



HAL
open science

Contribution à une méthodologie de conception modulaire : modélisation de la diversité dans les familles de produits.

Blaise Eugène Mtopi Fotso

► To cite this version:

Blaise Eugène Mtopi Fotso. Contribution à une méthodologie de conception modulaire : modélisation de la diversité dans les familles de produits.. Automatique / Robotique. Université de Franche-Comté, 2006. Français. NNT : . tel-00241342

HAL Id: tel-00241342

<https://theses.hal.science/tel-00241342>

Submitted on 6 Feb 2008

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

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

Année : **2006**

N° ordre : 1159

THESE

présentée à

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

pour obtenir le

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

en Automatique

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

**Contribution à une Méthodologie de Conception Modulaire :
Modélisation de la Diversité dans les Familles de Produits**

par

Blaise Eugène MTOPI FOTSO

Soutenue le 12 juillet 2006 devant la Commission d'examen :

Rapporteurs :	Michel ALDANONDO	Professeur, Ecole des Mines d'Albi Carmaux
	Emmanuel CAILLAUD	Professeur, Université Louis Pasteur de Strasbourg
Examineurs :	Jean-Michel HENRIOUD	Professeur, Université de Franche-Comté
	Olivier GARRO	Professeur à l'UTBM, Chef du Projet COMETES Cameroun
Directeurs de thèse :	Maryvonne DULMET	Maître de Conférences HDR., Université de Franche-Comté
	Eric BONJOUR	Maître de Conférences, Université de Franche-Comté
Membre invité :	Médard FOGUE	Professeur, Directeur de l'IUT/FV de Bandjoun - Université de Dschang, Cameroun

A ma mère Thérèse FOTSO – MAKUATE

Parti trop tôt en ce début d'année

Amon père Pierre FOTSO NGUIFFO

Qui n'a pas eu le temps de voir le fruit de tous les efforts consentis pour que je mène à bien mes études

Remerciements

Les travaux présentés dans cette thèse ont été réalisés au sein de l'équipe Modélisation et Pilotage des Activités de Conception du Laboratoire d'Automatique de Besançon (LAB). Ils se sont déroulés en séjours alternés financés en partie par le Service de Coopération et d'Action Culturelle (SCAC Yaoundé – Cameroun).

J'adresse mes remerciements à Alain BOURJAULT, directeur du LAB pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire et pour avoir complété le financement de mes séjours en France.

Je remercie Monsieur Michel ALDANONDO, professeur à l'Ecole des Mines d'Albi Carmaux, pour avoir accepté d'être rapporteur de mon mémoire de thèse. Son expertise dans le domaine de l'ingénierie simultanée et tout particulièrement ses conseils et remarques ont permis la maturation finale de ce mémoire.

Que Monsieur Emmanuel CAILLAUD, professeur à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, trouve ici ma reconnaissance pour avoir accepté, lui aussi, d'être rapporteur de mon mémoire de thèse.

C'est un honneur pour moi d'avoir pu intéresser à ce travail et compter parmi les membres du jury Monsieur Jean-Michel HENRIOUD, professeur à l'Université de Franche-Comté pour le temps qu'il a consacré à son examen et pour les critiques dont il m'a fait part.

Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur Olivier GARRO, professeur à l'UTBM (Université Technologique de Belfort Montbéliard) et chef du projet COMETES (Coordination et Modernisation des Etablissements Technologiques d'Enseignements Supérieur) au Cameroun pour sa participation à mon jury de thèse. Sa présence montre l'intérêt de la collaboration entre le Cameroun et la France en matière de formation des formateurs.

Je remercie Monsieur Médard FOGUE, professeur à l'Université de Dschang et Directeur de l'IUT/FV de Bandjoun pour avoir facilité l'organisation de mes enseignements et pour avoir accepté de participer à ce jury de thèse.

Je tiens à remercier tout particulièrement Madame Maryvonne DULMET, Maître de Conférence HDR à l'Université de Franche-Comté qui m'a accueilli au sein de l'équipe Modélisation et Pilotage des Activités de Conception qu'elle dirige. Je la remercie pour le

soutien et la confiance qu'elle m'a accordée durant les trois années où elle m'a encadré. Elle a toujours été très ouverte aux idées que j'ai proposées et m'a toujours encouragé à les développer. Sa disponibilité, son écoute, son soutien et ses qualités humaines ont permis de mener cette aventure à bon terme et de manière satisfaisante.

Enfin, je souhaite exprimer toute ma gratitude à Monsieur Eric BONJOUR, Maître de conférences à l'Université de Franche-Comté, pour avoir participé au suivi de mes travaux. Je lui suis profondément reconnaissant de m'avoir mis en contact et d'avoir organisé mes rencontres avec des industriels du meuble.

Après mon jury, mes remerciements vont à mon institution, l'IUT Fotso Victor de Bandjoun de l'Université de Dschang pour tout le soutien. Je pense à mes collègues (Grégoire, Armand, Gilbert, Georgette). Je présente mes excuses aux étudiants qui ont dû subir en ces derniers moments de thèse mes accès de mauvaise humeur voir de très, très mauvaise humeur.

Ma reconnaissance va également à l'endroit des membres du laboratoire pour avoir constitué l'environnement amical nécessaire à la concrétisation de ces travaux. Je pense aux doctorants (Farouk, Micky, Eric D., Onanun, François...), aux personnels (Denis, Martine, Isabelle, Sandrine, Charles-Henri...)

Ma gratitude va également à Soukalo DEMBELE, Maître de Conférence à l'Université de Franche-Comté qui m'a beaucoup encouragé dans mes initiatives et a toujours su me reconforter (sans se rendre compte souvent) dans mes moments difficiles.

N'arrivant pas à finir mes remerciements et face à la difficulté de la tâche (tant le nombre des gens qui me viennent à l'esprit en cet instant est important), j'espère que tous ceux (toutes celles) qui par leur présence, leur courrier électronique, leur discussion, leur sourire, leur générosité, leur patience, leur accueil, ont cheminé avec moi, trouveront dans ces quelques lignes toute ma gratitude et mon amitié sans que je n'aie besoin de les citer un(e) à un(e).

Enfin, que mes frères (Alain, Lambert, David Bertrand), mes sœurs (Valérie, Nathalie, Jacky), mes jeunes neveux (Daryn, Yannick, Carla Joyce, Robert) se sentent concernés par ce travail malgré nos rencontres toujours intermittentes ces dernières années.

Merci Mireille, pour tout.

Sommaire général

Introduction générale.....1

Chapitre 1

Etat de l'Art et Problématique.....5

Chapitre 2

**Architecture modulaire en conception de
famille de produits.....43**

Chapitre 3

**Modélisation de famille de produits par les
grammaires de graphe.....79**

Chapitre 4

**Vers une approche matricielle de la conception
des familles de produits.....139**

Conclusion générale.....167

Bibliographie.....173

Introduction générale

Introduction générale

Les changements survenus ces dernières années dans le domaine industriel débouchent sur de nouvelles façons de concevoir et de produire. Dans le contexte concurrentiel actuel, l'objectif principal d'une entreprise est certainement de prendre ou de conserver un avantage concurrentiel, en offrant à ses clients des produits répondant au mieux à des critères de coût, qualité, délai, supportant la concurrence. Sa compétitivité repose alors sur sa capacité à développer rapidement de nouveaux produits.

Le souci de mieux maîtriser les processus de conception des nouveaux produits s'est fait grandissant, notamment avec la volonté d'offrir aux clients des produits de meilleure qualité, à un coût plus compétitif et avec un délai de mise sur le marché plus court. La gestion des projets de conception a vu progressivement son déroulement séquentiel, consistant en une succession de phases dont l'exécution relevait de différentes fonctions de l'entreprise, céder la place à une « *ingénierie simultanée* », supportée par des équipes multidisciplinaires dotées d'autonomie et de pouvoir de décision.

La démarche de conception d'un produit est le plus souvent considérée comme la transformation d'un ensemble de données de nature variée et permet de passer de besoins clients (explicites ou implicites) à une offre de produits nouveaux. Dans ce cadre, l'une des préoccupations essentielle est d'élucider le passage du domaine fonctionnel au domaine organique.

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés au sein de l'équipe « *Modélisation et Pilotage des Activités de Conception* » du Laboratoire d'Automatique de Besançon (LAB). Ils sont une suite logique des travaux réalisés au LAB, aussi bien ceux concernant la modélisation de famille de produits, que ceux relatifs à la conception simultanée de produits et de leur système d'assemblage dont les résultats ont été reconnus aussi bien dans les milieux scientifiques qu'industriels.

Ce mémoire s'intéresse tout particulièrement à la modélisation des familles de produits, d'une part en s'appuyant sur les concepts de modularité et d'autre part en s'appuyant sur une formalisation de l'architecture d'une famille de produits par les grammaires de graphe permettant de mieux représenter et gérer la diversité et la complexité. Ces travaux peuvent servir de supports aux concepteurs, dans un rôle d'architecte, pour représenter les architectures fonctionnelles et organiques de familles de produits, pour mieux expliciter le passage du fonctionnel à l'organique et pour dériver des variantes à partir d'une structure générique de produits.

Introduction générale

Le chapitre 1 présente le contexte dans lequel s'inscrivent nos travaux. Nous présentons les concepts liés aux nouvelles formes et organisations de conception. Il se termine par la problématique qui positionne nos travaux en mettant en exergue notre contribution.

Dans le chapitre 2, les concepts liés à l'architecture sont abordés. Nous distinguons clairement l'architecture du produit de l'architecture organisationnelle. L'architecture du produit se subdivise en architecture modulaire et intégrale. Une lecture couplée de la modularité montrant ses deux aspects techniques et organisationnels est faite et débouche sur la notion de plate-forme. Des principes d'organisation d'une architecture de famille de produits sont proposés. Pour gérer cette modularité et la diversité qui l'accompagne, nous utilisons une terminologie décrivant les rôles joués par les modules composant le produit.

Le chapitre 3 est une contribution à la modélisation des familles de produits par les grammaires de graphe. En utilisant les grammaires de graphe, nous avons proposé une organisation logique des données d'une famille de produits sous forme d'une approche architecturale. En particulier, nous avons utilisé des formalismes permettant d'ajouter, éliminer, échanger et redimensionner un module avant de passer au diagramme de contrôle et des règles de productions que nous avons appliqué d'une part à un exemple académique (le stylo à bille) et d'autre part à un cas industriel.

Dans le chapitre 4, nous analysons les principes qui permettent de mieux prendre en compte la complexité. Nous proposons pour cela après une analyse structurelle des familles de produits, des matrices de décomposition reliant les exigences fonctionnelles aux composants génériques constants, partiels et variants. A partir d'un exemple, nous montrons comment structurer les solutions technologiques associées aux fonctions sous forme de matrices diagonales par bloc. Chacun de ces blocs peut être vu comme un module d'une famille de produits et permet de regrouper les solutions technologiques associées à la fonction de ce module. Ceci permet de traduire le passage du fonctionnel à l'organique.

Le mémoire se termine par une conclusion générale où nous présentons quelques perspectives de nos travaux.

Chapitre 1

Etat de l’Art et Problématique

Chapitre 1 – Etat de l'Art et Problématique

Chapitre 1 – Etat de l’Art et Problématique

1.1. Processus et activités de conception.....	9
1.1.1. Réflexions liées au processus de conception de produits.....	10
1.1.1.1. Erreurs et délais de conception.....	10
1.1.1.2. Coûts de développement	11
1.2.1. Elaboration du cahier de charges	13
1.2.2. Conception de principes de solution	14
1.2.3. Conception d'ensemble.....	14
1.2.4. Conception détaillée.....	15
1.3. Typologie de conception.....	15
1.3.1. Conception routinière ou prédéfinie (routine design)	17
1.3.2. Conception innovante (innovative design).....	17
1.3.3. Schéma global de conception.....	18
1.4. Conception intégrée et ingénierie simultanée	19
1.4.1. Contexte et Définitions.....	19
1.4.2. Contexte de mise en oeuvre du CE	21
1.4.3. Gammes génériques d’assemblage.....	21
1.5. Conception et diversité des produits.....	23
1.5.1. La différenciation retardée	24
1.5.2. La conception modulaire.....	29
1.5.3. Design Structure Matrix (DSM).....	31
1.5.4. La standardisation et technologie de groupe.....	33
1.5.5. Variété et diversité, customisation de masse.....	35
1.5.5.1. La variété de l’offre : comment la mesurer.....	35

Chapitre 1 – Etat de l’Art et Problématique

1.5.5.2. Approche par « stratégies de profit » et stratégie de « volume et diversité ».....	37
1.5.5.3. La personnalisation ou le « sur-mesure de masse » (mass customization)	38
1.6. Conclusion et problématique.....	38

Chapitre 1 – Etat de l'Art et Problématique

Dans cette partie, nous dressons un état de l'art de la conception de produits, en s'intéressant plus particulièrement à la conception des produits à forte diversité. Ce qui nous a conduit à subdiviser cette partie en plusieurs sections. Chaque section aborde un aspect singulier de l'activité de conception. Le chapitre se termine par une conclusion où nous dégagons la problématique et positionnons nos travaux.

1.1. Processus et activités de conception

(Dixon, 1988) considère la conception comme une activité intellectuelle et cognitive particulièrement complexe. Cette activité peut être considérée comme le déroulement d'un processus faisant intervenir en permanence plusieurs processus de raisonnement qui utilisent plusieurs sources de connaissances (Brown, 1998).

En conception mécanique, elle prend la forme d'un processus de création et de définition d'une ou de plusieurs descriptions d'un produit. Ces descriptions sont identifiées en réponse à un ensemble d'exigences et de besoins qui, en outre, doivent satisfaire un ensemble de contraintes. Ces contraintes ayant plusieurs origines, peuvent être imposées par le problème, par le concepteur, par le fabricant, par l'utilisateur ou par des lois naturelles. En effet, elles traduisent les fonctions que doivent remplir le produit, les ressources disponibles, les limitations physiques, les contraintes de fabrication, les critères de conception, et enfin la manière de concevoir.

L'une des tâches principales du concepteur consiste à transformer un besoin client, exprimé en termes d'exigences fonctionnelles en une description détaillée et organique du produit. Cette description finale du produit est généralement représentée sous formes graphiques, numériques ou simplement textuelles (Gero, 2001). Elle doit être suffisamment complète, cohérente et explicite pour que les produits conçus soient techniquement réalisables, autrement dit, qu'ils puissent être fabriqués, assemblés et distribués.

L'activité de conception consiste à définir simultanément et progressivement différents espaces : l'espace du problème, l'espace de la solution et l'espace des critères qui lie les deux espaces précédents (spécification / évaluation). (Chandrasekaran, 1990) matérialise bien cette spécificité en proposant une définition générale. Pour lui, « un problème de conception est spécifié par :

- un ensemble de fonctions exigées par le client et le consommateur du produit ou définies implicitement par le domaine de fonctionnement, que doit remplir le produit ainsi qu'un ensemble de contraintes à satisfaire,

Chapitre 1 – Etat de l'Art et Problématique

- un ensemble de composants prédéfinis et un ensemble de relations entre ces différents composants. Les contraintes peuvent porter sur les paramètres de définition du produit, sur le processus de réalisation du produit ou sur le processus de conception.

La solution d'un problème de conception est définie par une spécification complète d'un ensemble de composants et de leurs relations. Cette spécification permet de décrire le produit remplissant les fonctions et respectant les contraintes. Cette solution est calculée de manière à optimiser ou à satisfaire un ensemble de critères ».

En réalité, les différentes listes de fonctions, composants, critères et contraintes sont en général incomplètes au début du projet de conception. Pour pallier ceci, des fonctions, composants, critères ou contraintes doivent être ajoutés, modifiés, ajustés, ou supprimés durant l'avancement des activités de conception. Ces différentes reconsidérations nécessitent d'être complétées par d'autres caractéristiques de la conception. Pour (Guéna, 1992), la conception doit être considérée comme un problème récursif. En effet dans le cas où par exemple des composants ne figurent pas dans la liste prédéfinie, le concepteur devra spécifier et définir ces nouveaux composants.

1.1.1. Réflexions liées au processus de conception de produits

1.1.1.1. Erreurs et délais de conception

De manière générale, une exécution séquentielle des phases élémentaires engendre un nombre considérable d'itérations pour converger vers une solution cohérente. Ceci est dû au fait que le processus de conception est défini comme une suite élémentaire de ces phases. Parallèlement à ceci s'ajoute une intervention en séquence des différents métiers qui regroupe le cycle de vie du produit. Les changements des besoins des clients ajoutés aux erreurs de conception sont à l'origine des itérations. Dit autrement, les mauvaises hypothèses de conception sont détectées tardivement lorsque certains choix faits par un concepteur ne sont pas cohérents avec d'autres choix ou lorsqu'ils sont sources de problèmes pour les métiers en aval du processus de conception. Les coûts et délais de conception deviennent élevés à mesure qu'une solution du produit est remise en cause tardivement dans le cycle de vie du produit. Du fait de l'évolution technologique et de la diversité des besoins clients, le cycle de vie d'un produit se trouve de plus en plus court. Toutefois, durant l'élaboration d'une nouvelle variante d'un produit ou de la reconception d'un produit, les concepteurs reconsidèrent souvent l'intégralité du processus de conception sans en exploiter la connaissance et l'expérience accumulées, ce qui engendre perte de temps et multiplication des erreurs de conception.

Chapitre 1 – Etat de l’Art et Problématique

A la base, les outils d’aide à la conception étaient conçus dans le but de ne conserver que les résultats finaux des différentes solutions de conception. Il se trouve que l’enrichissement des connaissances, ajoutées au savoir et au savoir faire mis en œuvre par les concepteurs n’étaient pas toujours pris en compte par ses outils. Dans le cadre de processus routiniers, la réduction des délais et des erreurs de conception nécessite une démarche capable de s’appuyer sur des développements antérieurs permettant d’éviter des itérations. Pour ce faire, il convient d’exploiter au mieux les connaissances relatives aux produits déjà développés, aux processus de conception validés ainsi qu’à l’expérience du savoir et savoir faire des concepteurs. Pour (Sohlenius, 19992), la réduction des délais et des erreurs de conception nécessite également d’intégrer les différentes connaissances métiers dans la démarche de conception et d’adopter un déroulement simultané pour rendre parallèle au mieux les différentes phases de conception. Ce sont les objectifs que se proposent d’atteindre les démarches d’ingénierie concurrente, qui visent à prendre en compte dès les premières phases de conception tous les éléments ayant trait au cycle de vie du produit (Prasad, 1996).

1.1.1.2. Coûts de développement

Les facteurs tels que les erreurs et délais du processus de conception sont à l’origine des différents coûts de l’activité de conception. Pour éviter les corrections et modifications de certains choix déjà effectués, il est important d’avoir une définition robuste d’un produit. Les modifications représentent une perte de temps énorme mais aussi, leurs répercussions sur le coût global peuvent être importantes. Les retours en arrière inutiles font à coup sûr augmenter le coût total en diminuant la qualité du produit. Il est maintenant admis que plus le produit se trouve dans une étape avancée du cycle de vie, plus le coût des corrections est élevé (Sohlenius, 1992).

Les solutions abordées dans le sens de la réduction des délais et erreurs de conception induisent également des diminutions des coûts de conception ainsi qu’une réduction des coûts des produits. De ce fait, les concepteurs souhaitent évaluer en permanence (et ceci durant le processus de conception) le coût du produit résultant. Cette évaluation des coûts a l’avantage de guider les choix vers un compromis satisfaisant entre le coût et la valeur perçue par le client.

1.2. Les différentes phases du processus de conception

Le processus de conception peut être structuré en une succession de phases plus ou moins liées par des relations et contraintes diverses. D'un côté le client exprime ses besoins et exigences sous forme d'un cahier des charges où sont consignées toutes (ou presque) les fonctionnalités et performances à remplir par le produit final, de l'autre côté le concepteur doit transformer progressivement ces besoins et exigences en un produit techniquement réalisable à travers un certain nombre de phases dont le déroulement caractérise l'évolution temporelle des différentes représentations du produit. Fort de ceci, (Gero, 1989) définit l'activité de conception comme un processus permettant de partir d'une description *sans forme* pour aboutir à une *forme*.

Dans la littérature, plusieurs auteurs ont proposé des décompositions du processus de conception en phases. Le nombre de phases et leurs descriptions diffèrent selon le type de produit, le niveau de spécification, les besoins, les connaissances disponibles ou encore selon les domaines de conception. Toutefois, l'ensemble des communautés scientifiques et industrielles adoptent généralement celle proposée par (Pahl et Beitz, 1996). Ils proposent un modèle assez exhaustif de tâches génériques de conception. La figure 1.1 ci-dessous nous montre comment l'ensemble est décomposé en quatre grandes phases :

- élaboration du cahier des charges - *planning and clarifying the task*,
- formalisation et spécification des principes de solution (ou concepts) - *conceptual design*,
- conception d'ensemble - *embodiment design*,
- conception détaillée – *detail design*.

Durant une phase avancée du processus de conception, une simple modification du besoin client peut remettre en cause certains choix et calculs déjà validés au cours de la phase de spécification des principes de solution. Tout ceci traduit le caractère itératif et dynamique du processus de conception.

Chapitre 1 – Etat de l'Art et Problématique

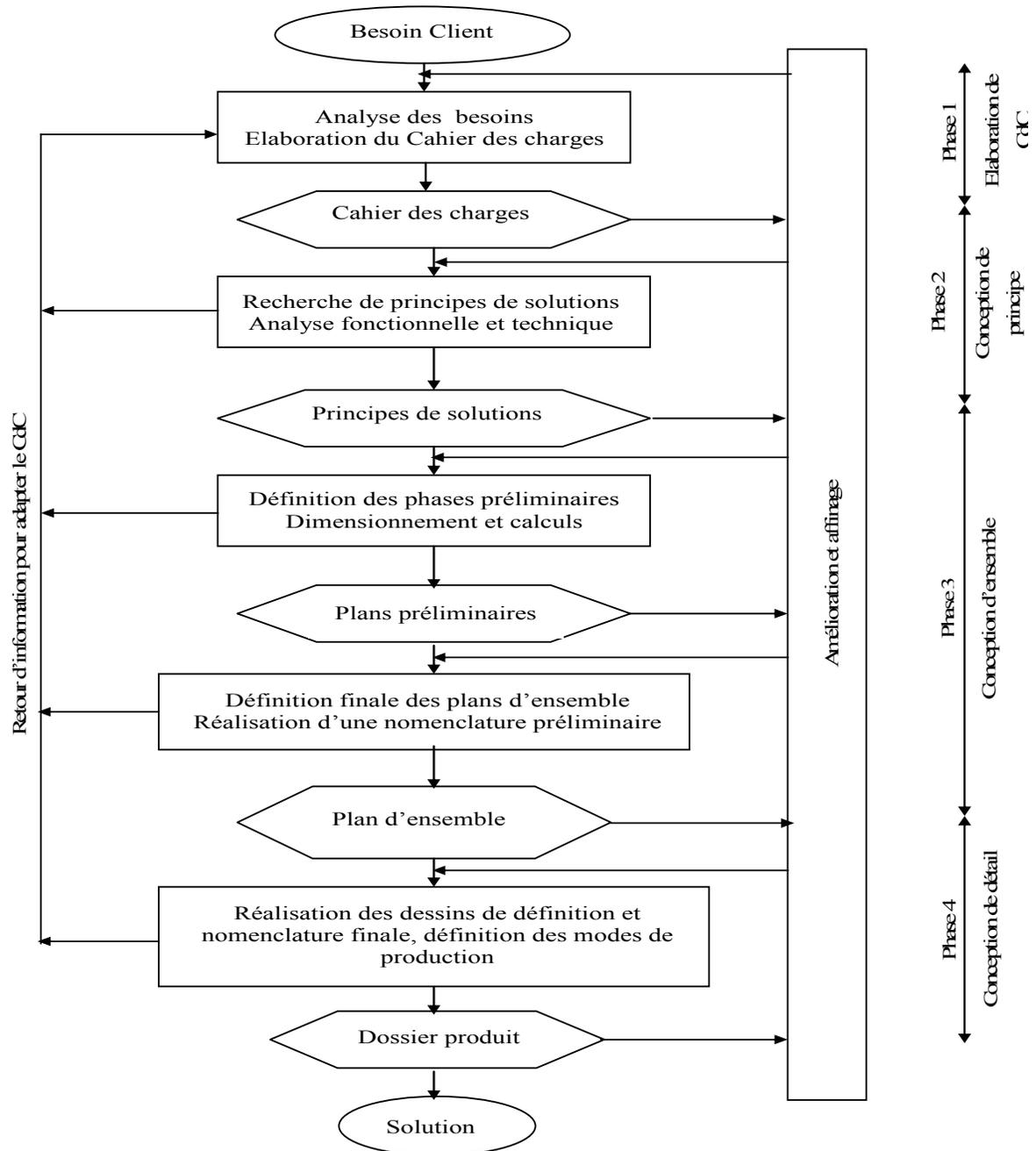


Figure 1.1. Phases du processus de conception (Pahl et Beitz, 1996)

1.2.1. Elaboration du cahier de charges

Le cahier de charges est un document contractuel qui doit apporter l'ensemble des informations pertinentes permettant au concepteur de spécifier et proposer une ou plusieurs architectures correspondant aux besoins clients. Il sera plus ou moins précis et complet suivant que l'on s'intéresse à automatiser une production existante dont l'entreprise a déjà la connaissance ou à concevoir un produit nouveau (Meunier, 1989). La phase d'élaboration du

Chapitre 1 – Etat de l'Art et Problématique

cahier de charges représente la phase initiale du processus de développement d'un produit. Au cours de cette phase, dite aussi phase fonctionnelle (Dixon *et al.*, 1988), la tâche du concepteur consiste d'une part, à récolter et analyser les besoins des clients ou du marché et d'autre part, à identifier les capacités de l'entreprise pour y répondre à travers une proposition produit. Le résultat final de cette phase est une spécification initiale du produit exprimée sous forme d'une liste de fonctions et de caractéristiques que doit remplir le produit, un ensemble de contraintes et éventuellement des objectifs coût et délai de mise sur le marché. Cette phase correspond aux deux phases « *identification du besoin* » et « *génération des spécifications* » proposées par (Chandrasekaran, 1990) dans le cadre d'un processus de reconception. Dès la rédaction apparaissent un certain nombre d'obstacles.

1.2.2. Conception de principes de solution

La spécification des principes de solution est une phase conceptuelle durant laquelle le concepteur envisage et évalue des pistes de solutions (concepts) qui correspondent aux besoins fonctionnels identifiés auparavant, puis il procède à la structuration, la hiérarchisation et la caractérisation des différents besoins fonctionnels exprimés. Les principes de solutions correspondent, le plus souvent, à un ensemble de fonctions techniques ou à des schémas et concepts techniques. Au terme de cette phase, apparaissent les premières représentations graphiques et maquettes du produit. Ce faisant, le concepteur peut être amené à faire développer des solutions déjà existantes ou à faire des propositions nouvelles (innovation). Lorsqu'il s'agit d'un processus de reconception, la phase prend la forme de « *génération des concepts* » (Chandrasekaran, 1990).

1.2.3. Conception d'ensemble

Les concepts liés au produit sont ensuite développés par une définition complète de la description technique et de la structure finale du produit. Dans le même sillage, le concepteur élabore la structure physique du produit par le choix, le dimensionnement et l'agencement judicieux d'un ensemble de composants. Au final, la solution *produit* est raffinée par des vues et représentations géométriques d'ensemble de plus en plus évoluées, une nomenclature des composants et une évaluation des coûts. Pour (Chandrasekaran, 1990), cette phase correspond aux phases *analyse* et *évaluation* des solutions de reconception de produits. Plusieurs solutions possibles de structure d'agencement ou architectures seront évaluées par les concepteurs, la solution la plus satisfaisante sera choisie en fonction des critères économiques et techniques, préambule à la conception détaillée.

1.2.4. Conception détaillée

Pour (Chandrasekaran, 1990), c'est la phase finale du processus de conception. Le concepteur a la charge de définir complètement et de manière détaillée chaque composant sélectionné, de valider en spécifiant les dimensions, les caractéristiques physiques (matériaux), les schémas et les plans détaillés, leur coût et une description de son processus d'industrialisation (fabrication, assemblage, distribution).

Le produit est entièrement décrit de telle sorte que les informations générées puissent être exploitées par tous les acteurs une fois la phase achevée. Sa définition finale comprend toutes les informations relatives au produit (schémas d'ensemble, plans des composants et pièces, nomenclature détaillée, agencement des composants et évaluation économique) et celles qui décrivent ses modes d'industrialisation, c'est-à-dire la technologie de fabrication, les gammes et outils.

En réalité, cette phase se traduit souvent par la réalisation d'un prototype physique (Gero, 2001) qui sera utilisé pour une réalisation des essais et pour la validation avec le client. En fait, des tâches de vérification et validation des résultats sont nécessaires tout au long du processus de conception. Elles permettent en effet de confirmer si le produit répond bien aux exigences et spécifications du cahier de charges. Toutefois, suite aux délais et aux coûts engendrés par la réalisation de prototypes et d'essais physiques, le maquettage physique est, le plus possible, remplacés par du maquettage et des simulations numériques ou des calculs. Ceci est rendu possible, d'une part, par l'amélioration des outils de CAO (3D, images de synthèse, applicatifs métier ...), de simulation et de calculs, et d'autre part, par l'approfondissement des lois physiques régissant le fonctionnement du produit et le développement de modèles comportementaux (par exemple, en électronique, en automatique, en mécanique des fluides, ...).

1.3. Typologie de conception

Selon (Smith et al., 1993), l'un des apports de l'Intelligence Artificielle (IA) dans la résolution de problèmes de conception est d'avoir proposé une typologie. Pour chaque auteur, il existe une typologie différente (Mayer, 1989 ; Sriram et al., 1989 ; Gero, 1990 ; Chandrasekaran, 1990). De manière globale, les auteurs proposent une distinction en deux types:

- la conception prédéfinie ou routinière,
- la conception nouvelle (non routinière).

Chapitre 1 – Etat de l'Art et Problématique

Le type « *nouvelle* » est nuancé par (Brown et al., 1985) en :

- conception innovante,
- conception créative.

Cette typologie, mettant en avant le degré de complétude de la connaissance relative au produit et au processus de conception se trouve être adoptée par plusieurs auteurs. La figure 1.2 synthétise une structuration de ces types de conception et des produits associés.

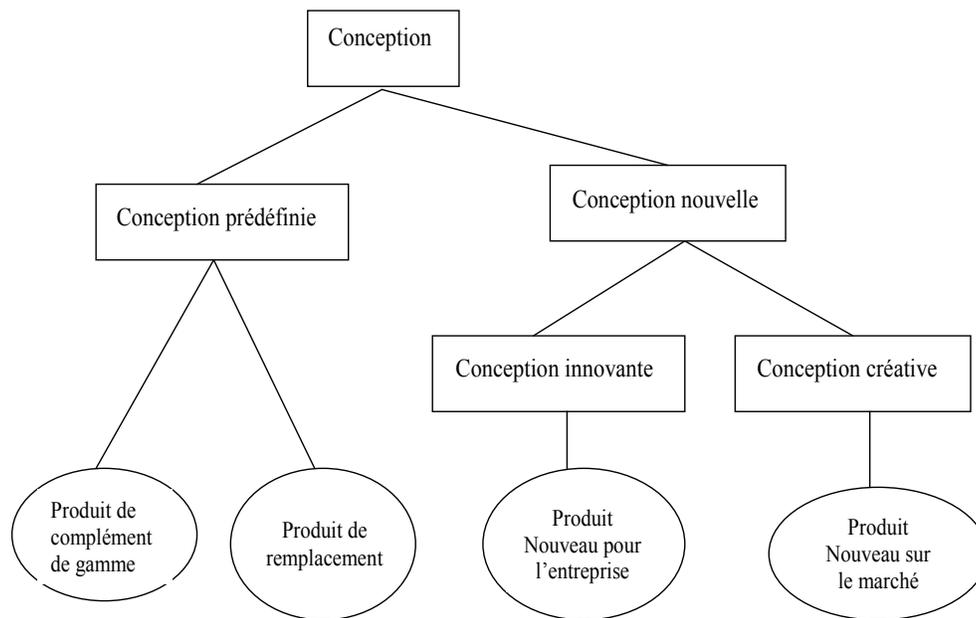


Figure 1.2. *Types de conception et nature de produits*

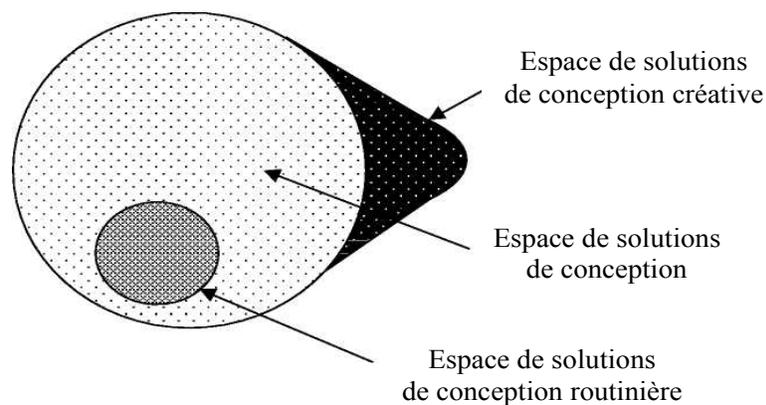


Figure 1.3. *Espace des solutions de conception routinière, innovante et créative*

Chapitre 1 – Etat de l'Art et Problématique

La représentation de la figure 1.3 proposée par (Gero, 2001) montre graphiquement l'espace des conceptions routinières et l'espace des conceptions créatives (ou innovantes) par rapport à l'espace de toutes les solutions possibles.

1.3.1. Conception routinière ou prédéfinie (routine design)

Selon (Brown et al., 1985), dans ce type de conception, les connaissances à exploiter sont clairement identifiées et les plans d'action du processus de conception sont globalement connus. En fait, les données relatives au produit et au processus sont disponibles préalablement au lancement de la conception. Ce type de conception s'appuie largement sur les études antérieures et peut être par exemple une modification ou amélioration d'un produit existant. Notons que le travail du concepteur est important et qu'il ne s'agit pas simplement d'un paramétrage des caractéristiques du produit. Le choix entre les solutions techniquement acceptables et la solution retenue du meilleur compromis agencement / dimensionnement sera toujours de mise. Son rôle consiste à justifier ses choix, à retenir ou non telle ou telle solution, et dans d'autres cas, à améliorer ou à modifier des solutions antérieures qui vérifient un ensemble de contraintes prédéfinies. La conception routinière ne permet qu'une instanciation ou modification des valeurs des paramètres qui caractérisent le produit. La conception routinière, appelée également reconception, représente environ 80 % des activités de conception mécanique (Vargas, 1995). Dans ce cadre, bien que le concepteur connaisse l'espace des solutions potentielles (les caractéristiques et les attributs à instancier sont connus à l'avance), la recherche d'une solution spécifique peut s'avérer complexe et coûteuse du fait de la taille de l'espace des solutions ou du fait de la difficulté à mesurer les conséquences d'un choix ou d'une modification.

1.3.2. Conception innovante (innovative design)

Selon (Brown et al., 1985), en conception innovante, les connaissances de départ sont globalement connues (expression de besoin, technologie à exploiter,...) mais les plans d'action du processus de conception sont à déterminer. Ce type de conception correspond à des projets de développement de produits nouveaux pour satisfaire un besoin (client, marché, ..) dont l'objectif produit a été clairement défini (cahier de charges, coût objectif, délai objectif). Ceci implique d'importantes actions de veille technologique, de recherche et développement, qui se révèlent payantes pour l'entreprise à condition de bien maîtriser le déroulement du projet. A ce niveau, le concepteur possède une large autonomie de travail et un espace de recherche de solutions plus large. Afin d'éviter des erreurs et contretemps préjudiciables, il est nécessaire de fournir une aide (conduite d'activités, outils d'évaluation et de contrôle) aux acteurs de la conception pour améliorer l'efficacité de leur travail. Le résultat

Chapitre 1 – Etat de l'Art et Problématique

d'une conception innovante est un produit familier à l'utilisateur mais avec un aspect nouveau résultant des nouvelles valeurs des attributs et des caractéristiques (Gero, 2001).

1.3.3. Schéma global de conception

(Kota et Ward, 1991) proposent un schéma synthétique (figure 1.4) qui illustre les différentes classes de problèmes de conception selon la disponibilité du niveau de connaissance. La figure 1.4 montre le caractère créatif d'un processus de conception, qui devient routinier lorsque les choix des principes technologiques ont été effectués.

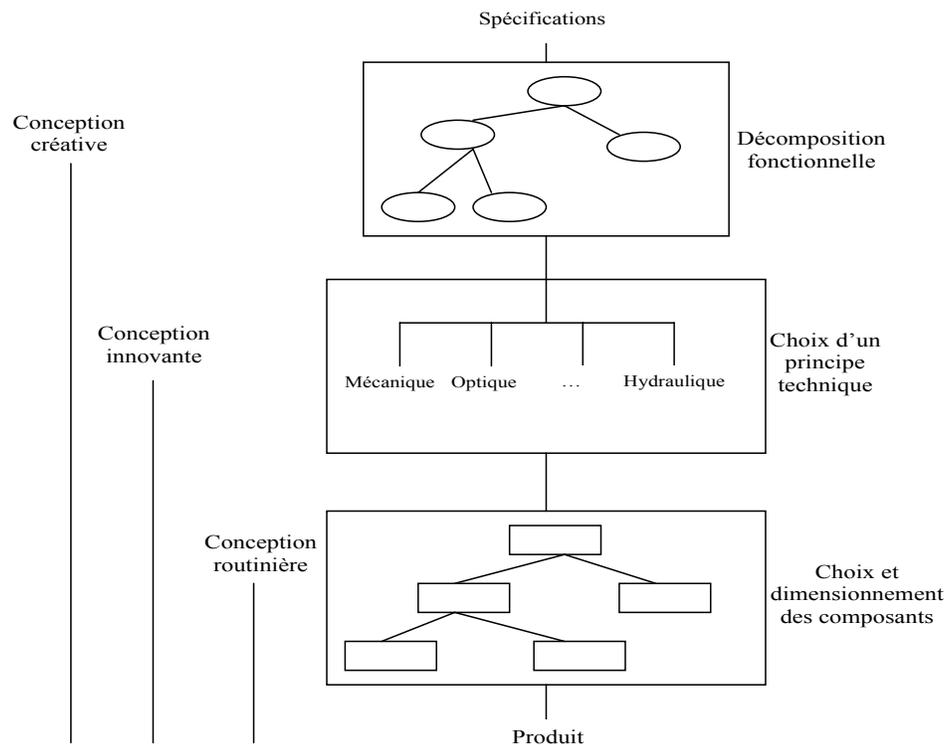


Figure 1.4. Schéma global de conception (Kota et Ward, 1991)

Plusieurs typologies existent dans la littérature. Toutefois dans l'approche systématique développée par (Pahl et Beitz, 1996), la conception nouvelle correspond à des tâches de conception pour lesquelles de nouvelles solutions sont développées pour de nouveaux principes trouvés. La conception adaptée exploite les principes et les solutions déjà établis et l'effort de conception consiste à adapter ces principes et solutions aux nouvelles contraintes et aux nouveaux besoins spécifiques. A partir d'une conception existante, la conception par variantes consiste à définir un produit par de simples variations de dimensions ou des agencements des composants. (Brown, 1998 ; Dixon, 1988) proposent des typologies plus détaillées des problèmes de conception. En effet, ils considèrent certaines phases du processus comme des classes de

Chapitre 1 – Etat de l’Art et Problématique

problèmes de conception. Les différentes classes sont identifiées sur plusieurs axes : le niveau de connaissances disponibles ou le niveau d'abstraction du produit et de spécification. Ils parlent alors de conception préliminaire, conceptuelle, fonctionnelle, innovante, créative, routinière, d'ensemble, paramétrique, détaillée, non-routinière, de configuration et de reconception.

1.4. Conception intégrée et ingénierie simultanée

1.4.1. Contexte et Définitions

De manière traditionnelle, le processus de conception est mis en œuvre par un transfert continu et séquentiel des informations allant de la spécification des besoins jusqu'à la conception détaillée. C'est assurément en raison de ce fonctionnement séquentiel que des erreurs se propagent le long du processus. Ces erreurs ne sont détectées que dans les phases ultérieures du processus, voire même au-delà, lors de l'industrialisation. C'est dans ce contexte d'inadéquation entre les pratiques de conception de produits selon un schéma séquentiel et les nouveaux enjeux économiques qu'au milieu des années quatre-vingt, l'industrie japonaise a vu émerger une nouvelle forme d'organisation qui est l'ingénierie simultanée dite aussi ingénierie concourante (Concurrent Engineering) (Foulard, 1994 ; Kosanke, 1997 ; Stadzisz, 1997 ; Bonnevault et al., 2001). Elle consiste en une mise en parallèle des activités de développement du produit et du système de production ayant pour but principal de réduire de manière significative les délais de mise à disposition d'un produit sur le marché (ou time-to-market) et aussi d'améliorer la qualité. L'idée est de faire passer tous les acteurs du projet, directs ou indirects, y compris en aval les clients, destinataires du produit final ou en amont le fournisseur. Cette préoccupation prend toute sa signification dans des environnements industriels incertains.

C'est une approche de la conception qui permet de prendre en compte, dès les premières phases du projet de développement, l'ensemble du cycle de vie du produit, depuis sa définition jusqu'à son déclin en passant par son industrialisation, sa distribution et son utilisation (Prasad, 1996). Elle permet d'adopter une organisation simultanée pour paralléliser au mieux les différentes phases du processus de développement (Sohlenius, 1992) ou encore une organisation concourante pour converger vers un même objectif. Cette organisation doit donc impliquer la participation de différents acteurs représentant les différentes fonctions du cycle de vie du projet de développement.

