/coût optimal. Les composants n'ayant pas de variantes sont un facteur stable dans la conception.

La création de la structure fonctionnelle pourra suivre la démarche présentée sur la figure 4.8.

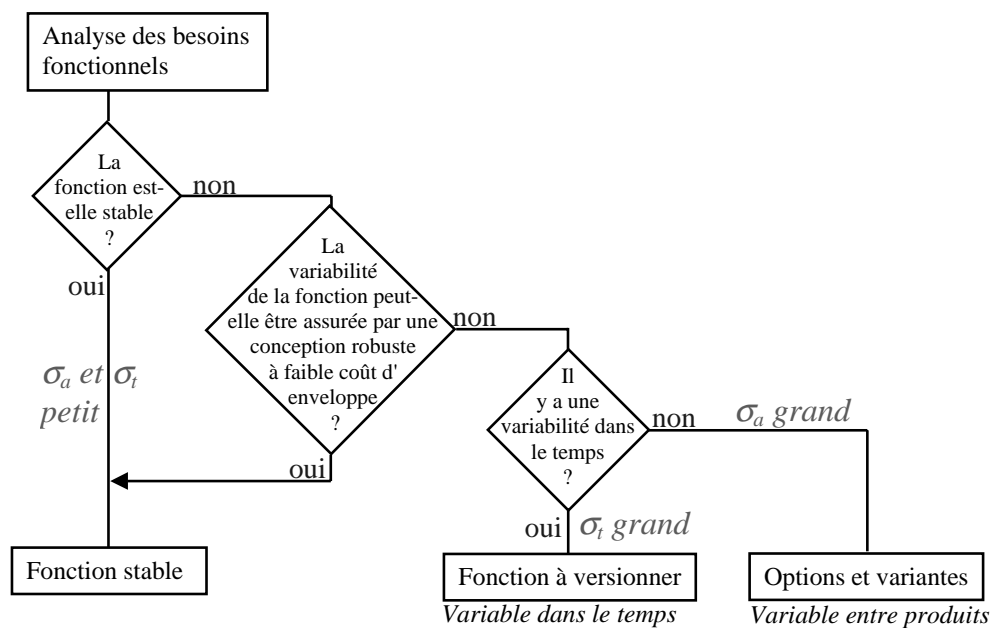


FIG. 4.8 – Création d'une structure fonctionnelle.

La première question à se poser permettra de distinguer les fonctions stables et les fonctions variables. Pour cela, des indicateurs tels que ceux présentés en 3.2.1 ($\sigma_a(i)$ et $\sigma_t(i)$) peuvent être utilisés.

La seconde question a pour but de regrouper les fonctions dont la variabilité peut être assurée par une conception robuste à faible coût d'enveloppe avec les fonctions stables.

L'ensemble de ces fonctions stables serviront de base robuste et formeront la structure fonctionnelle stable. Les fonctions variables représenteront les options, variantes et versions qui viendront se greffer sur la structure fonctionnelle pour enrichir la gamme proposée.

Enfin la dernière question de cette étape permettra de distinguer les différents types de variation (variation entre produits et variation dans le temps) afin de les considérer différemment au moment de la conception. Isoler les fonctions qui évoluent dans le temps permettra de versionner spécifiquement les fonctions considérées.

4.5.5 Création d'une structure technique

Dans cette étape, la diversité *fonctionnelle* est donnée, on s'interroge sur la diversité *technique*, il va falloir répondre à la question : comment fabriquer une grande diversité (fonctionnelle) de produits à moindre coût ?

Différentes stratégies de réponses sont possibles qui dépendent du contexte dans lequel évolue l'entreprise. Ainsi l'offre proposée peut être :

- spécifique : dans le cas d'un produit unique non reproductible (barrage électrique, station orbitale MIR, porte-avion, ...),
- standardisée avec un produit unique notamment sur les marchés émergents ou à faible concurrence, standardisée avec plusieurs produits standardisés si les coûts enveloppes sont faibles (électroménager),
- diversifiée : principalement sur les marchés matures soumis à la concurrence. Pour cela il est possible de se baser sur une plate-forme commune à tous les produits à laquelle on ajoute un ensemble d'options et variantes, ou bien sur différentes plate-formes standardisées par gamme de produit.

Un choix stratégique s'impose sur la manière dont sera présentée la solution technique en réponse à la diversité fonctionnelle. Ce choix devra être argumenté par une évaluation aussi complète que possible des différentes solutions envisageables en prenant en compte les questions suivantes :

- combien coûte / rapporte de faire telle ou telle option / variante ?
- combien coûte / rapporte de NE PAS faire telle ou telle option / variante ?

L'option standardisée étant équivalente à l'option spécifique avec des fonctions élargies, il s'agit dans tous les cas de conception monoproduit que nous ne développons pas ici.

Nous nous situons maintenant dans l'option où il a été choisi de réaliser une offre diversifiée qui s'appuie sur une plate-forme commune à laquelle s'ajoutent des options et variantes. La création de la structure technique proposée s'appuie sur la figure 4.9.

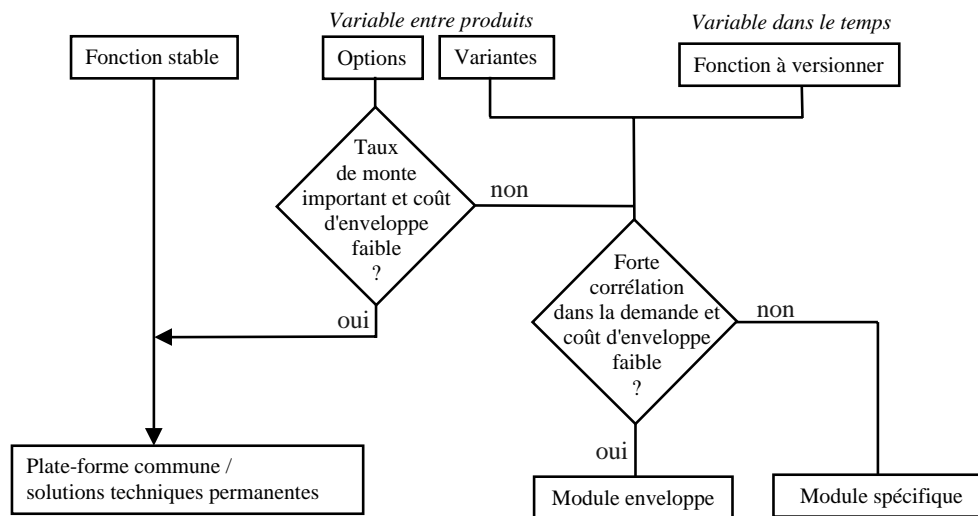


FIG. 4.9 – Création d'une structure technique.

Comme pour la structure fonctionnelle, la structure technique doit séparer les aspects stables des aspects variables. Les aspects stables seront autant que possible intégrés dans la plate-forme commune. Une négociation sur les éléments variables permettra d'inclure certains de ces éléments dans la plate-forme commune (Cf Gonzalez-Zugasti *et al.* [40, 42] présenté en 3.2.1).

Les éléments variables seront conçus autour de modules en proposant des interfaces standards pour faciliter l'échange des modules et en découplant au maximum modules et fonctions pour éviter les fonctions partagées entre plusieurs modules ce qui propage les modifications en cas d'évolution de la fonction (Cf 3.2.1). En revanche si un module peut assurer différentes fonctions la différenciation des produits pourra être retardée en utilisant ce même module pour plusieurs usages.

L'intégration des différentes fonctions dans un même module est d'autant plus intéressante que la corrélation entre les fonctions est importante. La mesure des interactions entre les fonctions peut être déterminée à l'aide des outils de *Data Mining* présentés plus loin en 4.6.

Enfin les taux de montage des différentes fonctions peuvent justifier le fait que certaines options soient montées en standard sur la plate-forme commune à l'aide d'une simple évaluation économique.

4.5.6 Création des ensembles de process

Cette étape consiste à définir les process candidats pour l'industrialisation des familles de produits.

Il s'agit de définir l'ensemble des choix possibles en prenant en compte les contraintes liées au contexte de production. Contraintes physiques, contraintes techniques, parc machine à disposition, réseau de fournisseurs, mode d'approvisionnement (kanban,

synchrone, ...), disposition physique des sites et des machines, compétences de l'entreprise, politique de développement sont autant de contraintes qui limitent l'étendue des possibilités.

Différents modes de gestion sont à considérer selon les productions. Pour les éléments communs, une production continue ou pour stock est envisageable. Pour les options et variantes, les coûts et quantités à produire des différents éléments aideront à la sélection de production par îlots, de process standards ou d'utilisation de process flexibles.

Les données sur les quantités produites sont ici indispensables pour dimensionner les processus et évaluer les coûts et délais nécessaires. Le taux de monte des fonctions peut aider dans le choix du process.

4.5.7 Recherche des solutions

L'ensemble des possibilités de conception et de production étant définies, il s'agit d'évaluer les différentes alternatives à l'aide de l'ensemble des indicateurs (Tableau 4.3). Selon les valeurs des différents indicateurs, il va s'agir très souvent de reconcevoir le produit et/ou le process pour prendre en compte l'évolution favorable d'un certain nombre d'indicateurs.

La figure 4.10 présente un algorithme de recherche de solutions valides pour la réalisation de la famille de produits.

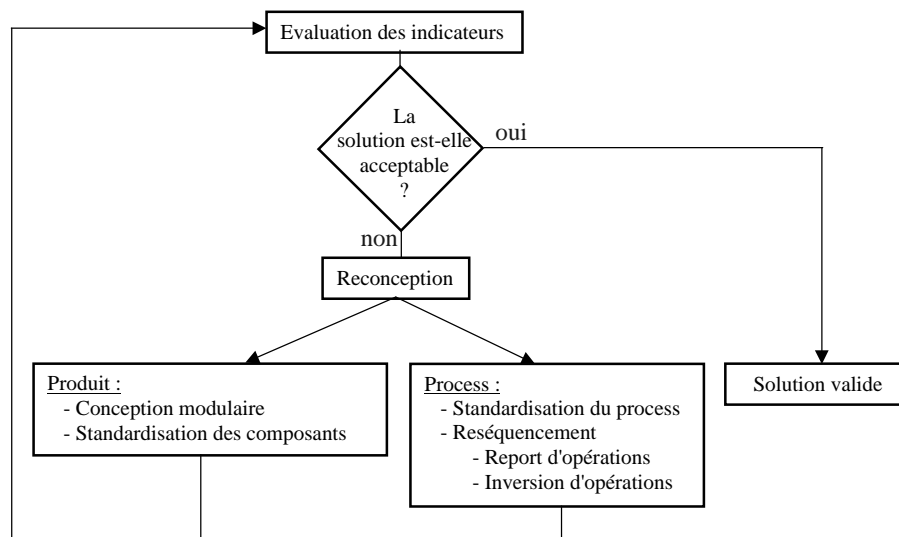


FIG. 4.10 – Recherche des solutions.

Le processus présenté est itératif. Il s'agit d'améliorer les propositions existantes de manière à satisfaire au mieux l'ensemble des contraintes présentes. Une réunion de l'équipe « Maîtrise de la diversité » est nécessaire pour poser des priorités quant à l'évolution à suivre. Il sera nécessaire parfois d'aller à l'encontre des logiques locales

et des indicateurs locaux pour prendre en compte la globalité des différents secteurs concernés.

Les outils à disposition pour la reconception du produit et du processus sont :

1. au niveau du produit : la composition modulaire, la standardisation des composants, la commonalité.
2. au niveau du process : la standardisation du process, le reséquencement (report d'opération, inversion d'opérations).

La décomposition modulaire veillera à décomposer les conceptions intégrées de manière à désolidariser les flux liés à l'utilisation de chaque fonction.

La standardisation veillera au contraire à partager le process sur une plus grande quantité de produits afin de lisser la charge et d'agréger les risques et incertitudes sur la demande des différentes fonctions du module.

Le reséquencement couplé à la décomposition modulaire permettra de repousser le point de différenciation pour faciliter la gestion des stocks, simplifier les flux et décaler les stocks de sécurité vers l'aval.

A chaque itération, le calcul de l'évolution des valeurs des indicateurs permet de vérifier que la conception évolue dans le bon sens et montre les progrès réalisés dans une démarche d'amélioration continue. De plus le chiffrage des progrès est une bonne source de motivation pour l'équipe « Maîtrise de la diversité ».

4.5.8 Choix d'une solution

L'ensemble des solutions valides dans le contexte considéré a été défini. L'équipe « Maîtrise de la diversité » va devoir évaluer et comparer ses propositions par rapport aux indicateurs définis stratégiquement. Il restera pour l'équipe à sélectionner une des solutions parmi celles-ci.

Toutes les solutions ont des évaluations différentes pour chacun des indicateurs, il convient de choisir la solution qui offre le meilleur compromis, il s'agit ici encore d'un choix stratégique qui va prendre en compte l'ensemble des indicateurs définis en amont. Une négociation entre les différents intervenants de l'équipe est encore nécessaire, car la décision transversale aura des impacts divers plus ou moins bénéfiques localement.

4.6 Contribution du *Data Mining* à la démarche

A travers la lecture des chapitres précédents est apparu la nécessité de posséder certaines informations sur le produit à réaliser. Cette section montre comment extraire ces données à l'aide du *Data Mining* et comment l'utilisation du *Data Mining* peut apporter des informations complémentaires dans les différentes phases de la réalisation des familles de produits.

4.6.1 Principes généraux

Au cours des dernières dizaines années avec l'augmentation de l'utilisation d'outils numériques, on observe une grande augmentation du nombre et du volume des bases de données. Le but est de conserver un maximum d'informations sur les activités passées et actuelles afin de les réutiliser (activités, produits) et/ou dans un but de gestion de la qualité. De nos jours, les industriels sont submergés par une immense quantité de données.

Parallèlement à l'augmentation de la quantité de données, celles-ci sont devenues de plus en plus spécifiques et précises. Il est alors de plus en plus difficile pour les managers, ingénieurs, commerciaux, ... de dominer tout le contenu de leurs données, de les comprendre pour en tirer des décisions.

Le *Data Mining* est défini comme étant l'exploration et l'analyse de grandes quantités de données afin de découvrir des formes, des informations et des règles significatives, non triviales, implicites, auparavant inconnues, potentiellement utiles et compréhensibles en utilisant des moyens automatiques ou semi-automatiques (Büchner *et al.* [12]).

Les hypothèses du *Data Mining* sont que les données contiennent des informations, et que ces informations peuvent être utiles à l'entreprise.

Pour cela, le *Data Mining* permet de :

1. produire des modèles à partir de ces données (afin de prédire l'avenir, classifier, estimer),
2. décrire les données en fournissant des modèles et des relations qui permettent de comprendre des données larges et complexes.

Le *Data Mining* se base sur un existant pour en déduire des prévisions, exprimer des lois. Dans le contexte de forte diversité et de grande quantité de production, l'intérêt sera d'utiliser les connaissances contenues dans les conceptions passées pour éviter les sources de diversité coûteuse et non nécessaire.

4.6.1.1 Processus d'utilisation du *Data Mining*

Le processus général d'utilisation du *Data Mining* est représenté sur la figure 4.11 tirée de Fayyad *et al.* [33].

Comme le montre cette figure, le processus est composé de cinq étapes :

1. Sélection des données en pointant sur un sous ensemble de l'ensemble des données disponibles et sensées contenir des connaissances à extraire,
2. Preprocessing : nettoyer les données, filtrer le bruit, échantillonner, compléter les manques dans les données,
3. Transformation des données pour quelles soient adaptées à l'algorithme utilisé (entiers, réels, intervalles, ...),

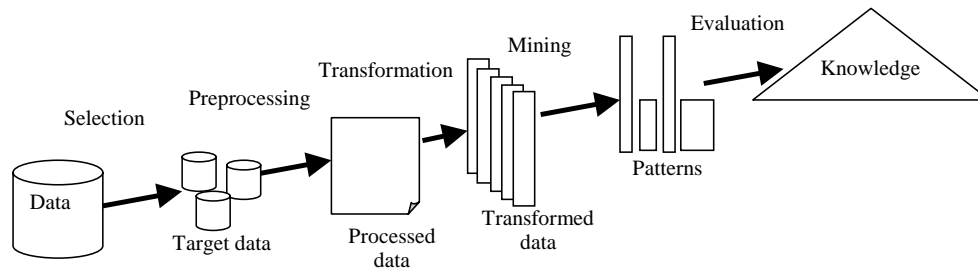


FIG. 4.11 – Processus général d'utilisation du Data Mining.

4. Recherche dans les données, choix des algorithmes et des paramètres d'utilisation de ceux-ci,
5. Evaluation des modèles, interprétation des résultats, ceci peut (très souvent) remettre en cause les étapes précédentes, pour affiner, contredire, corriger. Lorsque le modèle convient, évaluer la nouvelle connaissance.

4.6.1.2 Tâches du *Data Mining*

Westphal et Blaxton dans [101] décrivent les tâches du *Data Mining*. Pour faciliter la compréhension nous considérerons que la base de données à traiter se compose d'une table dans laquelle les colonnes sont les champs et les lignes correspondent aux différents enregistrements.

Modèles prédictifs : Les modèles prédictifs ont pour rôle de prédire une sortie en fonction des entrées qui sont fournies. Dans un tableau, une colonne est considérée comme la réponse, les algorithmes doivent trouver un modèle qui donne la réponse en fonction des autres champs.

Il s'agit d'un apprentissage supervisé dans ce sens où l'on impose le but à atteindre (prédire un champ particulier). Si la réponse souhaitée est continue, les modèles de régression, réseaux de neurones, arbres de décision ou règles de décision seront utilisés. Si la réponse souhaitée est discrète, il faudra se retourner vers les modèles de classification ou de décision.

La classification : il s'agit d'un modèle prédictif discret qui consiste à placer un attribut sur des enregistrements. Les attributs proviennent de petits ensembles prédéfinis (bon/mauvais ou rouge/blanc/rosé). Le travail des algorithmes est de construire un modèle qui classifera correctement les enregistrements avec le bon attribut.

L'estimation est un modèle prédictif continu, la tâche consiste à remplir une valeur manquante dans un champ particulier en fonction des autres champs de l'enregistrement. Les techniques usuelles de régression sont les plus utilisées pour l'estimation. L'estimation est aussi une application des réseaux neuronaux.

Segmentation : Il s'agit d'une méthode d'apprentissage non-supervisée qui consiste à partager une population en sous-populations partageant des caractéristiques communes. On l'appelle aussi *Clustering*. Les méthodes tentent d'obtenir un maximum d'homogénéisation dans chaque groupe et un maximum d'hétérogénéité entre les groupes. Différentes mesures sont utilisées, pour plus de détails Fayyad *et al.* [33] fournissent des explications sur les différentes mesures :

- Distances euclidiennes (k-médian, hiérarchique),
- Reconnaissances de modèles,
- Réseaux de neurones.

Description : La description a pour but de donner une idée claire de ce qui se passe dans les données. Des techniques de visualisation sont utilisées pour simplifier la compréhension.

Pour cela, des méthodes consistent à extraire les modèles fréquents, c'est-à-dire extraire toutes les combinaisons de variables dans les données qui ont un certain niveau de régularité, comme par exemple une association *A implique B* avec deux mesures la *confiance* et le *support*.

- La confiance mesure la fraction de fois où *B* existe quand *A* est présent.

$$confiance = p(B|A) = \frac{p(A \cap B)}{p(A)}$$

- Le support mesure la fraction de fois que *A* existe dans le nombre total de données.

$$support = p(A)$$

Si une association existe avec un haut support et une grande confiance, cette association est dite « forte ». Les associations fortes sont fournies à l'utilisateur, qui devra les analyser pour en tirer des connaissances sur les données. On parle parfois des associations sous les appellations « regroupement par similitudes » ou « analyse de panier ».

D'autres tâches : consistent par exemple en la détection d'une déviation dans les données. Pour cela, une évaluation statistique d'une norme ou d'un comportement est effectuée à partir d'un ensemble de données et les objets qui dévient de la norme sont extraits.

Pour plus de détails sur les algorithmes utilisés le lecteur pourra consulter l'ouvrage de Fayyad *et al.* [33] qui fournit des explications très complètes.

Lorsque le volume de données devient trop important pour être traité par les algorithmes de *Data Mining* actuels dans un temps raisonnable, Kusiak [60] propose deux formes de décompositions : soit en partitionnant selon les enregistrements (lignes) de la base de donnée (« *Object set decomposition* ») soit en partitionnant selon les champs (colonnes) de la base de données (« *Feature set decomposition* »).

4.6.2 Applications pour la Conception

Dans une entreprise intégrée, le système d'information dispose de toutes sortes d'informations qui proviennent des différents secteurs [59] (figure 4.12).

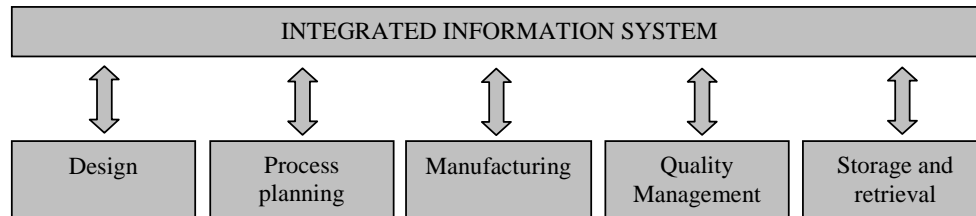


FIG. 4.12 – *Origine des informations dans une entreprise intégrée.*

Tout au long du cycle de vie d'un produit une grande quantité d'information est générée autour du produit par le biais des données. Ces données proviennent des études marketing pour définir le segments de marché, quantités, souhaits des clients, . . . Elles proviennent aussi de la conception directement générée dans les modèles numériques et de la production par les systèmes ERP. Toutes ces données sont actuellement sous-utilisées en dépit de leur contenu qui peut fournir de la connaissance utilisable dans les futures conceptions.

Dans les paragraphes suivants nous montrerons comment il est possible d'extraire de la connaissance utile pour la conception d'un nouveau produit ou la reconception d'un produit existant à partir des bases de données créées indépendamment à différents instants du cycle de vie des produits.

4.6.2.1 Analyse des besoins fonctionnels

En marketing, le *Data Mining* peut être utilisé pour découvrir une grande quantité d'information sur le consommateur. L'ouvrage de Berry et Linoff [14] fournit des informations très complètes à ce sujet, aussi bien au niveau des données à traiter que du savoir faire nécessaire. Les données à creuser peuvent être les données des dernières périodes contenant la description des produits vendus, avec une description du contenu des produits (options, variantes), comment le client a-t-il payé (liquide, chèque, carte bancaire)? A-t-il fait un crédit? Auprès de quelle banque? Quels services ont été demandés par le client (garanties, date de livraison, livraison à la maison, installation à la maison)? A-t-il demandé une formation pour apprendre à utiliser le produit (informatique)?

Il est possible de trouver des informations sur le consommateur : Quel âge a-t-il? Quelle est sa profession, ses loisirs? Est-il marié (oui/non)? A-t-il des enfants? A-t-il acheté le produit/service pour lui, pour offrir?

Des données informelles peuvent être fournies par le vendeur : combien de temps a-t-il fallu au client pour faire son choix? Combien de fois est-t-il venu se renseigner avant d'acheter? A-t-il été voir la concurrence avant de venir? Qui? A-t-il prévu d'aller voir la concurrence après? Qui? Pourquoi?

De ces données, pourra être extraite de la connaissance :

1. Tout d'abord les désirs des clients pourront être séparés en groupes partageant un ensemble de caractéristiques communes grâce aux techniques de *clustering*. Ainsi, il sera possible de créer des produits customisés pour chaque groupe plutôt qu'un produit générique pour l'ensemble des consommateurs.
2. Prédire le groupe de personnes susceptibles d'acheter ou non un produit/service permettra de faire des choix de conception (est-il rentable de proposer telle option?), aidera au choix des matériaux et moyens de production, permettra de dimensionner les volumes de production.
3. Essayer d'anticiper les futurs besoins et souhaits pour de nouvelles fonctionnalités orientera afin de travailler sur de nouveaux produits ou bien adapter les produits actuels.
4. La découverte de liens entre options (Télévision et magnétoscope), entre produits et consommateurs (les jeunes achètent des CD), entre consommateurs et services (les personnes âgées veulent des garanties) entre produits et services (ordinateur et internet) peut être utile pour créer de nouveaux produits/services ou pour améliorer les produits/services actuels.

Ces données combinées à des statistiques peuvent être une aide pour décider si un nouveau produit/service doit être créé ou non, en combien de temps, pour combien de consommateurs, à quel prix? Toutes ces données peuvent être utilisées par l'équipe de conception pour concevoir le nouveau produit/service.

En service après-vente, la relation avec le client n'est pas la même que lors de l'achat, il est possible d'extraire des informations supplémentaires. La nature même de la relation va différencier le type de données à disposition :

- lors de l'installation ou de la livraison du produit au client, le client pose des questions sur le produit qu'on lui installe, ses questions ne sont pas anodines, elles peuvent permettre le modifier les versions futures du produit,
- lors d'une réparation, les causes de la panne, le type de panne, les services de remplacement demandés par le client sont autant d'informations utilisables pour découvrir le client.

Le but est d'extraire des informations pour :

- augmenter la qualité : le retour d'expérience permet de mieux connaître les produits, les sources d'erreur, et de corriger ces erreurs,
- améliorer le produit : l'écoute des clients permet de découvrir des fonctionnalités à ajouter sur le produit,
- améliorer le service : le client ne veut pas qu'un produit, il veut le service qui va avec.

Un exemple d'amélioration du service offert est réalisé par Sforma [88], qui a utilisé le *Data Mining* dans une entreprise qui fournit de l'énergie afin de découvrir les changements d'habitudes ou les consommations anormales pour proposer rapidement aux consommateurs des suggestions appropriées à leur nouveau mode de consommation. Ceci donne l'apparence à chaque client que le fournisseur d'énergie le connaît bien et se préoccupe de lui personnellement ce qui a tendance à fidéliser le client.

4.6.2.2 Analyse des besoins techniques

Pendant la phase de conception des produits, une grande quantité d'information est créée et stockée dans des entrepôts de données (datawarehouses), systèmes CAO, FAO, GPAO, résultats de simulations et de calculs, retours d'expériences, ...

Les techniques de *Data Mining* peuvent fournir de la connaissance sur le produit.

Le *Data Mining* a besoin d'une certaine quantité de données pour extraire de la connaissance représentative, c'est pourquoi ces techniques sont mieux adaptées à des problèmes fréquemment rencontrés ou à des tâches répétitives à partir desquels il est possible d'avoir des données d'apprentissage.

Le but sera d'apprendre des conceptions passées dans le but d'aider à la prise de décisions pour les conceptions nouvelles. Nous allons montrer à partir d'un exemple comment les techniques de *Data Mining* peuvent être appliquées.

Leu et al. [8] ont utilisé une approche *Data Mining* pour la prédiction de la stabilité des supports de tunnel. Dans cette étude de cas, une entreprise devait concevoir un tunnel dans la roche pour une voie de chemin de fer. Concevoir ce type de projet nécessite beaucoup de savoir-faire et d'expérience. Une tâche cruciale consiste en la détermination des systèmes de support. L'estimation des causes d'instabilité des supports de tunnel dépend de nombreux paramètres tels que les caractéristiques de la roche et les caractéristiques de la construction. Les ingénieurs des projets de tunnel ont une compréhension incomplète des mécanismes de la roche et de l'influence des procédures et méthodes de construction.