Pour les entreprises, le développement rapide de nouveaux produits est devenu une nécessité pour se maintenir à un haut niveau de compétitivité. Pour atteindre un tel but, de nombreuses entreprises ont utilisé et utilisent les techniques du Concurrent

Chapitre 1 – Etat de l'Art et Problématique

Engineering (CE) pour développer un produit plus vite, moins cher et avec une qualité éprouvée.

Le Concurrent Engineering (Prasad, 1997) est présenté comme une approche systématique pour la conception intégrée et simultanée des produits et des processus de production. Quand la conception du produit atteint un certain stade, des informations préliminaires sont transmises aux concepteurs du système de production et sa conception commence dès que possible. C'est ainsi que l'on peut mettre en évidence de manière précoce les erreurs de conception du produit et que l'on peut les réviser (itération). La qualité des produits est ainsi améliorée, les coûts supplémentaires dus aux modifications sont éliminés et les délais de mise sur le marché sont réduits. Par conséquent, l'entreprise parvient à tenir ses engagements de satisfaction du besoin client et de diminution de ses coûts globaux.

De nos jours, les concepts et les applications du concurrent engineering sont largement traités par de nombreux ouvrages. Plusieurs définitions souvent complémentaires ont été proposées (Clermont, 1998 ; Boudouh, 2000), parmi elles, l'une des plus synthétiques est « le Concurrent Engineering qui est une approche organisationnelle systématique et globale de l'entreprise, basée sur la conduite simultanée et intégrée du cycle de vie du produit, mettant en œuvre des équipes pluridisciplinaires travaillant en symbiose et visant des objectifs de production communs de coût-délai-qualité ». De cette définition découlent deux grands principes : la simultanéité et l'intégration. Le premier consiste à développer en même temps différentes activités concourant à la conception du produit et de son système de production, le second principe est caractérisé par l'établissement d'une interdépendance étroite entre les différentes phases de projet à dessein de prendre en compte à chaque niveau de développement, des considérations relative de l'ensemble du cycle de vie du produit. Les principales caractéristiques en sont l'exécution parallèle des activités de conception, l'intégration et la prise en compte des activités aval pendant le déroulement des activités amont, la constitution d'équipes pluridisciplinaires qui regroupent différents acteurs impliqués dans le projet de développement de produit, l'optimisation des processus de développement existants (en particulier les méthodes de conception et de gestion de la production et de la distribution).

La notion de Concurrent Engineering (CE) est utilisée sous d'autres appellations : "conception ou ingénierie intégrée", "ingénierie simultanée", "ingénierie parallèle" et "ingénierie concourante". Pour notre part, et tout au long de ce document, nous utilisons le terme "concurrent engineering" pour désigner les trois notions de simultanéité, de concourance et d'intégration des activités d'un projet de conception de produit.

1.4.2. Contexte de mise en oeuvre du CE

De nombreuses méthodologies de conception des produits ont été développées ces dernières années (Agard et Kusiak, 2004). Sont apparus, entre autres, de nouvelles formes d'organisation (par exemple, les équipes de travail multidisciplinaires), de nouveaux outils (par exemple les Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication – NTIC), de nouvelles méthodes de conception (par exemple, le Design For X où X prend plusieurs significations : A=Assemblage, F=Fabrication, V=Variété, R=Recyclage, etc) :

- Formation des équipes de travail multidisciplinaires : cela forme une organisation favorable au processus de développement de produits. Les acteurs de conception se réunissent tous, dans une même équipe, autour d'un même projet de développement de produit. Les points de vue pluriculturels et multi-métiers de ces équipes nécessitent la négociation et la confrontation des savoir et savoir-faire pour converger vers un compromis (Tichkiewitch *et al.*, 1995).
- Utilisation des NTIC : l'émergence et le développement des technologies de l'information de la communication ont beaucoup favorisé l'échange et l'archivage des informations. Le volume et l'évolution des données et connaissances associées au produit pendant tout son processus de développement sont conservés, maintenus et accessibles par tous les acteurs de l'équipe projet. L'accumulation de ces différentes connaissances au fil des projets de conception constitue l'expérience et le savoir-faire de l'entreprise
- Le Design For X (DFX) : l'ingénierie intégrée propose des approches visant à intégrer conception de produit et conception du système de production. Ces approches rentrent dans les démarches de type Conception pour X (Design For X) présentées dans (Huang, 1996). Ainsi, la conception pour la fabrication et l'assemblage (Design For Manufacturing and Assembly ou DFMA) vise à agir sur la conception du produit dans le but de rendre sa fabrication et son assemblage les plus efficaces possibles.

1.4.3. Gammes génériques d'assemblage

Selon (Brown, 1998), le point de départ de l'activité de conception peut être n'importe quel niveau d'abstraction du produit et le point final peut être n'importe quel niveau de spécification du produit. La complexité et la durée du processus de conception dépendent de l'écart entre les deux niveaux d'abstraction et de spécification. Ainsi, un processus complet de conception, où toutes les phases détaillées au § 1.2 sont à développer, représente le cas extrême. Généralement les problèmes de conception sont classifiés suivant la présence ou non

Chapitre 1 – Etat de l’Art et Problématique

d’une ou plusieurs de ses phases. Toutefois, bien que la décomposition des phases résulte en grande partie des travaux menés sur des processus de conception liés à la conception de produits manufacturiers, elle reste de mire pour décrire les processus de conception dans d’autres domaines.

A l’inverse de la conception routinière, la reproductibilité très difficile est liée à la complexité des processus créatifs et innovants (Blanco, 1999). Le processus de conception s’appuie sur la capitalisation et la réutilisation des connaissances relatives au produit pour une bonne gestion de la diversité du besoin. Cette capitalisation est pleinement exploitée en conception routinière et adaptative en rassemblant les principes et les solutions ayant fait leurs preuves lors de conception antérieures dans un modèle générique.

Dans le contexte de gamme générique d’assemblage, Stadzisz et Henrioud (Stadzisz, 1997 ; Stadzisz et Henrioud, 1998) 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 d’intégrer les activités de conception des processus d’assemblage et de conception de famille de produits. Leur objectif était de prendre en compte le manière dont les produits seront assemblé au moment de la conception des familles de produits et des systèmes d’assemblage. La génération et la sélection des gammes génériques d’assemblage sont les points forts de leur travail. Une gamme générique d’assemblage est définie comme une suite ordonnée d’opérations génériques décrivant un processus d’assemblage de l’ensemble des produits d’une même famille. L’obtention d’une gamme générique d’assemblage passe par plusieurs phases :

- 1) la modélisation des gammes génériques d’assemblage qui s’appuie sur un modèle de représentation et 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 ce modèle, une méthode de génération permet de déterminer l’ensemble des gammes d’assemblage génériques admissibles pour une famille de produits donnée. Une gamme admissible correspond à une stratégie (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) L’ultime étape concerne l’évaluation des gammes d’assemblages génériques, qui permettra d’évaluer les différentes gammes génériques du réseau générique d’assemblage. Le choix de la gamme définitive dépend de plusieurs facteurs :

Chapitre 1 – Etat de l'Art et Problématique

- 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 l'exemple l'Indice de Variabilité IV est lié au fait que l'on s'intéresse à des familles de produits. Il peut servir à comparer deux alternatives de conception de famille de produits.

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

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
- $v_{jk} = \frac{n_{jk}}{t_{jk}}$ où :
 - n_{jk} = nombre d'opérations non communes entre les produits j et k
 - t_{jk} = nombre total d'opérations dans l'assemblage des produits j et k

1.5. Conception et diversité des produits

Dans un contexte de concurrence marqué par la diversification des besoins, un client souhaite un produit sur mesure répondant à l'ensemble de ses besoins et refuse de payer des fonctions dont il n'a pas l'utilité. Les concepteurs se trouvent dans une situation où il faut adopter plusieurs stratégies allant de la conception d'un produit unique capable de répondre à l'ensemble des besoins et par là même à satisfaire tous les clients, à la conception de produits sur mesure répondant strictement aux besoins d'un client spécifique.

La première stratégie a l'inconvénient des surcoûts de suréquipements et la seconde, de générer une augmentation des coûts de production. La philosophie voudrait que les concepteurs optent pour des solutions intermédiaires, solutions qui consistent à concevoir et à assembler à la fois des éléments standard et des éléments spécifiques. Ce qui conduit à la gestion simultanée de trois types de diversité : la diversité fonctionnelle, externe visant la satisfaction du client, la diversité technique, interne qui concerne plus spécifiquement la fabrication des références de

Chapitre 1 – Etat de l’Art et Problématique

produits et la diversité « process » (ou diversité industrielle) liée à 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. Lors de la conception du produit, il s'avère donc nécessaire de modéliser les interactions entre la diversité fonctionnelle 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 (Agard, 2004) :

- une grande diversité fonctionnelle du produit fini est souhaitée par le service commercial qui vise la satisfaction du consommateur,
- une faible diversité technique (ou une forte standardisation) est souhaitée par les services achats et gestion pour les produits stockés afin de diminuer le nombre de références traitées, de profiter d'économies d'échelle et de pouvoir facilement mettre en concurrence un ensemble de fournisseurs,
- au niveau de la production, il y a un désir de réduire la diversité industrielle du processus de production pour réduire les temps et les coûts des changements de production, le nombre de lancement des ordres de fabrication, la surface des zones de stockage ...

La solution idéale consiste à proposer des produits avec une diversité commerciale maximale tout en limitant la diversité technique. Plusieurs politiques de conception de produits ont été proposées pour définir un ensemble de produits à partir d'éléments standardisés, à savoir la différenciation retardée, la conception modulaire et la standardisation. (Agard, 2002 ; Agard et Tollenaere, 2002) ont développé un outil d'aide à la conception de modules industriels (pour les faisceaux électriques automobiles) permettant d'assurer une diversité fonctionnelle totale des produits finis, en s'appuyant à la fois sur la description du produit et des processus de production. Un compromis est alors recherché entre le nombre de modules à réaliser et les coûts de production pour l'assemblage final des produits sous une contrainte de temps d'assemblage final liée à une livraison synchrone.

1.5.1. La différenciation retardée

L'augmentation de la diversité des produits limite à coup sûr la capacité d'anticipation du producteur et engendre une demande de flexibilité qui nécessite des surcapacités de divers ordres. En admettant 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.

Chapitre 1 – Etat de l'Art et Problématique

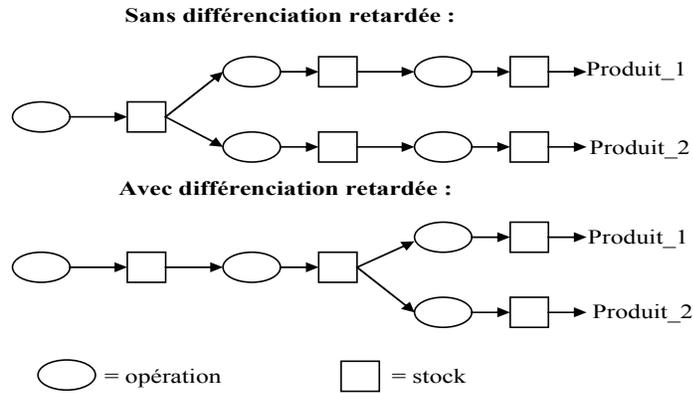


Figure 1.5. *Différenciation retardée*

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 comme le montre la figure 1.5.

D'après (Tarondeau, 1998), 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. Il conclut que « la réduction de variété des produits intermédiaires permet d'augmenter la productivité du système de production en limitant les surcapacités engendrés par les besoins de flexibilité. »

Cette approche permet 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*. Elle 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 processus de production (c'est le point 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 (Lee et Tang, 1998). Le but en réalité est de produire un maximum d'éléments standard et de repousser le plus longtemps possible le point où chaque produit est différent des autres et a besoin d'être identifié comme tel.

Contrairement à (Lee, 1997) qui définit le type de différenciation retardée selon l'approche

Chapitre 1 – Etat de l’Art et Problématique

qui sert à la réaliser, c’est-à-dire la standardisation, la conception modulaire et la restructuration de processus de production, (Zinn, 1990) donne sa propre classification qui est résumée dans le tableau 1.

Différenciation d’étiquetage	L’entreprise vend un même produit sous différentes marques. Les étiquettes indiquant la marque ne sont mises qu’à l’arrivée d’une commande.
Différenciation de packaging	Le distributeur se charge du packaging adapté à chaque client.
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.

Tableau 1.1. *Classification de la différenciation retardée*

Pour (Agard, 2004) et (Lee, 1997), l’industriel dispose de (et peut combiner) plusieurs stratégies possibles pour mettre en œuvre cette différenciation retardée : la personnalisation par l’utilisateur, la différenciation perceptuelle, la différenciation par restructuration des processus de production, la différenciation retardée géographique, la différenciation au stade de la distribution, la standardisation et la conception modulaire (qui fera l’objet de la section suivante).

La personnalisation par l’utilisateur : l’utilisateur est le créateur de la variété des produits par la diversité des usages qu’il en fait. De ce fait, il réduit les exigences de flexibilité pour le promoteur qui ne peut prévoir tous les cas d’usage. L’industriel peut aller jusqu’à favoriser cette activité créatrice des utilisateurs, en fabricant des produits facilement adaptables par les utilisateurs. C’est cette 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 exigence moindre sur l’anticipation des besoins spécifiques des consommateurs, ainsi que sur la flexibilité de son système de production. Dans ce cas, la différenciation retardée est à son maximum puisque c’est l’utilisateur lui-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, fiables 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.

Chapitre 1 – Etat de l'Art et Problématique

La différenciation perceptuelle : la différenciation des produits se situe au stade de la consommation des produits, la création de variété ne porte ni sur la production ni sur la distribution de ces produits. Elle porte sur la perception des individus. Les moyens de différenciation appartiennent 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 nécessaire que le produit dispose d'une certaine flexibilité qui permette la politique de la différenciation des perceptions. Par exemple, la capacité des téléphones mobiles d'accéder à différents réseaux de communication où se fera la différenciation.

La différenciation par restructuration du processus de production : l'objet de la différenciation retardée du produit par action sur le processus de production réside en la modification de l'ordre des phases du mode opératoire pour repousser les opérations générant de la diversité vers la fin du processus. (Lee et Tang, 1998) présentent deux exemples : dans un cas, l'opération qui cause la différenciation est repoussée à la fin du processus et c'est au moment de la distribution que s'effectue la différenciation par l'assemblage des éléments nécessaires. Le second cas traite de l'inversion dans l'ordre de réalisation de deux opérations. La diversité se produisant plus tard dans le processus, le délai de livraison durant lequel la demande fluctue peut être petit. De plus, cette réduction de délai fournit un levier pour la mise en flux tendu des opérations retardées. L'inversion a aussi pour effet de réduire la diversité des composants des opérations avancées, ce qui engendre des gains équivalents à une standardisation des composants.

La différenciation retardée géographique : en considérant le processus de transformation de matière, la différenciation retardée géographique vise à déplacer physiquement un processus de transformation de matière avec un processus de stockage et transport (Lee et al., 1993 ; Lee et Billington, 1994). Par un processus dual, les opérations générant une faible diversité peuvent être rassemblées sur un nombre limité de sites afin de réaliser des économies d'échelle et des gains de productivité. Cette action corrective pousse ainsi à situer les processus à forte diversité au plus près des clients et à conserver les processus à faible diversité sur des sites à haute productivité et faible coût de fonctionnement. La proximité de la demande des installations de fin de chaîne permettra d'améliorer le taux de service mais dégradera le paramètre coût. Les décisions concernant cette forme de localisation des procédés sont très délicates car liées à la fiabilité géographique de la demande, à la disponibilité des transports et à la stabilité des pays à coûts de production modérés.

Chapitre 1 – Etat de l’Art et Problématique

La différenciation au stade de la distribution : le distributeur a pour rôle de faire passer les produits finis de la phase de production à celle de leur acquisition ou 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 consommations en utilisant des stocks intermédiaires,
- transformer les produits dans le sens de l’adaptation aux besoins du client, le produit devient ainsi spécifique par l’adjonction de services, modification des caractéristiques du produit, personnalisation, etc.

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

- déjà, un rôle de déconnection de la production aux variations des besoins dans l’espace 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.

La standardisation : une analyse des effets de la commonalité¹ sur les stocks a été effectuée par (Fouque, 1999). Il s’est intéressé à déterminer quelle augmentation maximale Cc^* du coût du composant Cc est acceptable, Cc pouvant être soit une généralisation dans l’utilisation du composants $C4$ ou $C5$ ou soit un nouveau composant (figure 1.7).

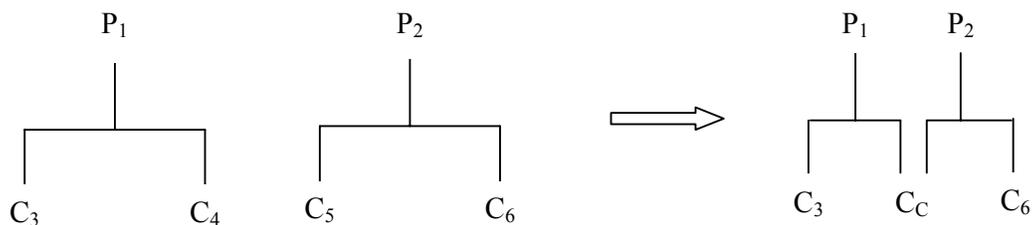


Figure 1.7. Commonalité entre deux produits

Il a mis en évidence une série de situations favorables à cette augmentation : le niveau de service des produits 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 variantes de P1 et P2

¹ Commonalité : généralisation de l’utilisation d’un composant à plusieurs produits finis

Chapitre 1 – Etat de l'Art et Problématique

diminue, les coûts des composants C4 et C5 sont proches l'un de l'autre et / ou la demande moyenne des produits P1 et P2 est faible. Il apparaît que 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 commonnalité permet d'augmenter la qualité des ressources (apprentissages, grande série). Les travaux de (Lee et Tang, 1997) illustrent parfaitement cela par un exemple industriel représenté par la figure 1. 8 où deux types de cartes électroniques pour imprimantes sont réunis en une seule.

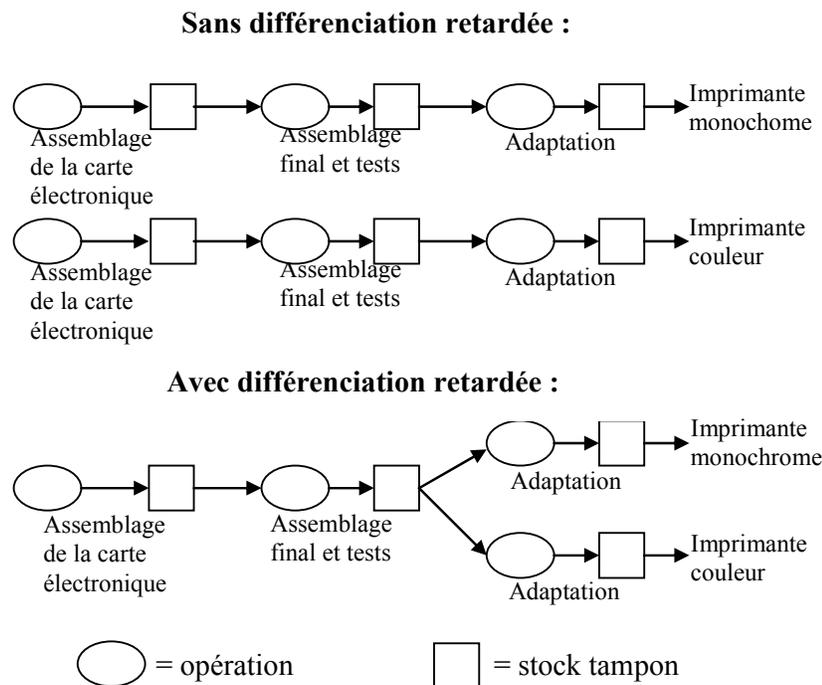


Figure 1.8. La standardisation des composants

1.5.2. La conception modulaire

Il arrive des moments où la création de la diversité ne peut être reportée vers le consommateur ou le distributeur. Dans ce cas, c'est le concepteur qui s'en chargera. Pour ce faire, il se réfère à des éléments communs à différents produits. Ces éléments communs à plusieurs produits (modules ou composants modulaires) sont donc destinés à des emplois multiples, ils doivent satisfaire un ensemble de besoins relatifs à chacun de leur emploi. Le but est d'utiliser un minimum de composants différents pour réaliser un maximum de produits différents. La conception modulaire consiste à décomposer un produit en sous-éléments plus ou moins indépendants appelés modules. Pour (Subbu et al., 1999), elle consiste à partager des éléments entre différentes fonctions et/ou différents produits finis. Ceci

Chapitre 1 – Etat de l'Art et Problématique

nécessite pour le module d'avoir des surcapacités fonctionnelles. 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. L'interchangeabilité suppose de standardiser non pas le module mais les interfaces entre modules et les types de fonctions ou, plus généralement, les objectifs de chaque module. Par la suite, un module pourra avoir différentes références correspondant à des performances différentes pour les objectifs recherchés.

On appelle « cas d'emploi » d'un module m (Agard, 2002) l'ensemble des produits dans lesquels m entre comme élément de composition. Un indicateur de 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. Il s'ensuit donc que tout produit est obtenu en faisant un assemblage des modules au besoin. Le but de la conception modulaire est alors d'augmenter le nombre de cas d'emploi, afin d'utiliser des modules communs dans différents produits, et de permettre de réaliser un grand nombre de produits finis différents à partir d'un nombre limité de composants modulaires. Elle consiste à définir les modules, de telle sorte que leurs caractéristiques et leur nombre permettent de satisfaire une variété d'usages donnée en minimisant la somme des coûts engendrés par leur conception (coût de surcapacités fonctionnelles) et leur production (coûts liés à la variété) (Tarondeau, 1998). La modularisation vise donc à complètement reconcevoir un ensemble de produits pour structurer des modules communs.

(Kusiak, 1996 ; Huang, 1998) 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 1.6) permet d'extraire les éléments interchangeable, standardisés et indépendants en regroupant les interactions par modules.

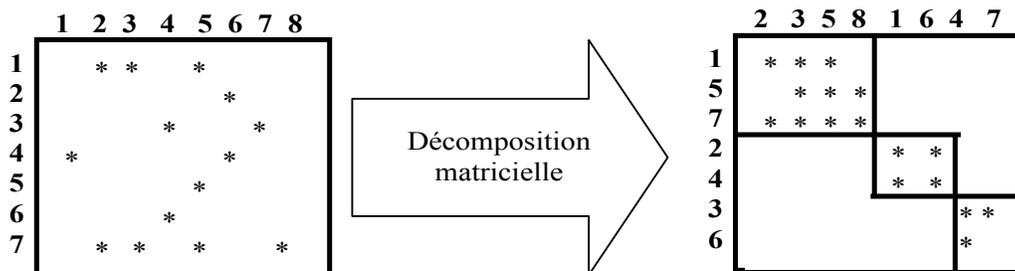


Figure 1.6. Décomposition matricielle

Chapitre 1 – Etat de l'Art et Problématique

Quatre types de modules sont alors définis :

- module de base : il contient les fonctions de base, en principe non variables et fondamentales pour le produit ou système,
- module auxiliaire : ce sont les 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 : contenant des fonctions spécifiques au consommateur, ces modules sont conçus individuellement pour satisfaire aux besoins spécifiques des clients.

De même, trois types de modularité sont définis:

- échanges de composants : c'est le cas où 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 produits,
- partage de composants : c'est le 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 toute combinaison de composants de base.

Ils soutiennent également que la modularité dépend de deux caractéristiques de conception de composants, à savoir : la similitude entre architecture physique et fonctionnelle et la minimisation des interactions entre les composants physiques.

1.5.3. Design Structure Matrix (DSM)

A travers les travaux sur la résolution des systèmes d'équations indépendantes, (Steward, 1981) a présenté l'outil « *Design Structure Matrix* ». C'est un outil de représentation d'un système complexe qui supporte les solutions du problème de la décomposition d'une architecture produit.

DSM est une matrice carrée dans laquelle sont établis les degrés de dépendance des composants d'un système donné (ce peut être un produit, un projet, un processus ...). Le nombre de lignes correspond au nombre de composants, les lignes et les colonnes sont nommées et ordonnées de façon identique.

Chapitre 1 – Etat de l’Art et Problématique

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A	■	X				X			
B		■		X	X				
C			■						
D		X		■					
E					■	X			
F		X	X			■			
G							■		
H								■	
I									■

Figure 1.2. *Matrice DSM*

Nous présenterons brièvement les quatre types de DSM qui existent et nous insisterons particulièrement sur l’un d’entre eux (le DSM-composant):

- *le DSM – composant* qui permet de présenter les relations entre les composants d’un système (ou produit),
- *le DSM – équipe* dont la particularité réside dans le fait de présenter les relations parmi les équipes travaillant sur un projet,
- *le DSM – activité*. L’idée ici est de mettre en évidence les liens entre les activités réalisées au cours du processus de conception,
- *le DSM – paramètre* a pour but de présenter les liens entre les paramètres.

(Pimmler et Eppinger, 1994) ont proposé une décomposition en trois étapes de l’architecture produit dans le cas du DSM – composant :

- décomposer un système en composants simples,
- documenter et déterminer les relations d’interactions entre les composants,
- analyser la réintégration potentielle des composants par la méthode « *clustering* »².

Cinq types d’interactions et références à documenter existent pour déterminer les relations entre les composants.

² Clustering : méthode de segmentation qui consiste à partager une population en sous-populations partageant des caractéristiques communes. La méthode permet d’obtenir un maximum d’homogénéisation dans chaque groupe et un maximum d’hétérogénéité entre les groupes. Cette méthode est une méthode prédictive, qui a pour rôle de prédire une sortie en fonction des entrées qui sont fournies.

Chapitre 1 – Etat de l’Art et Problématique

Type d’interaction	Description de types d’interaction
Espace	Les besoins de la contiguïté entre deux éléments pour l’alignement, l’orientation, l’assemblage ou le poids.
Structurel	L’existence de condition fonctionnelle pour le transfert des charges, des forces.
Energétique	Les besoins du transfert de l’énergie, de chaleur, de vibration, d’électrique, du bruit.
Matériel	Les besoins du transfert de l’air, de l’huile, de l’eau, etc.
Informationnel	Les besoins du transfert du signal et des contrôles

Tableau 1.3. Description du type d’interaction (Sosa et al., 2003)

Le tableau 1.4 présente les degrés de dépendance. En particulier, chaque niveau de dépendance (spatial, structure, énergie, matériel et information) peut être évalué à partir de la matrice proposée par (Pimmler et Eppinger, 1994).

Niveau de dépendance	Degrés de dépendance	
	Description	Mesure
Demandé	La dépendance est nécessaire pour la fonctionnalité	+2
Souhaité	La dépendance est favorable, mais nécessaire pour la fonctionnalité	+1
Indifférent	La dépendance n’affecte pas la fonctionnalité	0
Non-souhaité	La dépendance cause des effets négatifs	-1
Préjudiciable	La dépendance doit être empêchée pour achever la fonctionnalité	-2

Tableau 1.4. Description de degré de dépendance (Pimmler et Eppinger, 1994)

Les travaux sur l'utilisation des DSM pour la conception modulaire sont très intéressants puisqu'ils permettent de constituer des modules. L'hypothèse de base est que les composants du produit, qui constitueront par regroupement des modules, sont connus au début de l'étude.

1.5.4. La standardisation et technologie de groupe

La standardisation permet de satisfaire plusieurs besoins par un produit unique. Pour cela, il est souvent nécessaire de surdimensionner le produit offert. Le surcoût provoqué par le surdimensionnement est compensé par les gains de productivité et de gestion induits. Il s’agit d’un problème de gestion économique.

D’après (Tarondeau, 1998), la standardisation consiste à utiliser un composant ou

Chapitre 1 – Etat de l'Art et Problématique

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 composants 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.

¶

ancienne qui correspond aux approches de type technologie de groupe. La technologie de groupe est une méthode 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 et archiver le savoir du personnel. Le principe est le suivant :

- 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, etc.
- Utilisation de gammes types (ou gammes mères) qui contiennent la liste ordonnée de phases. L'ordre opératoire est optimisé globalement, mais tous les degrés de complexité des pièces ne sont pas analysés dans le détail.

L'idée de la standardisation est de proposer aux concepteurs d'utiliser un nombre limité de composants prédéfinis. Les profits d'un tel exercice dépendent de l'investissement nécessaire à la standardisation des composants et des profits résultants des économies d'échelle. Ces considérations ont conduit (Lee et Tang, 1997) à développer un instrument mathématique permettant de trouver le meilleur compromis, (Erol, 1999) à proposer une formulation mathématique pour la standardisation des composants et (Dupont et al., 1999) de dire que c'est un problème d'optimisation non linéaire en nombres entiers. Les produits étant modularisés, il est encore possible de réduire la diversité en standardisant les modules. Elle s'effectue en standardisant les composants des modules et/ou en suréquipant les modules. L'objet du suréquipement est de concevoir des produits finis et des modules de telle façon que différentes demandes puissent être satisfaites par une même référence de produit ou de module (Aldanondo et al., 1997 ; Dupont et al., 1999). On obtient ainsi une réduction importante du nombre de références (produit et module) tout en conservant la même

Chapitre 1 – Etat de l'Art et Problématique

diversité au niveau de l'offre. Ce résultat est cependant obtenu au prix d'une augmentation du coût (les fonctionnalités les plus basiques sont satisfaites au prix de la fonctionnalité la plus évoluée).

1.5.5. Variété et diversité, customisation de masse

La réponse à la combinatoire des besoins fonctionnels conduit à proposer plusieurs concepts : une variante unique capable de couvrir tous les besoins, des variantes sur mesure et des solutions intermédiaires à base de « modules ».

Les travaux de (Agard, 2002) ont porté sur la réalisation d'une grande diversité de produits à moindre coût. Pour cela ils ont cherché à répondre aux questions suivantes :

- quelle diversité proposer ?
- comment gérer cette diversité ?

Une étude de l'existant faite en matière de modélisation et de réalisation des familles de produits leur a permis de constater :

- 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,
- qu'il existe un certain nombre d'outils, aussi bien au niveau du produit qu'au niveau du processus de fabrication permettant la réalisation de famille de produits
- le manque actuel de démarche globale dans l'approche et la résolution des problèmes de conception de produits à forte diversité.

L'apport essentiel de leurs travaux réside en la proposition d'un modèle utilisé dans le cadre d'une méthodologie globale de conception de produits à forte diversité, structurée en trois points : séparation entre les différents types de diversité nécessaires à la description du cycle de mise sur le marché d'une famille de produits, déclinaison d'un type de diversité à l'autre en s'appuyant sur les outils actuellement disponibles, proposition d'une démarche de conception produit/process dans le cas de la conception de produits à forte diversité.

1.5.5.1. La variété de l'offre : comment la mesurer

La variété de l'offre engendre le besoin de flexibilité productive de l'entreprise. C'est pour cette raison que la mesurer devient particulièrement important. Des problèmes méthodologiques vont assurément entacher cette mesure. En réalité, la variété est un terme imprécis qui regroupe et englobe tout à la fois des modèles qui se distinguent par quelques caractéristiques et des modèles radicalement différents, et entre ces deux extrêmes, toute une

Chapitre 1 – Etat de l’Art et Problématique

palette de situations intermédiaires. Pour le premier cas, les investissements supplémentaires et massifs en capital fixe ne seront, en général, pas nécessaires. Dans le second cas ils ont toutes les chances de l’être. La question est donc de savoir si des produits nettement différents peuvent être fabriqués par une même capacité de production et s’il y a un intérêt à la faire. Sur le plan empirique, la mesure des concepts employés crée des difficultés qui imposent des choix méthodologiques.

Dans l’industrie automobile la distinction des véhicules totalement nouveaux de ceux qui ne le sont pas, (et qui sont en fait des dérivés de véhicules déjà existants) constitue une première étape de la mesure de la variété. Dans le premier cas le véhicule dispose d’une plate-forme³ nouvelle. Dans le second cas, le véhicule utilise une plate-forme déjà existante.

(Jetin, 1994) observe que les vrais problèmes apparaissent avec les véhicules partageant une même plate-forme (plate-forme commune). Entrent dans cette catégorie des véhicules nettement distincts et des véhicules qui se différencient seulement par des variantes (les versions 2 portières – 4 portières, les versions break, les versions bi-corps-tri-corps). En choisissant l’optique du producteur et non celle du consommateur pour distinguer ces véhicules, il apparaît que deux véhicules, aux yeux du consommateur peuvent être considérés comme deux modèles différents (*nous parlons alors de diversité fonctionnelle forte*). A titre d’exemple, (Jetin, 1994) rappelle que, d’une part, l’Escort et l’Orion, et d’autre part, la Renault 9 et la Renault 11, ne sont pas considérés comme différents dans l’optique du producteur, car ils ne nécessitent pas de lignes de production distinctes à l’assemblage et donc d’investissements spécifiques (*nous parlons alors de diversité industrielle faible*). La différenciation des deux modèles s’opère au niveau de la finition-soudure (*différenciation perceptuelle*). Ce choix aboutit à minimiser considérablement la variété de l’offre en ce qu’il élimine par exemple systématiquement les véhicules qui se distinguent par des caractéristiques différentes. C’est pourquoi, selon les auteurs, il est intéressant de choisir un moyen terme en considérant comme différents deux véhicules d’une même marque possédant une plate-forme commune, mais destinés à des segments différents du marché (par exemple, la Peugeot 205 et la Peugeot 309), ou bien des véhicules possédant une plate-forme commune, s’adressant au même segment du marché mais vendu sous des marques différentes (par exemple, la Citroën ZX et la Peugeot 306), qui sont assemblés sur les mêmes lignes (Jetin, 1994).

Une dernière étape consisterait à comptabiliser toutes les variantes d’un même modèle non encore prises en compte : version 2 portes- 4 portes, 2 volumes – 3 volumes pour une même marque et un même segment de marché (Renault 19 et Renault 19 Chamade), ainsi que les multiples possibilités de motorisation. Ce niveau fin de différenciation a l’inconvénient de

³ Plate-forme : définition en première approche : mise en commun entre des modèles différents du maximum de pièces non visibles par le client.

Chapitre 1 – Etat de l’Art et Problématique

l’indisponibilité des sources statistiques. Il en est de même a fortiori de tout ce qui relève du domaine de l’option (couleur, confort intérieur, autoradio etc...). En somme cette approche, loin d’être parfaite offre l’avantage de pouvoir mesurer la variété de l’offre qui entraîne une contrainte de flexibilité pour le constructeur. Une définition assez stricte des modèles permet aussi de mesurer facilement les économies d’échelle.

1.5.5.2. Approche par « stratégies de profit » et stratégie de « volume et diversité »

L’étude des modèles productifs dans l’industrie au cours du XXème siècle a permis de constater que les manufacturiers n’ont pas privilégié les mêmes sources de profit. Dans le cas de l’automobile par exemple, (Boyer et Freyssenet, 2004) ramènent les sources directement liées à cette activité à six : les économies d’échelle consistant à répartir les coûts fixes sur le *volume* le plus large possible pour réduire les coûts unitaires, la *diversité* de l’offre qui permet de répondre aux demande solvables dans leur variété, la *qualité* du produit permettant de faire payer à la clientèle haut de gamme la satisfaction de ses attentes de différenciation sociale, l’*innovation* commercialement pertinente qui garantit, pendant un temps, une rente profitable, la *flexibilité* productive qui permet de rester profitable lors des baisses conjoncturelles du marché, et la réduction *permanente des coûts* à volume constant qui permet de dégager une marge en toutes circonstances. Les « stratégies de profit » sont la ou les sources de profit privilégiés selon les constructeurs forment des combinaisons particulières. Au cours des dernières décennies, les manufacturiers ont mis en œuvre plusieurs stratégies de profits différentes : la stratégie de « volume et diversité », la stratégie de « qualité », la stratégie de « réduction permanente des coûts à volume constant », la stratégie d’« innovation et flexibilité ». Ces « stratégies de profit » ne sont pas toutes également pertinentes en tout temps en tout lieu et pour cause, il faut recourir à des spécificités liées au type de marché et de travail.

Le volume et la diversité sont la combinaison de deux sources de profit, considérées à priori comme incompatibles. C’est General Motors qui a été amené dans les années vingt et trente à surmonter la contradiction, en mettant en commun entre des modèles différents le maximum de pièces non visibles par le client (la plate-forme), et en réduisant donc leur diversité à la diversité perceptible par le client à savoir essentiellement la carrosserie, l’habillage intérieur et les équipements. Cette stratégie n’est toutefois viable et profitable qu’à deux conditions : la diversité de « surface » doit être commercialement acceptable, les « économies d’échelle » doivent être poursuivies. Pour que la diversité de « surface » soit commercialement acceptable, il faut que la demande soit modérément différenciée. Une stratégie « volume et diversité » appelle une politique de gammes parallèles, relevant de marques différentes, finement hiérarchisées, couvrant les principaux segments du marché, excluant généralement les modèles de très bas de gamme comme les modèles de très haut de

Chapitre 1 – Etat de l’Art et Problématique

gamme, de même que les véhicules « niches » correspondant à des catégories de clients numériquement trop limitées et à la pérennité trop incertaine. L’organisation productive doit permettre de gérer la diversité et les variations de la demande entre modèles, versions et options, de telle sorte que les sur- et les sous-capacités simultanées soient évitées et que la complexification des approvisionnements, de la conception, de la fabrication et de la distribution soient maîtrisées.

1.5.5.3. La personnalisation ou le « sur-mesure de masse » (mass customization)

Dans ce type de marché concurrentiel visant en priorité la satisfaction des clients, les entreprises sont amenées à répondre à des besoins fonctionnels de plus en plus variés. Pour mieux cibler la clientèle, les réponses à ces besoins fonctionnels doivent être personnalisées. Les entreprises sont donc conduites à proposer un nombre important de variantes pour un même produit afin de satisfaire tous les besoins. Pour les concepteurs, cette diversité fonctionnelle du besoin doit être maîtrisée pour limiter, en parallèle, les diversités industrielles et techniques. Une faible diversité technique contribue à la maîtrise des coûts sur le tout le cycle de vie de produits. L’entreprise doit alors gérer plusieurs niveaux de diversités : la diversité des besoins fonctionnels, la diversité technique (relative au nombre de références produit gérées), la diversité industrielle. Le problème résultant consiste à satisfaire et à gérer au mieux la diversité du besoin des clients tout en réduisant les coûts et les délais de mise sur le marché. Ce problème est équivalent à rechercher un compromis entre une logique de production de masse, minimisant le coût total de fabrication et de distribution, une logique marketing caractérisée par une diversité fonctionnelle importante assurant la satisfaction du besoin client.

1.6. Conclusion et problématique

Au terme de l’état de l’art que nous venons de présenter, une articulation se dégage entre une problématique industrielle et une problématique universitaire. Sur le plan industriel, il existe des besoins et difficultés réels pour lesquels les solutions ne sont pas toujours évidentes. Du côté de la communauté universitaire, les travaux de recherche permettent d’apporter des réponses aux problèmes posés et souvent anticipent ceux qui n’existent pas encore de façon concrète. C’est de cette évolution à double vitesse entre les problèmes rencontrés par les industriels pour lesquels les chercheurs n’ont pas de solution ou alors les solutions proposées par les universitaires concernant des problèmes d’industrie à venir que naît notre problématique. Celle-ci résulte d’une convergence entre les problèmes industriels et l’état d’avancement de la recherche. Nous allons aborder tour à tour les besoins industriels,

Chapitre 1 – Etat de l’Art et Problématique

les travaux de recherche s’y rapportant, dégager la problématique puis faire ressortir notre contribution.

De nos jours, le client souhaite avoir un produit sur mesure qui réponde à l’ensemble de ses besoins et se refuse de payer les fonctions qui lui sont inutiles. Cette attitude à l’avantage de créer une diversification des besoins qui astreint les industriels à adopter plusieurs stratégies. D’une part ils optent pour la conception d’un produit unique devant répondre à tous les besoins et par voie de conséquence satisfaire tous les clients et d’autre part, pour la conception de produits sur mesure répondant strictement aux besoins d’un client spécifique. Le premier cas a l’inconvénient d’avoir un surcoût dû aux suréquipements et le second de générer une augmentation des coûts de production. Face à ces deux désavantages, l’option de solutions intermédiaires fait de plus en plus son chemin dans l’optique de concevoir et assembler simultanément les éléments aussi bien standard que spécifiques. Ceci conduit à la gestion simultanée de plusieurs types de diversités. La satisfaction du client (forte personnalisation ou sur-mesure) est assurée par la diversité fonctionnelle, l’explosion combinatoire des références de produit est assurée par la gestion de la diversité technique et enfin, la limitation des coûts et des délais industriels est assurée par la maîtrise de la diversité industrielle. Evidemment la solution idéale consiste à proposer des produits à diversité commerciale maximale tout en limitant les diversités technique et industrielle.

Face à ces problèmes industriels, les chercheurs ont apportés plusieurs réponses. Les travaux de (Djemel, 1994 ; Stadzisz, 1997) ont contribué à une nouvelle modélisation des familles de produits, de l’élaboration et l’évaluation des gammes génériques d’assemblage inspirée de la méthode LAB mono produit. Ceux de (Agard, 2002 ; Hadj-Hamou, 2002) sont axés sur la proposition de modèles servant de support à une méthodologie globale de conception de produits à forte diversité, plus précisément 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. Ils ont également proposé une démarche multi-phases de préconception et de personnalisation des produits à forte diversité avec pour résultat un ensemble de solutions de conception. Plusieurs autres travaux, en particulier ceux de (Kjellberg et Schmekel, 1992 ; Krause et al., 1993), en vue de répondre aux besoins industriels concernant la modélisation de produits se sont principalement focalisés sur la description détaillée des produits ou composants individuels tels que les modèles de surface, les modèles de solide et les modèles basés sur les « features ». Les travaux de (Lee et Tang, 1998 ; Fouque, 1999 ; Pimmler et Eppinger, 1994 ; Aldanondo et al., 1997 ; José et Tollenaere, 2004 ; Henderson et Carl, 1990 ; Hsaun, 2000 ; Sako, 2003) ont permis d’optimiser la conception modulaire. Le principe de celle-ci consiste à décomposer un produit en sous systèmes plus ou moins indépendants. Certains auteurs (Kusiak, 1996 ; Huang, 1998) l’ont formalisé afin de générer une grande variété de produits par une relation matricielle entre les composants utilisés dans le produit et les fonctions

Chapitre 1 – Etat de l’Art et Problématique

réalisées par celui-ci. Dans la même logique (Steward, 1981) a présenté l’outil *DSM* pour la représentation de systèmes complexes supportant les solutions du problème de décomposition d’une architecture produit. Cette architecture produit favorise la bonne gestion de la complexité croissante des produits, ce qui est une réponse aux industries d’assemblages (Ulrich, 1995).