Pour résoudre ce problème complexe leurs outils traditionnels, analyse du discriminant et méthodes de régressions multiples non-linéaires, sont parfois sans succès. L'entreprise, qui dispose d'une large base de données contenant la description des anciennes réalisations de tunnels, a décidé d'utiliser les techniques de *Data Mining*.

Après une classification des anciens projets selon le type de roche, des réseaux de neurones ont été exercés sur les données filtrées. Ainsi les ingénieurs projet ont disposé d'un modèle pour concevoir le nouveau tunnel. L'étude a démontré la capacité du *Data Mining* à fournir de nouvelles solutions là où les techniques traditionnelles s'étaient avérées insuffisantes pour les assister dans leur prise de décision.

4.6.2.3 Analyse des besoins process

Pour Kalpakjian et Schmid [54] la production juste à temps a été mise en place dans le but d'éliminer le gaspillage de matériel, de machines, de capital, de main d'oeuvre

et d'inventaire à l'intérieur du système de production. Les concepts du juste à temps sont les suivants :

- réception des approvisionnement juste à temps pour être utilisés,
- produire les pièces juste à temps pour être utilisées,
- réaliser les assemblages juste à temps pour être assemblés dans le produit final,
- produire et livrer les produits finis juste à temps pour être vendus.

Avec l'utilisation de plus en plus généralisée de systèmes ERP dans les entreprises, celles-ci disposent d'une très grande quantité d'information sur leur propre activité, capacité et moyen de production. Ces données peuvent être creusées dans de nombreuses directions. Elles peuvent permettre de :

- Comprendre la réalité du système de fabrication. Par exemple pour la planification du process et des ressources, trouver de nouvelles méthodes qui intègrent et analysent l'information sur la vie du système de fabrication.
- Contrôler le process en identifiant les situations dans lesquelles le système de fabrication risque de passer hors contrôle .
- Améliorer la logistique en prenant en compte l'influence de facteurs cachés dans les données.

La planification des process concerne la sélection de moyens de production, séquences d'opération et d'assemblage afin de réaliser une certaine production tout en assurant un ensemble de contraintes telles de l'équilibrage de la chaîne de production, la minimisation des coûts de stock, la minimisation des cycles de production, ...

Pour cela, dans les tâches répétitives, à l'aide du *Data Mining*, il est possible de comparer l'évolution actuelle d'une tâche avec une situation équivalente ancienne dans le but d'anticiper sur le résultat et la prochaine étape qui doit se produire.

De même il sera possible d'extraire de la base de production des ensembles de règles (heuristiques) pouvant servir au management comme par exemple celles utilisées sur les lignes d'assemblage automobile visant à espacer les options qui nécessitent plus de temps de travail de l'opérateur (le toit ouvrant par exemple).

La planification des besoins en ressource se base sur les prévisions des services commerciaux à partir de l'analyse des ventes antérieures et d'études prospectives. Le *Data Mining* peut aider à l'anticipation des demandes réelles des clients afin de produire avec les stocks les plus faibles possibles. Il est possible d'identifier les consommations anormales, les consommations saisonnières, les consommations liées, ... afin d'en tenir compte dans les calculs prévisionnels.

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la conception des familles de produits.

Différents types de diversité ont été mis en relief. Les diversités fonctionnelle, technique et process sont ainsi définies.

L'analyse de la littérature autour des problèmes de maîtrise de la diversité produit a fourni un certain nombre d'outils, de méthodologies et d'indicateurs que nous avons structurés autour des trois niveaux de diversité.

Les outils et méthodes proposées dans la littérature ne nous ayant pas pleinement satisfait quant à la maîtrise de la diversité lors de la conception de produits à forte diversité, nous avons proposé une méthodologie de conception des familles de produits. Cette méthodologie de conception s'appuie très fortement sur les outils tirés de la littérature.

Pour mener à bien la méthodologie de conception, différentes données sont nécessaires. Nous avons proposé pour cela l'utilisation d'un outil, le *Data Mining*, permettant d'extraire certaines de ces données, là où les outils classiques tels que les statistiques deviennent impuissants.

Chapitre 5

Application Industrielle

5.1 Introduction

Le but des travaux présentés dans ce chapitre est de mettre en oeuvre la méthodologie du chapitre 4 sur un des cas d'étude présentés en introduction.

Nous commençons par expliquer la problématique de conception sur laquelle va reposer l'étude. Le contexte de la relation donneur d'ordres–fournisseur est précisé, ainsi que les contraintes du donneur d'ordres et celles du fournisseur. Enfin les composants à l'origine de la relation (des faisceaux électriques) sont décrits avec leurs contraintes de conception.

Dans la section 5.3, le contexte de conception des faisceaux électriques est rappelé.

La section 5.4 porte sur le découpage modulaire des faisceaux électriques. Cette section décrit la stratégie adoptée et l'algorithme de découpage modulaire utilisé. Les découpages structurel et fonctionnel sont décrits.

Enfin dans la dernière section, les résultats obtenus à partir des deux découpages modulaires sont présentés et comparés.

5.2 Problématique

5.2.1 Contexte de conception

Le contexte industriel dans lequel nous nous plaçons est le suivant (représenté figure 5.1) : un fournisseur fabrique des faisceaux électriques pour un donneur d'ordres. Le fournisseur dispose de sites de proximité et de sites délocalisés, il peut se faire approvisionner en produits semi-finis en provenance de ses sites délocalisés où se trouve une main d'oeuvre moins coûteuse.

Le donneur d'ordres reçoit les commandes de ses clients via son réseau de concessionnaires, et transmet les commandes à son fournisseur. Le fournisseur doit alors livrer le faisceau électrique dans un faible intervalle de temps car le donneur d'ordres travaille en production synchrone et exige d'être livré dans l'ordre où les produits se trouvent sur sa chaîne d'assemblage.

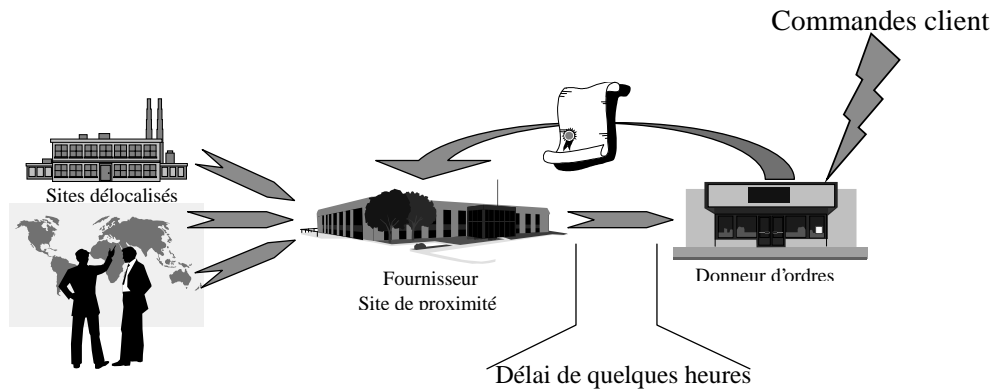


FIG. 5.1 – Contexte industriel.

Pour satisfaire un maximum de clients, le donneur d'ordres propose de nombreuses options et variantes sur le produit final. Chaque client combine les options et variantes qu'il désire de manière à sélectionner un produit personnalisé.

Pour réaliser ces faisceaux électriques, le fournisseur dispose d'un ensemble de composants capables de satisfaire l'ensemble des fonctions à réaliser (figure 5.2), ces composants entrent dans la composition des fonctions, c'est-à-dire que pour réaliser une fonction donnée, il faudra utiliser un ensemble de composants élémentaires. De même un composant donné pourra satisfaire un ensemble de fonctions.

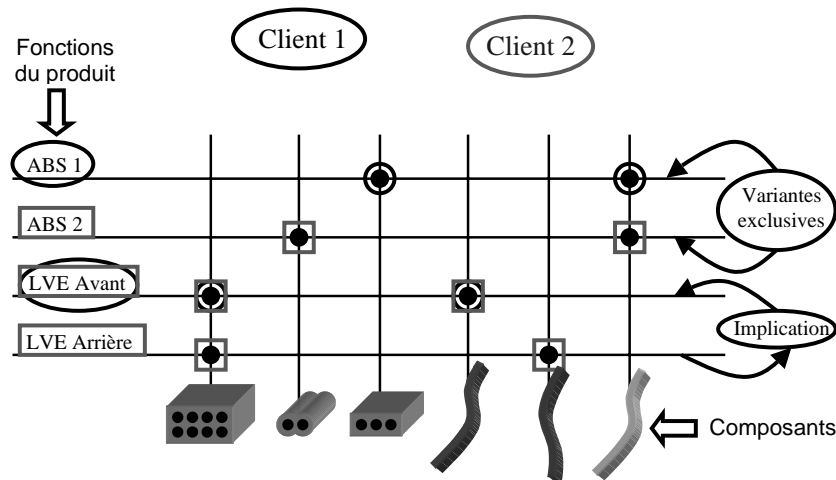


FIG. 5.2 – Besoins en composants.

Enfin il existe au niveau des fonctions un ensemble de contraintes telles que :

- des contraintes d'exclusion : par exemple on ne peut monter qu'une seule version d'ABS sur un véhicule donné,
- des contraintes d'implication : si on installe des lève-vitres électriques arrière,

alors il y aura obligatoirement des lève-vitres électriques avant.

Partant de là, les clients choisissent parmi les fonctions celles qui les intéressent. Dans l'exemple figure 5.2 :

- le client 1 a choisi ABS1¹ et LVE² avant,
- le client 2 a choisi ABS2³, LVE avant et LVE arrière.

Il apparaît immédiatement que les clients 1 et 2 n'ont alors pas les mêmes besoins en composants élémentaires (entourés d'un cercle pour le client 1 et cernés d'un carré pour le client 2).

Dans le cas où les composants élémentaires seraient à forte valeur ajoutée par rapport au coût du faisceau électrique (coût élémentaire, coût process, coût d'installation, ...), il apparaît nécessaire de gérer cette diversité de besoins de sorte que la grande diversité fonctionnelle disponible coté client ne se révèle pas coûteuse pour le fabricant.

Le fournisseur se demande alors comment réaliser un produit à forte diversité à livrer en synchrone. C'est à cette question que nous allons tenter de répondre en appliquant la méthodologie développée au chapitre 4.5.

Nous allons commencer par présenter plus en détail le contexte donneur d'ordres—fournisseur dans lequel nous nous situons, ensuite nous détaillerons le composant (faisceau électrique) au coeur de cette relation. Nous présenterons ensuite la stratégie choisie qui s'appuiera sur le découpage modulaire du faisceau électrique. Enfin, nous présenterons deux types de découpage modulaire adaptés aux faisceaux électriques et nous les comparerons.

5.2.1.1 Le donneur d'ordres

Le donneur d'ordres fabrique des produits à forte valeur ajoutée. Ces produits sont assemblés spécifiquement et selon les désirs de chaque consommateur; cela signifie que le donneur d'ordre attend d'avoir une commande ferme avant d'assembler chaque produit. Pour réaliser ces assemblages, un certain nombre de composants est nécessaire parmi lesquels des faisceaux électriques.

Les besoins des consommateurs sont tous différents, cela signifie que chaque produit ne devra pas réaliser les mêmes fonctions, chaque produit final est donc différent bien que produit en masse, on parle alors de production quasi-unitaire.

Le donneur d'ordres doit mettre en place différents faisceaux électriques dans chaque produit final. Chaque faisceau électrique a un coût relativement élevé [9]. De plus les faisceaux électriques sont des éléments difficiles à assembler dans le produit final car il y a un grand nombre de fils à fixer et de connecteurs à brancher.

Le process de fabrication du donneur d'ordres est de type synchrone ; sa ligne de production est telle qu'un produit ne peut pas en doubler un autre et que l'arrêt d'un

1. ABS1 : Système anti-blocage des roues version 1.
2. LVE : Lève-vitres électriques.
3. ABS1 : Système anti-blocage des roues version 2.

produit provoque l'arrêt de toute la chaîne. De plus, les perturbations en amont de la chaîne d'assemblage qui nous concerne sont telles que le donneur d'ordres connaît l'ordre des produits sur la chaîne d'assemblage seulement quelques heures avant le besoin en faisceau électrique.

Le donneur d'ordres attend de son fournisseur le composant exact (qui ne contient pas d'élément non strictement nécessaire), car chaque élément (utilisé ou non) provoque un coût (matériau, installation) pour le donneur d'ordres. Ce coût est estimé injustifié, et montre une preuve de non qualité.

5.2.1.2 Le fournisseur

Le faisceau à fournir est un composant à forte valeur ajoutée. Le processus de fabrication du fournisseur est libre, cependant il doit livrer en synchrone dans l'ordre imposé par le donneur d'ordres.

Le faisceau électrique intervient dans le fonctionnement d'un grand nombre de fonctions du produit final, notamment parmi les fonctions pour lesquelles il existe des options et variantes. Ainsi, la composition de chaque faisceau électrique est très dépendante de chaque produit final pour le client.

Compte tenu du grand nombre de produits finaux qu'il est possible d'obtenir par la combinatoire de l'ensemble des options et variantes, les faisceaux électriques sont quasiment tous différents bien qu'obtenus à partir de constituants standardisés.

Dès que le donneur d'ordres connaît ses besoins, il les transmet au fournisseur. En prenant en compte le processus de fabrication du donneur d'ordre, le fournisseur ne connaît alors la composition ordonnée des assemblages à livrer que quelques heures avant le moment de le faire. Compte tenu des différents temps d'acheminement au bord de la chaîne d'assemblage du donneur d'ordres, il subsiste pour le fournisseur quelques dizaines de minutes pour la préparation de chaque faisceau électrique.