Au vu de ce qui précède, il apparaît en particulier que la robustesse de la conception de familles de produits permet une meilleure conception de plate-forme produit facilitant ainsi l’exploration et la synthèse des concepts communs de la plate-forme afin de générer les familles de produits appropriés.

Ainsi donc, la recherche décrite dans ce mémoire est centrée sur une contribution à la conception modulaire des familles de produits. Ces travaux pourront fournir, aux concepteurs, une aide en termes de démarche et de support de modélisation de l’architecture des familles de produits, en phase de conception de principes de solutions (où il s’agit de définir les architectures fonctionnelles et organiques). Ils représentent pour une part une suite aux travaux de la thèse de Stadzisz développés au LAB par l’équipe Méthodologie d’Assemblage. Une famille de produits est le résultat de la différenciation d’un produit de base à partir de modules dérivés. Les objectifs sont bien sûr de réduire les coûts et les délais de la conception tout en assurant la diversité souhaitée par le client. L’objectif fondamental de ce travail est d’apporter une contribution à une « modélisation » de conception modulaire pour les familles de produits. En hypothèse nous considérons que le contenu du cahier de charges fonctionnel tout comme l’ensemble fonctions que peut remplir la famille de produits sont connus. Notre apport s’articule autour des trois points suivants :

A partir d’une réflexion sur la modularisation, nous proposons une méthodologie permettant de développer une architecture de famille de produits afin de rationaliser la conception de produits selon le point de vue de la diversité. Les concepts liés à l’architecture modulaire sont abordés et discutés. Des principes d’organisation d’une architecture de famille de produits sont proposés.

Notre contribution à la modélisation des familles de produits s’appuie sur la différenciation d’un produit de base à l’aide des grammaires de graphe. Nous proposons entre autres des formalismes permettant d’ajouter, d’éliminer, d’échanger et redimensionner un module avant de passer au diagramme de contrôle et des règles de productions.

Le troisième point développé découle de la modularité dans la mesure où la réutilisation d’un composant dans le cadre d’un système tend naturellement à complexifier les couplages. Afin de répondre donc à la conception de tels systèmes, nous avons proposé une réflexion sur le passage entre espace fonctionnel et organique pour lequel nous avons défini

Chapitre 1 – Etat de l'Art et Problématique

une matrice d'allocation. Pour optimiser les efforts de conception sans par ailleurs préjuger de la pertinence des résultats, nous avons transformé et obtenu des matrices d'allocation diagonales par blocs, véritable réponse aux couplages non désirés.

Chapitre 1 – Etat de l'Art et Problématique

Chapitre 2

Architecture modulaire en conception de famille de produits

Chapitre 2 – Architecture modulaire en conception de famille de produits

Chapitre 2 – Architecture modulaire en conception de famille de produits

2.1. Introduction.....	47
2.2. Terminologie sur les « familles de produits ».....	48
2.3. Architecture du produit	51
2.3.1. Définitions et Concepts.....	51
2.3.2. Différents types de modularité.....	53
2.4. Impacts sur les pratiques et enjeux de l'adoption de la modularité.....	55
2.4.1. Conditions de mise en œuvre d'une architecture modulaire du produit et opportunités des architectures modulaires	55
2.4.2. Les apports d'une architecture modulaire.....	57
2.4.2.1. Stratégies de la firme du donneur d'ordre.....	57
2.4.2.2. Rendement économique pour le donneur d'ordre.....	57
2.4.2.3. Possibilités nouvelles pour le produit	58
2.4.2.3. Possibilités nouvelles pour le processus de production	58
2.5. Architecture organisationnelle	59
2.5.1. Lecture couplée de la modularité.....	59
2.5.2. La dimension organisationnelle de la modularité	60
2.6. Architecture de Famille de Produits	62
2.6.1. Architecture modulaire	62
2.6.2. Génération des variantes et réalisation de la variété de produits	64
2.7. Plate-forme	66
2.7.1. Management et architecture organisationnelle dans l'approche plate-forme	66
2.7.2. Cas particulier des plates-formes automobiles	67
2.8. Proposition de quelques principes d'architecture de famille de produits	71

Chapitre 2 – Architecture modulaire en conception de famille de produits

2.8.1. Structure générique du produit (SGP).....	71
2.8.2. Produit de base.....	73
2.8.3. Principe de composition.....	73
2.9. Conclusion et limites de l'architecture modulaire	76

2.1. Introduction

Dans le contexte concurrentiel actuel, les industriels se doivent de concevoir et de réaliser une grande variété de produits pour répondre aux différents besoins des clients ainsi qu'aux 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 les délais et des coûts acceptables de conception et de production.

Les approches et stratégies de conception diversifiées de famille de produits pour le « sur mesure de masse », très répandues dans la littérature, peuvent être classées en trois thèmes, à savoir :

- Architecture de produit
- Plate-forme produit
- Famille de produits

Le développement de famille de produits a été reconnu comme moyen efficace pour réaliser une économie d'échelle, pour accommoder une diversité croissante de produits à travers des marchés spécifiques et pour réduire le développement des risques par la réutilisation des éléments provenant des offres et activités antérieures.

Dans ce chapitre, nous présentons un état de l'art des concepts développés dans ce domaine, puis une réflexion sur la modularisation. L'architecture du produit et l'architecture organisationnelle sont traitées. Dans un premier temps, nous analysons tour à tour les architectures modulaire et intégrale ainsi que les avantages et inconvénients de chacune pour déduire une lecture couplée de la modularité. Une attention particulière est portée sur l'architecture de famille de produits, laquelle nous conduit au concept de plates-formes. Des principes d'organisation d'une architecture de familles de produits sont proposés. Le chapitre se termine par une conclusion présentant les limites de l'architecture modulaire.

2.2. Terminologie sur les « familles de produits »

La difficulté de l'étude du concept de famille de produits réside dans l'absence d'une terminologie « *universelle* » (Salvolaine et al., 1995). Les termes les plus souvent utilisés : « *famille de produits* » et « *variante de produits* » ont des significations parfois différentes.

Un autre terme utilisé est : « *groupe de produits* » qui représente un nombre de produits ayant une ou plusieurs caractéristiques permettant une combinaison du processus de planification et de contrôle. Toutefois, un « *groupe de produits* » est semblable à une « *famille de produits* » mais les industriels et universitaires utilisent le second terme plutôt que le premier (De Lit, 2001).

Une revue de la littérature nous a permis de rassembler différentes définitions du terme « *famille de produits* ». Ces définitions s'appuient sur une ou des propriétés communes d'un ensemble de produits. Sans prétendre être exhaustif, nous pouvons citer les propriétés suivantes : des fonctions communes, des composants communs, des caractéristiques communes, des processus de production communs, des technologies communes ...

Une famille de produits est composée d'une collection de produits ayant des similarités importantes dans leurs caractéristiques, c'est un ensemble de produits finaux constitués d'un grand nombre d'ensemble de composants (Rampersad, 1994 ; Ulrich et Tung, 1991). Pour (McKay et al., 1996), c'est un ensemble qui identifie les différences et les similarités entre les produits individuels formant la gamme des produits. Par ailleurs, chaque produit d'une famille de produits inclut quelques composants qui sont communs à tous les produits d'une famille et les autres optionnels. Ces composants optionnels peuvent être partagés par plusieurs produits de la famille. Ainsi une famille de produits contient une option de base pour les composants communs et plusieurs qui constituent les différentes variantes de produits de la famille (Danloy et al., 1999).

Un ensemble de produits manufacturiers à l'intérieur d'une même entreprise et pour lesquelles les fonctions principales sont identiques est une famille de produits (Dufrène, 1991 ; Perrard, 1993). (Falkenauer et Delchambre, 1993 ; Rekiek et al., 1997) nuancent en précisant que outre le fait que les produits présentent des fonctions communes, quelques caractéristiques doivent être différentes d'un produit à l'autre. Autrement dit, une famille de produits est un groupe de produits partageant des formes, des caractéristiques et fonctions communes visant une ou plusieurs niches de marchés.

Chapitre 2 – Architecture modulaire en conception de famille de produits

Plusieurs auteurs (Miller et Liberatore, 1993 ; Laokko et Mäntylä, 1994 ; Fan et Liu, 1999) définissent les structures de famille de produits sur la base de processus de routage, de fabrication et/ou d'assemblage similaires. Les familles de produits représentent des "packages" intermédiaires de produits finaux partageant des caractéristiques identiques en terme de processus de production. Ainsi, une ligne de production pouvant réaliser un produit est également capable de produire tout autre produit de la famille.

Certains auteurs ont des terminologies qui combinent à la fois l'approche par processus communs, caractéristiques communes et fonctions communes. Partant du principe qu'une famille de produits est un ensemble d'objets répondant à un ou plusieurs critères définissant une parenté entre eux, (Meunier, 1989), (Meyer, 1997 ; Meyer et Lopez, 1995 ; Erens, 1996 ; Erens et al., 1997) la définissent comme un ensemble de produits possédant des technologies communes qui concourent directement à un ensemble d'applications commerciales. Ils concluent qu'une famille de produits est un concept créé pour le marché, répondant à l'ensemble des attentes des consommateurs par l'introduction de la variété dans la définition de l'architecture du produit et dans celle des processus de fabrication. C'est somme toute un ensemble de produits partageant des technologies communes et ayant un même champ d'application du marché (Siddique et Rosen, 1999). (Stadzisz, 1997) en introduisant plusieurs notions, considère une famille de produits comme un ensemble de produits composés, possédant une équivalence fonctionnelle (au moins partielle) et différenciées par leurs formes, leurs structures, leurs matériaux, leurs propriétés et / ou les moyens de solidarisation de leurs composants. En outre, elle doit satisfaire les conditions de similarités, de volume de production et de durée de vie.

Cet état de l'art montre que les définitions de famille de produits sont relatives aux produits et mettent un accent fort sur la commonalité de ses fonctions et de ses constituants, en se focalisant sur les processus de production et les technologies nécessaires aux produits à l'intérieur de la famille de produits. Certaines définitions mettent un accent sur les segments de marchés communs. Une comparaison de la famille de produits à d'autres termes comme « *plate-forme de produits* » et « *éventail de produits* » est donnée dans (Erens, 1996).

La définition de "produit variant" (ou variante) change aussi selon les auteurs. En effet, elle est une conséquence directe de la définition de famille de produits. Pour (Erens, 1996), un "produit variant" est une occurrence de famille de produits, quelquefois

Chapitre 2 – Architecture modulaire en conception de famille de produits

présenté comme un produit propre, souvent dérivé d'une famille de produits pour répondre à la demande du consommateur. Pour (McKay et al., 1996), une variante de famille de produits est un produit séparé (individuel) conforme à cette famille de produits.

(Rekiek et al., 2000) introduisent une autre notion. Selon eux, une variante d'une famille de produits est un produit réel obtenu par différentes combinaisons des variantes de composants de la famille. (Simpson, 1998) rattache ce concept à celui de plate-forme (que nous approfondirons plus loin) : un "produit variant" est une instantiation spécifique d'une plate-forme de produits dans une famille de produits qui possède une forme, des caractéristiques et des fonctions, différentes de celles des autres membres de la famille.

Le développement du concept de famille de produits s'est avéré être un moyen efficace pour le maintien de l'économie d'échelle en satisfaisant la variété de besoins du client. Pour notre part, dans la suite de nos travaux, nous retiendrons les définitions suivantes.

Une famille de produits se réfère à un ensemble de produits semblables qui proviennent d'une plate-forme commune possédant en plus, des caractéristiques / fonctions spécifiques, qui satisfont les exigences particulières des clients.

Chaque produit individuel dans une famille de produits, i.e. un membre de la famille, est appelé variante du produit. Toutes les variantes du produit partagent des structures et/ou technologies communes qui forment la plate-forme de la famille de produits.

Une famille de produits vise une part de marché et chaque variante du produit est développée pour un ensemble de besoins spécifiques des clients de ce segment de marché. Les interprétations des familles de produits dépendent des différentes perspectives. En ce qui concerne l'aspect marketing, l'architecture fonctionnelle de la famille de produits met en exergue l'objectif de réutilisation de la ligne produit ou du portefeuille produit d'une entreprise et donc est caractérisée par un ensemble de caractéristiques fonctionnelles.

2.3. Architecture du produit

2.3.1. Définitions et Concepts

Comme tout système complexe, les produits tendent à s'organiser hiérarchiquement (Simon, 1962), en particulier, leurs structures fonctionnelles et physiques forment des hiérarchies. Il apparaît donc qu'à ces deux niveaux, le produit est composé de sous systèmes eux-mêmes divisés en sous-systèmes.

Définissons en premier lieu la notion d'architecture. (Ulrich, 1995) affirme que l'architecture du produit est un élément fondamental de la performance d'une firme, et que le choix de sa modification relève des décisions de management bien au-delà des seuls bureaux d'études. Il définit l'architecture du produit comme l'allocation des fonctions à des composants physiques en isolant trois étapes :

- l'organisation des éléments fonctionnels ;
- la cartographie de ces éléments traduite en composants physiques ;
- la spécification des interfaces entre ces composants qui interagissent.

Henderson et Clark (Henderson et Clark, 1990) définissent un composant comme une portion distincte d'un produit qui contribue à une fonction spécifique, et qui est liée au reste par le biais d'un jeu d'interfaces défini par l'architecture du produit¹.

Prenons un exemple dans l'automobile. Le condensateur est un composant. Il assure une fonction spécifique et est associé à un évaporateur, un compresseur, un fluide et des canalisations, ainsi que leurs interfaces, pour réaliser la partie mécanique de la fonction de climatisation du véhicule. Si on ajoute, à cet ensemble de composants, une régulation de température intérieure du véhicule, par le moyen de capteurs, de faisceaux électriques, et d'une carte électronique portant un programme informatique adéquat, on obtient un système : le système de climatisation de la voiture.

Reprenons, pour définir le module, l'exemple du condensateur. Si l'on regarde qui sont ses « voisins » dans la voiture, on trouve le radiateur de refroidissement, la serrure du capot, les phares avant du véhicule, des pièces souvent métalliques constitutives du

¹ « Component are physically distinct portions of the product that carry out specific functions and are linked to each through a set of interfaces defined by the product architecture »

Chapitre 2 – Architecture modulaire en conception de famille de produits

châssis du véhicule, etc...Chacun de ces éléments est un maillon qui réalise une fonction, mais chacune de ces fonctions peut être différente. Le radiateur contribue à la fonction de refroidissement du moteur, la serrure à la fonction de fermeture des ouvrants, les pièces métalliques contribuent à la fonction rigidité et / ou absorption d'énergies en cas de chocs. Ces fonctions sont toutes très distinctes et pourtant, on peut retrouver tous ces éléments, livrés en un seul bloc pré-assemblé. On parle alors d'un module. Baldwin parle dans ce cas de « *Physical Modularity* » par opposition à « *Design Modularity* ».

En conception modulaire, un module pourra être un composant (souvent considéré comme un ensemble de pièces élémentaires) ou un ensemble de composants. Le produit (en entier) pourra être vu aussi comme un module. Nous introduirons dans la partie 2.8 une terminologie plus précise sur les modules pour lever cette ambiguïté.

Cependant, au vu des définitions qui précèdent, deux éléments apparaissent déjà comme fondamentaux dans la description d'une architecture de produit : l'allocation composants / fonctions et les caractéristiques des interfaces. Ces agencements sont indispensables pour déterminer la performance globale du produit mais posent des questions délicates, à savoir :

- la manière dont s'effectue la transposition de ces éléments fonctionnels en composants physiques. Ce sont ces derniers qui sont en réalité concrètement intégrés dans le produit. D'où la question essentielle, à savoir si une fonction peut ou doit être remplie par un ou plusieurs composants ;
- la manière dont sont reliés les composants entre eux et avec le système global conduit à s'interroger sur les interfaces qui régissent les interactions physiques entre composants.

Les interfaces se définissent :

- par le degré d'interdépendance qu'elles engendrent entre les modules qu'elles connectent ;
- par le niveau de standardisation.

Les interfaces seront dites « *couplées* » si une modification d'un composant implique une modification subséquente chez le composant relié. Elles seront dites « *découplées* », si un changement dans un composant n'implique pas de changement dans l'autre.

Chapitre 2 – Architecture modulaire en conception de famille de produits

(Ulrich, 1995) pour définir les modules, part de l'architecture du produit : une architecture est dite modulaire si on a un « *one to one mapping* » entre les fonctions et modules (c'est-à-dire lorsqu'à une fonction ne correspond qu'un seul composant physique) et si les interfaces sont découplées dans le sens où modifier un composant ne demande pas de redessiner l'interface. D'où la notion importante unifiant tous ces champs, la notion d'interdépendance à l'intérieur du module, et d'indépendance entre les modules.

Par opposition à une architecture modulaire, une architecture est dite intégrale si on n'a pas cette cartographie d'éléments découplés « *no one to one mapping* » (c'est-à-dire lorsqu'un composant réalise plusieurs fonctions ou plusieurs composants réalisent partiellement une fonction) et que les fonctions sont partagées entre plusieurs composants.

L'avantage de l'architecture modulaire est qu'elle permet d'augmenter le gain dans une entreprise par les économies d'échelle, la logistique et une amélioration rapide du produit. Elle rend aisée les modifications incrémentales du produit au cours de son cycle de vie. Dit autrement, les produits lancés dans un premier temps sur le marché sont ultérieurement réadaptés en fonction des demandes exprimées par le marché.

L'architecture intégrale a l'avantage d'augmenter le partage des connaissances et l'opportunité de travailler en mode collaboratif. Contrairement à l'architecture modulaire, elle permet d'optimiser le coût relatif à la customisation d'un composant non désiré sans changer les autres composants (Hsuan, 2000).

2.3.2. Différents types de modularité

La modularité est un concept de structuration permettant de gérer la complexité. La littérature présente deux concepts de la modularité.

Le premier concept qui est celui de la décomposition d'un système en plusieurs sous-systèmes dont le but est de faciliter les activités de conception, de production et d'usage. Pour (Baldwin et Clark, 1997), il permet le développement d'un produit ou d'un processus complexe conçu de façon indépendante à partir de sous-système qui fonctionnent comme un ensemble.

Le second est relatif au découplage entre les parties. Ici, il s'agit d'une approche de conception via la standardisation des spécifications des interfaces des composants d'un produit. Mari Sako (Sako, 2003) illustre cela clairement en identifiant la modularité

Chapitre 2 – Architecture modulaire en conception de famille de produits

par les interfaces standardisées et ouvertes qui permettent d'augmenter la possibilité de « *mix and match*² ».

Trois types de modularité (conception, production, utilisation) ont été identifiés par (Baldwin et Clark, 1997). En effet et comme le présente la figure 2.1., sous l'angle de la modularité, le développement de nouveaux produits concerne tous les éléments du cycle de vie de la conception au retrait. Durant le cycle de vie du produit, les étapes concernent (bien que notre travail se situe aux dimensions techniques) tour à tour la définition du produit, le processus de fabrication, l'utilisation et la maintenance.

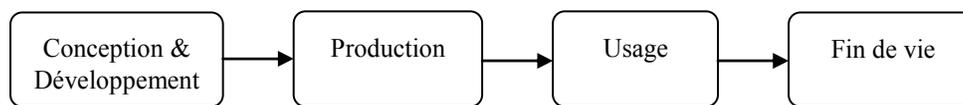


Figure 2.1. *Les phases dans le cycle de vie d'un produit*

La modularité en conception concerne une architecture de produits pour lesquelles les interfaces sont standards. L'intérêt est de réduire le délai et le coût de la conception ainsi que le développement du produit. Pour cela, le développement parallèle des modules avec des équipes de conception travaillant indépendamment est possible. Toutefois, les concepteurs doivent réaliser que cette manière de concevoir peut être à l'origine de problèmes de modularisation incomplète. Ceux-ci apparaissent lorsque les modules assemblés présentent des dysfonctionnements une fois intégrés dans un tout.

Pour gérer les problèmes de modularisation incomplète, nous proposons d'introduire comme cela est fait très souvent dans la littérature:

- les modules communs
- les modules distinctifs

Le second type étant constitué des modules composés et des modules primitifs. Nous précisons en détail ces définitions, dans la partie 2.8.

Dans ses travaux, (Calcagno, 2001) regroupe les thèmes concernant la modularité en conception en quatre catégories :

² Le « *mix and match* » est une stratégie permettant d'augmenter une grande variété de produits pour la standardisation des composants qui sont destinés à des emplois multiples. L'idée est d'utiliser un minimum de composants pour réaliser un maximum de produits différents.

Chapitre 2 – Architecture modulaire en conception de famille de produits

- la modularité en conception d'architecture (Alexander, 1964),
- l'architecture modulaire et architectures intégrales (Ulrich, 1995),
- la modularité en conception de logiciel (Parnas, 1972 ; Weiss, 1995),
- les règles de modularité (Baldwin et Clark, 2000).

Le champ d'application de la modularité en production se limite aux processus de production. En particulier, il s'applique à la production des composants standards de manière indépendante et ceci avant l'assemblage du produit final.

Le cas de la modularité à l'utilisation relève essentiellement du marketing car permet aux clients de combiner et d'assembler des modules dans le but d'obtenir un produit final correspondant à leurs besoins spécifiques. L'intérêt est de faciliter l'utilisation ainsi que les activités de maintenance.

2.4. Impacts sur les pratiques et enjeux de l'adoption de la modularité

La modularisation a été essentiellement abordée dans la littérature en considérant le point de vue du donneur d'ordre et rarement celui de ses fournisseurs directs. La modularisation apparaît avant tout comme un principe de conception qui nécessite des conditions de mise en œuvre initiales. Moyennant le respect de ces conditions initiales, le choix d'une architecture modulaire pour un produit offre de nouvelles perspectives pour le donneur d'ordre, en matière de stratégie, de rendement économique, et également en matière de technique, que l'on parle du produit ou de son processus de fabrication. La modularisation présente également des risques. La majeure partie de la littérature puise ses fondements dans des secteurs industriels tels que l'informatique de hardware et software, la micro électronique ou l'automobile.

2.4.1. Conditions de mise en œuvre d'une architecture modulaire du produit et opportunités des architectures modulaires

Architecture produit et architecture de l'organisation sont liées selon Sanchez (Sanchez et Mahomey, 1966) et Langlois (Langlois, 1997), et le succès de la modularisation dans les PCs réside selon eux dans le « *one to one mapping* » entre

Chapitre 2 – Architecture modulaire en conception de famille de produits

produit et organisation. Pour eux, l'efficacité d'un système d'échanges correspond à un équilibre entre coûts d'organisation des transactions entre les firmes et les coûts d'organisation de ces transactions en interne, dans l'entreprise. (Baldwin, 2004) reprend ce point et démontre que la modularisation n'est efficace que si l'on découpe le produit là où les relations nécessaires entre les firmes sont les moins intenses, en volume comme en difficultés.

(Ulrich, 1995) insiste sur l'effort nécessaire, en amont de la conception, permettant de définir les « *design rules* ». Cet effort doit permettre de définir le découpage du produit de sorte que les cahiers de charges fonctionnels de chacun des modules existent et que les interfaces soient préalablement définies, pour permettre le travail en « *Black Box* » (Clark, 1989). Cet effort est plus important que dans le cas d'une architecture intégrale, mais, le donneur d'ordre est supposé récupérer les fruits de cet effort dans le développement du produit permettant aux partenaires de se concentrer sur leur module sans avoir à rediscuter les interfaces. Dans le même esprit (Fujimoto et Clark, 1995) indiquent que l'efficacité de la modularisation réside dans la simplification des liaisons entre les fonctions et les composants.

Les outils de cette mise en conditions initiales ont été largement étudiés dans la littérature. (Eppinger, 1994) indique que pour introduire de la modularité en conception, l'utilisation de Design Structure Matrix (DSM) et de Task Structure Matrix (TSM), permet de concevoir l'objet de manière modulaire, et ce en trois étapes :

- la définition des « *design rules* » (Baldwin et Clark, 1997) ;
- le développement de ces modules de manière indépendante ;
- l'intégration du système et la phase de test.

Les conditions d'obtention de la performance d'une architecture modulaire sont donc la définition en amont des « *design rules* » permettant le « *one to one mapping* » réduisant ainsi la nécessité de coordination entre les acteurs, le montage « *plug and play* » des éléments via des spécifications précises. L'organisation doit être compatible avec le produit dans la même idée du « *one to one mapping* », avec peu de degrés de liberté entre les modules et un effet « *black box* » à l'intérieur des modules.

2.4.2. Les apports d'une architecture modulaire

Moyennant le respect des conditions initiales précisées, le choix d'une architecture modulaire va affecter la stratégie de la firme du donneur d'ordre, son rendement économique, les performances de son produit et de son processus de fabrication.

2.4.2.1. Stratégies de la firme du donneur d'ordre

Pour (Ulrich, 1995) le problème de l'architecture du produit se trouve au niveau de la décision stratégique de la firme du fait des nombreuses et profondes implications qu'elle impose. Pour le donneur d'ordre, la question posée est : dois-je ou non utiliser ce principe de conception. Ce principe pourra être mis en oeuvre ou non par le constructeur (Mitchell and Hamilton, 1988 ; Baldwin et Clark, 1992 ; 2002).

2.4.2.2. Rendement économique pour le donneur d'ordre

(Starr, 1965) indique que l'intérêt économique lié au choix d'une architecture modulaire réside dans la nouvelle combinatoire de produits finaux qui sont manufacturables économiquement. La modularisation permet un coût d'obtention de la diversité moindre comparé à une architecture intégrale. Pour (Ulrich, 1995), deux forces sont à l'origine de l'idée de conception modulaire : la nécessité d'une plus grande combinatoire des produits issus directement du processus de production, mais aussi la nécessité d'une rationalisation de la conception du produit. Disposer d'une architecture modulaire permet une division claire du travail de conception, permettant un travail en parallèle, réduisant le besoin de discussion aux interfaces. Il répond à la question de l'efficacité économique de la modularisation en relevant plusieurs éléments. La modularisation permet une gestion de projet plus efficace, et durant le cycle de vie du produit, une évolution plus aisée qu'il s'agisse d'évolutions liées à une augmentation de performance ou à l'ajout d'options. (Baldwin et Clark, 2000) prennent l'angle de la rationalisation de conception devenue nécessaire pour accélérer l'innovation, du fait que chaque acteur est spécialisé sur son module. Il ressort de leur étude que la valeur que recèle une architecture modulaire est portée par le potentiel d'utilisation d'opérateurs qui

sont au nombre de six³.

2.4.2.3. Possibilités nouvelles pour le produit

Dans la parabole de l'horloger illustrée par Herber Simon (Simon, 1969), le concept de module est central dans sa pensée. Selon lui, on peut organiser la complexité d'un système (langage de programmation, organisation, objet) en le hiérarchisant : des éléments inférieurs obéissent à d'autres supérieurs et ainsi de suite. Ces éléments « *inférieurs* » sont de complexité moindre donc plus faciles à concevoir.

Un autre élément de la performance annoncée d'une architecture modulaire est le fait qu'elle permette une standardisation efficace « *plug and play* ». Comme le découpage du produit et les interfaces sont disponibles en amont de la conception, on peut imaginer que chaque module devient interchangeable plus facilement, sans affecter le reste des fonctions produits. Concernant l'innovation, l'intérêt majeur de la modularisation, par opposition à une architecture de type intégrale réside selon (Ulrich et Eppinger, 1999) dans la capacité à favoriser l'innovation et la flexibilité produit. La modularisation si elle est conduite correctement, favorise l'innovation s'effectuant à deux niveaux, au sein du module lui-même, et dans la combinatoire entre modules.

2.4.2.3. Possibilités nouvelles pour le processus de production

(Starr, 1965) face aux premiers signes de « *product uniqueness* » demandés par les clients, et au début de la production par lots annonce la modularisation comme le nouveau concept qui va placer les responsables de production au premier niveau de l'entreprise. (Ulrich, 1995) insiste sur le fait que la flexibilité de production est obtenue plus facilement via l'architecture du produit que via l'organisation de la production type Toyota. Pour lui, une architecture modulaire permet une différenciation plus facile et surtout, le plus tard possible y compris dans le réseau de distribution. C'est le postponement.

³ *Splitting* (a design and its tasks), *Substituting* one module for another, *Augmenting* (adding a new module to the system), *Excluding* a module from a system, *Inventing* to create new design rules, *Porting* a module to another system.

2.5. Architecture organisationnelle

2.5.1. Lecture couplée de la modularité

L'architecture modulaire, en offrant une décomposition en sous-systèmes autonomes qui sont connectés par des interfaces se présente comme un puissant réducteur de la complexité des systèmes (Simon, 1962). Cette architecture produit décrivant la façon dont sont intégrés les composants d'un système favorise la bonne gestion de la complexité croissante des produits dans les industries d'assemblage (Ulrich, 1995). A l'instar de l'industrie automobile, ces industries sont confrontées à l'apparition de nouvelles technologies, telles l'électronique, l'informatique et l'automatique, qui doivent s'intégrer pour constituer des systèmes innovants et performants.

La modularité dépasse cependant la seule dimension technique. Pour (Chun-Che et al., 1998) la modularité est abordée dans la littérature comme une forme abstraite et son exploration n'est pas satisfaite dans l'industrie. Ainsi, pour certaines entreprises, passer à la modularité requiert de repenser leur organisation globale sous peine d'échec ; pour d'autres la modularité constitue une opportunité pour reconsidérer le positionnement concurrentiel de l'entreprise.

Il apparaît naturel dès lors de remarquer que les deux approches de la modularité se rejoignent sur l'hypothèse que la modularité est porteuse d'enjeux organisationnels majeurs où la technologie vient définir la forme organisationnelle. (Frigant et Talbot, 2004) soutiennent que le choix d'une architecture produit conduit à l'adoption, plus ou moins contrainte d'une architecture organisationnelle spécifique que l'on se place au niveau intra entreprise ou inter entreprise. A ce titre, la notion de modularisation possède une dimension heuristique (Frigant et Talbot, 2004) pour analyser l'hypothèse d'une convergence entre les industries automobiles et aéronautique car elle suggère qu'un couple technologie/organisation se forme et se déforme lorsqu'il s'agit pour les acteurs de l'adopter.

La modularité relève d'une démarche qui vise à décomposer les systèmes complexes. Le produit final doit être scindé en une série de sous ensembles eux-mêmes simples, ou complexes, reliés les uns aux autres par des interfaces standardisées. L'idée est un jeu où chaque élément du jeu constitue un module dont les interfaces standardisées peuvent être assemblées à volonté, indépendamment de la forme pour former un système complexe. Il apparaît évident qu'à partir du moment où la forme de chaque module et

Chapitre 2 – Architecture modulaire en conception de famille de produits

principalement les interfaces sont fixées, la modularité permet une large variété d'assemblage. On comprend ainsi que la mise en œuvre d'une architecture modulaire sera recherchée lorsqu'il s'agira d'introduire de nouvelles technologies dans un produit donné. D'où l'intérêt qu'éprouvent à l'égard de la modularité des entreprises des secteurs où :

- le processus concurrentiel repose sur la recherche de différenciation ;
- la durée de vie d'un produit est relativement longue et / ou les conditions d'utilisation sont sévères, ce qui rend contraignantes les conditions de maintenance et / ou requiert des programmes de mises à niveau technologiques ;
- les normes réglementaires et les contraintes technologiques concernant certaines fonctionnalités du produit sont instables et, à ce titre, susceptibles d'évoluer.

Il ressort donc que l'utilisation de l'architecture modulaire du produit suppose de concevoir une organisation en conception également modulaire.

2.5.2. La dimension organisationnelle de la modularité

La modularité porte en elle-même les germes d'un approfondissement de la division du travail dans la mesure où l'architecture modulaire du produit autorise un découplage des tâches, en conception et en production, sur chacun des modules pris séparément. Dès lors, l'entreprise verticalement intégrée céderait la place, sous le poids des facteurs qui poussent à la désintégration verticale (Langlois, 2003), à une structure organisationnelle que nous qualifierons de modulaire.

Cette désintégration verticale trouve ses fondements dans la simplification des composantes de coordination liées au développement, à la production et à la modification du produit. En effet, dans une architecture strictement modulaire, deux types d'acteurs sont identifiables. Le premier est l'architecte du produit. Sa fonction consiste à définir les caractéristiques générales du produit et à spécifier les interfaces. Le second a pour fonction de développer et de produire les modules. Il apparaît donc que la désintégration verticale trouve ses fondements dans la simplification des composantes de la coordination liées au développement, à la production et à la modification du produit.

Le concepteur, dans un rôle d'architecte, n'a plus besoin de connaître les caractéristiques intrinsèques des modules. A ce titre (Baldwin et Clark, 2000)

Chapitre 2 – Architecture modulaire en conception de famille de produits

introduisent une distinction entre les éléments visibles et invisibles, le rôle de l'architecte se limitant à la définition des éléments « *visibles* » du système. Ils concernent les points de rencontres entre les composants, c'est-à-dire les interfaces, et, plus généralement les spécifications fonctionnelles et physiques qui sont allouées aux modules. Dans une telle perspective, le contenu d'un module que ce soit dans l'agencement physique de ses composants (et de leurs propriétés intrinsèques), ou dans l'agencement fonctionnel, peuvent demeurer « *invisibles* ». Autrement dit, toutes les parties liées au développement du produit n'ont pas besoin de détenir l'ensemble des informations pour réaliser leurs propres tâches. La modularité favorise dès lors une division du temps de travail entre plusieurs équipes, au moins en ce qui concerne les décisions détaillées, spécialisées sur tel ou tel type de fonctions ou de matériaux.

L'intérêt de la modularité est donc de concilier spécialisation des tâches et autonomie des équipes impliquées dans la conception / production ce qui devrait accroître l'efficacité d'ensemble, notamment parce qu'elle accélère l'exploitation des apprentissages dynamiques de compétences désormais plus focalisées (Sanchez et Mahomey, 1996). Ainsi, la spécialisation induit une reconfiguration du registre des compétences à mobiliser (Brusoni et Prencipe, 2001). En effet, l'architecte doit posséder des connaissances liées à la définition de l'architecture produit, notamment les connaissances techniques relatives d'une part à l'identification des interactions entre modules et d'autre part à leurs fonctions propres, mais aussi des connaissances marketing qui lui permettent de concevoir des produits commercialement viables. Les responsables de modules vont quant à eux recentrer leurs compétences sur celles directement liées à la production des éléments particuliers dont ils ont la charge.

Dans ces travaux, une hypothèse forte et souvent implicite est faite : le fournisseur est supposé capable de fournir un module fiable et répondant parfaitement à un cahier des charges, qui lui-même est évolutif au cours de la conception. A ce titre, des entreprises qui centrent leur savoir-faire sur la spécification, l'architecture et l'intégration de produits (comme par exemple, les constructeurs automobiles), doivent rester vigilantes sur la capacité de leurs fournisseurs à développer des modules qui sont aussi des systèmes complexes.

2.6. Architecture de Famille de Produits

A la base des familles de produits, l'architecture (la structure conceptuelle et l'organisation logique permet de produire une famille de produits) fournit une arborescence générique (via la commonalité) et un graphe de liaisons représentant les relations entre les modules constituant les produits. En effet, chaque nouveau produit est instancié à partir d'une structure générique de produits. Le raisonnement par l'utilisation d'une telle architecture de famille de produits ne se prolonge pas seulement sur la base des connaissances (consistant à garder les différentes formes de solution) mais aussi sur la modélisation du processus de conception d'une famille de produits, qui peut prendre en compte les exigences individualisées de customisation de masse dans une architecture cohérente

2.6.1. Architecture modulaire

Une approche relevant directement de la conception de famille de produits est le développement de l'architecture modulaire du produit. Dans les paragraphes précédents, plusieurs auteurs ont souligné qu'en utilisant l'architecture modulaire du produit, la diversité peut être créée par combinaison des blocs de composants (ou modules). Ils ont aussi examiné les avantages et inconvénients des produits modulaires ainsi que les méthodes de raisonnement au sujet de l'architecture des produits modulaires.

Des efforts ont été consacrés à l'organisation systématique de l'architecture modulaire en termes de caractéristiques fonctionnelles et paramètres de conception à une étape amont de la conception (Suh, 1990). Les recherches courantes se focalisent principalement sur les architectures du produit et la conception modulaire produit dans le contexte de produit unique. Nous avons effectué une exploration de la littérature en se focalisant sur les travaux concernant l'architecture du produit dans le contexte de famille de produits.

L'une des caractéristiques permettant de discerner l'architecture d'une famille de produits de celle d'un produit unique est la manipulation simultanée de produits multiples. La prise en compte de la variété de modèles de produits permet de décrire l'architecture de famille de produits comme un empilement de modèles simple de produits, au lieu d'un modèle unifié de famille de produits. Un rapprochement cohérent des aspects fonctionnels permet aussi de mieux définir l'architecture du portefeuille de produits, basée sur les demandes des consommateurs.

Chapitre 2 – Architecture modulaire en conception de famille de produits

En conception, le développement de l'Architecture de Famille de Produits implique une organisation systématique de la modularité et de la commonalité à travers les vues fonctionnelles, comportementales et structurelles. Il apparaît nécessaire d'appréhender le développement de l'architecture de produit et des plates-formes comme une synchronisation des vues multiples telles que celles liées aux des besoins des clients, aux structures des fonctions et aux architectures physiques.

L'une des innovations dans la conception d'une famille de produits est la manière de la représenter différemment des produits uniques. Une approche déjà mentionnée est le modèle générique de produits (Stadzisz, 1997) qui a l'avantage de permettre une représentation de la famille de produits sous l'angle marketing.

Jiao et al. (2000) ont analysé les différentes articulations intervenant dans la modélisation de famille de produits. Ils remarquent qu'il existe plusieurs relations de données dans les familles de produits, elles incluent les relations de type « *composant à composant* », « *composant à produit* », « *produit à produit* », « *produit à famille* » et « *famille à famille* ». La relation « *composant à composant* » représente les interconnexions entre composants tandis que la composition d'un produit sous la forme de structure hiérarchique est mise en exergue par la relation « *composant à produit* ». La relation « *produit à produit* » matérialise la commonalité parmi les membres d'une famille de produits, c'est-à-dire les variantes d'un produit. Les relations « *produit à famille* » et « *famille à famille* » spécifient comment les variantes des produits proviennent des plates-formes communes de famille de produits en réponse aux exigences des clients. Ils ont aussi proposé une structure de variété générique pour caractériser la diversité et ses dérivations.

L'importance de l'exploration des architectures de famille de produits a été bien reconnue, surtout en ce qui concerne les fondements théoriques du développement des familles de produit. Par rapport à cet aspect de l'architecture de famille de produits, nos travaux différencient l'architecture de produits uniques de celle de famille de produits, parce que la relation famille à famille est intégrée dans l'architecture de famille de produits et est exclue dans celle de produit simple. Notre travail se focalise sur l'architecture de famille de produits, en particulier l'implication des relations composant à composant, composant à produit, produit à produit, produit à famille et famille à famille (en reprenant la typologie de (Jiao et al., 2000)).

En conséquence, une Architecture de Famille de Produits (AFP) peut être définie comme une organisation logique d'une famille de produits selon les deux points de vue

Chapitre 2 – Architecture modulaire en conception de famille de produits

marketing et technique. Dans un contexte de customisation de masse, il doit y avoir un équilibre entre standardisation et diversification dans l'Architecture de Famille de produits. En d'autres termes, une AFP définit les deux familles (communes et différentes) parmi les membres, aussi bien que les mécanismes avec lesquels les variantes du produit peuvent être générées. Par conséquent, il y a deux aspects : génératifs et composés.

2.6.2. Génération des variantes et réalisation de la variété de produits

L'approche traditionnelle liée à la manipulation des variantes consiste à traiter chaque variante comme étant un produit séparé en spécifiant la nomenclature⁴ de chacune. Cette démarche ne souffre d'aucune ambiguïté lorsqu'il s'agit d'un nombre réduit de variantes. Toutefois, elle devient complexe à mesure que le nombre de variante sera élevé dans la spécification des produits. Ce qu'on pourrait qualifier de dilemme est qu'un grand nombre de structures de BOM apparaîtra lors de la production diversifiée d'une grande gamme de combinaison des caractéristiques du produit et pourra conduire à des millions de variantes pour un produit unique. La conception et la maintenance d'un tel nombre de structures de données sont difficiles voire impossibles. Les modules dans ce contexte sont un ensemble de composants physiques ou un groupe d'unités logiques qui répondent à certaines fonctions. La variété de produit peut ainsi être réalisée à travers des combinaisons de modules.

Comme la Structure générique du Produit (SGP) d'une famille de produits est bâtie sur la décomposition hiérarchique des différents modules composés, les méthodes de génération de la variété sont définies pour chaque module composé et spécifient comment la variété des modules composés est créée par manipulation de ses modules fils⁵. A partir de ces hypothèses et affirmations et à l'aide des grammaires de graphes, les mécanismes de régulation de la variété seront amplement traités au chapitre 3.

Du point de vue marketing, une famille de produits est spécifiée à la fois par un ensemble de caractéristiques communes et optionnelles. Les variantes des produits spécifiques sont définies par la combinaison des caractéristiques communes et de certaines caractéristiques optionnelles sélectionnées. Bien que les caractéristiques communes prennent en compte les similitudes des exigences des consommateurs du

⁴ Nomenclature a pour correspondance anglo saxon BOM = Bill-of-Materials: c'est la liste des articles nécessaires pour la fabrication d'un produit

⁵ Les modules fils sont les modules contenus dans le produit, voir §3.4.3 du chapitre 3

Chapitre 2 – Architecture modulaire en conception de famille de produits

marché ciblé, les caractéristiques optionnelles se focalisent sur les différenciations des exigences fonctionnelles. Comme certaines combinaisons ne sont pas technologiquement réalisables ou économiquement raisonnables, il existe des contraintes sur la sélection des caractéristiques optionnelles, appelées contraintes de sélection.

Certains auteurs comme (Kanis, 1998 ; Gales et Mansour-Cole, 1995) ont développé des métriques pour l'évaluation des coûts et l'importance de la variété des produits. Leurs travaux étaient basés en grande partie sur les correspondances uniques entre composants et fonctions et en supposant que la variété de produits résulte de la combinaison des composants.

L'optimisation simultanée structure / famille de produits permet d'appliquer les techniques et éléments de programmation pour la conception des familles de produits. Suh (1990) a mis en exergue la différence entre la diversité de perception du client en termes de fonctionnalités et la diversité technique en termes de réalisation. Un des apports lié à la diversité de perception du client est le travail de sélection des "lignes de produits" qui se focalise sur les attributs et les caractéristiques fonctionnelles du produit. L'analyse conjointe attributs/caractéristiques (Subramanian, 1996) est amplement utilisée dans l'exploration des préférences des clients, ceci en apportant un éclaircissement sur la rationalisation de la ligne de produits.

Pour la réalisation de la variété, plusieurs auteurs (Fujita et al., 1999 ; Simpson et al., 1999 ; Ulrich, 1995, Jiao et al., 2004) ont proposé certaines méthodes parmi lesquelles :

- la personnalisation collaborative, adaptative des produits de beauté,
- le choix des composants des fonctions,
- l'ajustement de plate-forme commune du produit,
- la combinaison des composants.

Deux notions importantes concourent à la réalisation de la variété. L'une, relative à la forme se focalise sur les caractéristiques intrinsèques dans la sélection des composants ; l'autre est liée à la méthode de la génération de la variété.

2.7. Plate-forme

2.7.1. Management et architecture organisationnelle dans l'approche plate-forme

Le développement de famille de produits est lié à la réalisation des plates-formes du produit. Les recherches faites aussi bien dans les domaines du « *sur mesure de masse* », ainsi que de la conception de famille de produits ont permis de caractériser les différentes lignes de produit ainsi que le besoin de développement des plates-formes communes

Plusieurs approches du concept de plate-forme produit existent dans la littérature. Un rapide tour d'horizon montre qu'une plate-forme produit a été définie de nombreuses façons, des définitions à la fois synthétiques et générales. De plus, la signification du concept varie en fonction des environnements industriels, des spécificités des manufacturiers. Quelques définitions se focalisent principalement sur le produit / artefact lui-même, alors que les autres essaient d'explorer le concept de plate-forme en termes de chaînes de valeur des entreprises (Dooley et O'Sullivan, 2000).

L'une des approches relatives aux plates-formes les considère comme le support du développement d'une famille de produits. Une autre approche identifie la plate-forme à un élément physique du produit, c'est-à-dire une collection d'éléments partagés par plusieurs produits semblables. En conséquence, le problème est d'identifier les dénominateurs communs pour une famille de produits. Il s'agit de réaliser l'extraction de ces éléments des produits communs, des caractéristiques et/ou sous systèmes qui sont stables et bien maîtrisés c'est-à-dire fournir une base pour introduire les différentes caractéristiques sur la valeur ajoutée. La robustesse de la conception de famille de produits permet une meilleure conception de la plate-forme pour faciliter l'exploration et la synthèse de certains concepts communs de plate-forme pouvant générer les familles de produits appropriés. Siddique et al. (Siddique et al., 1998) ont utilisé les grammaires graphes pour identifier les plates-formes communes d'un ensemble de produits similaires et spécifier le portefeuille du produit supporté par la plate-forme. Pour faciliter le développement de base des plates-formes de familles de produits, il convient de mieux gérer l'interface en la rapportant à un processus distinct de définition des interfaces physiques entre modules.

Chapitre 2 – Architecture modulaire en conception de famille de produits

L'approche plate-forme est une solution adoptée pour répondre au dilemme standardisation / différenciation. Elle repose sur une architecture modulaire des produits, la plate-forme étant une forme avancée de gestion de cette modularité. La plate-forme peut se présenter selon divers environnements : plates-formes propriétaires et plates-formes ouvertes.

Dans une approche plate-forme, on trouve différents types d'éléments : les modules distinctifs (lié à la différenciation permettant de créer des produits dérivés), les modules communs (du fait de la standardisation).

Les plates-formes propriétaires sont caractérisées par le fait que la plate-forme est développée, utilisée et commercialisée par une entreprise ou un groupe d'entreprises liées par des relations de partenariat. Le propriétaire gère les évolutions de la plate-forme. Il est également responsable de produits dérivés. Par exemple des imprimantes à jet d'encre Hewlett-Packard, la plate-forme initiale « *Deskjet* ». Il y a eu développement de produits dérivés (Deskjet Plus, Deskwriter, Deskjet 500).

Le cas des plates-formes ouvertes, utilisées par un réseau d'entreprises est tel que, l'entreprise devient leader de plate-forme mais elle est utilisée par un réseau d'entreprises pour développer des produits dérivés et des produits complémentaires. Cette configuration se trouve dans des produits complexes (producteurs indépendants, taux rapide de progrès technologiques, incertitude sur la demande de produits complémentaires). A titre d'exemple, la plate-forme de PC d'IBM est une plate-forme ouverte. L'Intel est une entreprise de ce réseau qui fait évaluer la plate-forme, surtout les standardisations d'interfaces, qui ont permis le développement par de nombreuses entreprises de module de différenciation et la création de nombreux produits complémentaires innovants (la webcam, le lecteur de disque Zip autoalimenté, la clé-mémoire USB ...).

2.7.2. Cas particulier des plates-formes automobiles

On assiste à un mouvement de réduction du nombre de plates-formes (surtout dans le domaine automobile). Celui-ci est associé à la multiplication des modèles de produits sous une seule marque ou sous des marques différentes. Cette contradiction apparente suppose une recombinaison de la diversité industrielle, qu'il convient d'éclaircir. Cette réduction conduit les concepteurs à changer de concept : de la durée de vie d'un produit on passe à celle de la plate-forme. Cela permet de commonaliser le maximum possible de pièces, de rendre les modèles plus

Chapitre 2 – Architecture modulaire en conception de famille de produits

« accueillants » pour ces pièces, d’allonger la durée d’exploitation de certains outillages et de certains moyens ainsi que de réduire les délais de conception des produits et de leurs système de production.

La stratégie visant à concentrer le produit au niveau de la plate-forme simplifie le processus de développement des produits puisqu’il y a moins de plate - forme que de produits et les décisions majeures concernant les plates-formes ne sont pas prises à chaque nouveau projet. Une stratégie de plate-forme facilite la visibilité à terme de la stratégie du produit. L’implantation du développement des plates-formes communes d’un ensemble de produits présentant des similarités demande une attention sur la configuration du produit pour la détermination de sa plate-forme ainsi que l’identification des documents associés à la plate-forme.

Toutefois, l’état actuel de la recherche ne répond pas à la question de savoir comment développer les plates-formes communes.

Notre approche de la définition de la plate-forme ainsi que celle de plusieurs chercheurs (en marketing, gestion stratégique et conception technique) est de concevoir et développer une famille de produits avec assez de similitudes possibles entre les produits ainsi qu’un minimum de compromis en performance et en qualité. L’un des éléments essentiels en conception des produits à forte diversité est la plate-forme. Le succès de la famille de produits dépend du processus de conception de la plate-forme.

Dans le cas de l’automobile, la plate forme est liée à la structure du châssis telle que présentée à la figure 2.1. Un des rôles principaux du châssis est de servir de support pour le reste de l’automobile.

Un ensemble de plates-formes est dit commun si leur processus d’assemblage (localisateurs et lignes de soudure) est le même (Siddique et al., 1998).

Comme l’indique la figure 2.4, les plates-formes typiques d’un châssis sont composées de trois sections principales :

- structure avant (compartiment moteur)
- châssis avant (compartiment du plancher pour passager)
- structure arrière (male arrière).

Chapitre 2 – Architecture modulaire en conception de famille de produits

Les liaisons entre ses trois sections sont réalisées par des lignes de soudure. Une plate-forme commune idéale est celle qui peut servir de base à un ensemble de modèles de véhicules différents sans changements de composants, processus d'assemblage et ses interfaces avec les modules.

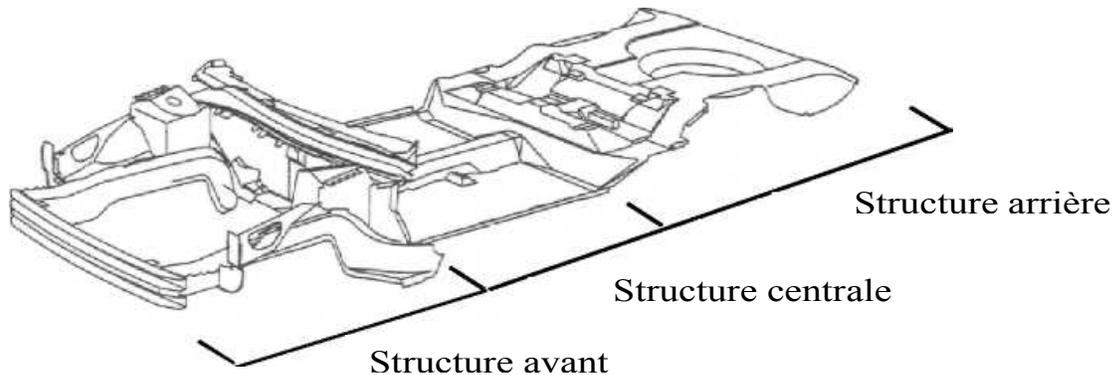


Figure 2.2. Plate -forme commune automobile

Le châssis est composé principalement des pièces qui sont assemblées autour d'un support. Le châssis est rarement vu par l'utilisateur, par voie de conséquence, la diversité n'est pas exigée du point de vue des utilisateurs finaux. La diversité du châssis a pour origine le désir du fabricant à « *accommoder* » différents modèles de voiture. Le châssis doit supporter les sollicitations des différents moteurs, de la transmission, la suspension, des structures variées de longueur et empattement différents. Actuellement, les constructeurs automobiles ont des plates-formes différentes pour différents segments de gamme de véhicule. Ils sont très flexibles sur le plan de la conception, de l'ingénierie et de la fabrication de leurs produits.

Les différents constructeurs automobile réduisent leur nombre de plate-forme toujours pour obtenir pour une meilleure économie d'échelle. En 1994, la compagnie Ford a annoncé un vaste changement par le montage des véhicules sur des plates-formes communes afin de les vendre en Amérique du Nord et en Europe (Siddique, 2000). La nouvelle organisation de Ford est similaire à la structure de plate-forme de Chrysler. General Motor par exemple comptera sur ses plates-formes communes et l'ensemble des composants modulaires pour ses plates-formes globales. Le but de GM est d'arriver à sept architectures de voitures de transport (tourisme) dans le monde en faisant varier l'empattement, la largeur, l'emplacement et l'orientation de l'essuie-glace dans une plate-forme. Honda a développé discrètement de nouveaux véhicules pour l'Amérique,

Chapitre 2 – Architecture modulaire en conception de famille de produits

l'Europe et le Japon en utilisant des plates-formes flexibles à composants rationalisés au lieu de créer une *voiture universelle* qui résoudra toutes les attentes du marché.

Une plate-forme commune idéale est celle qui peut servir de base à un ensemble de modèles de véhicules différents sans changements de composants, processus d'assemblage et ses interfaces avec les modules. De manière réaliste, sur une plate-forme commune, il doit pouvoir avoir les différentes variations exigées pour les modèles de voiture sans nécessiter de changement des lignes de soudure et du processus d'assemblage. Quelques unes des exigences pour les plates-formes communes sont les suivantes :

- la longueur du châssis peut varier pour les différents modèles,
- le moteur, la transmission et autres composants varient suivant les modèles de voitures,
- le système d'assemblage peut assembler les variations sans séquence, poste de travail ou changements d'outils,
- les lignes de soudure doivent avoir les mêmes positions relatives en respectant les bords de châssis.

L'une des solutions qui émerge de ces exigences est que la plate-forme commune peut être subdivisée en deux segments :

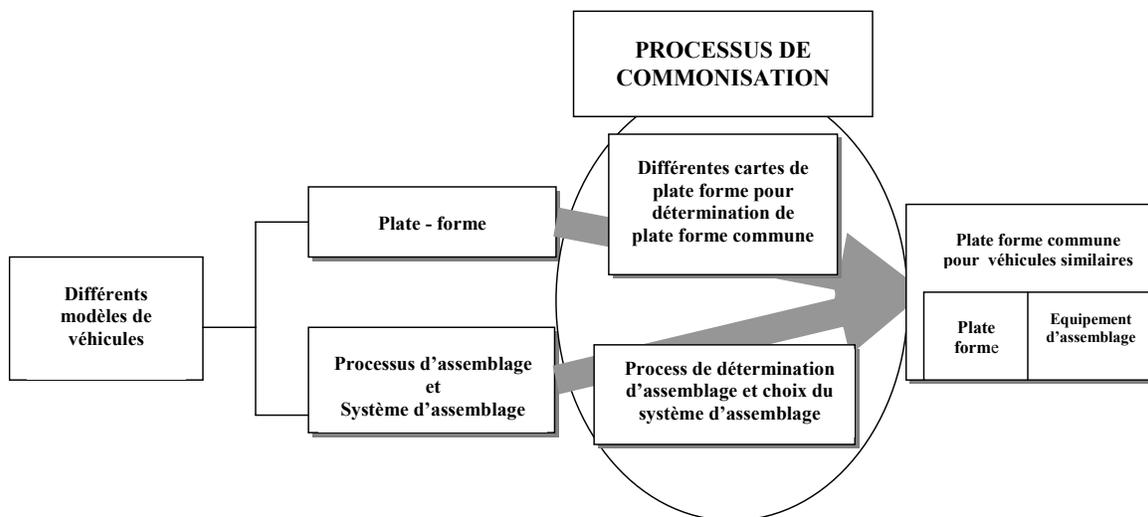


Figure 2.3. *Communisation de plate-forme automobile*

Chapitre 2 – Architecture modulaire en conception de famille de produits

Les exigences relatives aux deux parties de plate-forme commune doivent être satisfaites pour permettre le développement d'une plate-forme commune totale, ce qui exige une approche de configuration qui est la commonisation. En général, le développement des plates-formes communes exige de satisfaire de façon simultanée plusieurs familles de produits.

2.8. Proposition de quelques principes d'architecture de famille de produits

2.8.1. Structure générique du produit (SGP)

Les premières études ont démontré le caractère rationnel de l'architecture modulaire avec une prise en compte de la flexibilité dans la réalisation des produits sur mesure par rapport aux pratiques habituelles (Jiao et al., 2000). Au lieu de traiter la famille de produits simplement comme un ensemble de produits individuels, notre approche consiste en une organisation logique des modules de la famille de produits. En d'autres termes, l'architecture sous-jacente d'une famille de produits doit définir à la fois ce qui est commun et ce qui est distinctif parmi les membres de la famille, aussi bien que les mécanismes par lesquels les variantes du produit peuvent être obtenues. Les pistes principales liées à cette décomposition d'une famille de produits sont analysées ici.

La structure générique d'un produit (SGP) d'une famille de produits fait référence à l'organisation générique de tous les modules qui peuvent se trouver dans la famille (Jiao et al., 1999). En se rapprochant du concept de nomenclature générique⁶, un module générique est un module abstrait qui représente une famille de modules concrets similaires. Nous distinguons deux catégories de modules concrets :

- les modules communs appartiennent à toutes les variantes de la famille de produits
- les modules distinctifs sont ceux qui rendent les variantes du produit différentes les une des autres.

On considérera que les modules communs ne peuvent pas avoir des décompositions futures. Par contre les modules distinctifs pourront être primitifs ou

⁶ GBOM : Generic Bill-off- Material est la correspondance anglaise saxon de nomenclature générique

Chapitre 2 – Architecture modulaire en conception de famille de produits

composés. La structure hiérarchique est une décomposition des modules composés à des niveaux de détails différents, jusqu'à l'obtention de modules communs ou primitifs.

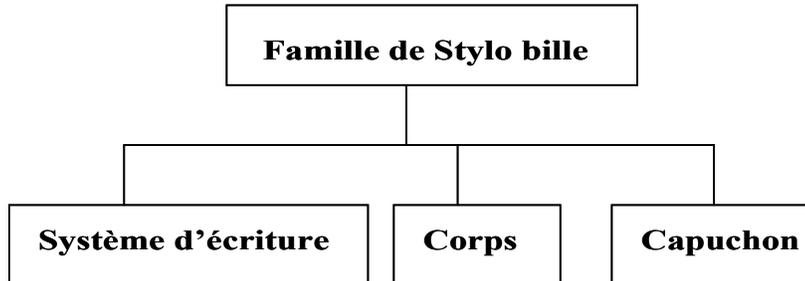


Figure 2.4. Exemple de structuration des modules communs et distinctifs

Prenons l'exemple d'un stylo bille.

Il peut être considéré lui-même comme un module composé. Le corps est un module commun à la famille de stylo bille. Le capuchon est un module distinctif qui n'est pas décomposable : c'est un module primitif. Le système d'écriture est un module composé car il est constitué de modules distinctifs (tête d'écriture et encre) et de module commun (cartouche).

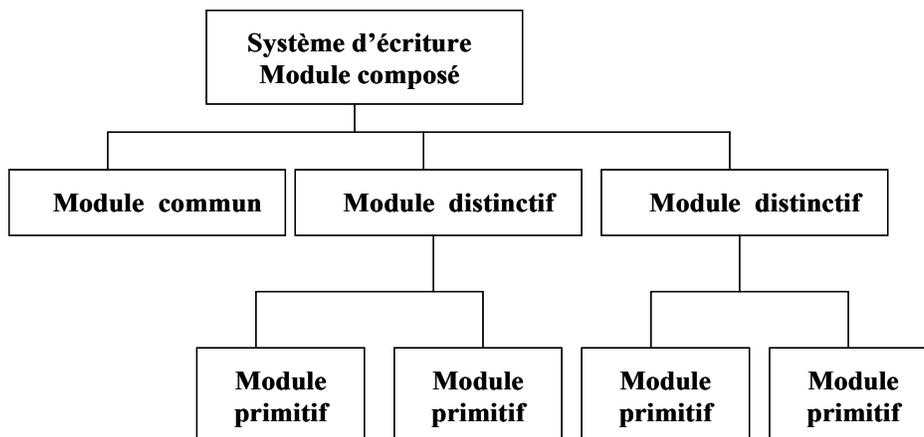


Figure 2.5. Exemple de structuration de modules commun et distinctif

A partir des définitions précédentes, la SGP de la famille de stylo bille est représentée par la structuration suivante :

Chapitre 2 – Architecture modulaire en conception de famille de produits

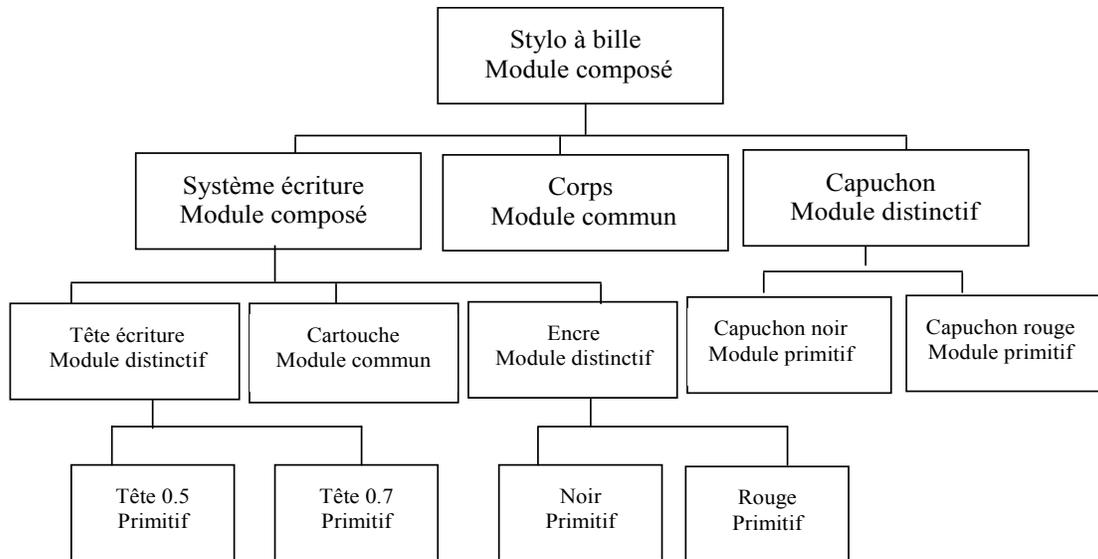


Figure 2.6. Illustration de la structuration des modules sur l'exemple d'une famille de stylo bille

Toutes les variantes apparaissent sur cette figure. De ce fait, chaque produit de la famille peut être considéré comme un module composé.

2.8.2. Produit de base

Les sous-systèmes communs ou composants à partir desquels les variantes d'un produit peuvent être obtenues seront dénommés "produit de base". Dans la pratique, le produit de base peut se manifester à travers plusieurs formes. Il peut être un produit avec les fonctionnalités de base, un produit semi-fini ou un produit standard qui remplit les exigences de la majorité des clients. Du point de vue technique (industriel), le produit de base matérialise la commonalité dans une famille de produits. L'utilisation des produits de base a l'avantage de permettre de tenir compte des mutations technologiques, d'avoir des réponses rapides face aux multiples demandes du marché, et donc de réduire les coûts.

2.8.3. Principe de composition

Nous subdivisons une AFP en trois grands éléments, à savoir les produits de base, les modules distinctifs et les règles de combinaisons, tels que présentés à la figure 2.3.

Chapitre 2 – Architecture modulaire en conception de famille de produits

Le produit de base (PB) matérialise les éléments partagés d'une famille de produits. Sur le plan marketing, ces éléments s'instancient aux caractéristiques fonctionnelles communes, tandis que du point de vue technique, ce sont les modules communs matérialisant ainsi les structures communes du produit. Dans la pratique, les produits de base constituent les bases de la famille de produits.

Les modules distinctifs (MDs) sont ceux qui rendent les produits différents les uns des autres. Ils sont à l'origine de la variété pour une famille de produits. Vu du côté technique, ces modules distinctifs peuvent être exprimés en relations structurelles distinctes ayant des performances fonctionnelles différentes. Ce sont des modules composés et modules primitifs. Sur le plan marketing, ils deviendront des caractéristiques fonctionnelles, d'accessoire ou des caractéristiques de valeurs pouvant être sélectionnées.

Les règles de combinaisons (RCs) définissent les règles et méthodes de dérivation des variantes du produit. Nous identifions trois types :

- *les contraintes de sélection* : elles précisent les conditions de restrictions sur les caractéristiques optionnelles car certaines combinaisons d'options (c'est-à-dire les valeurs alternatives des caractéristiques optionnelles) peuvent être non autorisées, non réalisables ou au contraire obligatoires,
- *les conditions fournies* : elles sont liées à la détermination de variantes alternatives pour chaque règle de combinaison. Les conditions fournies définissent celles sous lesquelles les variantes devraient (ou ne devraient pas) être utilisées pour tenir compte des exigences du produit. Cela peut être tout simplement une fonction logique avec une évaluation des paramètres des modules distinctifs ou avec les constituants parent comme variables indépendantes,
- *la génération de variété* : elle traduit la diversification que l'intégration du produit doit créer, le point d'ancrage étant les structures du produit. De telles réalisations de la variété sont en rapport étroit avec les modules distinctifs.

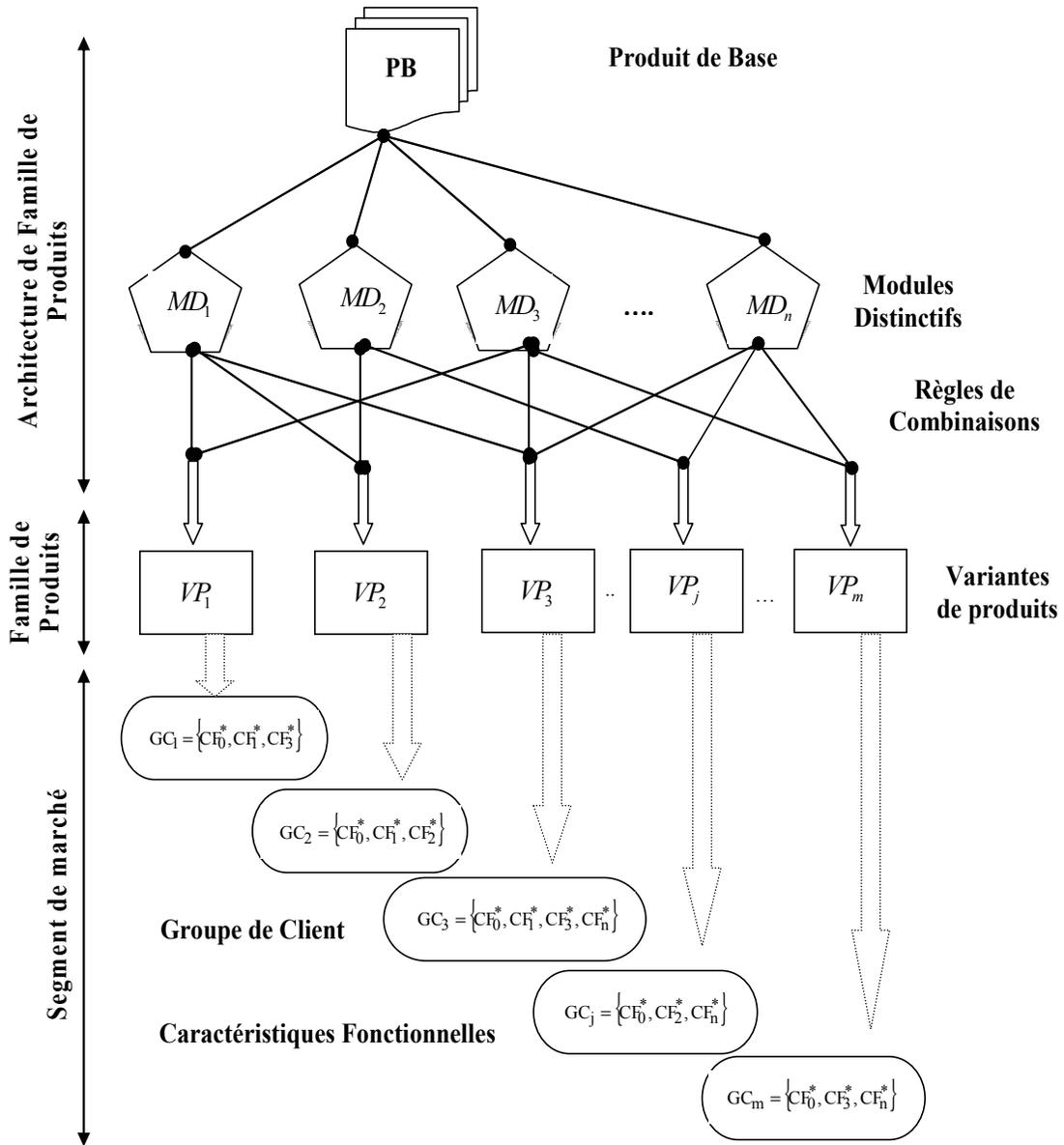


Figure 2.7. Principe de composition d'une Architecture de Famille de Produits

Comme le montre la figure 2.6, le principe de composition d'une architecture de famille de produits est défini par l'ensemble suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \{PB, MD_i, VP_j, CF_i\} \\ 1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq m \\ n \leq m \end{array} \right. \quad (2.1)$$

Chapitre 2 – Architecture modulaire en conception de famille de produits

L'AFP est quand à elle matérialisée par les produits de base, les modules distinctifs et les règles de combinaisons qui conduisent aux variantes de produits.

PB sont les produits de base.

MD_i correspondent aux modules distinctifs, ils sont prédéfinies pour la famille de produits.

VP_j constituent les variantes du produit appartenant à la famille de produits. Elles permettent de satisfaire les exigences de Groupe de Clients GC_j d'un segment de marché.

CF_i sont les caractéristiques fonctionnelles induites par les combinaisons des clients. L'estimation de ces caractéristiques associées étant CF_i^*

$$CF_i = \{CF_0^*, CF_i^*\} \quad \text{où} \quad (2.1.1)$$

CF_0^* correspond aux exigences communes partagées par tous les clients,

CF_i^* étant l'estimation des exigences communes et / ou distinctes.

Les règles de combinaisons déterminent l'aspect génératif de l'AFP. Ils garantissent seulement la conformité des variantes du produit (réalisation technologique et marché recherché) qui peuvent être générées.

2.9. Conclusion et limites de l'architecture modulaire

Au terme de ce chapitre, on comprend que les modules étant communs, les variations des demandes sur les produits finis peuvent se compenser et rendre une chaîne logistique moins sensible aux fluctuations de demande. La réduction de la diversité par la modularisation a ainsi des impacts multiples sur la chaîne logistique (Lamothe et Aldanondo, 2001). Il est également possible d'avoir des niveaux de stock par module plus importants et d'être moins vulnérable aux ruptures, ce qui améliore le taux de service. Enfin, l'indépendance des modules facilite le recours à la sous-traitance permettant ainsi de réduire les commandes en retard. Cette indépendance autorise aussi

Chapitre 2 – Architecture modulaire en conception de famille de produits

une spécialisation des moyens par module, à tous les stades de son cycle de vie, qui permet des gains de productivité et de flexibilité.

Toutefois, la modularisation peut d'après (Ulrich, 1995) ne pas être le meilleur optimum. Un autre point d'ombre levé à l'encontre d'une architecture modulaire et mis en relief par (Hendersen et Clark, 1999) est le fait que l'architecture modulaire crée des cloisons étanches entre les concepteurs des modules et de fait, rend quasi impossible les innovations d'architecture, emprisonnant la conception dans un sillon duquel il sera difficile d'échapper. Trop de modularisation peut être anti-économique et un découpage intermédiaire doit offrir un meilleur rendement (Fourcade et Midler, 2003). Le coût du produit en soi peut ne pas être totalement optimisé par une option d'architecture modulaire du fait de l'existence de duplications de fonctions. Pour réduire les coûts de conception, il est utile de concevoir certains composants comme réutilisables. Cela demande de pouvoir mutualiser certaines fonctions entre plusieurs configurations du système en anticipant le besoin par une stratégie technique. Un composant est alors réutilisable car conçu en tant que tel, de manière à répondre aux fonctions mutualisées avec des zones d'adaptations et de paramétrages. La stratégie technique ne peut cependant pas tout anticiper et l'architecture d'un système incluant des composants réutilisables constitue donc une conception sous contrainte.

Nous avons abordé dans ce chapitre les principaux concepts de l'architecture modulaire puis nous avons montré quelques principes d'architecture d'une famille de produits permettant de modéliser et gérer la diversité. Ces travaux nous serviront de base dans le chapitre suivant, dans lequel nous présentons une modélisation de l'architecture des familles de produits à l'aide des grammaires de graphe.

Chapitre 2 – Architecture modulaire en conception de famille de produits

Chapitre 3

Modélisation de famille de produits par les grammaires de graphe

3.1.	Introduction.....	83
3.2.	Modélisation par les graphes	83
3.2.1.	Modélisation dans le cas mono-produit	86
3.2.2.	Modélisation dans le cas multi-produit.....	87
3.3.	Introduction aux grammaires.....	88
3.3.1.	Relation d'appartenance entre les fonctions	89
3.3.2.	Grammaire de Web	94
3.4.	Modélisation d'une famille de produits par les grammaires de graphe	100
3.4.1.	Formalisation du graphe	101
3.4.2.	Exemple d'application : le « crayon à bille »	103
3.4.3.	Modélisation d'un produit composé de modules : graphe attribut	105
3.4.4.	Modélisation des interfaces et de la structure interne : graphe encapsulé .	106
3.4.5.	Modélisation de la variété.....	108
3.4.5.1.	Opération d'ajout de module	109
3.4.5.2.	Opération d'élimination de module	111
3.4.5.3.	Opération d'échange de module	112
3.4.5.4	Opération de redimensionnement de module	114
3.4.6.	Modélisation d'une variante par dérivation de graphe	116
3.4.7.	Modélisation des productions par un diagramme de contrôle	117
3.4.8.	Dérivation de la variante du produit	121
3.5.	Application à un cas industriel	122
3.5.1.	Grammaire de graphe du caisson.....	128

Chapitre 3- Modélisation de famille de produits par les grammaires de graphe

3.5.2.	Définitions et mise en place des productions.....	130
3.5.3.	Définitions des diagrammes de contrôle et dérivation de la variante	133
3.5.4.	Synthèse de la formulation des grammaires de graphe du caisson.....	136
3.6.	Conclusion et limites du modèle	137

3.1. Introduction

Ce chapitre est une contribution à la modélisation des familles de produits par l'utilisation des grammaires de graphe. Au cours d'un rappel conséquent sur la modélisation multi-produit, nous éclaircirons les notions générales de graphe, de liaison fonctionnelle, de liaison géométrique et de modèle opératoire. Pour aborder le concept général de grammaire et plus particulièrement celui de grammaires de web, nous reformulerons de manière analytique et littérale la base de la théorie des grammaires de web. En particulier, le quadruplet définissant les éléments d'une grammaire de web ou grammaire de graphes étiquetés nous conduit à expliciter auparavant les relations d'appartenance entre les fonctions. Les fonctions abstraites et élémentaires sont essentielles pour comprendre les terminologies de vocabulaire non terminal et terminal. Les règles de réécriture, les règles d'écriture contextuelle, hors-contexte ainsi que les différents types de production permettront en définitive de résumer en l'essentiel les fondements des grammaires de web.

L'organisation logique des données d'une famille de produits est abordée sous forme d'une approche architecturale. Les grammaires de graphes sont utilisées pour la modélisation d'une famille de produits. Le chapitre se termine par le développement et l'application du modèle de grammaire de graphe à travers une étude de cas industrielle.

3.2. Modélisation par les graphes

Il convient, avant de rentrer dans le vif du sujet de rappeler quelques notions de graphe, liaison fonctionnelle et liaison géométrique.

Notion de graphe

Un graphe G est un couple constitué d'un ensemble fini X non vide et d'un ensemble E de paires d'éléments de X . Les éléments de X sont les sommets du graphe G , ceux de E les arêtes de G .

On notera

$$G = (X, E) \quad (3.1)$$

- le nombre de ses sommets est $n = |X|$
- le nombre de ses arêtes est $m = |E|$
- l'ordre du graphe G noté $|X|$ est le nombre de ses sommets
- un graphe $G' = (X', E')$ sera un sous-graphe d'un graphe $G = (X, E)$ si $X' \subset X$ et $E' \subset E$
- un graphe sera dit connexe, si pour toute paire de sommets, il existe une chaîne d'arête les joignant.

Notion de liaison fonctionnelle

Il existe une liaison fonctionnelle et une seule entre deux constituants (composants élémentaires) d'un produit s'il existe au moins une liaison mécanique (contact supprimant des degrés de liberté) entre ces deux constituants. L'ensemble des liaisons mécaniques entre deux constituants est remplacé par une seule liaison fonctionnelle. Le graphe des liaisons fonctionnelles est en réalité le modèle le plus réduit qui soit d'un produit composé. Il contient infiniment moins d'informations sur le produit. Toutefois il contient les données les plus essentielles pour l'étude de l'assemblage.

Notion de liaison géométrique

Considérons un produit P et un ensemble $\{E_{h1}, \dots, E_{hp}\}$ d'états de P . Une liaison géométrique $\{C_i, C_j\}$ est une liaison spatiale entre deux composants élémentaires C_i et C_j de P , définie comme suit :

$$\begin{cases} \exists E_k \in \{E_{h1}, \dots, E_{hp}\} \text{ tel que } C_{ij}^k = 1 \\ u_{ij} \in v_{ij} \end{cases} \quad (3.2)$$

La première relation de (3.2) conditionne une liaison géométrique à l'existence d'un contact entre deux composants concernés dans au moins un des états E_k du produit fini. La seconde par contre, conditionne une liaison géométrique par le fait que les

composants concernés soient dans des positions prévues au niveau des états du produit fini.

Dans la seconde relation de (3.2), u_{ij} est le vecteur des coordonnées généralisées de C_i dans un repère lié de C_j et v_{ij} est le domaine parcouru par u_{ij} pour toutes les positions que peut prendre C_i relativement à C_j au sein du produits fini.

Pour un produit donné, l'union des matrices M_k conduit à la matrice M qui définit ainsi une relation binaire sur l'ensemble des composants élémentaires. Nous avons alors :

$$\begin{cases} M_k = [C_{ij}^k] \\ M = \bigcup_{k=1}^p M_k [C_{ij}^k] \end{cases} \quad (3.3)$$

Avec

$$\begin{cases} C_{ij}^k = 0, i = j \\ C_{ij}^k = 1, \text{si contact } C_i \text{ et } C_j \\ C_{ij}^k = 0, \text{si pas de contact } C_i \text{ et } C_j \end{cases} \quad (3.3.1)$$

k est l'identificateur de l'état et p est le nombre d'états du produit fini.

$i, j = 1, \dots, m$: m étant le nombre de composants élémentaires du produit

M définit aussi un graphe simple et non orienté $G = (C, \Gamma)$ appelé graphe des liaisons géométriques du produit P pour l'ensemble des états considérés. Il est toujours connexe car les produits ne comportent ni composants ni groupe de composants isolés.

L'assemblage de certains composants d'un produit peut demander en dehors des liaisons géométriques, une énergie supplémentaire pour assurer leur cohésion. Cette énergie, indépendante de la pesanteur est qualifiée de liaison physique dans le modèle opératoire. Une solidarisation (vis, écrou, rondelles, rivet, colle, soudure, ...) est tout ce qui concoure à l'existence d'une même liaison physique.

3.2.1. Modélisation dans le cas mono-produit

La modélisation dans le cas mono-produit est intimement liée à la « *modélisation fonctionnelle* ». Elle a été développée par Bourjault (Bourjault, 1984) et est l'une des plus anciennes. Il a proposé le concept de liaison fonctionnelle sur la base du modèle de même nom. A tout produit, on peut associer un graphe non orienté tel que l'ensemble de ses sommets correspond de façon biunivoque à l'ensemble des composants élémentaires du produit et l'ensemble de ses arêtes correspond à l'ensemble des liaisons fonctionnelles du produit. A titre d'exemple, la figure 3.1 présente le graphe des liaisons fonctionnelles du produit crayon à bille. Le graphe des liaisons fonctionnelles est un graphe simple où il y a au plus une liaison fonctionnelle entre deux composants élémentaires C_i et C_j et aucune liaison entre un composant C_i et lui-même.

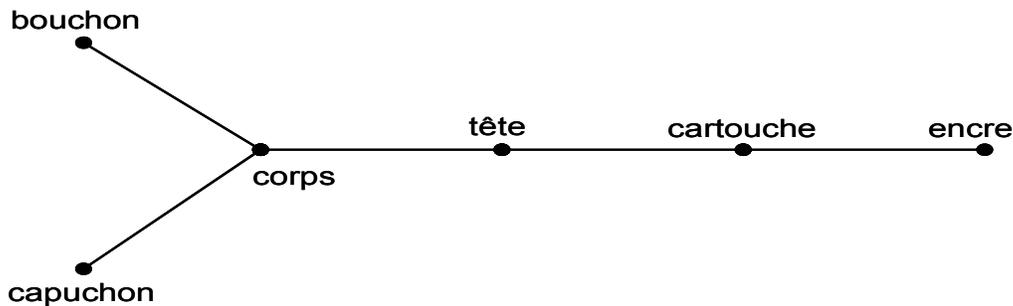


Figure 3.1. Exemple de *graphe des liaisons fonctionnelles du produit crayon à bille*

La modélisation dans le cas mono-produit ne représente que certains aspects du produit, notamment ceux relatifs à sa structure. Henrioud (Henrioud, 1989) a développé la « *modélisation opérationnelle* » qui est une extension de la modélisation fonctionnelle. Son approche est qualifiée d'approche par constituant et le modèle développé par cette approche est le modèle opératoire. Les chercheurs de CSDL (Charles Stark Draper Laboratory) ont également développé une variante de la modélisation fonctionnelle en s'appuyant sur une modélisation beaucoup plus détaillée (Whitney, 86).

3.2.2. Modélisation dans le cas multi-produit

Les travaux de Dufrène (Dufrène, 1991) sur la modélisation d'une famille de produits constituent une bonne base de l'approche multi-produit. Il propose un graphe générique étiqueté en s'inspirant du graphe des liaisons fonctionnelles utilisé pour représenter individuellement les produits composés. Il modélise un ensemble de produits qui présentent des différences au niveau de leurs composants et de leurs structures (liaison entre composants). Ces différences sont indiquées par des étiquettes sur un graphe générique.

Il définit ainsi la notion d'étiquette qu'il associe au graphe générique étiqueté. Celui-ci est un graphe associé à une famille de produits ayant les spécificités suivantes :

- les sommets représentent les composants génériques et les composants spécifiques définis sur l'ensemble des composants de la famille,
- il existe une arête entre deux sommets s'il existe au moins un (type de) produit de la famille pour lequel les deux sommets sont reliés par une liaison fonctionnelle,
- une étiquette est attachée à chaque sommet et à chaque arête.

La notion de composant générique a la particularité d'être limitée aux seuls composants élémentaires (non décomposable ou primitif).