La fabrication d'un faisceau électrique nécessite beaucoup de travail manuel, ce qui impacte fortement le coût. Pour réaliser ces produits, le fournisseur dispose de deux types d'usines. Le premier type d'usine est localisée à proximité du site d'assemblage du donneur d'ordres; les employés dans ces usines sont spécialisés et leur travail est flexible. Nous appellerons ces sites « *sites de proximité* ». Le second type d'usine est située à une plus longue distance du site du donneur d'ordres néanmoins la main d'oeuvre dans ces usines est moins spécialisée et le coût horaire de leur travail est inférieur; on appelle ces sites « *sites délocalisés* ».

Le fournisseur peut fabriquer les faisceaux électriques dans les deux types d'usines. Il est assez facile pour lui d'approvisionner les sites de proximité en produits semi-finis en provenance de ses sites délocalisés.

5.2.1.3 Le faisceau électrique

a) Description physique Les faisceaux électriques sont des ensembles de câbles utilisés pour connecter différents éléments dans un système électromécanique ou électronique. Les fonctions d'un faisceau électrique sont de fournir de l'énergie électrique

et des signaux électroniques à différents périphériques. Un exemple de faisceau électrique dans le contexte automobile est fourni figure 5.3.



FIG. 5.3 – *Faisceau électrique.*

Un faisceau électrique est composé de différents types d'éléments :

- un ensemble de câbles utilisés dans le but de transmettre de l'information et de l'énergie,
- des connecteurs nécessaires pour relier le faisceau électrique aux autres éléments,
- les épissures sont des soudures entre les câbles,
- des gaines sont quelquefois positionnées sur des zones du faisceau électrique où il est nécessaire de résister à certaines contraintes telles que vibrations, chocs, frottements, étanchéité, températures élevées, ...
- des fixations sont installées à différents endroits du faisceau électrique pour le fixer sur le produit final.

Tout ces éléments sont ici pour répondre à un grand nombre de fonctions individuelles. Dans un faisceau électrique moyen dans le contexte automobile, la famille de faisceau peut être composée d'environ 400 références de câbles, 120 connecteurs, 50 dérivationes et 30 épissures, dans le but de réaliser approximativement 15 fonctions différentes avec un maximum de 9 versions pour quelques unes de ces fonctions. Ce qui permet de réaliser une combinatoire potentielle de 7 millions de faisceaux électriques différents !

Enfin, les faisceaux électriques ont une espérance de vie supérieure à 20 ans. Ils doivent résister aussi longtemps que le produit final est en utilisation, car c'est une opération délicate et coûteuse que de les réparer.

b) Complexité de l'assemblage Un faisceau électrique est un composant relativement difficile à fabriquer avec des contraintes économiques. La difficulté provient de la diversité, de nombreux composants du produit final ont besoin d'être connectés au faisceau électrique afin de recevoir de l'énergie et/ou de l'information. Néanmoins certains composants peuvent être optionnels, nombreux ont différentes variantes, et de plus ces composants peuvent se décliner en différentes versions. En général différentes variantes et différentes versions d'un composant n'ont pas les mêmes besoins vis à vis du faisceau électrique. A chaque fois que ces besoins changent (intensité du courant, type de connecteurs, nombre de câbles, ...) le faisceau électrique a souvent besoin d'être adapté.

Suivant les fonctions choisies par le client, il n'y a pas les mêmes besoins en composants. La combinatoire des options et variantes donne une combinaison de faisceaux électriques différents très importante. Considérons un faisceau pour lequel le produit final propose :

- 5 modèles d'ABS/ESP en option,
- 6 modèles de boîte de vitesses,
- 7 modèles de refroidissement moteur,
- 9 modèles de moteurs,
- 2 modèles de systèmes de navigation en option.

En diversité totale, cela obligera le sous-traitant à gérer $6*6*7*9*3 = 972$ combinaisons possibles !

En réalité le nombre de faisceau électrique à produire est inférieur car il existe des contraintes entre les différents composants. Par exemple on ne peut installer qu'une seule version de moteur sur chaque véhicule, il n'y a pas d'ABS sur les petits véhicules ... d'où l'existence d'un certain nombre de contraintes à prendre en compte, il est possible de distinguer différentes natures de contraintes :

- Contrainte d'inclusion

SI pack électrique, ALORS (vitres électriques ET fermeture centralisée)

- Contrainte d'exclusion

SI toit ouvrant ALORS PAS antenne de toit

De plus contrairement aux options, qui peuvent ne pas exister, pour les variantes, il y a toujours existence d'un des éléments.

Enfin dans le contexte industriel ou les différents composants sont sujets à de nombreuses évolutions, il faut tenir compte de la cohérence des versions.

– Contrainte de cohérence

SI *climatisation version 3* ALORS *alimentation électrique version 3*

De plus, le produit fourni au client est très évolutif (effets de mode, renouvellement de la gamme, ...) avec des impacts importants au niveau des faisceaux électriques.

L'assemblage d'un grand nombre de composants est nécessaire pour réaliser chaque faisceau électrique à livrer. La complexité d'un faisceau électrique est telle qu'il est impossible de le fabriquer en partant des composants élémentaires dans le temps dont dispose le sous-traitant. Le temps de fabrication est supérieur au délai de livraison.

5.3 Action maîtrise de la diversité

Dans le cas de l'automobile, les faisceaux électriques sont l'un des composants les plus coûteux (Aguire et Raucent [9]). Composant indispensable, un retard dans la réalisation des faisceaux électriques provoque un retard sur le produit final. La non qualité du faisceau électrique n'est pas tolérée par le client final, elle peut provoquer de gros désagrément qui peuvent aller jusqu'à l'immobilisation du véhicule (ou l'incendie!).

Malgré l'importance stratégique de ce composant peu de travaux se sont intéressés à leur conception. Ng *et al.* [81] ont réalisé un état de l'art du domaine. Ils présentent les problèmes et difficultés rencontrés pour leur conception et planification. D'après eux la conception des faisceaux électriques est considérée comme une activité de seconde importance qui prend place à la fin du cycle de développement des produits dans lesquels ils interviennent.

Rappelons toutefois les travaux de Thoteman et Brandeau [97] déjà présentés qui montrent, en considérant un cas d'application sur les faisceaux électriques automobiles, qu'une conception optimale (d'un point de vue financier) peut être obtenue en recherchant la commonalité optimale des composants dans le sous-produit.

Les travaux de Aldanondo *et al.* [10, 44, 45] proposent une approche à partir de l'utilisation des configurateurs de produits pour aider à la conception de produits à forte diversité avec un cas d'application aux faisceaux électriques.

Les travaux de Eckstein [30] sur l'application de la différenciation retardée appliquée dans le cadre de la fabrication des faisceaux électriques, qui ont servi de point de départ à nos travaux.

Pour réaliser tous ces faisceaux électriques, le fournisseur doit prendre en compte à la fois la grande diversité et le court délai de livraison.

Deux approches industrielles sont envisageables pour résoudre ce problème, à savoir la standardisation et la conception modulaire.

a) Standardisation Il s'agit de concevoir un nombre limité de modules pouvant être assemblés sur la totalité des produits finis du donneur d'ordres. Il suffit alors de produire un stock de chaque module, le temps d'assemblage des modules n'est alors plus un problème lors de la livraison et la synchronisation est largement simplifiée pour le fournisseur.

D'un autre côté, la standardisation provoque un effet enveloppe⁴ qui a un coût pour le fabricant. c'est-à-dire que pour satisfaire un ensemble de clients, le fournisseur peut approvisionner un module standard (le pack électrique par exemple) qui contient l'ensemble des désirs des clients potentiels (vitres électriques, fermeture centralisée, rétroviseurs électriques). Cependant un tel module contient pour chaque client des éléments qu'il n'a pas nécessairement demandés (les rétroviseurs électriques), et qui ont un coût pour le fabricant. En revanche un module donné est moins coûteux si le fournisseur l'approvisionne de ses sites délocalisés, que s'il le réalise lui-même, en raison de la différence des coûts de main d'oeuvre.

Actuellement, le fournisseur réalise des faisceaux électriques standards. Il faut alors trouver un équilibre entre les surcoûts liés aux éléments non utilisés et les bénéfices provenant de la réduction de la diversité. Une approche de ce type est actuellement utilisée par le fournisseur [15].

b) Conception modulaire Une autre approche consiste à créer des modules, qu'il suffira par la suite d'assembler entre eux. Chaque faisceau électrique sera alors réalisé par l'assemblage d'un certain nombre de modules standards appelés Modules Industriels (MI). Cela permet de diminuer l'effet enveloppe et les coûts associés à chaque module. D'un autre côté, il est nécessaire de prendre en compte le temps d'assemblage final des MIs entre eux. Ces MIs seront réalisés dans les sites délocalisés du fournisseur, là où les coûts de main d'oeuvre sont plus faibles.

L'assemblage final est effectué dans les sites de proximité. Le temps de fabrication le plus important pour la synchronisation est alors l'assemblage final dans l'usine de proximité. La diversité est supportée par la bonne sélection de modules pré-assemblés dans les sites distants ; le temps de fabrication de ces modules n'entre alors pas dans le « temps d'assemblage final » qui nous intéresse dans cette étude.

Le donneur d'ordres fournit une estimation des ventes moyennes de chaque option; le sous-traitant connaît alors une estimation des besoins dans chaque type de MI par période ; ceci va lui permettre de dimensionner chaque stock sur chaque période.

Un des points clef de l'approche modulaire est le partage du produit en modules. L'efficacité de toute l'approche dépend de la bonne compilation de modules qui permet au produit d'être assemblé pendant le temps dont le fabricant dispose et qui couvre toute la diversité, et qui minimise le nombre coûteux de références.

Le problème qui intéresse le fournisseur est le suivant : quels modules réaliser en pré-assemblage, sachant que le temps d'assemblage final est fixé par avance (temps inférieur au temps total de fabrication du composant), que le donneur d'ordre désire l'assemblage exact et cela au coût minimum.

4. Des fonctions sont non utilisées.

Le choix judicieux des modules à créer est donc un problème important, et trouver une solution réalisable n'est pas simple.

5.4 Découpage en modules

Notre action de « Maîtrise de la diversité » se situe donc dans le contexte qui vient d'être présenté. Le fournisseur estime prohibitifs les coûts d'enveloppe dus à la standardisation et souhaite donc fournir des faisceaux électriques à diversité totale. La stratégie de conception modulaire sera donc celle sur laquelle se basera la suite de notre travail. Notre action sera une action de reconception du produit et du process de production.

Le donneur d'ordre refusant de rémunérer les fonctions non nécessaires, le fournisseur s'interroge sur la possibilité de faire de la diversité totale de ses produits, c'est-à-dire ne jamais mettre un seul élément non nécessaire.

La stratégie choisie (figure 5.4) est de :

1. Décomposer les faisceaux électriques en Modules Industriels qui seront réalisés dans les sites délocalisés et produits sur stock,
2. Réaliser un assemblage final sur site de proximité,
3. Livrer en synchrone.

Ainsi le temps critique pour la livraison synchrone est le temps d'assemblage final dans le site de proximité.

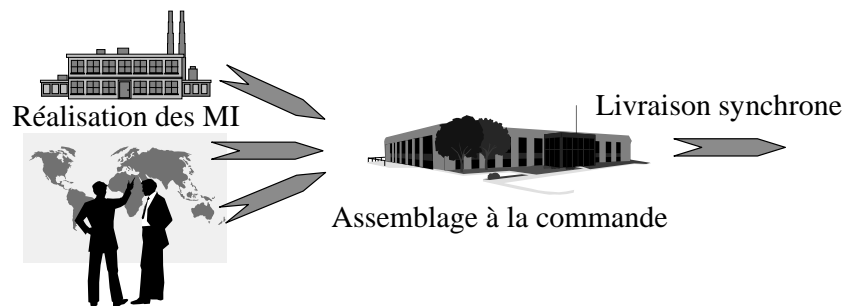


FIG. 5.4 – *Stratégie choisie.*

Compte tenu de la stratégie choisie, un premier indicateur de mesure sera le temps d'assemblage final des faisceaux électriques à partir des MIs. La valeur du temps d'assemblage final devra être inférieure au temps disponible dû à la livraison synchrone.

Cependant le temps d'assemblage final ne suffira pas à qualifier une solution, nous prendrons en compte le nombre de MIs à réaliser. En effet ces MIs représentent un coût pour le fournisseur (fabrication, approvisionnement) qui sera la contre partie de la diminution du temps d'assemblage final et donc du point de différenciation

retardée. Sinon la solution optimale reviendrait à se faire approvisionner toute la combinatoire possible à partir des sites délocalisés en créant des modules correspondants aux produits finaux diversifiés !

Les deux indicateurs sont de nature différente, ils ont été agrégés dans un critère de sélection y à l'aide de la conversion suivante :

$$y = TGAF.\Delta MOD.VA - x.CGR \quad (5.1)$$

Avec

- $TGAF$ = Temps Gagné en Assemblage Final sera détaillé en 5.4.1 et 5.4.2
- x = nombre de références de modules industriels
- CGR = coût de gestion d'une référence de module
- ΔMOD = différence entre le coût de main d'oeuvre direct des sites de proximité et des sites délocalisés
- VA = nombre de véhicules fabriqués par an

Ainsi :

- $TGAF.\Delta MOD.VA$ représente le gain en coût de main d'oeuvre
- $x.CGR$ représente le coût de gestion des nouvelles références
- y est le gain (la perte) financier(e) pour réaliser un découpage modulaire, y représente le coût de délocalisation des MIs

Evaluation de la diversité x

Si, pour une raison quelconque (mise en place, étanchéité, positionnement, fonctionnement, ...), le choix est fait de réaliser un pré-assemblage concernant les fonctions F_1 , F_2 et F_3 qui peuvent — ou non — être sélectionnées par le client, compte tenu du fait que l'on veut pouvoir satisfaire l'ensemble des demandes possibles, et cela au juste nécessaire, sans satisfaire de fonctions non souhaitées par le client, si de plus, chacune des fonctions F_1 , F_2 et F_3 a un impact sur l'assemblage A, alors il faudra créer jusqu'à 7 ($2^3 - 1$) références en assemblage, à savoir F_1 , F_2 , F_3 , $F_1 - F_2$, $F_1 - F_3$, $F_2 - F_3$ et $F_1 - F_2 - F_3$ de manière à pouvoir assurer l'ensemble de la diversité commerciale souhaitée par le donneur d'ordre.