Par ailleurs, l'étiquette d'un sommet est un vecteur, de dimension égale au nombre de types de produits de la famille, dans laquelle la i -ème composante vaut 1 si le constituant associé au sommet existe dans le i -ème type de produit et vaut 0 dans le cas contraire. Cette définition suppose que les types de produits de la famille soient rangés de manière à avoir les composants de même rang dans les différentes étiquettes et quelles correspondent toujours au même type de produit.

De même, l'étiquette d'une arête est un vecteur dont la dimension est le nombre de type de produits de la famille, la i -ème composante valant 1 si la liaison fonctionnelle modélisée existe dans le i -ème type de produit et valant 0 dans le cas contraire. L'ordre des types de produits choisis pour déterminer les étiquettes des sommets doit également être utilisé pour celles des arêtes.

3.3. Introduction aux grammaires

Une grammaire définit les éléments et les structures (syntaxes) d'une langue. La langue peut être le Français, l'Anglais, un langage de programmation informatique etc. La grammaire fournit une structure sur laquelle peut être développé un langage. Les interprétations de langage sont basées sur une information syntaxique obtenue par l'analyse grammaticale de l'information lexicale inhérente aux composants individuels. Les grammaires peuvent être utilisées pour générer des formes de phrases (les formes de phrases pouvant être des chaînes, des graphiques ou des types de formes variées) ou pour analyser des phrases dans le but de vérifier la syntaxe pour l'inclure dans le langage.

La figure 3.2 ci-après proposée par (Djemel, 1994) fait ressortir la similitude entre la génération des phrases à partir des symboles (mots) en respectant une sémantique liée à une langue donnée et la génération des fonctions d'un produit en considérant les fonctionnalités définies par la conception.

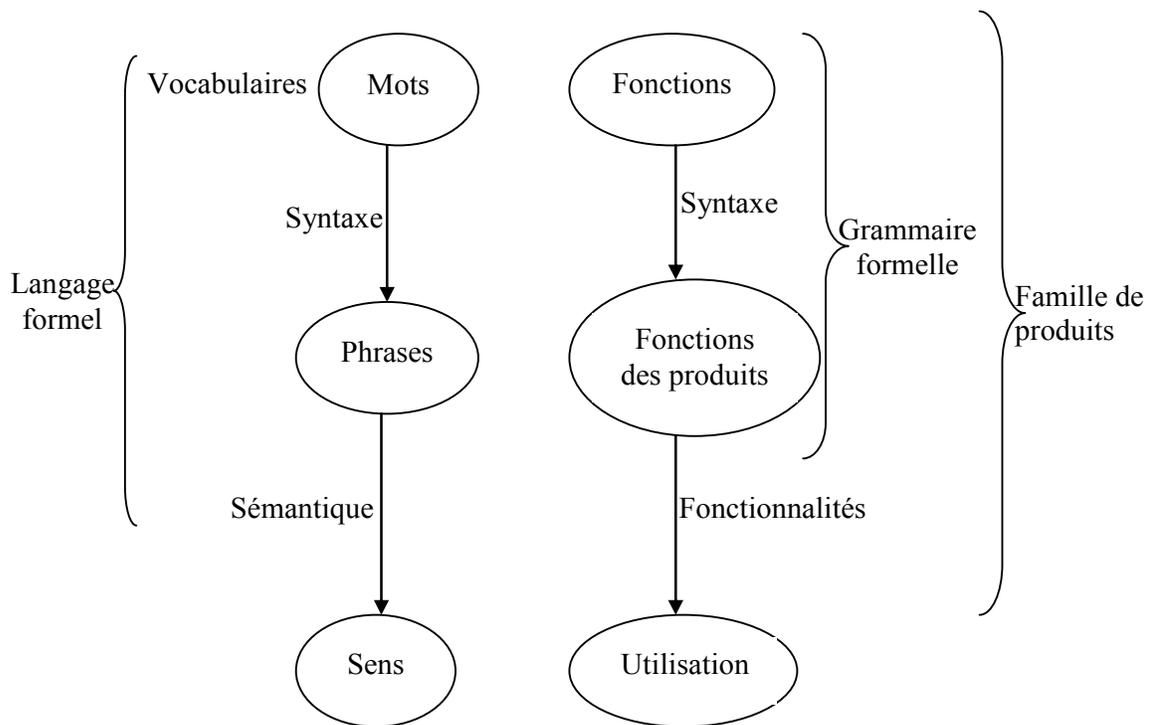


Figure 3.2. *Correspondance entre langage formel et une famille de produits*

Les éléments de cette figure nous conduisent à la définition d'une grammaire formelle que nous appliquerons à un modèle de description fonctionnelle d'une famille.

Considérons un ensemble fini V appelé vocabulaire.

Soit $V_T \subset V$ le vocabulaire non terminal, c'est – à – dire l'ensemble des symboles qui peuvent apparaître dans les graphes de langage,

$V_N = V - V_T$ est le vocabulaire non terminal, c'est l'ensemble des symboles nécessaires à la description de cette langue appelé aussi « variable » ou « catégories syntaxiques »,

S un élément distinct de V_N appelé axiome ou symbole initial,

L'ensemble fini P des règles de production : une règle de production étant un élément de la forme $\alpha \rightarrow \beta$, α et β étant de longueur finie.

Un quadruplet défini par la relation (3.4) est une grammaire formelle

$$G = (V_N, V_T, S, P) \quad (3.4)$$

Les éléments des vocabulaires terminaux et non terminaux sont respectivement des fonctions élémentaires constantes, variantes et / ou optionnelles et des fonctions génériques constantes, variantes et / ou optionnelles. Les travaux de (Stadzisz, 1997 ; Mtopi et al., 2004a) permettent de mieux structurer les définitions relatives aux différents types de fonctions, il convient de les rappeler dans le but de bien comprendre les différents vocabulaires.

3.3.1. Relation d'appartenance entre les fonctions

Considérons un ensemble de fonctions de service et techniques E_{SF} contenues dans le modèle fonctionnel d'un type de produit donné. La relation d'appartenance entre les fonctions d'un produit est matérialisée par la relation suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} R_f(F_i, F_j) \\ \pi_f \end{array} \right. \quad (3.5)$$

$R_f(F_i, F_j)$ est une relation binaire et est une partie de $E_{SF} \times E_{SF}$

Les éléments de la relation $R_f(F_i, F_j)$, encore appelée relation d'appartenance entre les fonctions d'un produit vérifient le prédicat π_f .

π_f signifie que la fonction F_i appartient à la fonction F_j . F_i est appelée sous fonction de F_j si F_i est hiérarchiquement attachée au dessous de F_j représentant ainsi une composante de F_j .

Cette relation d'appartenance est transitive puisque :

$$\forall F_i, F_j, F_k \in E_{SF} / R_f(F_i, F_j) \text{ et } R_f(F_j, F_k), \text{ on a } R_f(F_i, F_k) \quad (3.6)$$

En reprenant les définitions de Djemel (Djemel, 1994) et Stadzisz (Stadzisz, 1997), nous avons structuré les relations d'appartenance entre les fonctions. Elles sont présentées ci-dessous.

Fonction abstraite ou générique

Une fonction quelconque F_i sera qualifiée de « *fonction abstraite* » ou de « *fonction générique* » s'il existe au moins une autre fonction F_j vérifiant la relation binaire $R_f(F_j, F_i)$, ce qui signifie que F_i possède au moins une sous fonction. Une fonction abstraite peut être dite aussi générique car plusieurs instanciations sont possibles. Par la suite, nous utiliserons indifféremment ces deux termes.

Fonction élémentaire

Une fonction quelconque F_i sera qualifiée de « *fonction élémentaire* » s'il n'existe pas une autre fonction F_j vérifiant $R_f(F_j, F_i)$, par conséquent F_i ne possède pas de sous-fonction.

Ces deux définitions permettent d'établir une typologie des fonctions des familles de produits. On distinguera ainsi dans ce cadre trois types de fonctions : les fonctions constantes, les fonctions variantes et les fonctions partielles.

Fonction constante

Une fonction abstraite ou élémentaire sera qualifiée de « *constante* » lorsqu'elle s'applique de manière rigoureusement identique à tous les types de produits appartenant à

une famille donnée. Dit autrement, elle aura la même description des paramètres et contraintes. Le terme « constant » tient au fait que ces fonctions sont communes à l'ensemble des produits.

Fonction variante

Une fonction sera qualifiée de « *variante* » si elle est abstraite et est assurée par tous les types de produits d'une famille. Il faudrait en outre que la valeur d'au moins un de ses paramètres change selon le type de produit. Le fait que ces fonctions sont présentes au sein de l'ensemble de types de produits en ayant toutefois des variantes en ce qui concerne la valeur de ses paramètres justifie bien le terme « *variante* ».

Fonction partielle ou optionnelle

Une fonction abstraite ou élémentaire est qualifiée de « *partielle* » si elle n'est pas assurée par la totalité des variétés de produits à l'intérieur d'une famille donnée. Les fonctions partielles sont par conséquent présentes dans certains types de produits et absentes dans d'autres types de la même famille. Ce type de fonction représente soit le fait qu'une certaine fonction est optionnelle (décrivant une fonctionnalité qui est présente ou bien absente dans chaque type produit) soit le fait qu'une fonction est alternative (ou bien la fonction existe ou bien une autre la remplace).

Afin d'illustrer les définitions précédentes, considérons l'exemple académique d'une famille de stylos bille dont le modèle fonctionnel est présenté à la figure 3.3. Cette famille de stylos offre un choix d'écriture d'épaisseur 0,5 et 0,7mm, et un choix d'encre noir ou rouge. Ce qui conduit à l'existence de quatre types de produits pour la famille.

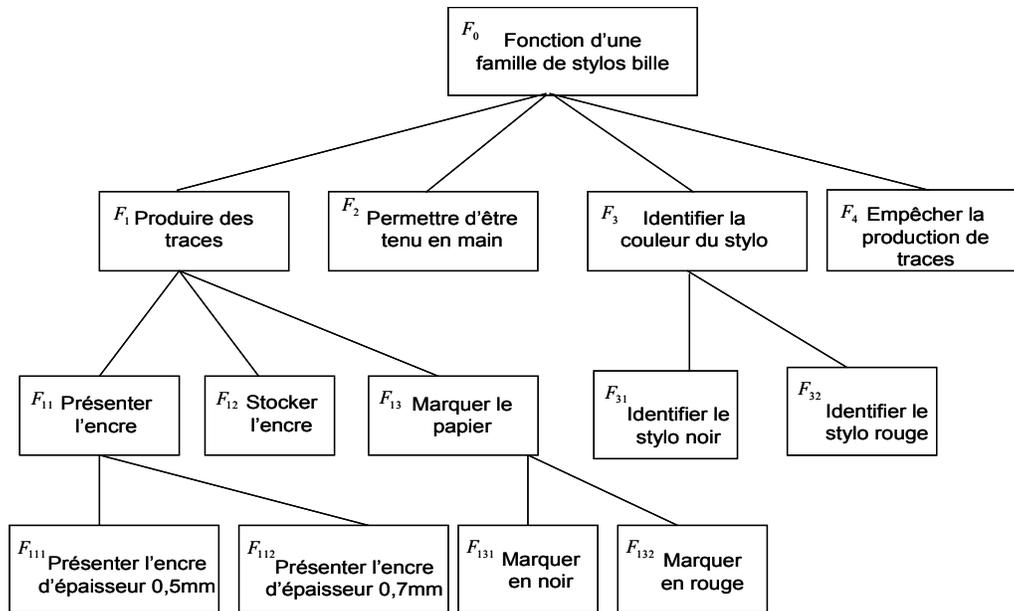


Figure 3.3. Description fonctionnelle d'une famille de stylos bille

Les relations d'appartenance entre les fonctions nous permettent d'identifier :

- quatre fonctions abstraites : F_1, F_{11}, F_{13} et F_3 ,
- neuf fonctions élémentaires : $F_{111}, F_{112}, F_{12}, F_{131}, F_{132}, F_2, F_4, F_{31}$ et F_{32} .

Ces fonctions peuvent encore être classées selon la typologie proposée précédemment. Nous obtenons ainsi :

- les fonctions constantes : ce sont F_{12}, F_2 et F_4 car elle s'appliquent indifféremment aux quatre types de produits de la famille,
- les fonctions variantes : ce sont les fonctions F_1, F_{11}, F_{13} et F_3 qui s'appliquent aux quatre types de produits mais avec des paramètres différents (couleur et épaisseur des traits),
- les fonctions partielles :
 - la fonction F_{111} ne s'applique qu'aux stylos 0,5 mm noir et rouge,
 - la fonction F_{112} ne s'applique qu'aux stylos 0,7 mm noir et rouge,

- les fonctions F_{131} et F_{31} ne s'appliquent qu'aux stylos 0,5 et 0,7 mm noir,
- les fonctions F_{132} et F_{32} ne s'appliquent qu'aux stylos 0,5 et 0,7 mm rouge.

L'utilisation de la relation (3.4) nous permet de décrire une famille de produits de la manière suivante :

Vocabulaire non terminal : V_N

Les différents éléments de V_N représenteront des fonctions génériques constantes, variantes et / ou optionnelles.

Vocabulaire terminal : V_T

Dans ce cas, les différents éléments de V_T seront des fonctions élémentaires constantes, variantes et / ou optionnelles.

Règles de réécriture

Une règle de grammaire est constituée d'un couple de symboles α et β séparés par une flèche (\rightarrow) où les symboles α et β sont appelés la partie gauche et la partie droite de la règle ($\alpha \rightarrow \beta$) respectivement.

Deux types de règles existent : les règles de décomposition et les règles de substitution.

Les règles de décomposition qui font apparaître plusieurs fonctions qui se traduisent par plusieurs symboles en partie droite de la règle. Ces symboles sont reliés par la fonction logique « ET », notée par un point «.». Cette règle ne concerne que les fonctions génériques constantes. Cela est dû à la nature de la fonction logique ET.

Si nous considérons la fonction générique constante F , les deux fonctions élémentaires constantes qui peuvent se substituer à F , sont f_1 et f_2 . La règle de décomposition dans cet exemple est :

$$F \rightarrow f_1.f_2 \tag{3.7}$$

Les règles de substitution qui sont issues d'un même symbole en partie gauche produisent un seul symbole en partie droite choisi de manière exclusive. Pour condenser l'ensemble des règles de substitution issues d'un même nœud, le « OU » exprimant le choix exclusif parmi plusieurs symboles peut être utilisé, que l'on peut noter par « / » entre chaque symbole. Cette règle concerne les fonctions génériques variantes ou optionnelles.

Soit la fonction générique variante G , elle peut être remplacée par la fonction élémentaire variante g_1 ou la fonction élémentaire g_2 .

$$\left\{ \begin{array}{l} G \rightarrow g_1 / g_2 \\ \text{équivalent aux deux règles} \\ G \rightarrow g_1 \\ G \rightarrow g_2 \end{array} \right. \quad (3.8)$$

On peut ainsi remarquer que les grammaires formelles permettent une représentation graphique de l'application des règles. En effet, on associe à chaque règle un graphe ET/OU comme le montre la figure 3.4.

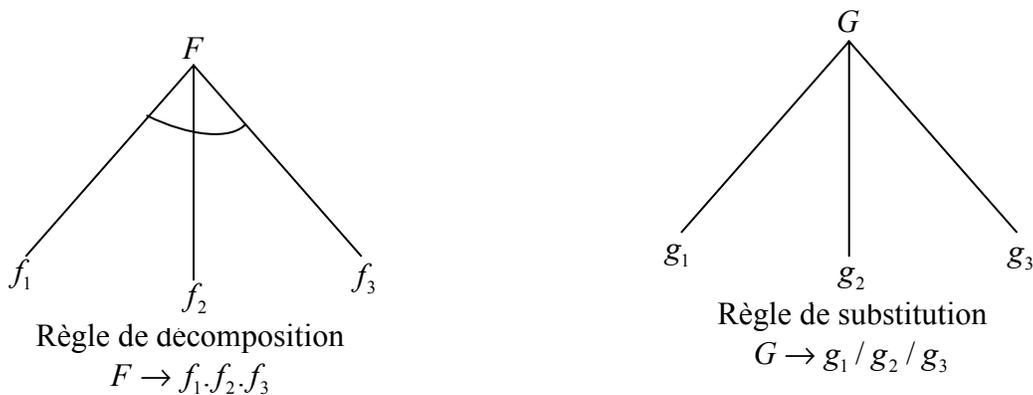


Figure 3.4. Représentation graphique des règles de réécriture

3.3.2. Grammaire de Web

(Pfalz et Rosenfeld, 1969) ont introduit la notion de grammaire de webs pour laquelle le langage est un ensemble de graphes étiquetés (les « web ») et dont la production consiste à remplacer un « subweb » par un autre « subweb ». (Rosenfeld et Milgram, 1972) ont introduit les notions de graphes orientés et de graphes non orientés.

Pour remédier aux problèmes de mise à jour du modèle d'une famille de produits lors de l'utilisation du graphe générique étiqueté proposé par (Dufrene, 1991), (Djemel, 1994) a développé un modèle de représentation de famille de produits qui repose sur l'utilisation des grammaires de web. Son modèle permet dans une première phase de modéliser tous les graphes de produits de la famille et, dans une deuxième phase, d'élaborer les gammes d'assemblage. L'idée essentielle est de ne pas écrire une famille en extension mais d'une manière générative, par conséquent plus condensée. Dans une telle représentation, le modèle de famille est décrit par une grammaire de web et le langage généré par cette grammaire est l'ensemble de types de produits de la famille.

(Stadzsiz, 1997) a utilisé les grammaires de web pour la modélisation de famille de stylos à billes. Un exemple a également été utilisé pour la modélisation d'une famille de roues de véhicule (Mtopi et al., 2004b,c).

De manière générale, les principes généraux qui sous tendent les grammaires de web sont énoncés ci-après.

Une grammaire de web est une grammaire de graphes étiquetés (c'est-à-dire que les nœuds possèdent des identificateurs) définie par le quadruplet suivant :

$$G_w = (V, V_T, S, P) \quad (3.9)$$

Où

V est un ensemble fini non vide, appelé vocabulaire

V_T est un sous ensemble non vide de V , appelé vocabulaire terminal

$$V_N = V - V_T$$

$S \in V_N$ est le symbole initial

P est un ensemble fini non vide de triplets (α, β, f) qui sont appelés règles de réécriture, avec

$$\begin{cases} \alpha \text{ et } \beta \text{ sont des subwebs de } V \\ f : N_\beta \times N_\alpha \rightarrow 2^V \end{cases} \quad (3.9.1)$$

f est une application de $N_\beta \times N_\alpha$ dans 2^V (l'ensemble des sous – ensembles de V).

N_β, N_α sont des ensembles finis non vides contenant les nœuds de β et α respectivement.

Dans les conventions de grammaires en chaînes, les règles de réécriture sont de la forme « $\alpha \rightarrow \beta$ ». Elles signifient qu'on remplace une chaîne par une autre.

Considérons l'exemple de la chaîne de caractères et la règle suivante :

$$\begin{cases} W = \Phi \alpha \Psi \\ \alpha \rightarrow \beta \end{cases} \quad (3.10)$$

La relation (3.10) signifie qu'on peut réécrire W en remplaçant α par β , ce qui donne

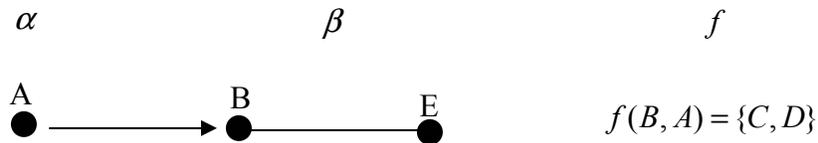
$$W \rightarrow \Phi \beta \Psi \quad (3.11)$$

Soit V un ensemble d'étiquettes (autrement dit V est un ensemble fini non vide dont les éléments sont appelés étiquettes), N_α et N_β les ensembles de nœuds des webs α et β respectivement. La règle de réécriture de la grammaire de webs est le triplet (α, β, f) . Elle a la forme suivante :

$$\alpha \rightarrow \beta \quad f \quad (3.12)$$

La relation (3.12) signifie que la fonction f spécifie la substitution du Web α par le Web β , en d'autres termes elle précise comment joindre les nœuds du Web β aux voisins de chaque nœud du Web α . Comme la fonction f est d'ordre pair $N_\beta \times N_\alpha$, son argument est de la forme (n, m) avec $n \in N_\beta$ et $m \in N_\alpha$. Les valeurs de $f(n, m)$ spécifient la connexion de n aux voisins de m .

Considérons l'exemple de la règle d'écriture suivante :



$f(B, A) = \{C, D\}$ veut dire « joindre le nœud B (de la partie droite « β » de la règle) aux voisins éventuels du nœud A (de la partie gauche « α » de la règle) dont les étiquettes doivent être C ou D ».

En l'appliquant à un ensemble concret de production, la fonction $f(B, A) = \{C, D\}$ se lit : « on instancie un nœud générique A par la variante B si les voisins de A ont les étiquettes C ou D ».

Dans le cas où la situation ne présente aucune ambiguïté dans l'application de la règle la fonction f sera remplacée par le terme « normal ».

Une règle de réécriture d'une grammaire de Web (α, β, f) est qualifiée de *contextuelle* s'il existe un élément non terminal A du Web α tel que $\alpha - \{A\}$ est un subweb de β . Si le Web α n'est constitué que d'un point singulier, la règle (α, β, f) est dite *hors - contexte*.

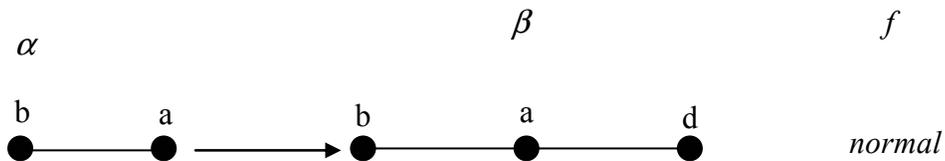


Figure 3.5. Exemple de règle d'écriture contextuelle

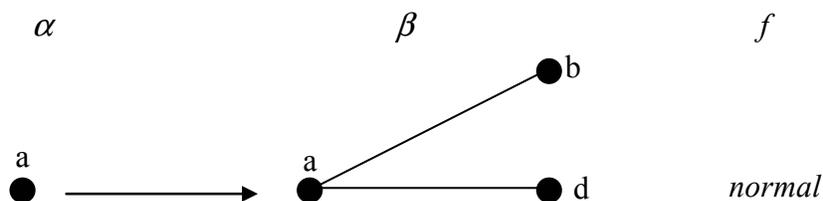


Figure 3.6. Exemple de règle d'écriture hors-contexte

La modélisation d'une famille de produits par une grammaire de web peut se faire par l'application des trois types de règles de production suivantes :

Règle de type 1

Pour cette règle, la partie gauche et la partie droite sont des nœuds simples. Cette règle concerne l'instanciation des composants génériques par des composants spécifiques.

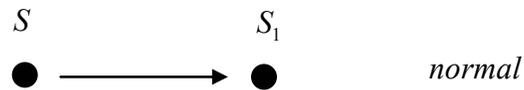


Figure 3.7. Représentation d'un exemple de règle de type 1

En considérant l'exemple de la famille des crayons à bille, le composant générique variant « *capuchon* » peut être instancié par capuchon vert, bleu, etc.



Figure 3.8. Règle de réécriture du capuchon de type 1

Règle de type 2

Une règle de type 2 est celle pour laquelle la partie gauche est un nœud simple et sa partie droite un subweb. Elle sert principalement

- à instancier un nœud par des composants polystructurels
- à ajouter des composants optionnels.

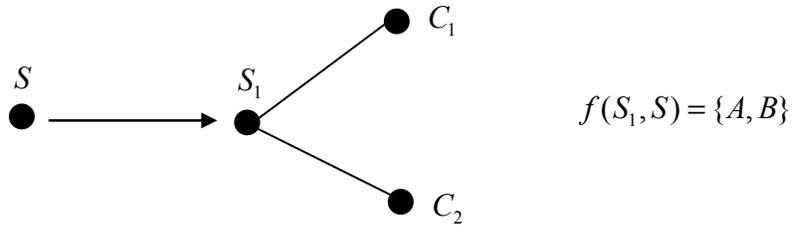


Figure 3.9. Représentation d'un exemple de règle de type 2

Si le capuchon de l'exemple précédent est un produit composé (c'est-à-dire constitué de plusieurs composants), le schéma ci-dessous illustre la première règle de type 2.

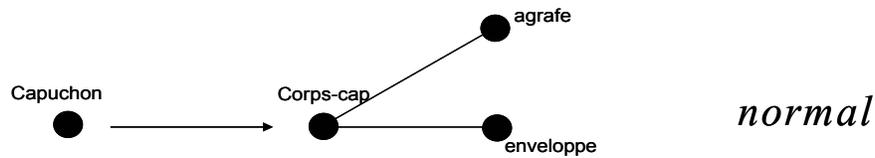


Figure 3.10. Règle de réécriture du capuchon de type 2

Règle de type 3

La règle de type 3 est particulière en ce sens que la partie gauche et la partie droite sont des subwebs comme le montre la figure 3.11. Elle peut en outre servir par exemple à ajouter une liaison partielle entre deux composants.

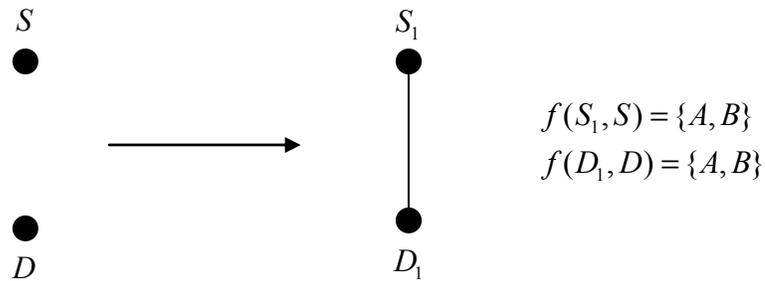


Figure 3.11. Représentation d'une règle de type 3

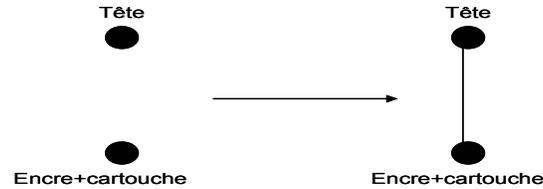


Figure 3.11. Exemple de règle de réécriture de type 3

3.4. Modélisation d'une famille de produits par les grammaires de graphe

L'expression « *grammaire de graphe* » se réfère généralement à une variété de méthodes pour la spécification (possibilités infinies) des ensembles de graphes (Jiao et Tseng, 1999). Les graphes et les structures semblables aux graphes sont utilisés pour représenter la structure de systèmes complexes, en fournissant une représentation de données à la fois expressives et variées. Typiquement, les nœuds représentent les objets ou concepts, les arêtes représentent les relations entre eux et l'attribut d'arête représente l'information non structurée associée aux objets ou relations. Les combinaisons possibles sont remplacées par les règles de production. Tout graphe pouvant être généré par application des productions à un graphe de départ constitue le langage de cette grammaire de graphe.

A un niveau abstrait, les systèmes réalistes de modèles de grammaires de graphe combinent les avantages d'une compréhension intuitive avec la rigueur mathématique (Blostein et al., 1994). Les travaux antérieurs démontrent que les grammaires de graphe constitue un outil de modélisation pour les systèmes complexes, elles sont particulièrement adaptées à la description des informations à la fois structurées et non structurées (forme, couleur etc.) ainsi que les combinaisons entrant dans la transformation et la génération des éléments du système modélisé. En raison des avantages venant de plusieurs applications, (Siddique, 2000) a adopté la grammaire de graphe comme un outil pour modéliser les éléments d'une famille de produits. Le principe de la modélisation de famille de produits basée sur les grammaires de graphe est de concevoir les grammaires de graphe pour représenter l'organisation d'éléments de la famille de produits et en conséquence de transformer le processus de dérivation graphique.

3.4.1. Formalisation du graphe

Fondamentalement, les produits possèdent des structures qui conviennent à une représentation par des graphes. Un produit est composé d'un ensemble de modules étroitement liés.

L'architecture d'une famille de produits est matérialisée par la SGP. Il y a un ou plusieurs modules composés associés à cette SGP. Chaque module composé associé possède son produit de base, les modules distinctifs et certaines méthodes permettent de modifier le produit de base pour générer les variantes du module composé. Les variantes résultantes forment la famille du module composé. Un module composé peut être défini par l'un ou l'autre produit final au niveau des sous ensembles, donc devenir une base de construction de la SGP pour caractériser la famille de produits (Mullins et Rinderle, 1991).

Les entités de famille de produits relatives aux éléments de grammaire de graphe (produits, produits de base, modules distincts) sont représentées par des graphes. Les modules sont modélisés comme des nœuds, les interconnexions (interfaces) entre ces modules comme des arêtes et les paramètres de modules comme attributs du nœud. Les combinaisons des modules ainsi que les conditions relatives au moment où ces combinaisons doivent être mises en place sont modélisées respectivement comme opérations et conditions d'application des règles de production. En adoptant le concept de grammaire de graphe par attribut programmé (Programmed Attributed Graph Grammars, PAGG) (Bunke, 1982), la séquence pour l'exécution d'un ensemble de productions peut être clarifiée dans un diagramme de contrôle. La description statique d'une famille de produits est composée des notations de ces grammaires de graphe. Basées sur cette description statique, les variantes de la famille de produits peuvent être décrites par application des règles de production tributaires du diagramme de contrôle pour modifier le graphe initial, graphe représentant le produit de base (ou initial). Les graphes résultants sont les modèles de graphe des variantes désirées.

Tous ces graphes composent le langage du graphe de cette grammaire, qui comprend l'espace de conception de la famille de produits à modéliser.

De ce fait une Grammaire de Graphe Programmée par Attribut (GGPA) est définie par six éléments :

- les étiquettes de sommet

Chapitre 3- Modélisation de famille de produits par les grammaires de graphe

- les étiquettes d'arc
- les attributs de sommet
- le graphe initial
- les productions
- le diagramme de contrôle

Par conséquent, la grammaire de graphe pour un module composé M est un 6-uplet défini comme suit :

$$G(M) \cong (V, W, A, G^i, P, C) \quad (3.13)$$

Où

V est l'ensemble constitué des sommets étiquetés (i.e. des noms) de tous les modules,

W représente l'ensemble constitué des arcs étiquetés qui indiquent les liaisons entre les modules de M ,

A est l'ensemble constitué des attributs de sommet représentant les paramètres des modules fils (ils permettent l'instanciation des modules),

G^i caractérise le graphe initial représentant le produit de base de M ,

P est l'ensemble comprenant toutes les règles de production définies pour les manipulations des modules distincts afin de générer les variantes de M ,

C matérialise le diagramme de contrôle sur P spécifiant l'ordre par lequel les productions sont appliquées afin que les variantes de M puissent être obtenues.

A partir de (3.13.1) nous obtenons les relations analytiques sur les ensembles V , W et P

$$\begin{cases} V = \{M_i\}; i = 1, 2, \dots, S(G(M)) \\ W = \{M_i \times M_j\}; i, j = 1, 2, \dots, S(G(M)) \\ P = \{p_k\} \end{cases} \quad (3.13.1)$$

Dans le modèle de grammaire de graphe d'une famille de produits, le produit de base s'identifie au graphe initial. Le processus visant à personnaliser le produit de base à travers les liaisons, l'attachement, l'enlèvement, l'échange et / ou l'ajustement de modules particuliers peut être modélisé par les réécritures du graphe de départ en utilisant une série de productions en accord avec le diagramme de contrôle. Les contraintes de configuration peuvent être traitées par l'utilisation des conditions d'application des règles de production. Les graphes dérivés représentent les variantes désirées. Alors que toutes les variantes composent la famille, l'espace de conception d'une famille de produits est décrit par un langage de graphe de cette grammaire de graphe.

3.4.2. Exemple d'application : le « crayon à bille »

Considérons un produit de base « crayon à bille » dont le graphe des liaisons fonctionnelles est matérialisé par la figure 3.1, constitué des modules corps (M_{Corp}), tête (M_{Tete}), encre (M_{Encr}), cartouche (M_{Cart}) et bouchon (M_{Bouc}). Les variantes de ce produit peuvent être obtenues d'une part en remplaçant le module encre par l'une ou l'autre des variantes « encre rouge » (M_{En_ro}) ou « encre noir » (M_{En_no}), d'autre part par l'ajout de fonctions supplémentaires matérialisées ici par le module agrafe (M_{Agra}), que nous appellerons module optionnel. Les modules encre rouge (M_{En_ro}) et encre noir (M_{En_no}) permettant d'instancier le produit sont des modules fils. Les figures 3.12 montrent trois cas de création de variantes.

Nous faisons l'hypothèse que les modules du produit de base ont les liaisons suivantes : r_{corp_cart} , r_{corp_bouc} , r_{corp_tete} , r_{tete_encr} , r_{encr_cart} . Par ailleurs, l'ajout du module agrafe crée des relations entre agrafe et cartouche (r_{corp_agra}).

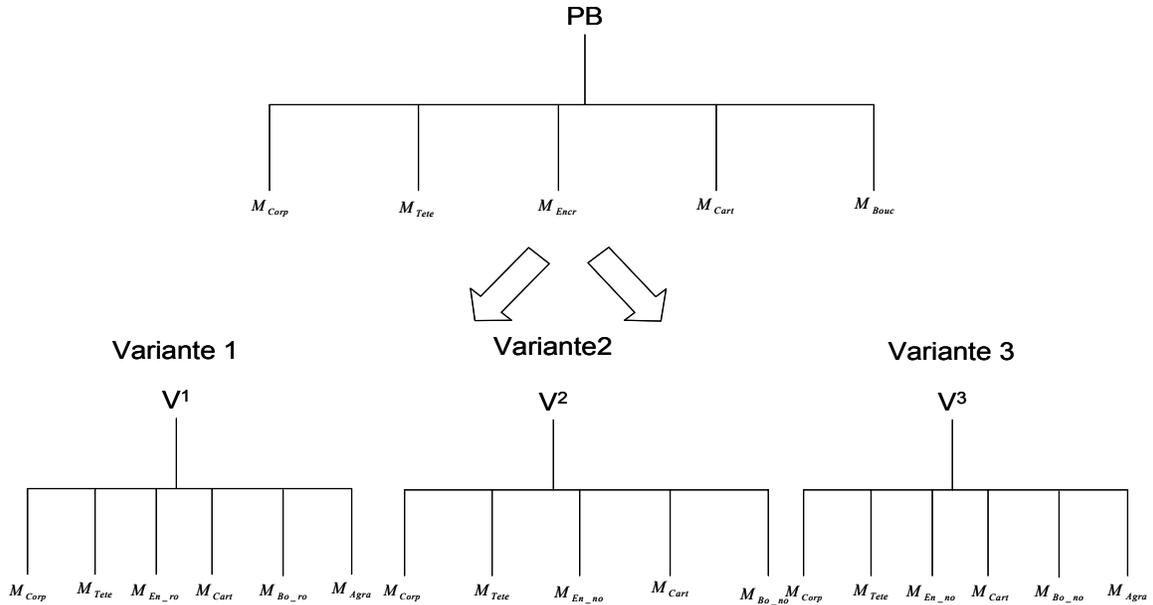


Figure 3.12. Passage du produit de base aux variantes

Nous pouvons formuler la grammaire de graphe par attribut programmé par l'équation suivante :

$$G(M) \cong (V, W, A, G^i, P, C) \quad (3.14)$$

Un rapprochement des relations (3.13) et (3.13.1) nous permet de repréciser les ensembles V , W et P par l'équation (3.14.1).

$$\begin{cases} V = \{M_{Corp}, M_{Tete}, M_{Encr}, M_{Cart}, M_{Bouc}, M_{Agra}\} \\ W = \{r_{corp_tete}, r_{corp_agra}, r_{corp_cart}, r_{tete_encr}, r_{encr_cart}, r_{corp_bouc}\} \\ P = \{p_1, p_2, p_3, p_4\} \end{cases} \quad (3.14.1)$$

La production p_1 représente l'ajout du module optionnel agrafe, p_2 l'ajustement du module tête (épaisseur 0.5 ou 0.7 mm), p_3 l'échange du module distinctif « encre de couleur rouge » (En_ro) par le module distinctif « encre de couleur noire » (En_no) et p_4 l'échange du module distinctif « bouchon de couleur rouge » (Bo_ro) par le module distinctif « bouchon de couleur noire » (Bo_no) comme le montre la relation (3.23).

A représente l'ensemble des attributs des sommets. Le graphe initial G^i de la figure 3.13 est une représentation graphique du produit de base.

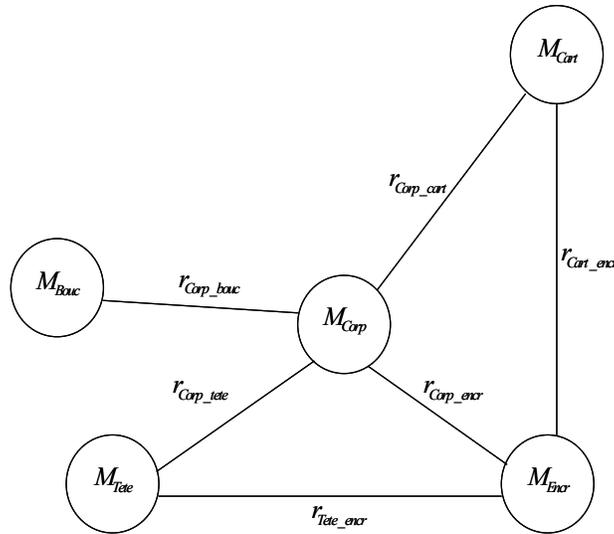


Figure 3.13. Graphe Initial

3.4.3. Modélisation d'un produit composé de modules : graphe attribut

Considérons V et W comme deux alphabets permettant d'étiqueter respectivement les sommets et les arcs. Soit A l'ensemble représentant l'attribut des sommets. En instanciant les noms de modules par V , les types de relations entre modules par W et les paramètres de module par A , un graphe attribut peut être utilisé pour représenter un produit composé de modules.

Un graphe attribut (*graphe_a*) g^a représentant un produit peut être caractérisé par un 4-uplet défini comme suit :

$$g^a \equiv (S, E, \lambda, \alpha) \quad (3.15)$$

Où

S est un ensemble fini composé de sommets représentant les modules du produit,

$E = (E_w)_{w \in W}$ est un uplet de relations,

$E_w \subseteq S \times S$ pour chaque $w \in W$, représentant l'ensemble des liaisons entre les modules.

Une paire $(s_i, s_j) \in E_w$ est interprétée comme un arc dirigé avec pour étiquette w du sommet s_i (lié au module M_i) au sommet s_j (lié à M_j),

$\lambda : S \rightarrow V$ est une fonction qui associe une étiquette de V à chaque sommet du graphe,

$\alpha(s_i)$ est une fonction qui associe un ensemble d'attributs au sommet s_i .

La figure 3.14 ci-dessous reprend l'exemple développé au §3.4.1 et présente la structure générique d'un module (ou produit) composé. Elle inclut toutes les variantes possibles. Dans cette figure, M_{Corp} , M_{Cart} et M_{Agra} sont des modules communs, M_{Tete} , M_{Encr} et M_{Bouc} représentent les modules primitifs.

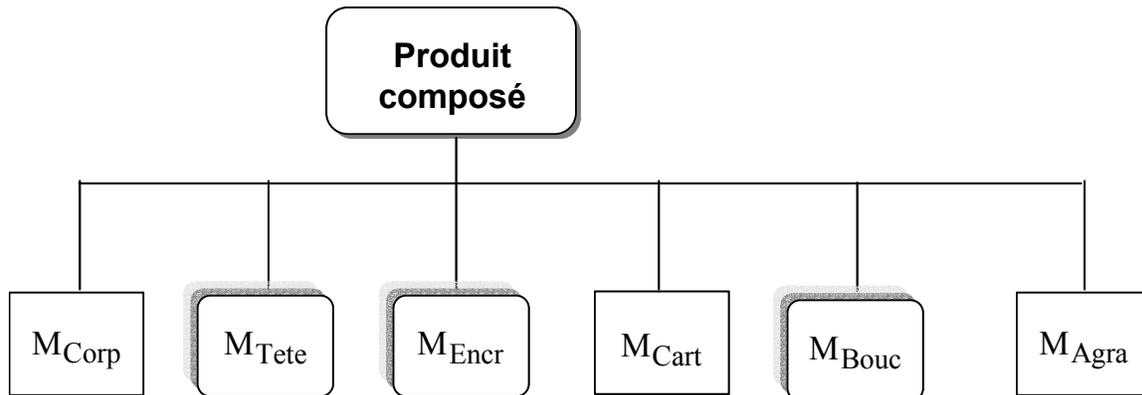


Figure 3.14. Structure Générique d'un produit Composé

3.4.4. Modélisation des interfaces et de la structure interne : graphe encapsulé

Pour caractériser les interfaces externes et les structures internes des modules, le graphe encapsulé est bien adapté. Le concept de graphe encapsulé a été initialement introduit par (Engels et Schürr, 1995). Il est utilisé pour décrire les différents niveaux d'abstraction de systèmes hiérarchiques. Nous définissons le graphe encapsulé pour la modélisation des modules à différents niveaux d'abstraction de la structure hiérarchique des produits.

Un graphe encapsulé (*graphe_e*) g du module M est spécifié par un 7-uplet défini comme suit :

$$g \equiv (S_c, S, A_c, A, S_{cp}, S_{pr}, S_{cm}) \quad (3.16)$$

Où

$S_c(g)$ est l'ensemble constitué de sommets connus de g qui correspond à tous les modules contenus ou reliés au produit, ainsi les modules contenus dans le produit sont appelés modules fils et ceux qui sont reliés au produit appelé module de contexte.

$S(g)$ est l'ensemble comprenant tous les sommets appartenant à g et correspondant à tous les modules fils de M .

$A_c(g)$ est l'ensemble comprenant tous les arcs connus de g .

$A(g)$ est l'ensemble comprenant tous les arcs qui appartiennent à g .

$S_{cp}(g)$ représente l'ensemble de tous les sommets composés correspondant aux modules fils composés de M .

$S_{pr}(g)$ est l'ensemble de tous les sommets primitifs qui correspondent aux modules fils primitifs de M .

S_{cm} est l'ensemble de tous les sommets communs correspondant aux modules fils communs de M .

Tous ces ensembles sont formalisés par les relations (3.16.1) suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} S_c(g) = S_c ; S_c \neq \emptyset \\ S(g) = S ; S \subseteq S_c, S \neq \emptyset \\ A_c(g) = A_c \subseteq S_c \times S_c \\ A(g) = A \subseteq S \times S ; A \subseteq A_c \\ S_{cp}(g) = S_{cp} \subseteq S \\ S_{pr}(g) = S_{pr} \subseteq S \\ S_{cm}(g) = S_{cm} \subseteq S \\ S(g) = S_{cp}(g) \cup S_{pr}(g) \cup S_{cm}(g) \end{array} \right. \quad (3.16.1)$$

Les notations de l'équation (3.16.2) seront utilisées par la suite.

On notera

$$\begin{cases} S_{ct}(g) = S(g) / S_c(g) \\ A_{ct}(g) = A(g) / A_c(g) \\ G(M) \end{cases} \quad (3.16.2)$$

Dans cette équation,

$S_{ct}(g)$ représente l'ensemble composé de tous les sommets de contexte dans g , c' est le complément de $S_c(g)$ par rapport à $S(g)$.

$A_{ct}(g)$ représente l'ensemble de tous les arcs de contexte dans g , c' est le complément de $A_c(g)$ par rapport à $A(g)$.

$G(M)$ définit le graphe encapsulé (*graphe_e*) du module M .

La définition du graphe encapsulé peut être utilisée pour représenter toute catégorie de modules dans une famille de produits comme le montre les équations (3.16.3) à (3.16.6). En effet,

$$Si \quad S_{cp}(G(M)) \cup S_{pr}(G(M)) = \emptyset, \quad M \text{ est un module commun} \quad (3.16.3)$$

$$Si \quad |S(G(M))| = 1, \quad M \text{ est un module primitif} \quad (3.16.4)$$

$$Si \quad |S(G(M))| > 1, \quad M \text{ est un module composé} \quad (3.16.5)$$

$$Si \quad |S(G(M))| > 1 \text{ et } S_c(G(M)) = \emptyset, \quad M \text{ est un produit final.} \quad (3.16.6)$$

Par conséquent, chaque module peut être représenté par un *graphe_e*. Un module fils représenté par un sommet dans un *graphe_e* de son module père peut être combiné en utilisant ses propres *graphe_e*.

3.4.5. Modélisation de la variété

En s'appuyant sur l'architecture modulaire des produits, la variété de produits peut être satisfaite à travers une combinaison variée de modules (Ulrich, 1995). En plus,

la variété peut résulter des modifications topologiques ou de la variation des attributs du sommet. La représentation des produits et modules par les *graphes_e* conduit à la modélisation de la génération de la variété par une spécification des transformations de l'état des graphes associés. Cela est réalisé en appliquant les productions aux graphes originaux. Une production est constituée de deux éléments :

- une opération
- des conditions d'applications.

L'opération $O \equiv (g_g, g_d, T_i, F, \pi)$ indique comment la partie gauche du graphe (PGG) g_g est remplacée par la partie droite du graphe (PDG) g_d en respectant la transformation intégrée représentée par T_i , ou alors la transformation d'attribut F. Les conditions d'applications spécifient le moment où une opération devrait être remplie. Elles peuvent être exprimées comme les fonctions des caractéristiques sélectionnées auprès des clients ou des caractéristiques des valeurs ou alors les paramètres des modules parents. Lorsque les conditions d'applications d'une production sont satisfaites, le prédicat d'application π est vrai. En fait les quatre premiers éléments définissent ensemble l'opération sur le graphe présenté (ou graphe hôte) en remplaçant g_g par g_d , alors que le dernier élément spécifie la condition sous laquelle l'opération peut être réalisée. L'opération sur le graphe étant liée à la manipulation du module, les conditions d'application veillent à la synchronisation de la variété des vues multiples. La création de la variété résulte de quatre opérations (Ulrich, 1991 ; Du et al., 2002): ajout , élimination, échange et redimensionnement.

3.4.5.1. Opération d'ajout de module

Objectif de l'opération

Un module particulier M_{Agra} apportant des caractéristiques fonctionnelles CF_3 peut être ajouté au produit de base pour donner une nouvelle variante de produit V_2 . Il s'agira d'un accessoire optionnel et le fait d'ajouter des modules nécessite des interfaces appropriées au produit de base.

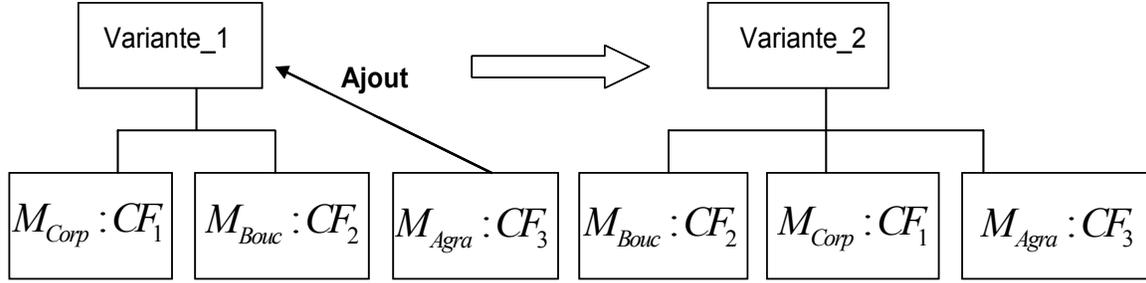


Figure 3.15. *Ajout de module*

Formalisation

Ajouter un module M (noté *ajou*) à un produit de base PB^0 , est équivalent à lier le *graphe_e* $G(M)$ au graphe hôte $g = g(PB^0)$ aussi longtemps qu'il y aura des sommets de contexte de $g(M)$ dans $G(PB^0)$. Autrement dit, l'opération consiste à proposer une variante en plus. Elle est matérialisée par le 3-uplet (g_g, g_d, T_i) défini comme suit :

$$ajou(G^{-1}(G(M))) = ajou(M) \quad (3.17)$$

Où

$G^{-1}(g_d)$ est le module représenté par le *graphe_e* de g_d (cette notation sera utilisée par la suite). g_g est un sous graphe de g et est composé des sommets de contexte de $G(M)$, ce qui signifie que le produit de base met à disposition l'interface au module M qui doit être attaché. T_i est une fonction de transformation intégrée spécifiant que tous les arcs connectés aux sommets dans le g_g devront être connectés aux sommets correspondant dans le g_d . L'équation (3.17.1) nous en donne le formalisme.

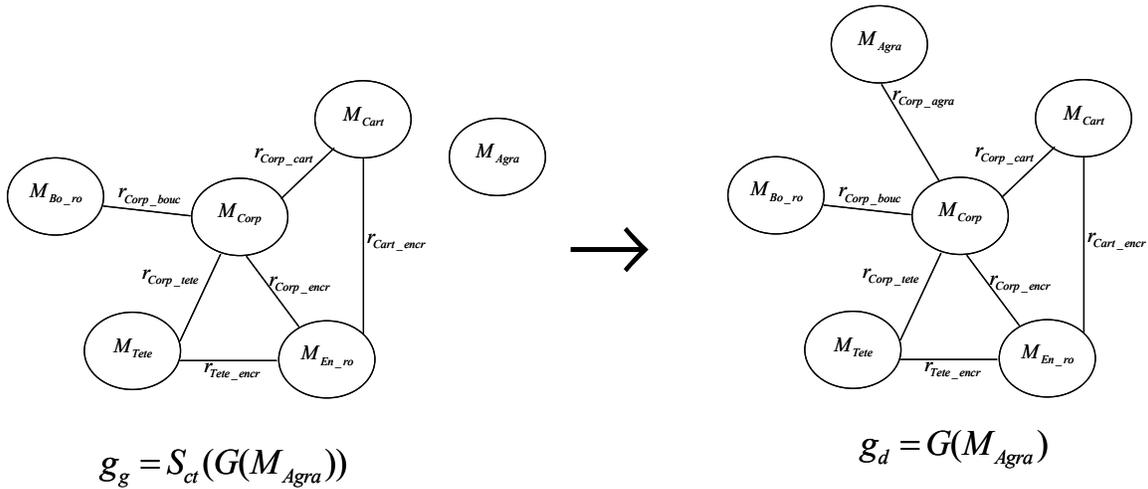
$$\begin{cases} g_g = S_{ct}(G(M)) \\ g_d = G(M) \\ T = (g_g, S_{ct}(g_d)) \end{cases} \quad (3.17.1)$$

Exemple

En guise d'exemple, une opération permettant d'ajouter le module M_{Agra} au produit de base composé des modules M_{Corp} , M_{Tete} , M_{En_no} , M_{Cart} et M_{Bo_no} est décrite par les relations de (3.17.2).

$$\begin{cases} \text{ajou}(M_{Agra}) = (g_g, g_d, T_i) \\ g_g = S_{ct}(G(M_{Agra})) \\ g_d = G(M_{Agra}) \\ T_i = (g_g, S_{ct}(g_d)) \end{cases} \quad (3.17.2)$$

En d'autres termes, M_{Agra} est connecté au produit de base par l'intermédiaire de M_{Corp} qui devient à son tour interface de M_{Agra} au produit de base comme le montre la figure ci après.



3.4.5.2. Opération d'élimination de module

Objectif de l'opération

S'opposant à l'ajout, une variante peut être obtenue par le retrait d'un module. Dans la plupart des cas, un module possédant un certain nombre de fonctions redondantes dont n'a pas besoin un client particulier peut être éliminé dans le but d'avoir un module simplifié et économique.

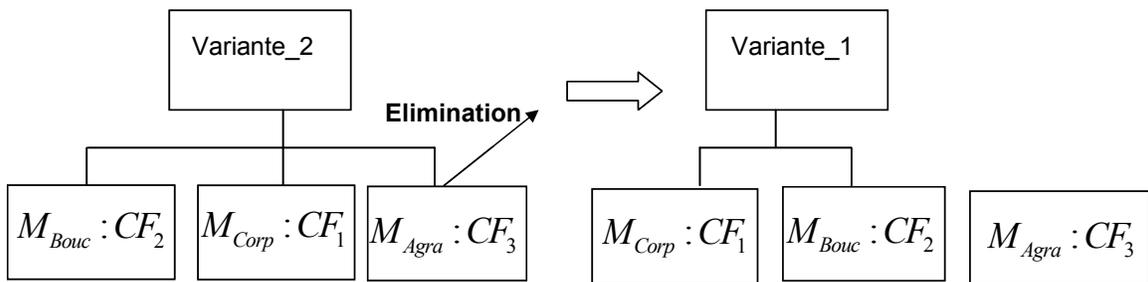


Figure 3.16. Elimination de module

Formalisation

Éliminer un module M (noté $enle$) d'un produit de base PB^0 équivaut à éliminer le graphe e $G(M)$ du graphe hôte $g = G(PB^0)$ mais garder les nœuds (sommets) de contexte de $G(M)$ dans le graphe résultat, il consiste à faire disparaître une variante de la famille. Il est matérialisé par le 2-uplet (g_g, g_d) défini comme suit :

$$enle(G^{-1}(G(M))) = enle(M) \quad (3.18)$$

Où

g_d est composé de sommets de contexte de $G(M)$ et est un sous graphe du graphe résultant.

$$\begin{cases} g_g = G(M) \\ g_d = S_{ct}(G(M)) \end{cases} \quad (3.18.1)$$

Exemple

En rapprochant les figures 3.15 et 3.16 pour le même exemple, on arrive à identifier de manière facile que $g_g = G(M_{Agra})$ et $g_d = S_{ct}(G(M_{Agra}))$.

3.4.5.3. Opération d'échange de module

Objectif de l'opération

L'échange est aussi lié à la variété en ce sens que pour une même fonction, il existe plusieurs réalisations technologiques possibles. La figure 3.17 nous montre que les deux modules « capuchon fixe » (M_{Ca_fi}) et « capuchon mobile » (M_{Ca_mo}) possèdent la même caractéristique fonctionnelle CF_{Capu} qui en particulier est d'éviter à la tête du stylo de tâcher par inadvertance. En utilisant M_{Ca_mo} pour le substituer à son équivalent M_{Ca_fi} au produit de base, on obtiendra une nouvelle variante V_β du produit de base, basée sur une réalisation technologique différente.

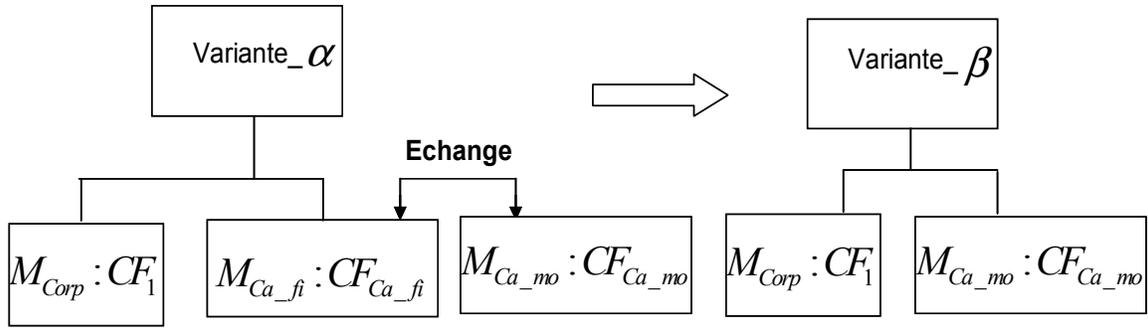


Figure 3.17. Echange de module

La variété est due au niveau de performance de la même fonction. Cela nécessite bien sûr que les modules possèdent la même interface. On peut aussi remarquer que l'échange des modules peut être considéré comme une combinaison de l'ajout et de l'élimination.

Formalisation

Echanger (noté *echa*) consiste à remplacer un module M^0 dans un produit de base PB^0 par un module M qui partage avec M^0 les interfaces identiques sur les autres parties du produit. C'est l'équivalent d'une substitution du graphe encapsulé *graphe_e* $G(M)$ par $G(M^0)$ dans le graphe hôte $g = G(PB^0)$ aussi longtemps que $G(M)$ et $G(M^0)$ posséderont les mêmes sommets de contexte. C'est un 3-uplet (g_g, g_d, T_i) défini comme suit :

$$echa(G^{-1}(G(M))) = echa(M) \quad (3.19)$$

Avec

$$\begin{cases} g_g = G(M^0) \\ g_d = G(M) \\ S_{ct}(g_d) = S_{ct}(g_g) \\ T_i = (S_{ct}(g_g), S_{ct}(g_d)) \end{cases} \quad (3.19.1)$$

Les deux dernières relations de (3.19.1) signifient que M et M^0 doivent avoir les mêmes interfaces avec les autres modules du produit. La fonction de transformation intégrée T_i

matérialise le fait que tous les arcs connectés aux sommets de contexte de g_g seront reliés aux sommets correspondant dans g_d .

Exemple

Dans l'exemple précédent du §3.4.2, une opération d'échange de module M_{En_ro} par M_{En_no} dans le produit de base qui est composé des modules M_{Corp} , M_{Tete} , M_{En_ro} , M_{Cart} et M_{Bouc} peut être décrite par (3.19.2). A travers cette opération M_{En_ro} est remplacée par M_{En_no} .

$$\left\{ \begin{array}{l} echa(M_{En_no}) = (g_g, g_d, T) \\ g_g = G(M_{En_ro}) \\ g_d = G(M_{En_no}) \\ T = (S_{ct}(g_g), S_{ct}(g_d)) \end{array} \right. \quad (3.19.2)$$

Les différents modules sont communs ou primitifs. M_{En_ro} et M_{En_no} sont les variantes du module M_{Enr} . Pour ces derniers modules, le module M_{Enr} est forcément un module primitif.

3.4.5.4 Opération de redimensionnement de module

Objectif de l'opération

Dans certains cas pour garder la même structure pour le produit, il est nécessaire soit d'améliorer soit de dégrader les performances d'un module. Ce qui se traduit par une modification des options liés à ce module.

Formalisation

Ajuster un module (noté *ajus*) consiste à redimensionner les paramètres du module M . C'est équivalent à changer les attributs du sommet $S(M)$ dans le graphe hôte $G(M)$. $S(M)$ est un sommet associé à M alors que la topologie du graphe demeure inchangée.

Une opération de redimensionnement est matérialisée par un 3-uplet (g_g, g_d, f) défini comme suit :

$$ajus(G^{-1}(G(M))) = ajus(M) \quad (3.20)$$

Où

f est la fonction de transfert attribut du sommet $S(M)$.

$$\begin{cases} g_g = g_d = G(M) \\ s_g = s_d = S(M) \in S(G(M)) \\ \alpha(s_g) \neq \alpha(s_d) \end{cases} \quad (3.20.1)$$

Exemple

Par exemple, une opération d'ajustement du module M_{Tete} dans le produit de base peut être décrite comme suit :

$$\begin{cases} ajus(M_{Tete}) = (g_g, g_d, f) \\ g_g = g_d = G(M_{Tete}) \\ \alpha(S(M_{Tete})) = f(\alpha(S(Parent))) \end{cases} \quad (3.20.2)$$

A travers cette opération, l'attribut de M_{Tete} passe de $A_{Tete} = \alpha(S(M_{Tete}))$ à $A'_{Tete} = \alpha(S(Parent))$. Ici, l'attribut A_{Tete} est l'ajustement du module tête à l'épaisseur 0.5mm tandis que l'attribut A'_{Tete} est l'ajustement du module tête à l'épaisseur 0.7mm. Les figures 3.20 illustrent en particulier cet ajustement.

Une fois que les opérations permettant la modification des graphes pour la génération de la variété sont définies, il reste à spécifier les conditions sous lesquelles ces opérations seront exécutées ; à savoir « ajouter », « éliminer », « échanger » et « ajuster ». Pour ce faire, nous introduisons le prédicat d'applicabilité π (qui peut être VRAI ou FAUX) comme conditions d'applications à satisfaire.

Une production est définie par un 2-uplet comme suit :

$$p \equiv (O, \pi) \quad (3.21)$$

Où

$$\begin{cases} \forall O \in \{ajou, enle, echa, ajus\} \\ \forall \pi \in \{VRAI, FAUX\} \end{cases} \quad (3.21.1)$$

O représente ici l'opération à effectuer. Toutefois, si des opérations n'appartenant à l'ensemble $\{ajou, deta, echa, ajus\}$ sont exigées, elles pourront être rajoutées à l'ensemble. π est le prédicat d'applicabilité, c'est une fonction logique des conditions d'applications.

3.4.6. Modélisation d'une variante par dérivation de graphe

Obtenir une variante de produit peut impliquer plus d'une étape dans la modification du produit de base. La séquence d'ordre permettant de modifier son exécution est déterminée par les relations de couplage / découplage parmi les modules associés. Le processus visant à modifier un produit de base pour un client peut être modélisé comme une série de dérivations du graphe en appliquant certaines règles de production.

La dérivation directe g' du graphe g aux moyens de la production p est définie par les procédures matérialisées par les quatre étapes suivantes :

Etape 1 : **Test**

Contrôler si g_g est un sous graphe de g , i.e., si $g : g_g \rightarrow g$ et contrôler si la condition d'application est vraie. Si les deux conditions sont remplies, passer à l'étape 2.

Etape 2 : **Remplacement**

Remplacer g_g , y compris tous les arcs incidents et sortants par les sommets et arcs de g_d .

Etape 3 : **Intégration**

Transformer les graphes intégrés g_g de g en g_d de g' .

Etape 4 : *Evaluation d'attribut*

Joindre les attributs de la PDG g_d d'après la fonction f .

La dérivation de graphe se manifeste elle-même à travers la séquence de dérivations directes ($n \geq 0$).

3.4.7. Modélisation des productions par un diagramme de contrôle

Habituellement, plusieurs productions sont impliquées dans le processus de dérivation de graphe. L'ordre séquentiel des productions est géré par un mécanisme de contrôle, mécanisme qui peut s'exprimer sous plusieurs formes. Une bonne spécification du contrôle doit être simple à lire et flexible en cas d'éventuelles extensions.

Le diagramme de contrôle dans une grammaire de graphe d'un module composé exprime l'ordre d'exécution des productions définies pour ces modules composés. Si P est un ensemble fini de productions, I le sommet initial et F le sommet final ; un diagramme de contrôle sur P noté C est un graphe attribut (*graphe_a*) spécifié par un 3-uplet matérialisé comme suit :

$$C \equiv (V', W', A') \quad (3.22)$$

Où

V' est un ensemble d'étiquettes de sommet, W' un ensemble d'étiquettes d'arcs spécifiant les arcs qui relient un sommet à ses successeurs et A' (c'est -à-dire *Atteindre*) est l'attribut des sommets étiquetés par $p_i \in P$. Les relations de (3.22.1) reprécisent cette définition.

$$\begin{cases} V' = P \cup \{I, F\} \\ W' = \{O, N\} \\ A' = \{Atteindre\} \end{cases} \quad (3.22.1)$$

En outre les quatre conditions ci-dessous sont vérifiées.

Condition1. Il existe un unique sommet initial s_I étiqueté par I

Condition2. Il existe un unique sommet final s_F étiqueté F

Condition3. Il n'existe aucun arc ayant pour extrémité s_j

Condition4. Il n'existe aucun arc ayant pour origine s_F .

L'attribut « *Atteindre* » est une variable entière. Sa valeur initiale indique la durée qu'une production peut être exécutée au cours d'un processus de simple dérivation. Chaque fois qu'une production est exécutée, le nombre se réduit de 1. Si le nombre est égal à 0, le sommet ne sera inclut dans aucun successeur de sommet vers lequel l'arc se dirige. Cette propriété par contre doit être évitée et pour cause permet d'éviter tout fait incertain dans le diagramme de contrôle.

En reprenant l'exemple précédent du §3.4.2, P est l'ensemble des productions définies en (3.23)

$$\begin{cases} p_1 = (ajou(M_{Agra}), \pi_{Agra}) \\ p_2 = (ajus(M_{Tete}), \pi_{Tete}) \\ p_3 = (echa(M_{En_ro}), \pi_{Encr}) \\ p_4 = (echa(M_{Bo_ro}), \pi_{Bouc}) \end{cases} \quad (3.23)$$

C est le diagramme de contrôle, vecteur de l'ordre des différentes productions p_1, p_2, p_3 et p_4 . La figure 3.18 illustre cet exemple.

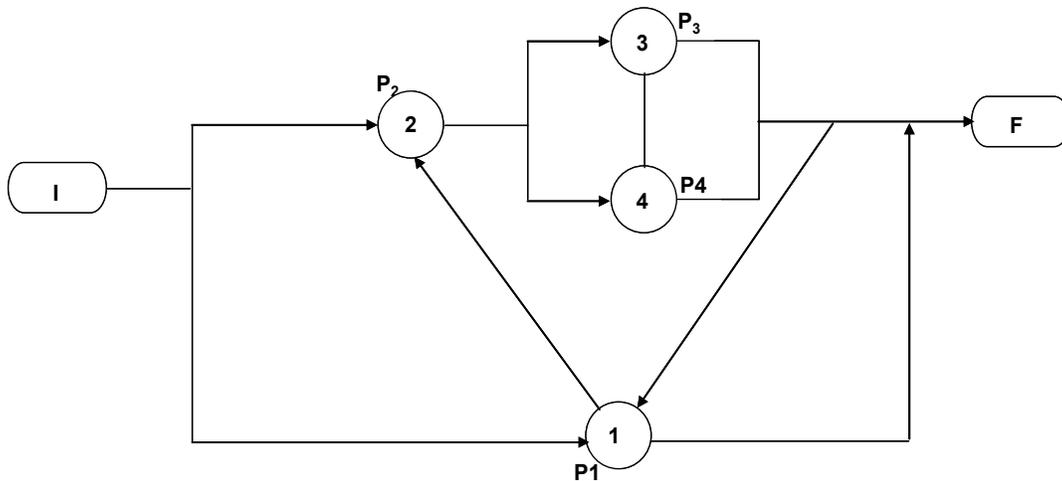


Figure 3.18. Diagramme de Contrôle

En particulier, on remarque qu'il y a trois principaux chemins possibles dans ce diagramme. Une combinaison simple des différents chemins nous permet la réécriture de graphes suivante :

$$I \rightarrow p_1 \rightarrow p_2 \rightarrow p_3 \rightarrow p_4 \rightarrow F \Rightarrow R \xrightarrow{p_1, p_2, p_3, p_4} g(V^1)$$

$$I \rightarrow p_2 \rightarrow p_3 \rightarrow p_4 \rightarrow F \Rightarrow R \xrightarrow{p_2, p_3, p_4} g(V^2)$$

$$I \rightarrow p_2 \rightarrow p_3 \rightarrow p_4 \rightarrow p_1 \rightarrow F \Rightarrow R \xrightarrow{p_2, p_3, p_4, p_1} g(V^3)$$

Figure 3.19. Réécriture des Graphes

En suivant les différents chemins de la figure 3.18 et en appliquant chacune des réécritures, nous obtenons (cf. figures 3.20) plusieurs graphes de variantes du produit. De plus $V^1, V^2, et V^3$ sont les membres de la famille de M .

Les attributs des sommets du module M_{Tete} sont A_{Tete} et A'_{Tete} . Ils correspondent respectivement aux ajustements des épaisseurs de la tête à 0.5mm et 0.7mm.

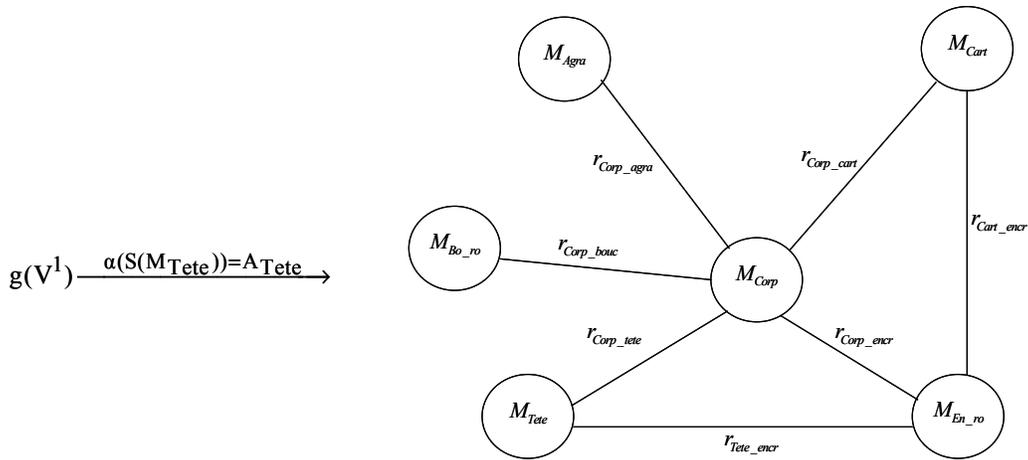


Figure 3.20-a Variante 1 : V^1

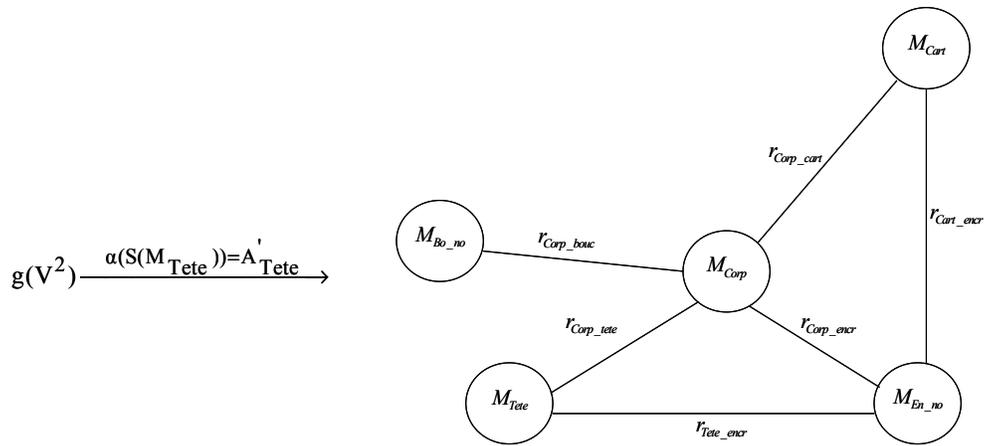


Figure 3.20-b Variante 2 : V^2

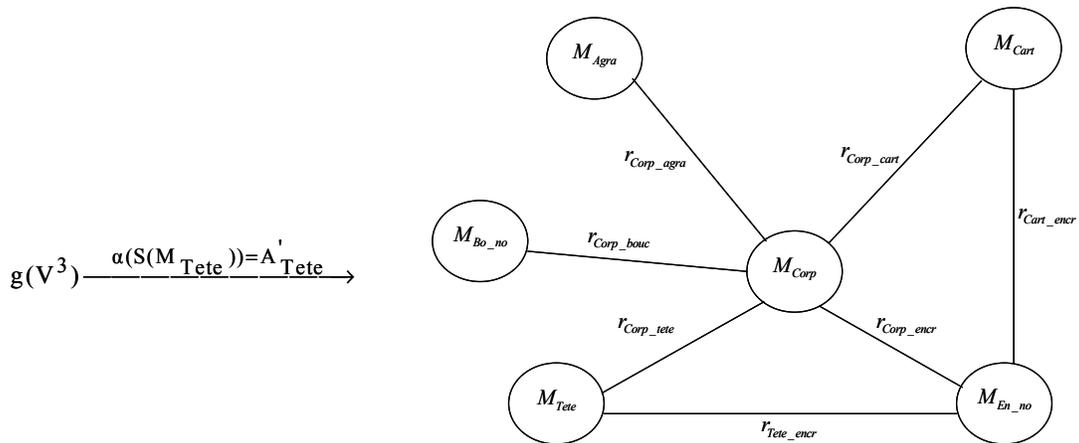


Figure 3.20-c Variante 3: V^3

Pour dresser une cartographie de sélection des clients pour une conception variante, le contrôle des conditions d'applications devrait commencer par la production qui est l'étiquette pour le successeur direct du sommet initial. Si la condition d'application est «VRAI», cette production sera appliquée. Autrement, la production qui est l'étiquette d'un autre successeur du sommet initial devra être contrôlée. Une fois le sommet final atteint, un graphe représentant une variante satisfaisant les caractéristiques peut être obtenue. S'il manque des arcs sortants, la continuation de la séquence de dérivation courante ne peut pas être définie, le processus de dérivation de graphe avorte (s'arrête) et aucun graphe n'est généré.

Sur la base de la GGPA ci-dessus définie pour les modules composés, le modèle de grammaire de graphe d'une famille de produits peut être défini comme suit :

$$GG(FP) \sim \{G(M)\},$$

Où $\{G(M)\}$ est un ensemble constitué de grammaire de graphe pour tous les modules composés dans la SGP de la famille de produits. Si le produit final emploie seulement les modules composés ou seulement les modules primitifs comme ses modules fils, alors $GG(FP)$ est équivalent à $G(M)$ et a seulement un module composé M qui devient le produit final lui-même.

Pour les produits complexes, plus d'un module composé sera impliqué pour les modules fils. Dans un tel cas, chaque module composé sera lui-même modélisé comme une famille de produits. En conclusion, $GG(FP)$ consiste en ces grammaires de graphes définis pour tous les modules composés, y compris le produit final.

3.4.8. Dérivation de la variante du produit

La structure hiérarchique des produits est considérée comme une collection de modules composés organisés à travers plusieurs niveaux d'abstraction. La dérivation de variante de produit sera un processus récursif, générateur de tous les modules composés.

Supposons que la hiérarchie de la structure générique de produit ait $L(L \geq 1)$ niveaux. Les variantes d'un module composé du niveau $j(1 \leq j \leq L)$ sont générées par la détermination des variantes au niveau $j+1$. Par ailleurs les variantes des modules primitifs pour ce même niveau $j+1$ peuvent être complètement spécifiées tandis que celles des modules composés ont besoin d'être obtenues par des combinaisons des modules fils du niveau $j+2$, tout ceci dans le souci de générer les variantes des modules parents (composés) au niveau j . Ce processus progresse de manière récursive pour les autres modules composés, ceci jusqu'à l'atteinte du niveau le plus bas des modules composés ($j = L$). Une fois le niveau le plus bas, atteint les modules fils des modules composés ne sont autres que les modules primitifs ou communs, par conséquent la détermination des variantes de ces modules composés peut se faire localement. Ainsi, de bas en haut les variantes de ses parents directs peuvent être générés jusqu'au plus élevé ($j = 1$) des modules composés atteints.

Le processus de génération de ces variantes est décrit dans (Du et al, 2002) et sera appliqué sur le cas industriel au § 3.5.

3.5. Application à un cas industriel

La cuisine intégrée est par excellence un produit à forte diversité et à caractère modulaire. Ce type de meubles est constitué d'éléments organisés en caissons, portes, quincailleries, poignées et boutons remplissant différents rôles : éléments sous évier, éléments de rangement, éléments d'angle. La diversité est obtenue par le choix des formes (type de moulure, type de contournement...), des finitions (placages, coloris, types de vernis ...), des quincailleries (poignées, boutons, piètement, ...), des dimensions multiples, etc.

Nous nous intéressons plus particulièrement à un meuble de rangement bas. Il a l'avantage d'être un élément de cuisine adaptable à la salle de bain. Il constitue la famille de produits « Meuble *Partie Basse, Une Porte, Un Tiroir* » (MPB_1P_1T) et est représenté sur la figure 3.21 ci-dessous.

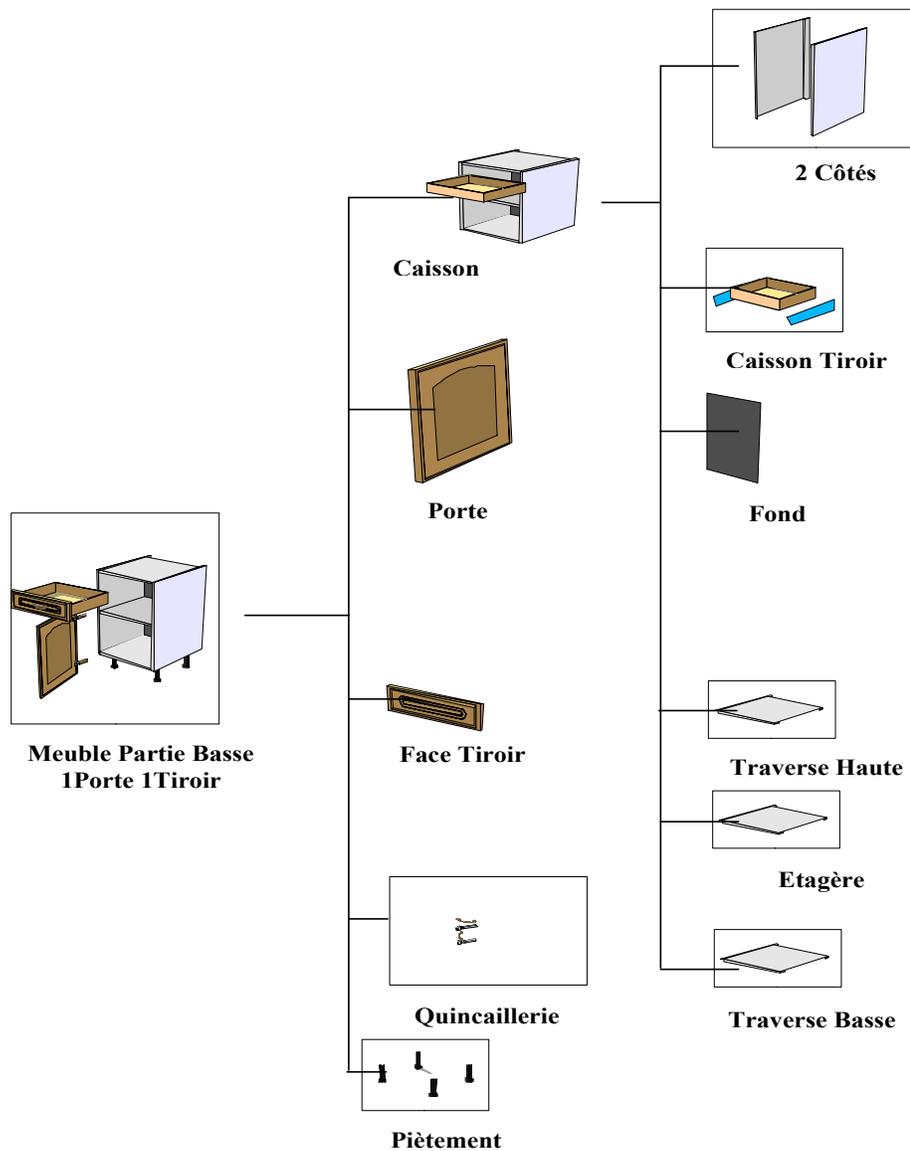


Figure 3.21. Représentation du produit Meuble Partie Basse Une Porte Un Tiroir

Cette figure présente le « meuble partie basse une porte un tiroir » et ces principaux modules :

- la porte,
- la face tiroir,

Chapitre 3- Modélisation de famille de produits par les grammaires de graphe

- la quincaillerie (pouvant être de type Mathilde, Romane, standard, etc.),
- le piètement (on peut avoir un piètement boule, aluminium, droit, etc.),
- le caisson, lui-même composé :
 - des 2 côtés,
 - du caisson tiroir (caisson tiroir à coulisse standard et / ou caisson tiroir à frein tiroir),
 - du fond,
 - de traverses (traverse haute, traverse basse, étagère),
 - les deux systèmes glissières permettant le mouvement du tiroir

Pour des besoins de codification et afin de mieux représenter la structure générique du produit (SGP), les graphes encapsulés, les règles de production et les digrammes de contrôle, nous proposons la nomenclature suivante

Dénomination du module	Nomenclature	Dénomination du module	Nomenclature
Meuble Partie Basse Une porte Un Tiroir	MPB_1P_1T	Piètement Boule	P_BOU
Porte	PORT	Caisson	CAIS
Face Tiroir	F_TIR	Système Glissière	S_GLI
Etagère	ETAG	Caisson Tiroir à Frein Tiroir	CT_FT
Quincaillerie Standard	Q_STD	Caisson Tiroir à Coulisserie Standard	CT_CS
Quincaillerie Mathilde	Q_MAT	Cotés	COTE
Quincaillerie Romane	Q_ROM	Fond	FOND
Piètement Droit	P_DRT	Traverse Haute	TRA_H
Piètement Aluminium	P_ALU	Traverse Basse	TRA_B

Tableau 3.1. *Nomenclature des modules de la famille de produit MPB_1P_1T*

Dans l'équation (3.13) représentant la formulation de grammaire de graphe par attribut programmé, W matérialise les relations entre les modules. Ici, ces relations sont les interfaces entre les modules et sont caractérisées par les types de liaisons qui existent. Nous avons identifié les types de liaisons suivantes entre les modules.

Rotation directe (1R et 0T = 1 Rotation et 0 Translation),

Solidarisation par tourillon (OR et OT),

Solidarisation par agrafe (0R et OT),

Solidarisation par emboîtement (OR et OT),

Solidarisation par vis (OR et OT).

Rainure (OR et OT),

D'où la nomenclature suivante

Dénomination du type de liaison	Nomenclature
Rotation directe = liaison pivot	piv
Solidarisation par tourillon = liaison fixe	fix
Solidarisation par agrafe = liaison fixe	fix
Solidarisation par vis = liaison fixe	fix
Rainure = liaison par encastrement	enc
Solidarisation par emboitement = liaison par encastrement	enc
Glissière = liaison glissière	gli

Tableau 3.2. *Nomenclature des différentes liaisons*

La structure générique du produit MPB_1P_1T est présentée à la figure 3.23, elle contient deux modules composés :

le meuble partie basse lui-même (MPB_1P_1T) et le caisson (CAISS).

Le MPB_1P_1T final est un module composé comportant neuf modules fils :

la face tiroir (F_TIR), la porte (PORT), les quincailleries standard, mathilde et romane (Q_STD, Q_MAT, Q_ROM), le caisson (CAIS), les piètements aluminium, droit et boule (P_ALU, P_DRT, P_BOU).

Le caisson est un module composé ayant sept modules fils :

les traverses haute et basse (TRA_H, TRA_B), l'étagère (ETAG), les 2 côtés (COTE), les caissons tiroir à frein tiroir et à coulisse standard (CT_FT, CT_CS) et le fond (FOND).