Cependant, compte tenu des contraintes fonctionnelles entre les différentes fonctions, le nombre de références de modules pourra être inférieur. Il faudra bien prendre soin à l'évaluation de x .

Compte tenu du contexte dans lequel nous nous situons, les étapes 4, 5 et 6 de la méthodologie ne s'appliquent pas car le produit est déjà conçu et le process est défini, les MIs seront réalisés dans les sites délocalisés, l'assemblage final s'effectuera dans les sites de proximité.

Les degrés de liberté restant pour la fabrication des faisceaux électriques en prenant en compte les critères définis et la stratégie choisie résident dans la détermination des modules.

Concernant la détermination de ces modules, notre proposition repose sur deux types de découpages modulaires (Cf figure 5.5). Notre apport est d'intégrer le processus du fabricant dans la sélection des modules industriels à réaliser car nous comparons les coûts liés à la diversité provoquée par le découpage modulaire au temps gagné dans le processus d'assemblage final.

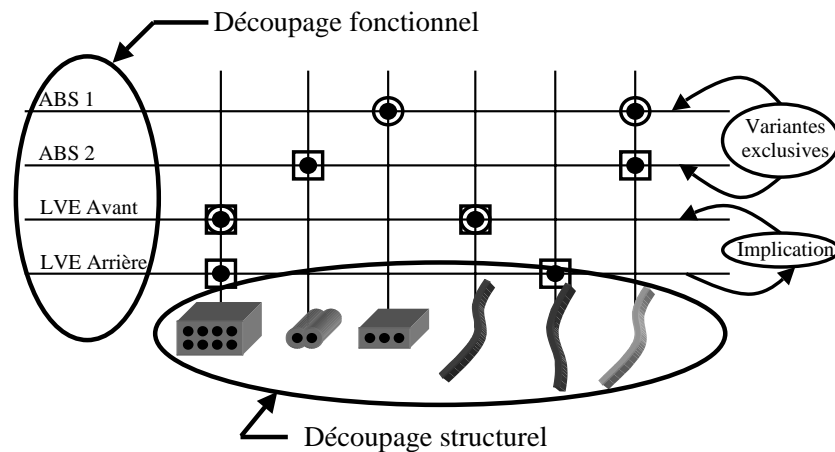


FIG. 5.5 – Propositions de découpage.

Ainsi, les MIs peuvent être créés :

- soit en s'appuyant sur les composants, on parlera de découpage *structurel*,
- soit en s'appuyant sur les fonctions, on parlera de découpage *fonctionnel*.

L'algorithme de découpage modulaire est présenté dans le tableau 5.1.

Deux stratégies de découpage modulaire sont présentées. La première appelée « *découpage structurel* » considère la famille de faisceaux électriques selon sa description physique ; la seconde appelée « *découpage fonctionnel* » considère les faisceaux électriques par les fonctions qu'ils doivent satisfaire.

Algorithme de découpage modulaire

1. Le point de départ est tel que les faisceaux électriques sont entièrement réalisés dans les sites de proximité. Ainsi le temps d'assemblage final de départ est maximum, car tout le travail d'assemblage reste à faire, en revanche le coût des références des modules industriels est nul, car il n'y a pas de modules industriels.
2. Déterminer l'ensemble des pré-assemblages candidats. L'une des deux stratégies suivante est disponible :
 - découpage structurel,
 - découpage fonctionnel.
3. Pour chacun des pré-assemblages candidats calculer les critères d'évaluation :
 - temps gagné en assemblage final : TGAF,
 - nombre de références de modules : x .
4. Sélectionner le module industriel qui offre le meilleur y à l'aide de la conversion (5.1).
5. Recommencer en 2) jusqu'à ce qu'un des critères d'arrêt soit atteint
 - temps d'assemblage final \leq temps cible,
 - coût de gestion des nouvelles références \leq coût maximum d'investissement autorisé,
 - plus de découpage possible.

TAB. 5.1 – *Algorithme de découpage modulaire.*

5.4.1 Découpage structurel

L'ensemble des faisceaux électriques à produire est modélisé par un faisceau électrique générique avec options, variantes et versionnement plus un ensemble de règles qui décrivent les contraintes entre les composants.

Le faisceau électrique générique est décrit comme un ensemble de câbles. De ce point de vue, un module pré-assemblé, appelé module industriel (MI) sera alors un sous ensemble de câbles produits dans les sites délocalisés. Le faisceau électrique générique est modélisé par un arbre. Dans chaque branche sont décrits les fils passant à l'intérieur (voir figure 5.6).

L'idée est de partager le faisceau électrique générique en deux sous faisceaux électriques génériques indépendants, l'un d'eux sera le MI produit dans les sites déloca-

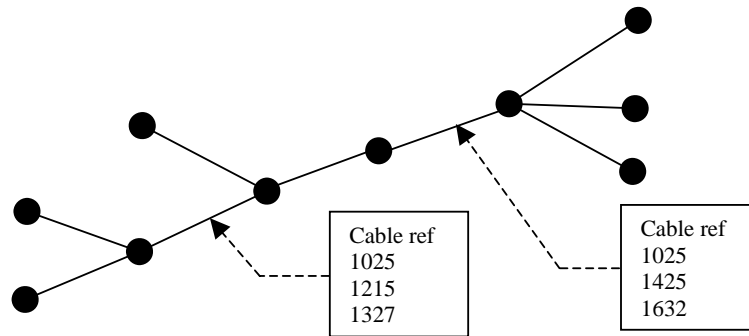


FIG. 5.6 – Description structurelle d'un faisceau électrique.

lisés, l'autre sera la spécialisation des MIs dans le but de créer un faisceau électrique spécifique pour le produit final spécifique (voir figure 5.7) lors de l'assemblage final.

Une fois le faisceau électrique spécifique partagé en différents modules, si le temps d'assemblage final est supérieur à la limite, le module de spécialisation sera partagé une autre fois en deux modules et ainsi de suite jusqu'à ce que le temps d'assemblage final soit inférieur à la limite.

En pratique le professionnel doit sélectionner la racine de l'arbre par le choix d'un noeud où le faisceau électrique générique ne sera pas partagé, en général un noeud à l'intérieur d'une gaine (figure 5.7). Ce noeud permet ensuite à l'algorithme de découpage de parcourir tout le faisceau électrique jusqu'aux extrémités, pour évaluer les différentes solutions. Ainsi, chaque noeud est évalué en temps d'assemblage final qu'il est possible de gagner et coût de création des MIs.

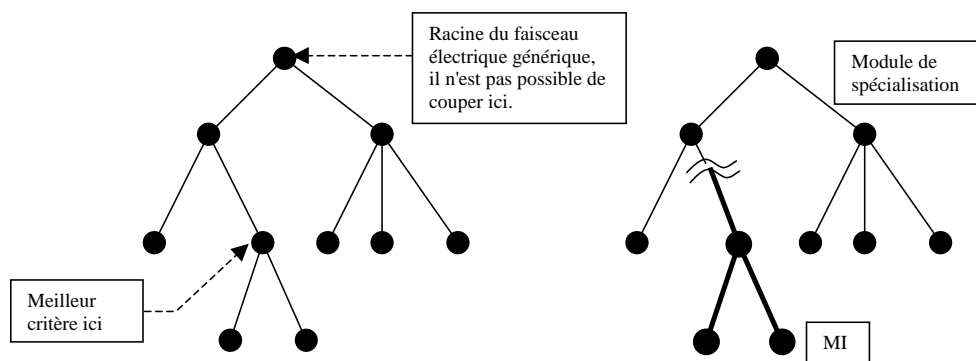


FIG. 5.7 – Découpage structurel d'un faisceau générique.

Le Temps Gagné en Assemblage Final (TGAF) est le temps de production des MIs car ils seront produits sur stock dans les sites délocalisés, et leur temps de fabrication n'entre donc pas dans le temps d'assemblage final. Ce TGAF est calculé de la manière suivante :

$$TGAF = \sum_{i=0}^{nb} trb(i) + \sum_{j=0}^{nn} trn(j) \quad (5.2)$$

Avec :

- nb : nombre de branches
- nn : nombre de noeuds
- $trb(i)$: temps de réalisation de la branche i
- $trb(i) = \text{type d'habillage de la branche } i * \text{longueur de la branche } i$
- $trn(j)$: temps de réalisation du noeud j dépend directement du type de noeud

Le critère y est alors évalué à chaque noeud et la meilleur alternative est sélectionnée. Le faisceau électrique générique est alors partagé en deux parties (voir figure 5.7) et certaines branches du module de spécialisation sont interdites pour un partage futur car des câbles avec une extrémité dans le MI ont l'autre extrémité dans la seconde partie.

5.4.2 Découpage Fonctionnel

Comme ci-dessus, l'ensemble des faisceaux électriques à fabriquer est modélisé par un faisceau électrique générique avec options, variantes et versionnement plus un ensemble de règles qui décrivent les contraintes entre les fonctions. Le faisceau électrique générique est décrit comme un ensemble de fonctions (Cf figure 5.8).

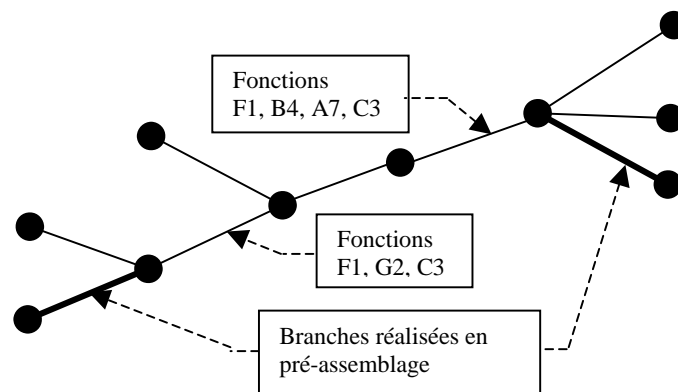


FIG. 5.8 – Description fonctionnelle d'un faisceau électrique.

Dans cette stratégie les MIs seront des sous-ensembles de fonctions qui seront réalisées dans les sites délocalisés.

Toutes les fonctions sont extraites du faisceau électrique générique ; pour chaque ensemble de fonctions qui apparaît dans une branche, une évaluation du temps d'assemblage final pouvant être économisé et du coût généré par la création des MIs sont calculés.

Alors avec le même critère que précédemment, une sélection de la meilleure alternative est opérée. Le faisceau électrique générique est séparé en deux modules, et si le temps d'assemblage final est supérieur à la limite, un autre partage est effectué sur le module de spécialisation.

Dans la stratégie fonctionnelle le TGAF se calcule par la formule suivante :

$$TGAF = \sum_{i=0}^{nb} trb(i) + \sum_{j=0}^{nn} trn(j) \quad (5.3)$$

Avec:

- nb : nombre de branches
- nn : nombre de noeuds
- $trb(i)$: temps de réalisation de la branche i
- $trb(i) = \begin{cases} \cdot \text{type d'habillage de la branche}(i) * \text{longueur de la branche}(i) \\ \cdot \text{si toutes les fonctions de la branche } i \text{ appartiennent au module} \\ \cdot 0 \text{ sinon} \end{cases}$
- $trn(j)$: temps de réalisation du noeud j
- $trn(j) = \begin{cases} \cdot \text{type de noeud } (j) \\ \cdot \text{si toutes les branches partant de } j \text{ appartiennent au module} \\ \cdot 0 \text{ sinon} \end{cases}$

5.5 Résultats

L'algorithme présenté dans le tableau 5.1 a été mis en oeuvre avec les deux types de découpage modulaire (*structurel* et *fonctionnel*). La validité des résultats est confrontée en permanence avec le cas industriel sur lequel s'appuie la problématique.

Les résultats obtenus sur un faisceau électrique représentatif sont représentés figure 5.9 et figure 5.10 [7, 8]. La figure 5.9 représente l'évolution du temps d'assemblage final et du coût obtenus à l'aide de la stratégie de découpage structurel.

Les résultats de la figure 5.10 représentent l'évolution des mêmes paramètres sur le même faisceau électrique réalisé cette fois à l'aide du découpage fonctionnel.

Ces deux figures (5.9 et 5.10) représentent en abscisse le numéro de l'itération considérée, ceci permet de retrouver la composition du (des) module(s) créé(s), en ordonnée, les temps d'assemblage finaux obtenus (en trait plein) ainsi que les coûts générés par la diversité des modules créés (en ligne pointillé).

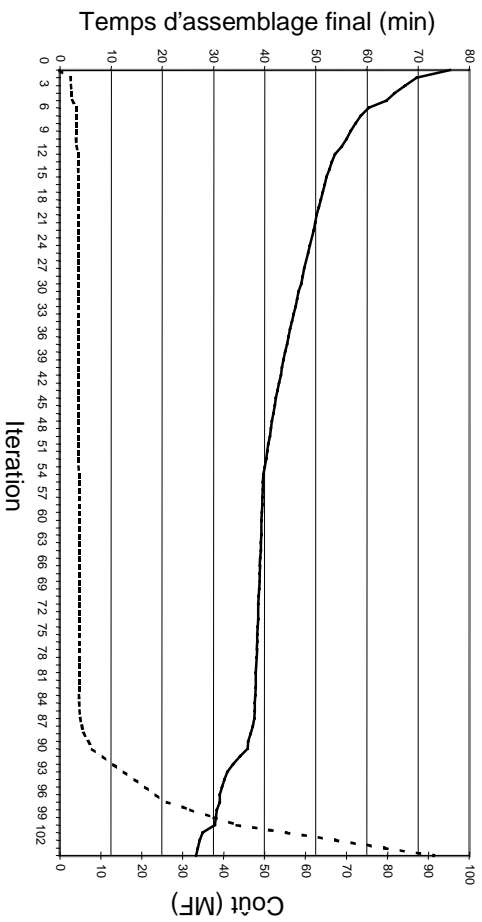


FIG. 5.9 – Evolution de la stratégie structurale.

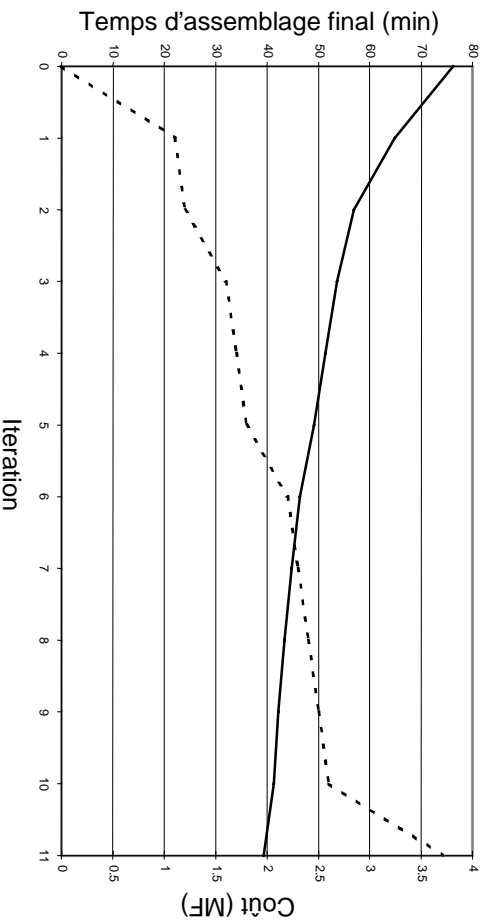


FIG. 5.10 – Evolution de la stratégie fonctionnelle.

L'étude de ces deux courbes montre dans les deux cas une diminution significative de temps d'assemblage final lié à une augmentation du coût des références à gérer.

Parmi les faits à noter, il y a tout d'abord la baisse significative du temps d'assemblage final qui part de la valeur maximale correspondant à l'assemblage réalisé au cas par cas, sans modules industriels (le coût de gestion des références de MI est alors nul), pour aller jusqu'à un temps d'assemblage final minimal non nul représentant la limite inférieur du temps d'assemblage final qu'il est possible d'obtenir (le coût de gestion des références de MI est alors maximal) et qui correspond à la partie du faisceau électrique qui ne sera pas réalisée sous forme de MI dans les sites délocalisés.

Les figures 5.11 et 5.12 [7, 8] représentent l'évolution du coût de délocalisation des références de MI en fonction du temps d'assemblage final pour les stratégies de

découpage structurel (figure 5.11) et fonctionnel (figure 5.12) pour le même faisceau électrique.

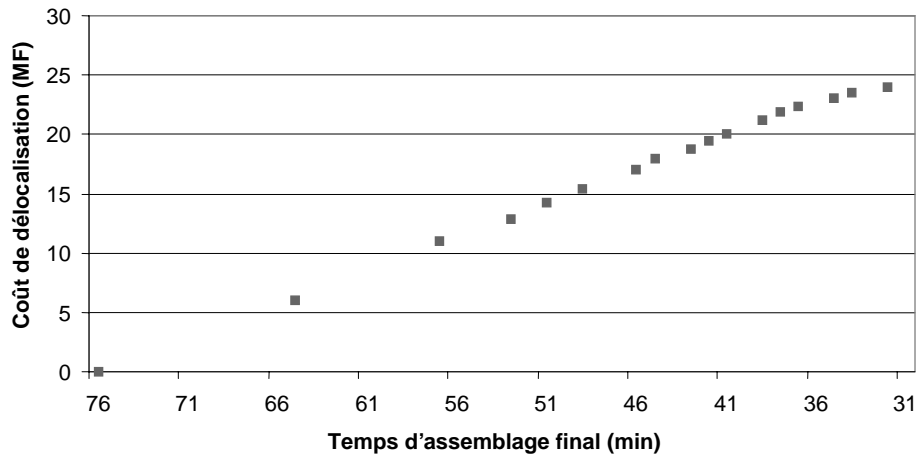


FIG. 5.11 – *Découpage structurel.*

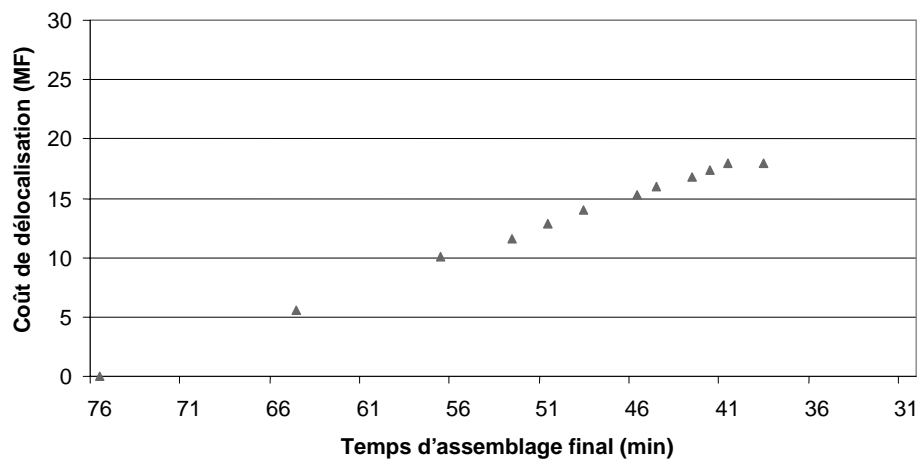


FIG. 5.12 – *Découpage fonctionnel.*

Ces deux figures montrent combien il en coûte au fournisseur de produire les faisceaux électriques en dessous d'une certaine limite de temps avec chaque stratégie. Grâce à ce type de représentation, le fournisseur peut négocier avec le donneur d'ordres sur le tarif et le délai qu'ils projettent. Le fournisseur peut proposer à son donneur d'ordres de modifier son processus pour augmenter le délai de livraison synchrone, et ainsi diminuer les tarifs d'achats des faisceaux électriques.

Dans la représentation suivante (figure 5.13), les deux résultats de découpage modulaire ont été placés à la même échelle et tronqué en ce qui concerne la stratégie structurelle. Le trait plein représente la stratégie structurelle, la ligne pointillé représente la stratégie fonctionnelle.

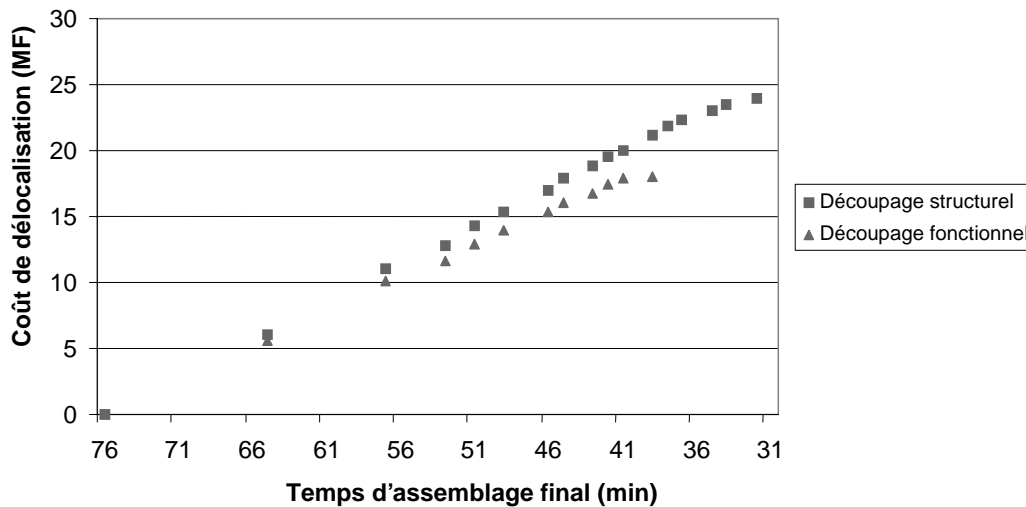


FIG. 5.13 – Comparaison des deux découpages modulaires.

On peut remarquer que pour les hautes limites de temps, la stratégie fonctionnelle est toujours moins onéreuse que la stratégie structurelle. Cependant dans le cas où le donneur d'ordres souhaite diminuer le temps d'assemblage final en dessous de la limite minimale de la stratégie fonctionnelle, le fournisseur devra adopter une stratégie structurelle pour avoir la possibilité de diminuer encore le temps d'assemblage final.

5.6 Conclusions

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la mise en oeuvre de la méthodologie présentée au chapitre 4 sur un des cas d'étude présentés en introduction.

La problématique de conception a été précisée : les contraintes du donneur d'ordres, celles du fournisseur ainsi que celles liées aux composants au coeur de la relation donneur d'ordres–fournisseur.

Dans la section 5.4, deux algorithmes de découpage modulaire ont été présentés. Ces deux algorithmes permettent de réaliser des faisceaux électriques à diversité totale, afin de pouvoir les livrer en synchrone.

Le premier algorithme utilise une représentation structurelle des faisceaux électriques. Les modules industriels proposés sont des assemblages de composants.

Le deuxième algorithme utilise une représentation fonctionnelle des faisceaux électriques, les modules industriels proposés sont cette fois des ensembles de fonctions.

Enfin ce chapitre se termine par une étude comparative des deux découpages modulaires.

Notre apport ici a été d'intégrer le process du fabricant dans la sélection des MIs à réaliser car nous comparons les coûts liés à la diversité provoquée par le découpage modulaire au temps gagné dans le processus d'assemblage final.

Conclusions et perspectives

Conclusions

Ce travail de thèse se situe dans le cadre de la conception de produits à forte diversité. L'étude présentée est essentiellement basée sur l'étude de la littérature et l'analyse de cas industriels pour en déduire un apport méthodologique. Cet apport méthodologique est validé sur un cas d'étude.

Dans le premier chapitre, une étude sur la diversité des produits industriels est présentée. Les origines de la diversité des produits sont étudiés en considérant l'évolution du marché, la stratégie de développement industriel, les stratégies de marketing et les logiques locales.

Ensuite, le problème de la variété optimale est traité à travers les approches marketing, économique et industrielle.

Ce chapitre montre ensuite trois cas d'étude qui présentent des problématiques d'industriels faisant face à la diversité des produits en s'attachant à la manière dont le problème a été géré pour chaque cas.

Dans le second chapitre, l'intérêt porte sur la représentation des familles de produits. Après une introduction sur le problème de modélisation de la diversité, la structuration des données techniques est présentée à travers la codification des objets techniques et la classification des objets techniques.

Différents types de liens permettant la représentation des familles de produits et des contraintes sont décrits.

Ensuite les modèles génériques de familles de produits et de configuration ont été présentés à travers les travaux les plus représentatifs du domaine.

Un intérêt particulier est porté à la norme STEP, notamment à la manière dont les protocoles d'application AP 203 et AP 214 supportent la représentation des options et variantes.

Enfin une synthèse fait apparaître les points forts et faiblesses de la représentation des familles de produits en contexte de maîtrise de la diversité.

Dans le troisième chapitre, l'état de l'art sur la réalisation des familles de produits est fait. Plus particulièrement l'étude s'intéresse aux méthodologies de conception des familles de produits, aux indicateurs proposés pour évaluer les familles de produits ainsi qu'aux outils aidant à la conception des familles de produits tels que les gammes génériques d'assemblage et la technologie de groupes.

Puis les outils supportant la différenciation retardée sont présentés à travers la personnalisation par l'utilisateur, la différenciation perceptuelle, la différenciation au stade de la distribution, la standardisation, la conception modulaire et enfin la restructuration des processus.

Le quatrième chapitre constitue la méthodologie de conception des familles de produits. Le contexte précis concerné par cette méthodologie est donné. Les différents niveaux de diversité utilisés par la méthodologie sont énoncés (diversité fonctionnelle, technique et process), leur partage du domaine est montré. Une structuration des outils de conception est faite autour de ce partage du domaine.

La méthodologie de conception proposée est énoncée, les huit points qui la constituent sont détaillés.

Afin d'aider à l'acquisition des données nécessaires à travers les différentes étapes de la méthodologie, les outils de *Data Mining* sont présentés dans leur cadre général puis autour de la conception des familles de produits.

Dans le cinquième chapitre, un des cas d'études sur lesquels s'est basée la problématique est repris. Le contexte de conception est tout d'abord précisé, ensuite la méthodologie proposée au chapitre 4 est appliquée à ce cas d'étude sur la maîtrise de la diversité des faisceaux électriques automobile. Le contexte est tel que le fournisseur doit réaliser pour son donneur d'ordres des faisceaux électriques à diversité totale et les livrer en synchrone.

Deux algorithmes ont été présentés qui proposent un ensemble de préassemblages pour les faisceaux électriques. Les algorithmes utilisent une description physique ou fonctionnelle de la famille de faisceaux électriques et fournissent un ensemble de modules à produire dans le but de diminuer le temps d'assemblage final, sachant que l'on doit produire une diversité totale en un temps court et pour un coût minimum.

Dans les deux cas, un compromis est recherché entre le coût de gestion des modules industriels supportant la diversité et le temps gagné en assemblage final.

Les deux algorithmes ont été mis en oeuvre à travers une application informatique. Cette application informatique permet de définir un découpage modulaire des faisceaux électriques. Les résultats ont été présentés et les deux stratégies comparées.

Les premiers résultats (figure 5.9 et figure 5.10) montrent qu'il existe un fort potentiel d'amélioration possible en permettant une forte diminution du temps d'assemblage final par la création de modules de constituants réalisés à bas prix, et cela sans diminuer la diversité des produits finaux mis sur le marché.