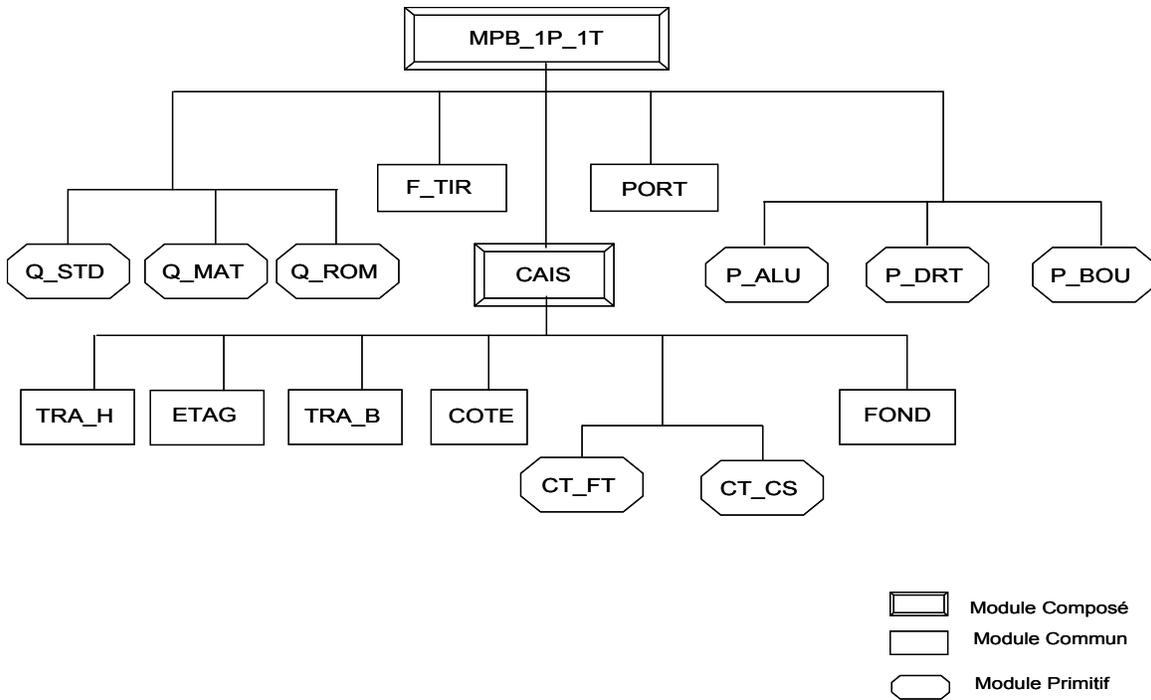


Figure 3.22. Structure générique de la famille de produits *MPB_1P_1T*

Nous allons modéliser le module composé caisson CAIS en utilisant des grammaires de graphe. Ce module a la particularité d’être composé de modules communs (TRA_H, ETAG, TRA_B, COTE, FOND) et de modules primitifs (CT_FT, CT_CS). Par ailleurs, il est en interaction externe (interfaces) avec les modules PORT et F_TIR. Les interactions internes sont réalisées par les modules distinctifs. En particulier, entre le module COTE et le caisson tiroir s’interpose le module S_GLI solidaire du module COTE, ce qui permet au module caisson tiroir d’être en liaison glissière avec le module S_GLI.

La génération des grammaires de graphe sera matérialisée par les quatre étapes de la programmation des graphes par attributs programmés de l’équation (3.13) que nous avons instanciées comme suit :

$$G(M_{CAIS}) \cong (V_{CAIS}, W_{CAIS}, A_{CAIS}, P_{CAIS}, G^i_{CAIS}, C_{CAIS})$$

3.5.1. Grammaire de graphe du caisson

La première étape consiste à définir les graphes encapsulés du produit de base et de chaque module distinctif. La figure 3.23 décrit les graphes encapsulés du caisson. La figure 3.23-1 présente le graphe encapsulé du produit de base, ici on peut remarquer la présence des modules communs fond (FOND), côté (COTE), traverse haute (TRA_H) et traverse basse (TRA_B) ainsi que les interactions des autres modules avec le caisson.

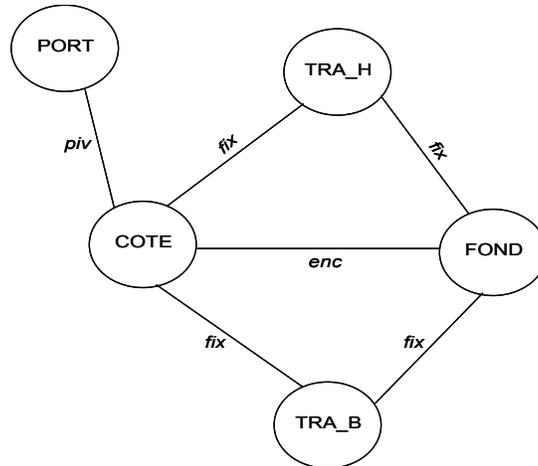


Figure 3.23-1. Graphe encapsulé du produit de base « caisson »

La figure 3.23-2 représente le graphe encapsulé du module distinctif caisson tiroir à frein tiroir (CT_FT), les interfaces sont également matérialisées.

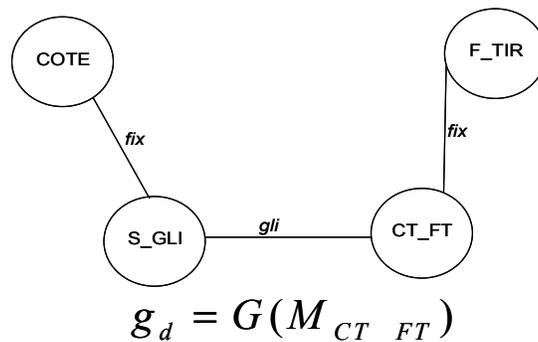


Figure 3.23-2. Graphe encapsulé du module distinctif Caisson Tiroir à Frein Tiroir

De même la figure 3.23-3 représente le graphe encapsulé du module distinctif caisson tiroir à coulisse standard (CT_CS) ainsi que ses interfaces.

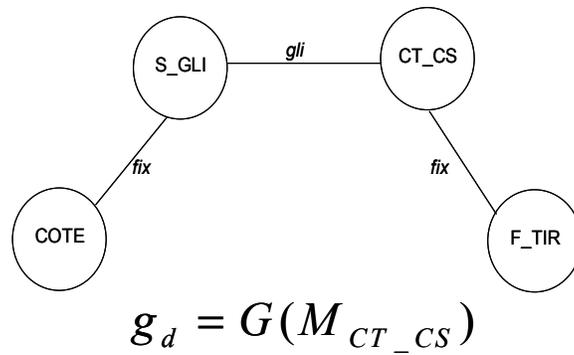


Figure 3.23-3. Graphe encapsulé du module *distinctif Caisson Tiroir à Coulisse Standard*

Le tableau 3.1 résume la définition textuelle de ces graphes encapsulés définis aux équations (3.16, 3.16.1, 3.16.2).

	$G(M_{CAIS}^0)$	$G(M_{CT_FT})$	$G(M_{CT_CS})$
S_c	{(PORT, FOND, COTE, TRA_H, TRA_B)}	{CT_FT, COTE, F_TIR, S_GLI}	{CT_CS, COTE, F_TIR, S_GLI}
S	{FOND, COTE, TRA_H, TRA_B}	{CT_FT}	{CT_CS}
A_c	{(PORT,COTE), (FOND,COTE), (FOND,TRA_H), (FOND, TRA_B), (TRA_H, COTE)}	{(COTE, S_GLI), (S_GLI,CT_FT), (CT_FT,F_TIR)}	{(COTE,S_GLI), (S_GLI,CT_CS), (CT_CS, F_TIR)}
A	\emptyset	\emptyset	\emptyset
S_{cp}	\emptyset	\emptyset	\emptyset
S_{pr}	\emptyset	{CT_FT}	{CT_CS}
S_{cm}		\emptyset	\emptyset
S_{ct}	{PORT}	{COTE, F_TIR, S_GLI}	{COTE, F_TIR, S_GLI}
A_{ct}	{(PORT,COTE), (FOND,COTE), (FOND,TRA_H), (FOND, TRA_B), (TRA_H, COTE)}	{(COTE, S_GLI), (S_GLI,CT_FT), (CT_FT,F_TIR)}	{(COTE,S_GLI), (S_GLI,CT_CS), (CT_CS, F_TIR)}

Tableau 3.3. Définition des graphes encapsulés de la famille de produits caisson

3.5.2. Définitions et mise en place des productions

L'exécution normale des productions nécessite de détailler les spécifications de la famille de produits MPB_1P_1T en termes de fonctions (communes, optionnelles, contraintes de sélection) et d'options. Dans cette partie, il sera question de l'ajout de modules dans le cas du caisson.

Il ressort donc que pour le caisson, le système glissière et la face tiroir sont des modules de base. Par contre on peut ensuite ajouter un caisson tiroir à frein tiroir (CT_FT) et / ou un caisson tiroir à coulisse standard (CT_CS). L'ajout de ces modules est déterminé par le choix du client.

Le client peut exiger aussi un module face tiroir muni d'un système d'ouverture à poignée (module CT_CS). Il peut également exiger une face tiroir ayant un système d'ouverture à bouton nécessitant le module CT_FT, certains clients par contre exigent les deux, CT_FT + CT_CS. La fonction optionnelle, exigence des clients sera matérialisée par F_{SO_FT} et définie par la relation (3.24) comme suit :

$$\begin{cases} F_{SO_FT} : \text{ système d'ouverture face tiroir} \\ option_{SO_FT} \in \{CT_FT, CT_CS, CT_FT \text{ et } CT_CS\} \end{cases} \quad (3.24)$$

La définition des productions est caractérisée par les différentes combinaisons possibles des modules distinctifs suivant un certain nombre de contraintes. Deux productions possibles sont présentées aux figures 3.24. Les graphes qui sont représentés à gauche et à droite du symbole \rightarrow sont respectivement la partie gauche du graphe (PGG) et la partie droite du graphe (PDG) des productions associées.

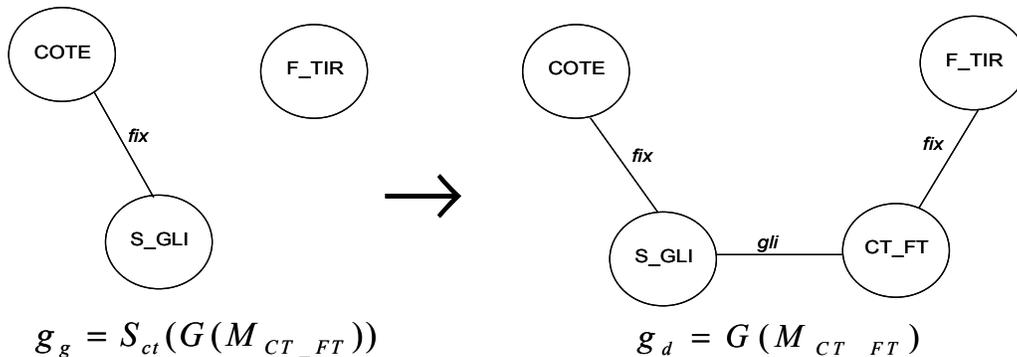


Figure 3.24-1. Production P_{CT_FT} représentant l'ajout d'un module

La production P_{CT_FT} , présentée à la figure 3.24-1 permet d'ajouter le caisson tiroir à frein tiroir CT_FT (sommet CT_FT) au produit de base. Ceci n'est possible que dans le cas où le système d'ouverture de la face tiroir du caisson est muni d'un système d'ouverture à bouton, c'est-à-dire CT_FT ou CT_FT + CT_CS. On remarque que la PGG de la production est constituée des sommets de contextes (voir tableau 3.3.) du graphe

encapsulé du caisson tiroir à frein tiroir tandis que la PDG représente le graphe encapsulé du même caisson tiroir à frein tiroir.

De manière similaire, \mathcal{P}_{CT_CS} , comme le montre la figure 3.24-2 est la production permettant d'ajouter le module CT_CS (sommet CT_CS) au produit de base au cas où le système d'ouverture de la face tiroir du caisson est muni d'une poignée, soit CT_CS ou CT_CS + CT_FT . Naturellement, la PGG de la production est constituée des sommets de contexte du graphe encapsulé du caisson tiroir à coulisse standard et la PDG, celle du graphe encapsulé du caisson tiroir à coulisse standard.

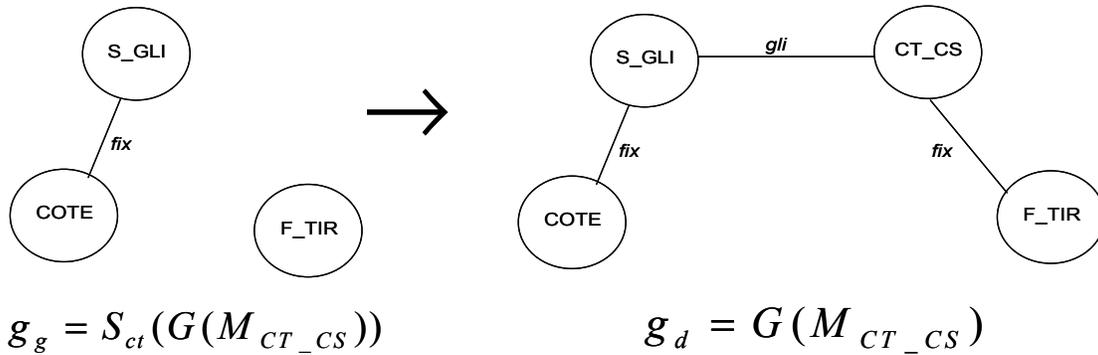


Figure 3.24-2. Production \mathcal{P}_{CT_CS}

Pour chaque production \mathcal{P}_{CT_FT} ou \mathcal{P}_{CT_CS} , le prédicat d'application π est une fonction logique de F_{SO_FT} . Si F_{SO_FT} prend l'une des valeurs CT_FT (pour \mathcal{P}_{CT_FT}) ou CT_CS (pour \mathcal{P}_{CT_CS}), alors π est vrai. Autrement π est faux. Les spécifications textuelles de ces productions sont données par les équations (3.25).

$$\begin{cases} p_{CT_FT} = (ajou((M_{CT_FT}), \pi = (\alpha(F_{SO_FT}) \in \{\{CT_FT\}, \{CT_FT + CT_CS\}\}))) \\ p_{CT_CS} = (ajou((M_{CT_CS}), \pi = (\alpha(F_{SO_FT}) \in \{\{CT_CS\}, \{CT_CS + CT_FT\}\}))) \end{cases} \quad (3.25)$$

3.5.3. Définitions des diagrammes de contrôle et dérivation de la variante

La définition des diagrammes de contrôle a pour principal objectif de spécifier l'ordre d'application des productions. La figure 3.25 nous présente le diagramme de contrôle pour la famille de produit caisson. En dehors du sommet initial I et du sommet final F, tous les sommets sont étiquetés par des productions. Dans le diagramme, deux productions coexistent, donc les deux variantes du caisson réalisables seront \mathcal{P}_{CT_FT} et \mathcal{P}_{CT_CS} .

Le diagramme a deux sommets hors I et F qui sont les productions \mathcal{P}_{CT_FT} et \mathcal{P}_{CT_CS} .

Les variantes du produit sont obtenues en parcourant le diagramme. Chaque chemin indique un processus de génération possible d'une variante, par exemple, $I \rightarrow \mathcal{P}_{CT_FT} \rightarrow F$, $I \rightarrow \mathcal{P}_{CT_CS} \rightarrow F$, $I \rightarrow \mathcal{P}_{CT_FT} \rightarrow \mathcal{P}_{CT_CS} \rightarrow F$, $I \rightarrow \mathcal{P}_{CT_CS} \rightarrow \mathcal{P}_{CT_FT} \rightarrow F$.

Pour chaque chemin, la valeur initiale de l'attribut « *Atteindre* » est fixée à 1. Le caractère bidirectionnel de l'arc entre les sommets \mathcal{P}_{CT_FT} et \mathcal{P}_{CT_CS} implique que le produit de base peut être modifié par l'ajout de l'un ou l'autre module. Dit autrement, le choix d'une direction permettra de considérer le module CT_FT en premier et le module CT_CS en second, tandis que le choix de la direction contraire permettra de considérer le module CT_CS d'abord et le module CT_FT ensuite. Dans cet exemple, il n'y aura pas d'ordre pour réaliser l'ajout.

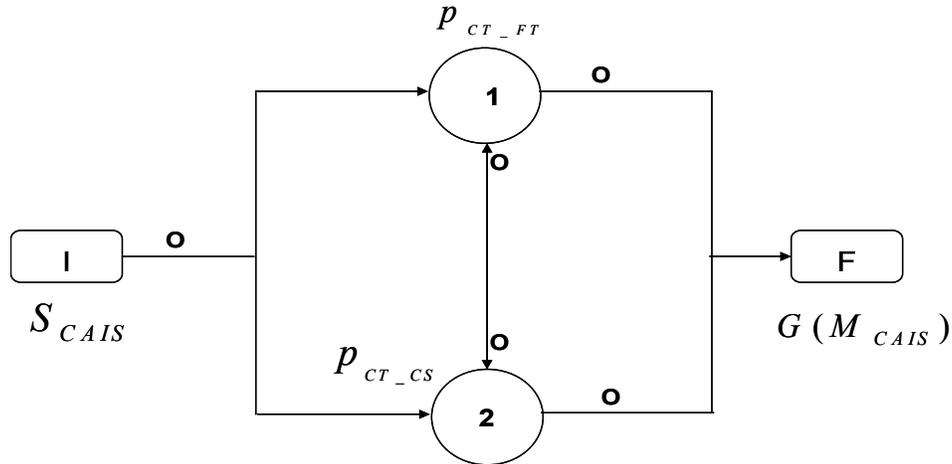


Figure 3.25 Diagramme de contrôle

Cependant, au cours du processus spécifique de génération des variantes, une seule variante est générée. Cela est dû à la valeur initiale de l'attribut « atteint » 1. Toutefois, en se référant à notre diagramme de contrôle, il y a trois variantes possibles de la famille, par conséquent, le diagramme de contrôle définit le langage du graphe de cette grammaire de graphe, c'est-à-dire de toutes les variantes possibles d'un module composé.

Les caractéristiques entrant dans la spécification d'un produit deviennent la base d'éléments permettant d'initier le processus de génération des variantes du produit. Avant de déclencher le processus de dérivation de variantes, il convient, une fois que l'on va initialiser une production (dans notre cas c'est P_{CT_FT}) il faudra vérifier les conditions d'applications. Si le prédicat π lié à la production choisie est « FAUX », alors un autre chemin disponible sera recherché à l'idée qu'il existe une autre production qui réponde à ce prédicat (nous l'appellerons production parallèle $p_{//}$). Si par contre le prédicat π est « VRAI » et que la partie droite du graphe g_d est un graphe encapsulé du module primitif, cette production sera appliquée. Dans le cas du caisson, en rapprochant les figures 3.24-1 (production P_{CT_FT}) et 3.23-2, il apparaît clairement que g_d est un graphe encapsulé du module distinctif Caisson Tiroir à Frein Tiroir. Dès lors le processus de dérivation évolue vers les sommets suivants comme P_{CT_CS} du diagramme de contrôle. Si d'aventure le prédicat est « VRAI » mais que le g_d de la production est un graphe encapsulé des modules composés, le processus évolue vers le diagramme de contrôle de ce module composé et le processus de dérivation de variante de ce module composé devra être initié.

Ce processus évolue de manière récursive pour toutes les productions du g_d empruntant un chemin du diagramme de contrôle des *graphe_e* de modules primitifs. La variante désirée du module composé devra être obtenue par dérivation successive aussi longtemps que le prédicat permettant d'assurer la condition d'application de chaque production est « *VRAI* ». Cette alternative est utilisée pour générer les variantes des parents directs. La figure 3.26 nous présente l'organigramme d'une telle variante de dérivation à travers plusieurs niveaux de réécritures de graphe. L'interruption qui est une forme d'arrêt constitue une impasse.

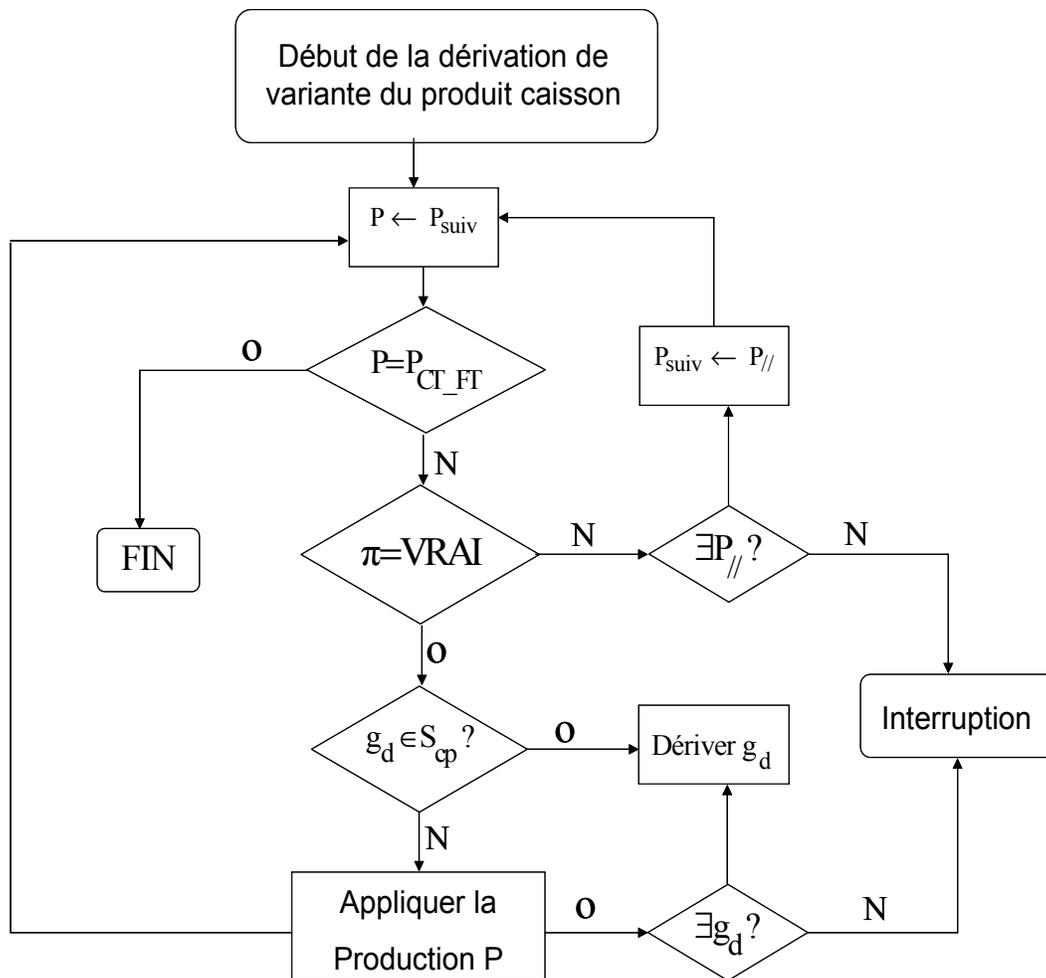


Figure 3.26. Organigramme de la dérivation de variante à travers plusieurs niveaux de réécriture de graphe

3.5.4. Synthèse de la formulation des grammaires de graphe du caisson

La formulation des grammaires se fait en résumant les noms des modules, les arêtes, le graphe initial, les productions et le diagramme de contrôle. Il résulte donc de ce qui précède que la grammaire de graphe du caisson peut se résumer comme suit :

$$G(M_{CAIS}) \cong (V_{CAIS}, W_{CAIS}, A_{CAIS}, P_{CAIS}, G^i_{CAIS}, C_{CAIS}) \quad (3.26)$$

Avec

$V_{CAIS} = \{M_{CT_FT}, M_{CT_CS}, M_{F_TIR}, M_{COTE}, M_{TRA_H}, M_{TRA_B}, M_{PORT}, M_{FOND}, M_{S_GLI}\}$ est l'ensemble de tous les nœuds apparaissant dans les graphes encapsulé du produit de base et des modules distinctifs.

$W_{CAIS} = \{gli, fix, enc, piv\}$ est l'ensemble des interfaces des sommets étiquetés qui apparaissent dans les graphes du produit de base et des modules distinctifs.

A_{CAIS} est l'ensemble des attributs des sommets représentant les paramètres des modules fils qui ne nous sont pas utiles dans ce cas de figure compte tenu du fait que la génération de la variété ne nécessite pas cette spécification.

$P_{CAIS} = \{p_{CT_FT}, p_{CT_CS}\}$ est l'ensemble des productions explicitées sur la figure 3.24.

$G^i_{CAIS} = G(M^0_{CAIS})$ est le graphe initial présenté à la figure 3.23-1

C_{CAIS} le diagramme de contrôle du caisson représenté à la figure 3.25

Il ressort, au terme de l'étude du cas industriel que l'application des grammaires de graphe possède plusieurs avantages. Les grammaires de graphe permettent une bonne représentation visuelle en explicitant les données internes de la structure de famille de produits qui deviennent ainsi faciles à comprendre. L'autre avantage est lié aux définitions formelles. En effet, l'utilisation de formulations mathématiques permet de définir avec précision et clarté toutes les combinaisons admissibles, ce qui a pour conséquence de gérer de manière succincte les interactions dans l'espace de conception.

La possibilité d'avoir une représentation formelle peut permettre une évaluation directe du processus de production des variantes de produits conduisant à une implémentation informatique.

3.6. Conclusion et limites du modèle

Notre contribution est étroitement liée aux limites des grammaires de web. Nous utilisons pour cela une approche par les grammaires de graphe en ayant pour point de départ une structure générique de produit qui fait ressortir la notion fondamentale de modules (communs et distinctifs). Nous formalisons un graphe par des graphes attributs et encapsulés. L'architecture modulaire des produits nous conduit à la manipulation des productions, manipulations basées sur quatre principales opérations (d'ajout, d'élimination, d'échange et de redimensionnement) de modules. Les procédures de test, de remplacement, d'interprétation et d'évaluation d'attribut nous permettent de gérer la dérivation de graphe afin de mieux structurer le diagramme de contrôle.

Les grammaires de web représentent un outil intéressant pour la modélisation des familles de produits surtout par son caractère génératif. Elles permettent en plus une description hiérarchisée des produits faisant correspondre les décompositions aux différentes règles de réécriture. Puisqu'elles manipulent les graphes, il est par exemple possible de décrire les multi-graphes modélisant les familles de produits (Stadzisz, 1997). Toutefois l'emploi des grammaires de web pour la modélisation de famille de produits possède plusieurs limites.

Les contraintes portant sur les combinaisons de constituants génériques sont loin d'être simples à appréhender quand on observe une grammaire de web.

L'existence d'un ordre imposé de lecture des règles dans le diagramme de contrôle complique tout traitement puisque d'autres ordres d'accès aux données sont certainement requis.

L'association des informations contenues dans un modèle décrit par les grammaires de web avec celles d'autres modèles (fonctionnel, géométrique, d'assemblage) se fait avec beaucoup de difficultés.

Son utilisation pour la modélisation de familles de produits nécessite la connaissance de la famille en extension lorsqu'il existe un nombre important de variantes. Ce dernier aspect est source d'explosion combinatoire doublé de la difficulté de mise à jour de modèle de famille de produits.

Chapitre 4

Vers une approche matricielle de la conception des familles de produits

4.1.	Introduction.....	143
4.2.	Terminologie et concepts.....	143
4.2.1.	Les systèmes arborescents	144
4.2.2.	La complexité des systèmes.....	146
4.2.3.	Complexité et modularité.....	147
4.2.4.	Les espaces fonctionnel et organique dans la gestion de la complexité	148
4.2.4.1.	L'analyse et l'espace fonctionnel externes	150
4.2.4.2.	L'analyse et l'espace fonctionnel internes.....	151
4.2.4.3.	Espace organique	152
4.3.	Méthodes matricielles de décomposition d'une famille de produits	154
4.3.1.	Analyse fonctionnelle	155
4.3.2.	Analyse structurelle	157
4.3.3.	Représentation matricielle	162
4.4.	Conclusion	165

4.1. Introduction

En 1969, c'est Herbert Simon (Simon, 1969) qui le premier a cherché à comprendre comment organiser la conception des systèmes complexes. C'est le concept de « modules » qui est central dans sa pensée, même si il n'est jamais cité, et qu'il l'illustre fort bien avec la parabole de l'horloger. Selon lui, on peut organiser la complexité d'un système (langage de programmation, organisation, objet) en hiérarchisant des éléments inférieurs qui obéiront à d'autres supérieurs et ainsi de suite. Ces éléments inférieurs sont de complexité moindre et donc plus faciles à concevoir.

La conception de produits est un processus de création qui, pour répondre aux exigences des clients intègre la conception des composants abstraits afin d'avoir une spécification complète des caractéristiques du produit. Pour (Shehab et al., 2001), si la croissance de la technologie de fabrication est en avance par rapport à la conception de produits, celle-ci joue un rôle important par le développement des systèmes de fabrication permettant d'améliorer la fabricabilité, la qualité et la réduction des coûts.

Dans ce chapitre, nous reconsidérons des notions déjà présentées aux chapitres précédents de manière à proposer une structure combinée et homogène, base d'une méthodologie de conception pour expliciter et maîtriser la complexité. La modularité et l'architecture produit sont les bases de notre démarche. Nous étudierons à partir d'analyses fonctionnelles externe et interne comment combiner les espaces fonctionnels externes et internes avec les espaces organiques afin de proposer un principe de conception articulé autour d'un espace de solutions. Notre contribution vise à proposer les bases d'une méthodologie de conception reposant sur des transformations matricielles. Ces transformations matricielles nous conduisent à trois types de matrices diagonales par blocs : celles reliant les fonctions (partielles, variantes, constantes, cf. §3.3.1 du chapitre 3) aux constituants génériques constant, partiel et variant. Nous l'appliquons, pour mieux illustrer nos propos, à un exemple de famille de roues de véhicule.

4.2. Terminologie et concepts

Nombreux sont les chercheurs, chacun dans son domaine de compétence, à avoir contribué à la définition ou l'explication de la « *complexité* ». Cette multiplicité

et cette diversité de significations est la meilleure démonstration de la difficulté que l'on a à cerner toutes les facettes de la complexité des systèmes¹.

D'un point de vue étymologique, le mot complexité vient du latin « *pletere* », « *plexus* » qui suggère « entrelacer » par « *complectic*, *complexus* » qui signifie embarrasser (Gigch, 1991). Le concept de la complexité doit être associé non seulement au nombre de parties reconnaissables dans un système, mais aussi à l'importance de leurs interrelations. Dans le domaine des sciences sociales, la complexité est toujours associée à l'interaction humaine, et donc, dépend du type d'interfaces entre l'être humain et le système ; il est donc impossible de faire de la complexité un attribut inhérent à un objet ou d'un système. Il existe une infinité de possibilités d'interactions avec un système, par conséquent il est hors de question de faire d'une tâche (assignation, affectation) la mesure unique de la complexité. La complexité doit se référer à des systèmes d'objets et non aux objets eux-mêmes. Partant des points de vue précédents, il y a une vision objective et subjective de la complexité. La vision objective est caractéristique des facettes du système qui peuvent être explicitées, telles que le nombre d'objets ou parties dans un système, le nombre dans un réseau dont on a besoin pour décrire le système. La vision subjective est relative au comportement et au côté non visible du système, donc dépend des relations particulières de l'individu avec le système. Ce qui est considéré comme complexe par un débutant interagissant avec un nouveau système peut être considéré comme simple par un expert.

En somme, la complexité est toujours associée aux systèmes et il serait difficile d'approfondir les éléments de la complexité sans rappeler les concepts liés aux systèmes.

4.2.1. Les systèmes arborescents

Par système hiérarchique (ou arborescent) ou par arborescence, (Simon, 1969) entend un système composé de sous-systèmes inter-reliés, chacun d'entre eux ayant, à son tour, une structure arborescente, ceci jusqu'à ce que nous atteignons le plus bas niveau des systèmes élémentaires. Dans la plupart des systèmes que nous rencontrons dans la nature, il y a quelque arbitraire dans la façon dont nous réalisons une partition et dans le choix du sous-système tenu pour élémentaire. La physique utilise beaucoup le concept de « *particule élémentaire* », bien que les particules aient une tendance déconcertante à ne pas rester bien longtemps élémentaire. Il y a seulement deux

¹ Système : ensemble composite de personnels, de matériels, de logiciels organisés pour que leur interfonctionnement permette, dans un environnement donné, de remplir les missions pour lesquelles il a été conçu (Meinadier, 2002).

générations, les atomes en tant que tels étaient les particules élémentaires. Aujourd'hui, pour le spécialiste de physique nucléaire, ce sont des systèmes complexes. Pour certains en astronomie, des étoiles entières, voire même des galaxies, peuvent être considérées comme des sous-systèmes élémentaires.

Ce sont précisément les raisons pour lesquelles un scientifique a le droit de tenir pour élémentaire un sous-système de fait extrêmement complexe. Le mot « *hiérarchie* » est en général utilisé pour qualifier un système complexe au sein duquel chacun des sous-systèmes est subordonné par une relation d'autorité au système auquel il appartient. Plus exactement, dans une organisation formellement hiérarchisée, chaque système est constitué d'un système de pilotage (ou de coordination) et d'un ensemble de sous-systèmes subordonnés.

Nos sociétés avancées reposent sur des « systèmes » de plus en plus complexes que la maîtrise des technologies de l'information, notamment, a permis de concevoir, de développer et de mettre en œuvre. Meinadier (Meinadier 2002) considère un avion de ligne comme un système complexe en lui-même. Le système de transport aérien apparaît ainsi comme un « *système de systèmes* », résultant de l'intégration de différents systèmes. Ainsi, tout système prend place dans une hiérarchie de système (figure 4.1). Il possède son « *sursystème* » : son environnement constitué d'autres systèmes avec lesquels il interagit. Il est formé de composants appelés ses « sous-systèmes », du moins tant qu'ils correspondent encore à la définition d'un système, c'est-à-dire qu'ils s'analysent eux-mêmes comme un ensemble organisé de composants en interaction.

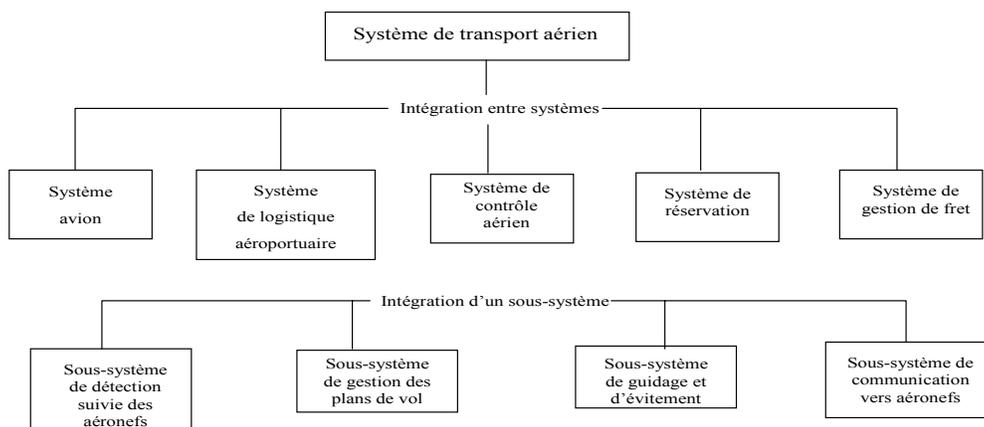


Figure 4.1. Élément d'une hiérarchie de systèmes

La figure 4.1 montre que le problème d'intégration se pose à différents niveaux de granularité des systèmes :

- intégrer un système par assemblage de ses composants,
- intégrer un système dans son sur-système
- faire interagir des systèmes existants, etc.

Dans la suite, nous appellerons « composants » tout élément d'un système quel que soit le niveau de granularité auquel il se place dans la hiérarchie de décomposition du système appelé « *arborescence système* »

4.2.2. La complexité des systèmes

(Flood et Carson, 1988) décomposent la complexité à travers les différents niveaux suivants :

- un niveau de distinction entre la complexité associée aux matériels et celle associée aux personnes,
- un niveau où l'accent est placé sur le nombre de parties et les liens entre les parties,
- un autre niveau caractérisé par les attributs des parties et les liens. Ces attributs incluent des propriétés telles que la linéarité, l'asymétrie et les contraintes.

(Weaver, 1968) proposait une typologie de la complexité

- les systèmes de simplicité organisée,
- les systèmes de complexité désordonnée,
- les systèmes de complexité organisée.

Les systèmes de simplicité organisée sont des systèmes ayant un petit nombre de variables à considérer permettant de faire des hypothèses de simplicité et qui, du fait de leur nature déterministe, peuvent être gérés par des techniques d'analyse mathématique. Beaucoup de systèmes physiques, y compris la mécanique newtonienne, possèdent les caractéristiques de la simplicité organisée et par conséquent peuvent être traités par des méthodes analytiques classiques.

Les systèmes de complexité désordonnée sont des systèmes ayant un très grand (presque infini) nombre de variables qui doivent être gérées par les méthodes statistiques. Les systèmes de cette nature peuvent être caractérisés seulement en faisant appel à la loi des grands nombres et exprimant les propriétés par les valeurs

attendues de distributions de fréquence. La thermodynamique et la mécanique statistique sont des exemples de complexité désordonnée.

Les systèmes de complexité organisée sont ceux que l'on rencontre dans nos environnements sociaux et dans nos organisations.

4.2.3. Complexité et modularité

Dans le chapitre 2, nous avons montré que la modularité permet de gérer et structurer la complexité. Ceci découle de la décomposition du système en sous systèmes et composants, décomposition qui doit être pensée en même temps que l'intégration ultérieure. Cette décomposition facilite la standardisation des composants et accroît la variété, mais nécessite une spécification précise des interfaces.

Au vu d'une revue de la littérature, il semble qu'il n'y ait pas de méthode systématique pour mesurer la modularité. Certains auteurs (Gershenson et al., 1999 ; 2004) considèrent cette mesure comme relative et n'ayant de sens qu'appliquée à un produit en cours d'évolution. Ils ont développé une méthode basée d'une part sur le rapport de la similitude interne au module à toutes les similitudes interne et externe des modules et d'autre part sur le rapport des dépendances entre modules à toutes les dépendances.

Newcomb et al. (1998) proposent une méthode basée sur deux données : la compatibilité moyenne intra et inter module et la dépendance introduite par les interfaces entre modules. Cette méthode est proche de celle de (Zhang et al., 2001 ; Gershenson et al., 1999) car en plus de la compatibilité, elle incorpore les éléments de dépendances, c'est-à-dire les interfaces physiques.

Les travaux de (Siddique et Rosen, 1998 ; 1999) s'appuient sur la standardisation d'interfaces entre modules. Sachant que la standardisation est un processus commun à un ensemble de produits, leur paramètre de mesure est le rapport du nombre d'interfaces communes à la somme de toutes les interfaces communes et uniques. Autrement dit

$$\alpha = \frac{\text{Nombre d'interfaces communes}}{\sum \text{Toutes les interfaces communes et uniques}}$$

(Di Marco et al., 1994) en regroupant les composants par type de recyclage, affectent un coût qualitatif de recyclage. Ce dernier est proposé comme mesure de la modularité. D'une manière similaire, (Ishii et al., 1995) incorporent les coûts indirects liés à trois paramètres :

- commonalité,
- point de différenciation
- coût d'installation.

Ils utilisent des outils comme le Quality Function Deployment (QFD) permettant de traduire le plus fidèlement possible les attentes du client. Cet outil leur permet d'estimer l'importance de la diversité du produit.

(Martin et Ishii, 1997) et (Hillstrom, 1994) abordent la mesure de la modularité par l'utilisation des informations relatives aux hiérarchies fonctionnelles et physiques pour clarifier les interactions d'interfaces ou de fonctions alors que la conception des outils de fabrication et d'assemblage est utilisée pour obtenir une mesure de la complexité de chaque interface.

En définitive, autant la mesure utilisée par (Gershenson et al., 1999) permet d'explicitier l'évolution de la modularité suivant les étapes du cycle de vie, autant les mesures plus spécifiques utilisées par (Newcomb et al., 1998) pourraient être généralisées au-delà des fonctions. Il se dégage de ce court état de l'art que la plupart des mesures de modularité s'appuient le plus souvent sur des ratios obtenus à partir de l'analyse des similarités ou des dépendances inter/intra modules. Par la suite, ces rapports sont additionnés ou multipliés pour donner une vue globale. Il semble donc que l'on dispose de peu d'outils permettant de mesurer l'impact de la modularité dans les choix de conception.

4.2.4. Les espaces fonctionnel et organique dans la gestion de la complexité

(Hsuan, 1998) s'est intéressée au processus de modularisation dans la conception « *black-box* ». Son objectif visait à répondre à la question suivante : quelles sont les stratégies susceptibles de faciliter la collaboration entre client-fournisseur dans le processus de développement de nouveaux produits ? A cet effet, elle a identifié quatre niveaux hiérarchiques du produit : le composant, le module, le sous-système et le système. Le tableau 4.1 montre en effet l'évaluation de l'opportunité de la modularisation et ses impacts sur la relation client-fournisseur.

Niveau	Nature de composant	Caractéristiques (utilisation)	Relation client-fournisseur	Exemple
Composant	Pièce standard	Le prix est variable par rapport au volume acheté. Spécification standard, souvent appliquée à n'importe quelles industries.	Durable-arm's length	Résistance, condensateur, connecteur, époxy
Module	Combinaison de composants.	Le module peut être appliqué à quelques systèmes particuliers.	Le sous-traitant et le client coopèrent à l'élaboration des spécifications.	Contrôleur de l'essuie-glace Capteur Engine-controllers Roues
Sous-système	Combinaison de modules	Personnalisé hautement et souvent conçu pour un seul produit.	Interdépendance élevée	ABS système, ITS Châssis Batterie Climate control
Système	Système assemblé clos	Le système est composé de sous-systèmes qui sont reliés par les interfaces et les couplages technologiques.	Degré d'interdépendance le plus élevé	Passenger car Luxury car Vans Sports cars

Tableau 4.1. Relation client-fournisseur dans le processus de modularisation selon l'architecture du produit (Hsuan, 1998).

L'approche précédente a pour principal champ applicatif l'architecture organisationnelle en conception appelée couramment l'Ingénierie Système (IS).

La décomposition progressive du système (produit ou système de production) en sous systèmes organisés permet de réduire la complexité tout en assurant la cohérence du système. La conception consiste à passer de l'ensemble des fonctions couplées à l'ensemble des composants couplés (descente du Vé) tandis que lors de la validation on intègre les composants dans les sous systèmes jusqu'au système complet (remontée du Vé). La branche descendante établit la description progressive du système jusqu'à la définition des pièces élémentaires et la branche remontante établit l'intégration progressive des constituants jusqu'à la validation du système. La figure 4.2 nous montre l'imbrication des Vé.