Ces résultats permettent à la fois au sous-traitant et au donneur d'ordres de discuter leur relation; ils peuvent ajuster leur temps de synchronisation.

La démarche méthodologique suivie a été la suivante (représentée figure 5.14) :

1. Observation et analyse d'une problématique industrielle centrée sur la maîtrise de la diversité à partir de trois cas industriels.
2. Généralisation de la problématique industrielle à la maîtrise de la diversité des produits.

3. Analyse bibliographique de ce qui est proposé dans la littérature pour résoudre le problème général. Nous en avons tiré des modélisations, des outils et des méthodologies.
4. Il en est ressorti quelques manques que nous avons tenté de combler en partie, en proposant tout d'abord une distinction des types de diversité produit. A partir de cette distinction, nous avons regardé comment se situaient les outils de la littérature, enfin nous avons proposé une méthodologie visant à résoudre le problème de réalisation de produits à forte diversité au niveau général.
5. Application de la méthodologie proposée au niveau général sur un des cas d'étude desquels la problématique a été extraite.

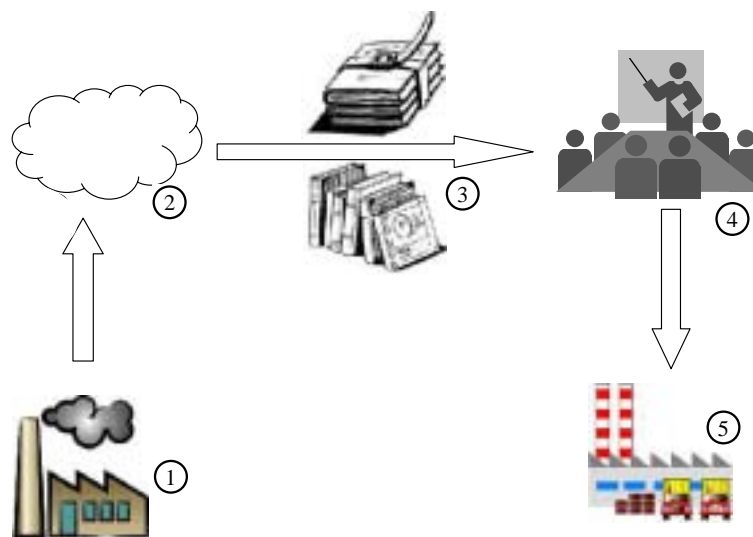


FIG. 5.14 – Démarche méthodologique.

Le travail présenté a été validé sur un exemple industriel à l'aide d'un algorithme, visant à retarder le point de différenciation d'un produit à forte diversité pour lequel on souhaite pouvoir fournir individuellement chaque option et variante en minimisant le coût de gestion des références, le tout devant être assemblé sous contrainte d'un temps maximal fixé par avance.

Pour cela, deux types de découpage modulaire ont été mis en oeuvre :

1. Un découpage structurel qui s'appuie sur la structure physique du faisceau, c'est à dire au niveau des composants (fils, connecteurs, ...),
2. Un découpage fonctionnel qui recherche parmi les fonctions du faisceau celles qui peuvent être préassemblées dans un module.

Perspectives

Ces travaux sur la conception de produits orientés vers la maîtrise de la diversité, ouvrent de nombreuses perspectives. Nous avons partagé ces perspectives en deux catégories, celles faisant suite à la méthodologie proposée au chapitre 4 et celles faisant suite au cas d'étude approfondi au chapitre 5.

Concernant la méthodologie de conception :

La première perspective à considérer est bien sûr la validation de la méthodologie de conception sur d'autres cas d'étude pour s'assurer de la généralité de l'approche, ou si ce n'est pas le cas pour faire évoluer la méthodologie. En effet, la validation sur le cas d'étude présenté est un cas particulier avec son contexte et ses spécificités qui ne suffisent pas pour généraliser. Des indicateurs quantitatifs pertinents devront être définis

L'application de la méthodologie sur différents cas d'étude peut faire ressortir différentes classes de problèmes pour lesquels des propositions spécifiques pourront être discutées.

L'ensemble des indicateurs proposés pourra bien entendu être étendu en prenant en compte un ensemble plus complet de paramètres.

Concernant le cas d'étude :

La première évolution que nous proposons de considérer consiste en une évaluation de l'effet enveloppe. Une tolérance d'effet enveloppe pourrait être intégrée pour diminuer le nombre très significatif de références dû à la différenciation totale. Une évolution des caractéristiques de diversité en fonction du taux d'enveloppe accepté peut permettre de trouver la valeur optimale du taux d'enveloppe pour une famille de faisceaux donnée.

L'effet d'enveloppe pourra porter sur les pourcentages prévisionnels de vente, prendre en compte les coûts des composants considérés et intégrer les corrélations de monte des options.

La représentation actuelle des faisceaux électrique est binaire, ce qui signifie que chaque option ou variante est ou n'est pas dans le produit final. Une évolution du modèle pourrait considérer des éléments évolutifs. Au lieu de considérer qu'une version d'air conditionné nécessite telle référence de câble pour son alimentation, alors qu'une autre version d'air conditionné nécessite telle autre référence de câble, il pourrait être judicieux de modéliser la section du câble en fonction de la version d'air conditionné.

Une évolution envisagée est un choix plus judicieux de l'ensemble des modules en recherchant un optimum global plutôt qu'une suite d'optimum locaux, une résolution de type Branch and Bound semble envisageable.

Plus que la recherche d'un optimum global, la recherche d'une solution robuste semble plus perspicace dans un cadre industriel. En effet compte tenu de l'évolution rapide des différentes technologies, une version de faisceau électrique a une faible espérance de vie (de l'ordre de trois mois). Une solution optimale pour une certaine version de faisceaux électrique risque d'être sous-optimale pour la version suivante. Ainsi

une solution de découpage modulaire robuste envers les évolutions de fonction paraît perspicace.

La recherche d'une solution robuste pourrait aussi concerner les taux de monte. Les taux de monte sont communiqués par le donneur d'ordres en fonction d'estimations prévisionnelles de monte, cependant une proposition peut devenir peu performante si les taux prévisionnels sont très loin de ce qui est réellement commandé.

Les corrélations de monte entre les fonctions ne sont actuellement pas communiqués au fournisseur. Une étude de type *Data Mining* sur les commandes réellement passées par les clients pourra faire apparaître ces corrélations, ceci pouvant être utilisé pour diminuer la diversité technique en diminuant le nombre de modules industriels créés en prenant en compte les taux de monte des corrélations dans l'effet enveloppe.

Bibliographie

- [1] ISO 10303-1. Industrial Automation Systems and Integration - Product Data Representation and Exchange - Part 1 : Overview and Fundamental Principles. *ISO - International Organization for Standardisation, Geneva, 1994.*
- [2] ISO 10303-11. Industrial Automation Systems and Integration - Product Data Representation and Exchange - Part 11 : Description Methods : The EXPRESS Language Reference Manual. *ISO - International Organization for Standardisation, Geneva, 1994.*
- [3] ISO 10303-203. Industrial Automation Systems and Integration - Product Data Representation and Exchange - Part 203 : Application Protocol : Configuration Control Design. *ISO - International Organization for Standardisation, Geneva, 1994.*
- [4] ISO 10303-214. Industrial Automation Systems and Integration - Product Data Representation and Exchange - Part 214 : Application Protocol : Core Data for Automotive Mechanical Design Processes. *ISO - International Organization for Standardisation, Geneva, 1998.*
- [5] B. Agard. Développement d'un logiciel de gestion des options et variantes pour des capteurs de température sous Dbase 5. Rapport de stage DUT, IUT de Bourges, 1995.
- [6] B. Agard. Nomenclature de produit et diversité : étude comparative des approches. Mémoire de DEA, Ecole Nationale Supérieure de Génie Industriel, 1999. ENSGI-INPG.
- [7] B. Agard et M. Tollenaere. Conception modulaire de produits à forte diversité. *Colloque IPI*, pages 101–108, Janvier 2002. Antrains, France.
- [8] B. Agard et M. Tollenaere. Design of wire harnesses for mass customization. *IDMME 2002*, Mai 2002. Clermont-Ferrand, France.
- [9] E. Aguirre et B. Raucent. Economic comparison of wire harnesses assembly systems. *J. Mfg Syst.*, 13:276–288, 1994.
- [10] M. Aldanondo, J. Lamothe, et H. Hamou. Configurator and CAD modeler : gathering the best of two worlds. *IJCAI Workshop on Configuration, Seattle, USA*, 2001.

- [11] S. Arbouy, A. Bezos, A.F. Cutting-Decelle, P. Diakonoff, P. Germain-Lacour, J.P. Letouzey, et C. Veil. *STEP Concepts Fondamentaux*. AFNOR, 1994.
- [12] A.G. Büchner, S.S. Anand, et J.G. Hugues. Data mining in manufacturing environments: Goal, techniques and applications. *Informatics and Control*, 6(4):319–328, 1997.
- [13] H. Ben-Aissa. La complexité au montage véhicule : de la production à la conception. *Revue Francaise de Gestion Industrielle*, 19(3):77–94, 2000.
- [14] M.-J.A. Berry et G. Linoff. *Data Mining : Techniques appliquées au marketing, à la vente et aux services clients*. Informatiques. InterEdition, 1997.
- [15] O. Briant. *Etude théorique et numérique du problème de la gestion de la diversité*. Thèse de Doctorat, INPG, 2000.
- [16] J. Browne, J. Haiken, et J. Shivnan. *Les systèmes de production dans un environnement CIM*. AFNOR, 1994.
- [17] L. Bruce. The bright new worlds of BENETTON. *International Management*, November:24–35, 1987.
- [18] C. Cabut. Conception modulaire de faisceaux électriques. Projet de fin d'étude, Ecole Nationale Supérieure de Génie Industriel, 1997.
- [19] C. Cabut. Simulation du flux logistique global et de l'assemblage final de faisceaux électriques modulaires - Outils méthodologiques d'aide à la conception. Mémoire de DEA, Ecole Nationale Supérieure de Génie Industriel, 1997.
- [20] C. Cerezuela. *Contribution à l'élaboration de méthodes et d'outils d'aide à la conception et à la fabrication dans une perspective d'ingénierie concurrente : Le cas du câblage électrique*. Thèse de Doctorat, Univ. Aix Marseille III, 1996.
- [21] F. Chambolle. *Conception de produits mécaniques - Chap 18: Normes et échange de données : le standard STEP*, pages 435–454. Hermes, 1998. Sous la direction de M. Tollenaere.
- [22] F. Chambolle. *Un modèle produit piloté par les processus d'élaboration : Application au secteur automobile dans l'environnement STEP*. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale Paris, 1999.
- [23] P. Child, R. Diederichs, F.-H. Sanders, et S. Wisniowski. The management of complexity. *Sloan Management Review*, pages 73–80, 1991.
- [24] B. Cialvaldini et J.-L. Loubet. La diversité dans l'industrie automobile française : Hésitations et enjeux. Regards croisés de l'historien et du gestionnaire. *Gérer et comprendre*, 41:4–19, décembre 1995.
- [25] J.B. Dahmus et J.P. Gonzalez-Zugasti. Modular product architecture. *Proceedings of DETC'00: ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, September 10-13, Baltimore, Maryland*, 2000.

- [26] J.B. Dahmus, J.P. Gonzalez-Zugasti, et K. Otto. Modular product architecture. *Design Studies*, 22:409–424, 2001.
- [27] P. Dietz et A. Ort. The use of ISO 13584 methodology for building part hierarchies in practice. *European PDT Days 1997*, pages 83–89, 1997.
- [28] L. Dupont. *La Gestion Industrielle : Concepts et Outils*. Hermès, Paris, 1998.
- [29] L. Dupont, M. Erol, G. Cormier, et N. Turkkan. La standardisation des composants : modèles et algorithmes. 3^{me} *Congrès International de Génie Industriel*, pages 671–680, Mai 1999.
- [30] F. Eckstein. La différenciation retardée : Etude théorique et application dans le cadre de la fabrication de faisceaux électriques. Technische studienarbeit, Ecole Nationale Supérieure de Génie Industriel, 2000.
- [31] F. Erens et K. Verhulst. Architectures for product families. *Computers in Industry*, 33:165–178, 1997.
- [32] M. Erol. *Prise en compte de la flexibilité dans la planification dynamique*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1999.
- [33] U.M. Fayyad, G. Piatetsky-Shapiro, P. Smyth, et R. Uthurusamy. *Advances in knowledge discovery and data mining*. AAAI Press / The MIT Press, 1996.
- [34] M.L. Fisher et C.D. Ittner. The impact of product variety on automobile assembly operations: Empirical evidence and simulation analysis. *Management Science*, 45(6):771–786, 1999.
- [35] T. Fouque. A la recherche des produits flexibles. *Revue Française de Gestion*, mars-avril-mai(123):80–87, 1999.
- [36] E. Garfield. A Tribute to S.R. Ranganathan: Part 1. Life and Works. *Essays of an Information Scientist*, 7:37–44, 1984.
- [37] E. Garfield. A Tribute to S.R. Ranganathan: Part 2. Contribution to Indian and International Library Science. *Essays of an Information Scientist*, 7:45–49, 1984.
- [38] N. Girard. Développer la structuration d’une offre nouvelle en s’appuyant sur une démarche interne s’intégrant dans le processus industriel de traitement de la commande. Rapport de stage ingénieur adjoint, Ecole Nationale Supérieure de Génie Industriel, 1998.
- [39] J. Gonzalez-Zugasti et K. Otto. Modular platform-based product family design. *Proceedings of DETC’00 ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference Baltimore, Maryland, September 10-13, 2000*.

- [40] J. Gonzalez-Zugasti, K. Otto, et J. Baker. A method for architecting product platforms with an application to interplanetary mission design. *Proceedings of 1998 DETC*, 1998. 1998 ASME Design Automation Conference, Atlanta, GA, September 13-16.
- [41] J. Gonzalez-Zugasti, K. Otto, et J. Baker. Assessing value for product family design and selection. *Proceedings of the 25th Design Automation Conference*, 1999. ASME Design Engineering Technical Conferences, Las Vegas, Nevada, September 12-15.
- [42] J. Gonzalez-Zugasti, K. Otto, et J. Baker. A method for architecting products platforms. *Research in Engineering Design*, 12:61–72, 2000.
- [43] S. Gupta et V. Krishnan. Product family-based assembly sequence design methodology. *IEEE Transactions*, 30:933–945, 1998.
- [44] H. Hamou, M. Aldanondo, J. Lamothe, et E. Caillaud. Aide à la conception de produits: Approche assistée par la configuration. *4^{me} Congrès International Franco-Québécois de Génie Industriel - Aix-Marseille*, 2001.
- [45] H. Hamou, E. Caillaud, J. Lamothe, et M. Aldanondo. Knowledge for product configuration. *International Conference on Engineering Design, ICED 01 Glasgow, August 21-23*, 2001.
- [46] Y. Harani. *Une approche multi-modèles pour la capitalisation des connaissances dans le domaine de la conception*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1997.
- [47] D. He, A. Kusiak, et T.L. Tseng. Delayed product differentiation : a design and manufacturing perspective. *Computer-Aided Design*, 30(2):105–113, 1998.
- [48] D.W. He et A. Kusiak. Design of assembly systems for modular products. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 13(5):646–655, 1997.
- [49] C.C. Huang et A. Kusiak. Modularity in design of products and systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans*, 28(1):66–77, 1998.
- [50] C.C. Huang et A. Kusiak. Synthesis of modular mechatronic products: a testability perspective. *IEEE/ASME Translation on Mechatronics*, 4(2):119–132, 1999.
- [51] N. Hyer et U. Wemmerlöv. Group technology and productivity. *Harvard Business Review*, July-August:140–149, 1984.
- [52] K. Ishii, C. Juengel, et C. Eubanks. Design for product variety : Key to product line structuring. *Proceedings of 1995 ASME Design Theory and Methodology, September, Boston, MA*, 1995.
- [53] J. Jiao et M. Tseng. A methodology of developing product family architecture for mass customization. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 10:3–20, 1999.

- [54] S. Kalpakjian et R.-R. Schmid. *Manufacturing Engineering and Technology, Fourth Edition*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2000.
- [55] S. Kekre et K. Srinivasan. Broader product line: a necessity to achieve success? *Management Science*, 36(10):1216–1231, 1990.
- [56] I. Kocher et P. Rolland. Quand les structures dessinent les produits. la diversité dans l'industrie automobile. *Gérer et comprendre*, 39:38–48, 1995.
- [57] S. Kota, K. Sethuraman, et R. Miller. A metric for evaluating design commonality in product families. *Journal of Mechanical Design*, 122:403–410, 2000.
- [58] A. Kusiak. *Engineering Design: Products, Processes, and Systems*. Academic Press, San Diego, CA., 1999.
- [59] A. Kusiak. *Computational Intelligence in Design and Manufacturing*. Wiley-Interscience, New York, NY, 2000.
- [60] A. Kusiak. Decomposition in data mining: An industrial case study. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 23(4):345–353, October 2000.
- [61] A. Kusiak et C.C. Huang. Development of modular products. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technologie, Part A*, 19(4):523–538, 1996.
- [62] H.L. Lee. Effective inventory and service management through product and process redesign. *Operations Research*, 44(1):151–159, 1996.
- [63] H.L. Lee et C.S. Tang. Modelling the costs and benefits of delayed product differentiation. *Management Science*, 43(1):40–53, 1997.
- [64] H.L. Lee et C.S. Tang. Variability reduction through operations reversals. *Management Science*, 44(2):162–171, 1998.
- [65] B. Lefebvre. *La transformation des cultures techniques, Merlin Gerin 1920-1996*. Collection « Logiques Sociales ». L'Harmattan, 1998.
- [66] R.J. Lewis. *Activity-based costing for marketing and manufacturing*. Westport, Conn., 1993.
- [67] J.L. Loubet. Un exemple de sortie de crise : Citroën (1935-1938). *Les Actes du Gerpisa*, numero 16 - Ford et les autres entre les deux guerres, juillet 1995.
- [68] J.-P. MacDuffie, K. Sethuraman, et M.-L. Fisher. Product variety and manufacturing performance : Evidence from the international automotive assembly plant study. *Management Science*, 42(3):350–369, 1996. March.
- [69] M. Martin et K. Ishii. Design for variety : A methodology for understanding the costs of product proliferation. *Proceedings of 1996 ASME Design Engineering Technical Conferences, August 18-22, Irvine, California*, 1996.

- [70] M. Martin et K. Ishii. Design for variety : Development of complexity indices and design charts. *Proceedings of 1997 ASME Design Engineering Technical Conferences, Sept. 14-17, Sacramento, CA, 1997.*
- [71] M.V. Martin. *Design for Variety: A methodology for developing Product Platform Architectures.* Thèse de Doctorat, Stanford University, 1999.
- [72] M.V. Martin et K. Ishii. Design for variety: A methodology for developing product platform architectures. *Proceedings of DETC2000, 2000 ASME Design Engineering Technical Conferences, Sept. 10-13, Baltimore, MD, 2000.*
- [73] M. Maurino. *La gestion des données techniques, technologie du concurrent engineering.* Collection « Organisation industrielle ». Masson, 1994.
- [74] C. McMahon et J. Browne. *CAD CAM 2nd Edition. Principles, Practice and Manufacturing Management.* Addison-Wesley, 1998.
- [75] C. Midler. *L'auto qui n'existait pas.* Inter-Editions, 1993.
- [76] T. Männistö, H. Peltonen, A. Martio, et R. Sulonen. Modeling generic product structures in STEP. *Computer-Aided Design*, 30(14):1111–1118, 1998.
- [77] T. Männistö, H. Peltonen, et R. Sulonen. View to product configuration knowledge modeling and evolution. *Configuration-papers from the 1996 AAAI Fall symposium*, pages 111–118, 1996. ed. Boi Faltings and Eugene Freuder, AAAI Press.
- [78] T. Männistö et R. Sulonen. Evolution of schema and individuals of configurable products. *Advances in Conceptual Modeling*, Lecture notes in Computer Science, 1999.
- [79] T. Männistö, T. Soininen, J. Tiihonen, et R. Sulonen. Framework and conceptual model for reconfiguration. *Proceedings of the AAAI'99 Workshop on Configuration*, AAAI Technical Report, 1999. AAAI Press.
- [80] J.C. Moisdon. *Du mode d'existence des outils de gestion - Les instruments à l'épreuve de l'organisation.* Editions Seli Arslan, Paris, 1997.
- [81] F.M. Ng, J.M. Ritchie, et J.E.L. Simmons. The design and planning of cable harness assembly. *Proc Instn Mech Engrs*, 214 Part B, 2000.
- [82] F.J. O'Donnell, K.J. MacCallum, T.D. Hogg, et B. Yu. Product structuring in a small manufacturing enterprise. *Computers in Industry*, 31:281–292, 1996.
- [83] K.A. Olsen, P. Saetre, et A. Thorstenson. A procedure-oriented generic bill of materials. *Computers Ind. Engng*, 32(1):29–45, 1997.
- [84] H. Peltonen, T. Männistö, T. Soininen, J. Tiihonen, A. Martio, et R. Sulonen. Concepts for modeling configurable products. *European PDT Days 1998*, pages 189–196, 1998.

- [85] J.M. Pointet. Cohérence de la stratégie produit renault. *Gérer et comprendre*, 41:43–55, 1997.
- [86] J.M. Pointet. Le paradoxe des comportements : différenciation/mimétisme dans l'industrie automobile européenne. *Les Actes du Gerpisa*, numero 19 - Organiser la conception, février 1997.
- [87] F. Sellini. *Contribution à la Représentation et à la vérification de modèles de connaissances produit en ingénierie d'ensembles mécaniques*. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale Paris, 1999.
- [88] M. Sformat. Data mining in a power company customer database. *Electric Power Systems Research*, 55:201–209, 2000.
- [89] T.W. Simpson, J.-R.A. Maier, et F. Mistree. Product platform design: method and application. *Res Eng Design*, 13:2–22, 2000.
- [90] P.C. Stadzisz. *Contribution à une Méthodologie de Conception Intégrée des Familles de Produits pour l'assemblage*. Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté, 1997.
- [91] P.C. Stadzisz et J.M. Henrioud. Integrated design of product families and assembly systems. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nagoya, Japan*, 2:1290–1295, 1995.
- [92] P.C. Stadzisz et J.M. Henrioud. Concurrent development of product families and assembly systems. *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Hawaï, USA*, pages 475–481, 1996.
- [93] P.C. Stadzisz et J.M. Henrioud. An integrated approach for the design of multi-product assembly systems. *Computers in Industry*, 36:21–29, 1998.
- [94] J.M. Swaminathan et S.R. Tayur. Managing broader product lines through delayed differentiation using vanilla boxes. *Management Science*, 44(12):161–172, 1998.
- [95] J.M. Swaminathan et S.R. Tayur. Managing design of assembly sequences for product lines that delay product differentiation. *IIE Transactions*, 31:1015–1026, 1999.
- [96] J.-C. Tarondeau. *Stratégie Industrielle : Seconde édition*. Collection Gestion. Vuibert, 1998.
- [97] U.W. Thonemann et M. Brandeau. Optimal commonality in component design. *Operations Research*, 48(1):1–19, 2000.
- [98] J. Tiihonen, T. Lehtonen, T. Soininen, A. Pulkkinen, R. Sulonen, et A. Riitahuhta. Modeling configurable product families. *Proceedings of 4th WDK Workshop on Product Structuring*, 1998. Delft University of Technology, The Netherlands, October 22-23.

- [99] J. Tiihonen, T. Soininen, T. Männistö, et R. Sulonen. State of the practice in product configuration : A survey of 10 cases in the finnish industry. *Knowledge Intensive CAD*, 1:95–114, 1996.
- [100] D. Twede, R.H. Clarke, et J.A. Tait. Packaging postponement: A global packaging strategy. *Packaging technology ans science*, 13:105–115, 2000.
- [101] C. Westphal et T. Blaxton. *Data Mining Solutions*. John Wiley & Sons, New York, NY, 1998.
- [102] J.S. Yu, J.P. Gonzalez-Zugasti, et K. Otto. Product architecture definition based upon customer demands. *Proceedings of 1998 DETC ASME Design Theory and Methodology Conference, Atlanta, GA*, 1998.
- [103] E. Zamirowski et K. Otto. Identifying product portfolio architecture modularity using function and variety heuristics. *Proceedings of the 11th International Conference on Design Theory and Methodology*, 1999. ASME Design Engineering Technical Conferences, Las Vegas, Nevada, September 12-15.
- [104] E. Zamirowski et K. Otto. Product portfolio architecture definition and selection. *International Conference on Engineering Design*, 1999. ICED 99 Munich, August 24-26.
- [105] W. Zinn. Should we assemble products before an order is received? *Business Horizons*, March-April:70–73, 1990.

Contribution à une méthodologie de conception de produits à forte diversité

Dans un contexte de conception de produits, les industriels sont conduits à concevoir et réaliser une grande diversité de produits pour répondre à des besoins clients différents et des contraintes spécifiques liées aux marchés. Deux questions couplées apparaissent donc immédiatement qui concernent d'une part la diversité qu'il est nécessaire de proposer, d'autre part la manière de gérer et produire cette diversité dans des délais et des coûts acceptables.

La contribution de cette thèse porte sur la proposition d'un modèle servant de support à une méthodologie globale de conception de produits à forte diversité. L'apport essentiel réside plus précisément d'une part, dans une séparation entre les différents types de diversité nécessaires à la description du cycle de mise sur le marché d'une famille de produits, d'autre part dans la déclinaison d'un type de diversité à l'autre en s'appuyant sur les outils disponibles actuellement dans la littérature. L'étude de la littérature montre l'absence de démarche globale. Une proposition de démarche a été formalisée en de 8 étapes clés, elle porte notamment sur l'analyse des besoins fonctionnels (avec une distinction entre les fonctions stables et les fonctions variables), la création d'une structure fonctionnelle, la création d'une structure technique et l'analyse de l'ensemble des process utilisables.

Ce travail de thèse est illustré par la mise en oeuvre de la démarche sur le cas des faisceaux électriques automobiles dans un contexte de livraison synchrone ; un outil logiciel créé spécifiquement permet de supporter le travail des concepteurs.

Mots Clés :

Diversité produit, familles de produits, conception modulaire, différenciation retardée, data mining, faisceaux électriques.

Contribution to a product design methodology in a context of wide diversity

In a product design context, industrials are lead to design and manufacture a wide diversity of products in order to satisfy diversified customers and markets. Two linked questions appear immediately that concern for a first part the diversity that is adequate to put in the market, and for a second part the way to manage and manufacture it with acceptable lead time and cost.

The contribution of this thesis is a proposition of a model that supports a global methodology for the design of products with high diversity, more specifically a separation between different kinds of diversity necessary for the life cycle design of product families, a passage through this different kinds of diversity with available tools from the literature. A study of the literature shows that there isn't any global methodology for that type of problems. A proposition of a methodology with 8 steps has been carried out. The methodology focuses in particular on the analysis of the functional requirements (with a distinction between stable and variable functions), the creation of a functional structure, the creation of a technical structure and an analysis of the set of relevant available processes.

This work is illustrated with an application of the methodology on electrical wire harnesses in a context of synchronous delivery; a software tool has been specially developed to support the designers' tasks.

Keywords :

Product diversity, product families, modular design, postponement, data mining, electrical wire harnesses.