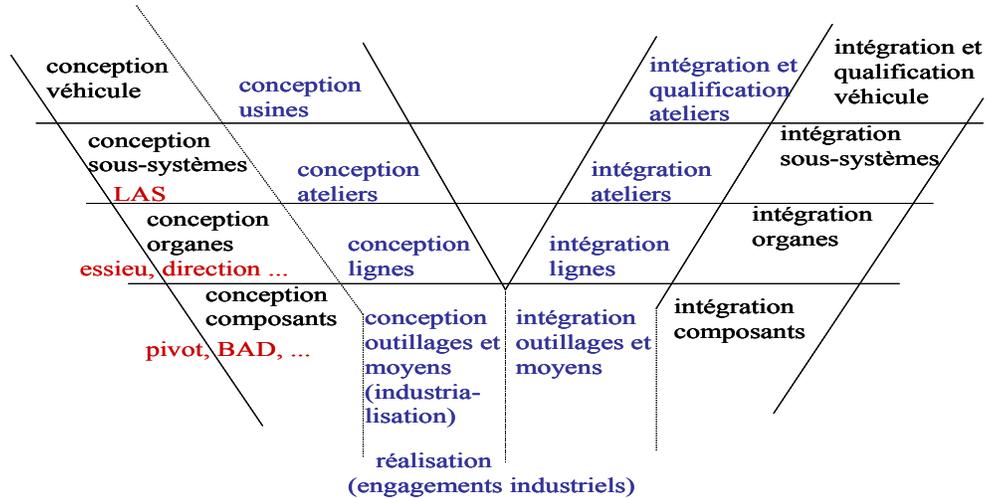


Figure 4.2. Imbrication des Vé produit-système de production

4.2.4.1. L'analyse et l'espace fonctionnel externes

Généralement, l'identification des fonctions de service combine une approche descendante de décomposition des missions du système en fonctions répondant à ces missions et une approche opérationnelle d'analyse de tous les cas d'utilisation du système par les utilisateurs, systèmes de l'environnement et système de soutien logistique en déterminant les scénarios opérationnels associés. Pour (Meinadier, 2002), l'analyse fonctionnelle réclame des décompositions préalables :

- analyse de la mission opérationnelle du système et des missions logistiques associées et décomposition en domaines fonctionnels ;
- décomposition temporelle en phases de vie et modes de fonctionnement, avec analyse des scénarios opérationnels correspondants ;
- décomposition éventuelle en segments ou sites géographiques, lorsque les choix fonctionnels externes en dépendent.

L'espace fonctionnel externe d'un produit caractérise son comportement du point de vue de ses utilisateurs, en d'autres termes du point de vue de l'usage. En considérant les exemples de stylo à billes ou du véhicule automobile, cette vue fonctionnelle externe se positionne sous l'angle client, c'est-à-dire sous l'angle de la subjectivité. Dit autrement, c'est le ressenti par le client direct et l'environnement du produit. Cette vue, qui est en réalité la vue « marketing » n'est pas directement interprétable par les équipes techniques de conception. On peut dès lors comprendre la nécessité de traduire le besoin « marketing » en besoin technique lors de la conception du produit. En ce qui concerne les composants d'un véhicule, la spécification d'entrée

est en général de nature technique. Cette traduction repose sur une analyse fonctionnelle externe du produit consistant en la définition des phases dont les principales sont les suivantes (Lartigue, 2003) :

- *la phase d'identification des « use cases »*. Cette phase consiste en la définition des grands cas d'utilisation ou situations de vie du produit selon son environnement, le client faisant partie de celui-ci.
- *la phase d'identification des interfaces externes*. Elle définit pour chaque cas d'utilisation, le périmètre des interactions du produit avec son environnement,
- *l'attendu du système*. Cette phase permet de caractériser pour chaque interface externe du produit l'attendu subjectif en variables quantifiables de la physique.

On remarque dès lors que cette démarche est en fait le passage d'une vue besoin du « client » (cahier de charges) à une vue besoin du « système » définissant son périmètre sous des dimensions principalement techniques et esthétiques. L'ensemble de toutes les dimensions définit le système en tant que boîte noire par ses missions à remplir, ses performances à satisfaire, ses contraintes à respecter ; ce qui permet à la conception technique de commencer.

4.2.4.2. L'analyse et l'espace fonctionnel internes

L'analyse fonctionnelle interne consiste à décomposer les fonctions opérationnelles en sous-fonctions jusqu'à un critère prédéterminé (c'est-à-dire une solution existante, des sous-traitant identifiés, un niveau de granularité fixé par la décomposition en blocs projets) et à les caractériser au fur et à mesure de la décomposition par allocation et répartition des exigences associées aux fonctions mères. On obtient ainsi les arbres fonctionnels dont les feuilles, ou modules fonctionnels, font l'objet de spécification.

L'espace fonctionnel interne suscite un enjeu particulier, celui de pouvoir passer de la demande fonctionnelle externe quantifiée (exigences de besoin technique et esthétique) à une solution fonctionnelle interne qui répond à ces exigences dans chaque cas d'utilisation (allocation des exigences aux fonctions internes du système).

Toutefois, du point de vue de l'architecture produit, à chaque niveau de l'arborescence, la conception d'un composant consiste à le traduire en « *boîtes blanches* » c'est-à-dire à le décrire par son fonctionnement interne, de manière à répondre aux exigences d'entrée décrivant les caractéristiques externes du composant

vu en tant que « *boîtes noires* » (Lartigue, 2003). D'une part, la conception éclaire l'espace fonctionnel interne et définit des sous composants « boîtes noires » réputés intégrables, d'autre part les exigences reflètent la vue fonctionnelle externe du composant par son comportement attendu. Sous un autre angle, l'ingénierie simultanée consiste aussi à construire cette vue boîte blanche en plusieurs fois à travers plusieurs rangs d'exigences, en étapes d'affinement successives. Dans cette optique, les états intermédiaires du composant en conception sont appelés de vues « *boîtes grises* ». L'avantage de cette approche est de permettre de fermer les degrés de liberté au plus tard afin d'obtenir la solution la plus adaptée, en évitant de descendre trop dans le détail et en garantissant la cohérence.

Cette vue fonctionnelle interne de boîte grise ou blanche permet de définir les corrélations entre fonctions externes. Ces corrélations sont positives ou négatives lorsque les solutions technologiques de l'architecture sont choisies. La vue fonctionnelle interne repose sur une analyse fonctionnelle interne qui met en évidence deux aspects de la solution fonctionnelle :

- l'arborescence fonctionnelle qui décrit le périmètre de chaque fonction interne : *l'aspect statique*,
- un *aspect dynamique*, succession des états entre cas d'utilisation, couplages des fonctions dans chaque état (diagramme de flux, de données, ...) qui décrivent les interactions entre fonctions pour répondre aux fonctions externes.

L'aspect dynamique montre ainsi les couplages fonctionnels internes. La solution pourra être jugée d'autant plus satisfaisante que les couplages seront moins nombreux, donc les interfaces organiques qui les supporteront également. Cette analyse fonctionnelle repose sur une itération entre le périmètre fonctionnel et le degré de couplage entre fonctions jusqu'à obtenir les couplages les plus simples et les plus compacts possibles : ceux là seront aisément simulables donc prédictibles sur la base des sciences physiques, des sciences de l'ingénieur et des outils numériques. En somme, la qualité d'une conception systémique résulte essentiellement de la qualité de ses interfaces d'abord externes, puis internes, d'abord fonctionnelles puis organiques.

4.2.4.3. Espace organique

La conception est acquise lorsque les fonctions internes et leurs couplages sont attribués à des sous constituants boîtes noires (allocation des fonctions internes aux sous composants). C'est le moment où les phénomènes physiques et les lois qui les

régissent viennent porter les flux fonctionnels. Ces flux fonctionnels de la physique sont utiles lorsqu'ils sont vecteurs du flux fonctionnel recherché, inutiles voire gênants lorsqu'ils sont sources de couplages non désirés c'est-à-dire de contraintes. La capacité de chacun des sous composants à remplir la totalité des fonctions et des interfaces qui lui sont allouées résulte de l'état et des solutions capitalisées qui en établissent la faisabilité.

Le premier rang de conception a pour rôle essentiel de confirmer cette faisabilité, notamment sur les points les plus sensibles, à savoir : restriction des degrés de liberté, corrélations négatives fortes, nouveaux couplages.

La conception organique a pour but aussi de spécifier puis de définir les interfaces organiques entre les sous composants sur la base de leurs couplages fonctionnels.

Pour construire une architecture sur la base de ces systèmes fonctionnels et organiques, une réponse aux exigences est construite en réalisant une double allocation de façon explicite et justifiable comme suit :

- d'une part, de ces exigences vers la modélisation fonctionnelle (réponse fonctionnelle),
- d'autre part, de la projection de l'ensemble de fonctions sur l'ensemble des sous composants (réponse organique).

La figure 4.3 illustre ces propos

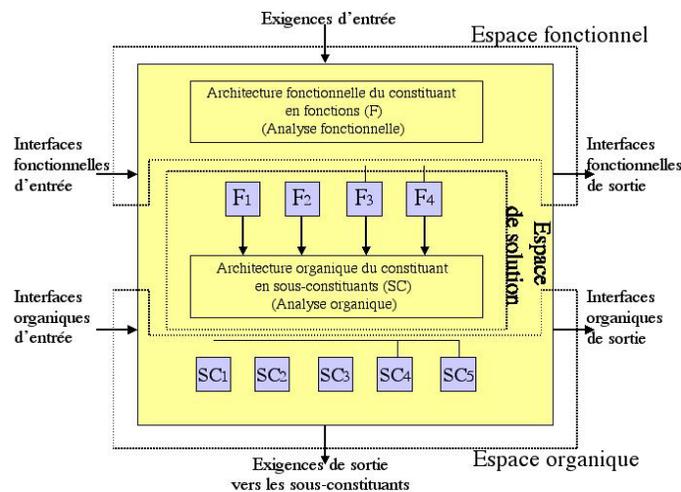


Figure 4.3. Les différents espaces de la conception d'un constituant (Lartigue, 2003)

Il est nécessaire que nous précisions que par rapport à la figure précédente, nous utiliserons indifféremment le terme constituant ou composant. Les constituants et sous constituants seront appelés suivant les cas composants, composants élémentaires. Notre démarche, suite aux différents points précédents sera caractérisée par l'analyse fonctionnelle d'une famille de produit qui débouchera sur plusieurs types de fonctions qui nous permettront de déterminer les interfaces entre fonctions. Les interfaces organiques, c'est-à-dire entre composants nécessiteront une analyse structurelle (nomenclature et typologie des composants génériques) de la famille de produits. Une analyse judicieuse de ceux-ci permet d'obtenir des matrices d'allocations sans couplages indésirables.

4.3. Méthodes matricielles de décomposition d'une famille de produits

Dans le chapitre 1, nous avons présenté la décomposition matricielle de Kusiak (Kusiak, 1996). Cette représentation matricielle du produit montre les relations entre les composants disposés en ligne et les fonctions réalisées disposées en colonne, ensuite une approche par décomposition permet d'extraire les éléments interchangeables, standardisés et indépendants en regroupant les interactions par modules. Nous avons également présenté l'outil « *Design Structure Matrix* » (DSM) dans ce même chapitre.

Les approches systématiques de méthodologie de conception de produits sont recherchées par les concepteurs car elles permettent de balayer un ensemble des solutions et d'évaluer l'efficacité de la solution finale. Ainsi, l'utilisation de propriétés mathématiques des matrices devient un outil efficace.

(Ming-Chyuan et Lung-Au, 2005) considèrent que dans la plupart des processus de conception, il est possible de représenter d'une part les exigences du client et d'autre part l'ensemble des solutions obtenues sous forme de vecteurs. Ils développent une approche matricielle d'aide au concepteur lui permettant de générer des alternatives de solutions techniques pour un ensemble spécifique d'exigences. Cette approche consiste à combiner le concept de stratégie de conception du composant et celui de systèmes de base de données relationnelles afin de manipuler les informations aussi bien anciennes que nouvelles relatives au produit à concevoir (dans leur exemple, il s'agit de chaussures de sport). Les paramètres d'entrée (exigences du client) et de sortie (solutions technologiques) sont utilisés dans l'approche matricielle en fournissant deux types d'informations :

- Les paramètres d'entrée (exigences du client) sont représentés par une information textuelle, par l'utilisation de mots.
- Les paramètres de sortie (solutions technologiques) sont représentés en extension.

Cette approche peut être synthétiser en trois principales étapes :

Etape 1 : élaboration de la matrice d'interaction entrée/sortie

Cette matrice est élaborée à partir d'une revue de la littérature sur les chaussures de sport, de l'opinion de l'expert, des caractéristiques et performances du produit. Elle propose un lien entre un ensemble de paramètres d'entrée qui sont les exigences du client et un ensemble de tous les paramètres de sortie qui sont liés aux différents modèles de chaussures conçues (paramètres de conception).

Etape 2 : choix de la « bonne matrice »

Cette étape consiste à définir ce que les auteurs appellent « une matrice de choix envisageables ». A partir de règles définies dans une procédure informatique et d'avis d'experts, on relie le besoin du client aux paramètres fonctionnels des chaussures qui peuvent y répondre.

Etape 3 : génération d'alternatives de conception

A partir de la matrice de choix envisageables, le système va générer des alternatives possibles pour répondre au besoin exprimé du client. Ceci s'effectue à travers un « traitement » sur les paramètres de conception et sur la matrice de choix définie à l'étape précédente.

L'intérêt de cette approche est d'une part d'éliminer rapidement les produits ou les alternatives ne répondant pas au besoin du client et d'autre part de générer un ensemble de solutions y répondant.

Pour notre part notre approche matricielle a pour point de départ une analyse fonctionnelle du produit à concevoir et aboutit à un ensemble de solutions techniques répondant à une fonction donnée.

4.3.1. Analyse fonctionnelle

Dans cette partie, nous présentons une illustration de la description fonctionnelle d'une famille de roues de véhicule (Figure 4.4). Cette famille offre le

choix entre deux diamètres de jante (13 et 16 pouces) et deux types de crochet, (B ou J).

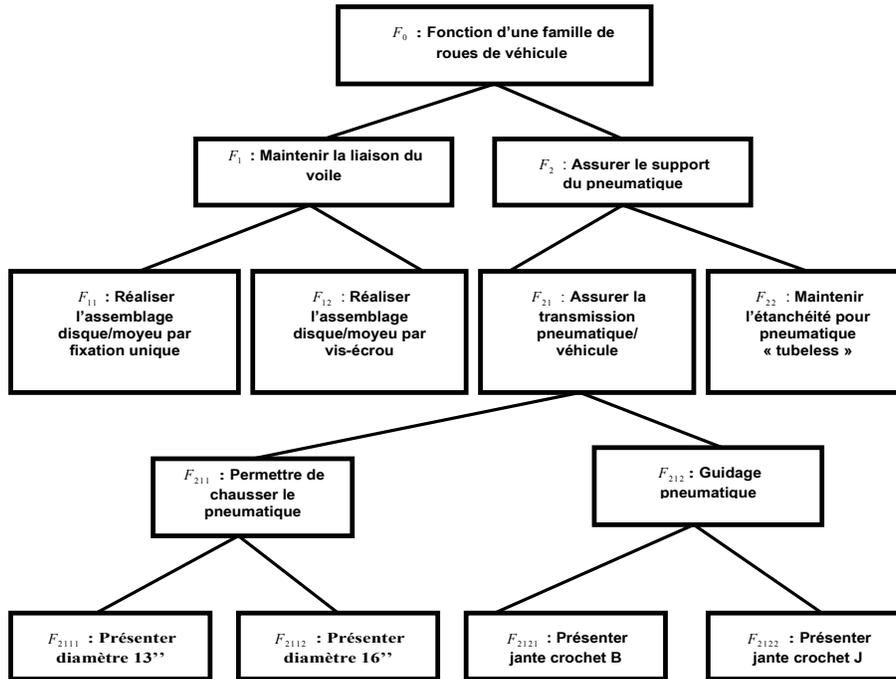


Figure 4.4. Description fonctionnelle d'une famille de roues de véhicule

Cette figure nous permet d'illustrer les relations d'appartenance entre fonctions, lesquelles seront classées suivant une typologie particulière. A la lumière des relations d'appartenance entre les fonctions matérialisées par les équations (3.6) et (3.7) du chapitre précédent, dans la figure 4.4 nous dénombrons :

- cinq fonctions abstraites : $F_1, F_2, F_{21}, F_{211}, F_{212}$,
- sept fonctions élémentaires : $F_{11}, F_{12}, F_{22}, F_{2111}, F_{2112}, F_{2121}, F_{2122}$

En appliquant les définitions des types de fonctions (constantes, variantes et partielles) faites au chapitre 3 à la famille de roues de véhicules, nous obtenons la configuration suivante :

Fonctions constantes : F_{11}, F_{12}, F_{22} car elles s'appliquent indifféremment aux quatre types produits de la famille.

Fonctions variantes : $F_1, F_2, F_{21}, F_{211}, F_{212}$ car elles s'appliquent aux quatre types de produits mais leurs paramètres (type d'assemblage, diamètre, type de crochet) changent.

Fonctions partielles :

F_{2111} : ne s'applique qu'aux roues de diamètres de jante 13'',

F_{2112} : ne s'applique qu'aux roues de diamètres de jante 16'',

F_{2121} : ne s'applique qu'aux roues de crochet de jante type B,

F_{2122} : ne s'applique qu'aux roues de crochet de jante type J,

F_{11} : ne s'applique qu'aux roues à voile non démontable,

F_{12} : ne s'applique qu'aux roues à voile démontable.

4.3.2. Analyse structurelle

Nous savons que toute famille de produits contient un ensemble de produits possédant des similarités. Ces similarités s'expriment aussi bien au niveau fonctionnel (comme nous venons de le voir) qu'au niveau de leur constitution matérielle (composants, liaisons communes ou similaires). Dans ce paragraphe, nous nous intéressons au concept de nomenclature générique et à l'établissement d'une typologie des composants et des liaisons entre composants pour la famille à laquelle ils appartiennent. Cette typologie est indispensable à la réalisation d'un modèle de représentation de familles de produits.

Nous pouvons remarquer qu'indépendamment de l'ordre d'assemblage des composants, un produit composé peut être considéré comme un arrangement fonctionnel de composants et d'ensembles de composants. La description d'un tel arrangement est la nomenclature d'un produit. Elle peut s'étendre au sous-ensemble fonctionnel, aux relations d'équivalence fonctionnelles de composants génériques de famille de produits et de nomenclature générique.

Les éléments de la nomenclature générique sont présentés suivant une hiérarchie croissante. La racine de cette hiérarchie correspond au composant générique représentant toute la famille de produits tandis que les nœuds et les « feuilles » correspondent à des constituants génériques représentant les composants et sous-ensembles fonctionnels.

Afin d'illustrer ces concepts, considérons à nouveau la famille de roues de véhicule dont le modèle fonctionnel est celui de la figure 4.4. Il existe quatre produits dans cette famille dont les graphes de liaisons et les nomenclatures sont présentées à la figure 4.5 où nous avons volontairement limité la représentation des familles à deux variantes au lieu de quatre.

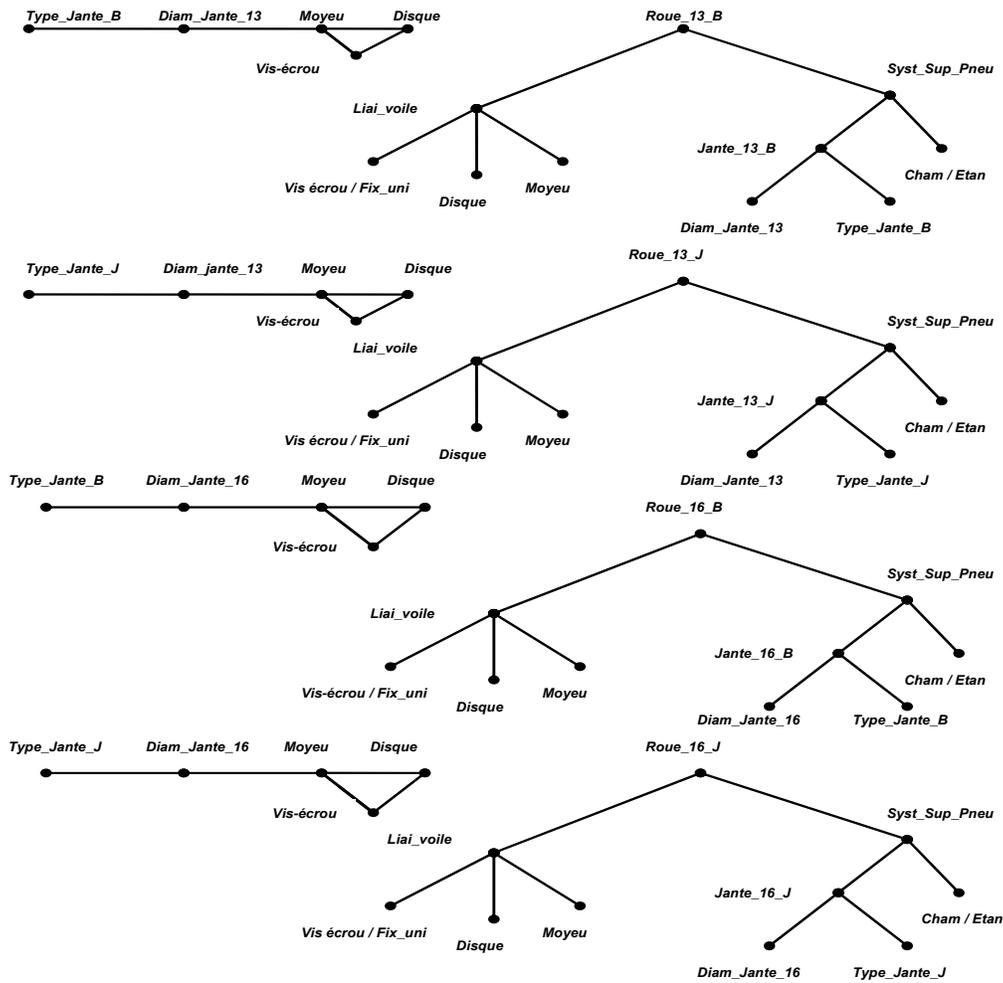


Figure 4.5. Descriptions individualisées (graphes de liaisons et nomenclatures) d'une famille de roues de véhicule.

L'analyse des classes d'équivalences fonctionnelles des éléments des quatre types de roues de véhicule nous conduit à la constitution des classes d'équivalences suivantes :

$$Cl_1 = \{Roue_13_B, Roue_13_J, Roue_16_B, Roue_16_J\},$$

$$Cl_2 = \{Syst_Sup_Pneu\},$$

$$Cl_3 = \{Cham / Etan\}$$

$$Cl_4 = \{Jante-13_B, Jante_13_J, Jante_16_B, Jante_16_J\},$$

$$Cl_5 = \{Diam_Jante_13, Diam_Jante_16\},$$

$$Cl_6 = \{Diam_Jante_13\}$$

$$Cl_7 = \{Diam_Jante_16\},$$

$$Cl_8 = \{Type_Jante_B, Type_Jante_J\},$$

$$Cl_9 = \{Type_Jante_B\}$$

$$Cl_{10} = \{Type_Jante_J\},$$

$$Cl_{11} = \{Liai_voile\},$$

$$Cl_{12} = \{Fix_Uni, Disque, Moyeu\},$$

$$Cl_{13} = \{Vis_ecrou, Disque, Moyeu\}$$

Chaque élément d'une classe d'équivalence réalise une fonction particulière F_j telle que présentée à la figure 4.4.

Nous avons ainsi :

$$Cl_1 \text{ réalise la fonction } F_0,$$

$$Cl_2 \text{ réalise la fonction } F_2,$$

$$Cl_3 \text{ réalise la fonction } F_{22}$$

$$Cl_4 \text{ réalise la fonction } F_{21},$$

$$Cl_5 \text{ réalise } F_{211},$$

$$Cl_6 \text{ réalise la fonction } F_{2111},$$

$$Cl_7 \text{ réalise la fonction } F_{2112},$$

$$Cl_8 \text{ réalise la fonction } F_{212},$$

$$Cl_9 \text{ réalise la fonction } F_{2121},$$

$$Cl_{10} \text{ réalise la fonction } F_{2122},$$

$$Cl_{11} \text{ réalise la fonction } F_1,$$

Cl_{12} réalise la fonction F_{11} et Cl_{13} réalise la fonction F_{12} .

Nous décrivons ces relations par la transformation matricielle $M_{F/C}$ entre fonctions et classes d'équivalences suivante :

$$\begin{bmatrix} M_1 & & & & \\ & M_2 & & & \\ & & M_3 & & \\ & & & \dots & \\ & & & & M_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Cl_1 \\ Cl_2 \\ Cl_3 \\ \dots \\ Cl_{13} \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} F_0 \\ F_2 \\ F_{22} \\ \dots \\ F_{12} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Avec

$$M_{F/C} = \begin{bmatrix} M_1 & & & & \\ & M_2 & & & \\ & & M_3 & & \\ & & & \dots & \\ & & & & M_{13} \end{bmatrix}$$

A titre d'exemple, dans la relation (4.1), M_1 est l'un des quatre éléments suivant

$$\begin{bmatrix} Roue_13_B \\ Roue_13_J \\ Roue_16_B \\ Roue_16_J \end{bmatrix} \text{ et } Cl_1(M_1) \text{ réalise la fonction } F_0, \text{ fonction d'une famille de roues de}$$

véhicule.

Pour une exploitation efficace de la matrice précédente, nous avons instancié un composant générique par classe d'équivalence fonctionnelle. Nous avons donc appelé :

$$ROUE = M_1 \in \begin{bmatrix} Roue_13_B \\ Roue_13_J \\ Roue_16_B \\ Roue_16_J \end{bmatrix} \text{ pour la classe } Cl_1,$$

$$SYS_SUP = M_2 = [Sys_Sup_Pneu] \text{ pour la classe } Cl_2,$$

$$CHAM_ETAN = M_3 = [Cham/Etan] \text{ pour } Cl_3,$$

$$JANTE = M_4 \in \begin{bmatrix} Jante_13_B \\ Jante_13_J \\ Jante_16_B \\ Jante_16_J \end{bmatrix} \text{ pour la classe } Cl_4,$$

$$DIAM = M_5 \in \begin{bmatrix} Diam_Jante_13 \\ Diam_Jante_16 \end{bmatrix} \text{ pour la classe } Cl_5,$$

$$DIAM_13 = M_6 = [Diam_Jante_13] \text{ pour la classe } Cl_6,$$

$$DIAM_16 = M_7 = [Diam_Jante_16] \text{ pour la classe } Cl_7,$$

$$JANTE = M_8 \in \begin{bmatrix} Type_Jante_B \\ Type_Jante_J \end{bmatrix} \text{ pour la classe } Cl_8,$$

$$CROCHET_B = M_9 = [Type_Jante_B] \text{ pour la classe } Cl_9,$$

$$CROCHET_J = M_{10} = [Type_Jante_J] \text{ pour la classe } Cl_{10},$$

$$LIAI_VOILE = M_{11} = [Liai_voile] \text{ pour la classe } Cl_{11},$$

$$FIX_UNI = M_{12} \in \begin{bmatrix} Fix_Uni \\ Disque \\ Moyeu \end{bmatrix} \text{ pour la classe } Cl_{12} \text{ et}$$

$$VIS_ECROU = M_{13} \in \begin{bmatrix} Vis_ecrou \\ Disque \\ Moyeu \end{bmatrix} \text{ pour } Cl_{13}$$

Nous établissons une relation d'appartenance entre les composants dont la hiérarchie est présentée à la figure 4.6.

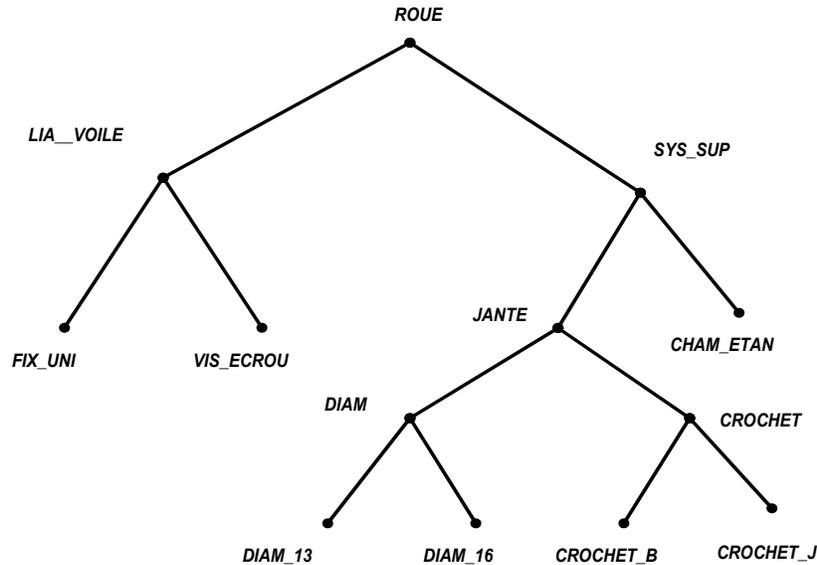


Figure 4.6. Nomenclature générique d'une famille de roues de véhicule

L'examen de la figure 4.6 nous permet de regrouper les différents éléments par bloc ou module comme suit :

$$\begin{aligned}
 ROUE &\leftarrow \{LIA_VOILE, \quad SYS_SUP\} \\
 LIA_VOILE &\leftarrow \{VIS_ECROU, \quad FIX_UNI\} \\
 SYS_SUP &\leftarrow \{JANTE, \quad CHAM_ETAN\} \\
 JANTE &\leftarrow \{DIAM, \quad CROCHET\} \\
 DIAM &\leftarrow \{DIAM_13, \quad DIAM_16\} \\
 CROCHET &\leftarrow \{CROCHET_B, \quad CROCHET_J\}
 \end{aligned}$$

4.3.3. Représentation matricielle

Les concepts introduits dans les paragraphes précédents nous ont permis d'établir une typologie des composants génériques d'une famille de roues de véhicule. Nous identifions trois types de composants génériques : le composant constant, le composant variant et le composant partiel.

Le composant générique constant : un composant générique quelconque sera qualifié de constant si toutes les fonctions qu'il réalise sont constantes. Cette définition repose sur l'hypothèse que toute différenciation matérielle dans une famille de produits est justifiée dans son modèle fonctionnel.

Le composant générique variant : au moins une des fonctions qu'il réalise est variante, les autres ne pouvant être que des fonctions constantes. Ce type de composant est présent dans tous les types de produits.

Le composant générique partiel : au moins une des fonctions qu’il réalise est partielle, les autres pouvant être indifféremment constantes ou variantes. Ils ne sont pas présents dans tous les types de produits de la famille car les fonctions partielles qu’ils réalisent ne s’appliquent qu’à une partie des types de produits.

La nomenclature présentée à la figure 4.8 illustre bien les définitions précédentes.

Soient :

$M_{T/CGC}$ la matrice de transformation des composants génériques constants,

$M_{T/CGV}$ la matrice de transformation des composants génériques variant et

$M_{T/CGP}$ la matrice de transformation des composants génériques partiels.

Leur application à la famille de roues de véhicule nous conduit aux relations suivantes :

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline \text{VIS} \\ \text{ECROU} \\ \hline & & \\ \hline & \text{FIX} \\ & \text{UNI} \\ \hline & & \text{CHAM} \\ & & \text{ETAN} \\ \hline \end{array} \begin{bmatrix} Cl_{13} \\ Cl_{12} \\ Cl_3 \end{bmatrix} \cong \begin{array}{|c|} \hline F_{12} \\ \hline F_{11} \\ \hline F_{22} \\ \hline \end{array}$$

$$M_{T/CGC} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline \text{VIS} \\ \text{ECROU} \\ \hline & \text{FIX} \\ & \text{UNI} \\ \hline & & \text{CHAM} \\ & & \text{ETAN} \\ \hline \end{array}$$

Figure 4.7. Matrice de transformation des composants génériques constants

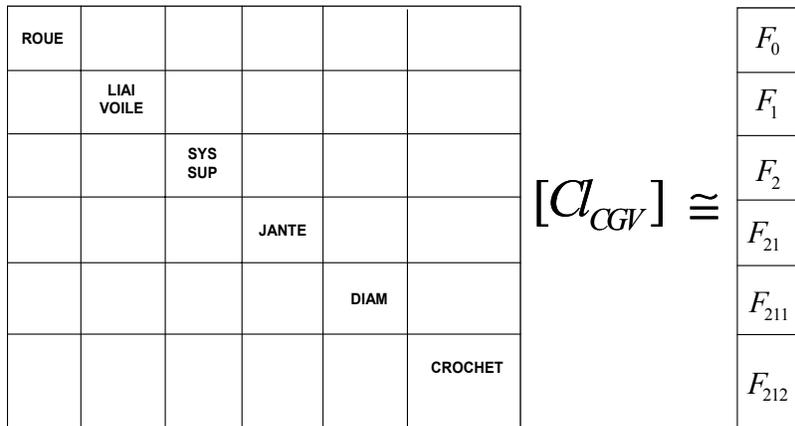


Figure 4.8. Matrice de transformations des composants génériques variants

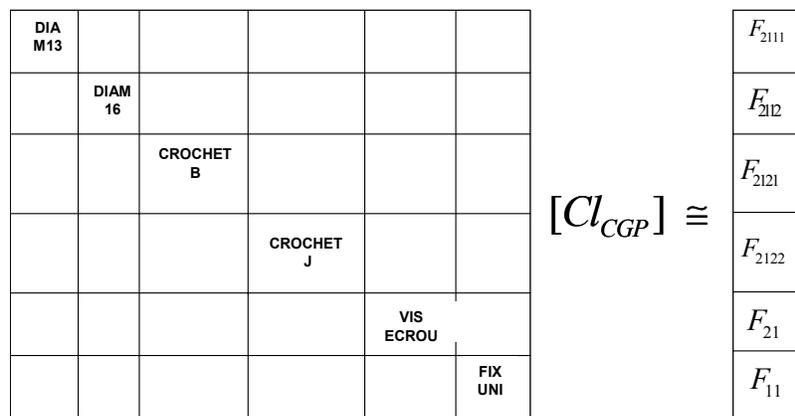


Figure 4.9. Matrice de transformations des composants génériques partiels

Cet exemple montre comment à partir d’une analyse fonctionnelle, il est possible de structurer les solutions technologiques associées aux fonctions sous forme de matrices « bloc » diagonales. Chacun de ces blocs peut être vu comme un module d’une famille de produits et permet de regrouper les solutions technologiques associées à la fonction de ce module. Ceci permet de traduire le passage du fonctionnel à l’organique.

Nous admettrons cependant que ce type de résultat est fortement lié à la connaissance que le concepteur a sur le produit à concevoir et qu’il nécessite une traçabilité des solutions technologiques à travers une base de données. Cet exemple de taille raisonnable a été traité « manuellement » et montre l’intérêt qu’il y aurait à développer une procédure informatisée pour traiter de plus gros systèmes.

4.4. Conclusion

Nous pouvons conclure en faisant plusieurs remarques. Concevoir pour réduire la complexité nécessite un acte de conception technique. De ce point de vue, la conception vise à regrouper, de la façon la plus synthétique possible, les caractéristiques fonctionnelles des composants et modules de manière à pouvoir les confronter à leurs hypothèses d'architecture.

Une architecture est optimisée lorsqu'elle réduit le nombre de couplages et d'interfaces, donc lorsqu'elle minimise les allocations entre fonctions et sous composants. Il existe alors un espace fonctionnel et organique pour lequel cette matrice d'allocation est diagonale par bloc : c'est la réponse que nous proposons pour diminuer la complexité et pour optimiser les efforts de conception et réduire les cycles de conception. Tout choix de conception consiste à bloquer des degrés de liberté c'est -à-dire à effectuer un meilleur choix des espaces fonctionnels et organiques. La conception se traduit par des exigences fonctionnelles en sortie et des répercussions de contraintes du système auxquelles s'ajoutent les contraintes de couplages au niveau du composant. Ces aspects expliquent que le plus souvent les couplages fonction / sous composants restent difficiles à réaliser.

L'exemple traité dans ce chapitre a permis de proposer trois types de matrices diagonales par blocs :

- la matrice de transformation entre les caractéristiques fonctionnelles et les composants génériques constants
- la matrice de transformation entre les caractéristiques fonctionnelles et les composants génériques variant
- la matrice liant les caractéristiques fonctionnelles et les composants génériques partiels.

De plus, pour réduire les coûts de conception, il est nécessaire de concevoir certains composants comme réutilisables, c'est-à-dire de pouvoir mutualiser certaines fonctions entre plusieurs configurations du système en anticipant le besoin par une stratégie technique. Un composant ou constituant est alors réutilisable car conçu en tant que tel, de manière à répondre aux fonctions mutualisés avec des zones d'adaptations et de paramétrages.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire se situe dans le cadre de la conception modulaire des familles de produits

L'étude bibliographique présente un état de l'art se rapportant aux activités de conception et à la diversité des produits. Notre démarche est cohérente par rapport à l'existant en bibliographie, elle met en œuvre plusieurs phases successives allant du cahier des charges à la mise en place de la nomenclature de production. Plus particulièrement la définition du produit est progressivement détaillée au cours de la définition fonctionnelle, de la définition géométrique pour aboutir à la phase de décomposition en modules. Ensuite, le problème de conception intégrée et de l'ingénierie simultanée est traité à travers la diversité des produits. En particulier, l'étude s'intéresse aux outils aidant à la conception des familles de produits tels que les gammes génériques d'assemblage. 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 et enfin la conception modulaire.

Nous dégageons une problématique qui découle d'une convergence entre les besoins industriels et les problèmes posés et / ou partiellement résolus par les chercheurs.

Dans le second chapitre, l'intérêt se porte sur l'architecture produit, la plate-forme produit et la modélisation de famille de produits. Après une introduction sur le problème de la terminologie de «*famille de produits*», l'architecture produit et l'architecture organisationnelle sont présentées à travers les différents types de modularité ainsi que les impacts sur les pratiques et enjeux de l'adoption de la modularité. Une lecture couplée de la modularité faisant ressortir sa dimension technique et organisationnelle est faite. L'architecture de famille de produits est traitée sous les deux points de vue marketing et technique. Nous faisons remarquer que dans un contexte de diversification de masse, un équilibre entre standardisation et diversification s'impose. Afin de mieux gérer la diversité des produits (qui est un handicap dans la mesure où elle limite la capacité d'anticipation du producteur), la génération des variantes et la réalisation de la variété des produits sont présentés ainsi que les méthodes permettant la réalisation de cette variété.

Enfin une synthèse fait apparaître l'approche plate-forme comme une solution permettant de répondre au dilemme standardisation / différenciation. Elle repose sur une architecture modulaire des produits et de ce fait devient une forme avancée de cette modularité. Des principes d'architecture de famille de produits sont proposés, les notions de modules communs, modules distinctifs, produit de base, règles de combinaisons sont énoncées et exemplifiées.

Le troisième chapitre propose une méthodologie de conception modulaire des familles de produits, en particulier pour la modélisation de la diversité. Nous utilisons comme outil de

Conclusion générale

modélisation les grammaires de graphe. Cet outil a le double avantage de s'appuyer sur une formulation mathématique et des représentations graphiques. Son choix pour la modélisation d'une famille de produits est justifié car cet outil permet de mettre en évidence les liaisons complexes entre les modules et les composants de la famille, ceci à travers la manipulation de la génération des variantes. Les grammaires de graphe nous ont permis de modéliser l'organisation logique des éléments d'une famille de meubles sous l'angle de la commonalité et de la modularité ainsi que montrer les mécanismes de génération de variantes pour une meilleure accommodation des besoins industriels des consommateurs. Dans un premier temps, les produits, produits de base et les modules sont représentés par des graphes ; les interfaces et structures internes par les graphes encapsulés. Dans un deuxième temps, la génération des variantes permettant la modélisation de la variété est réalisée par des opérations d'ajout, d'élimination, d'échange et de redimensionnement des modules. Les différentes combinaisons des modules sont modélisées par l'application des productions, elles sont synchronisées non seulement à travers la définition des conditions sous lesquelles les hypothèses sont faites, mais aussi à travers le contrôle de l'ordre d'exécution des dites productions, piloté par le diagramme de contrôle.

Le chapitre se termine par une application à un exemple industriel. Il s'agit d'un meuble de rangement bas, un élément de cuisine adaptable à une salle de bain qui par excellence est un produit à forte diversité et à caractère modulaire. Toute la formulation théorique a ainsi été validée. Les grammaires de graphe du caisson (graphes encapsulés du produit de base et des modules distinctifs), les définitions des diagrammes de contrôle et la mise en place des productions sont bien définies. A la fin, une synthèse de la formulation des grammaires de graphe du caisson est faite.

A partir d'analyses fonctionnelles externes et internes, dans le chapitre 4 nous montrons comment combiner les espaces fonctionnels externes et internes, les espaces organiques afin de proposer un principe de conception articulé sur un espace de solutions. Ce chapitre contribue également à une réflexion sur la complexité en conception et à sa réduction à travers la proposition de plusieurs matrices d'allocation illustrées à partir d'une famille de roues de véhicules. Les principales matrices sont celles de passage entre caractéristiques fonctionnelles et les composants génériques constants et variants, celles liant les caractéristiques fonctionnelles aux composants génériques partiels.

Les deux derniers chapitres nous montrent en parallèle deux approches de modélisation. Le chapitre 3 concerne la modélisation par les graphes et le chapitre 4 la modélisation par les matrices. Les deux modèles ont en commun la mise en relation des approches fonctionnelles et physiques (cf. figure 3.3 et figures 4.4) ainsi que l'utilisation de terminologies voisines (modules composants ou constituants). La modélisation par les graphes apporte un plus du fait de son caractère génératif qui permet de plus une description

Conclusion générale

hiérarchisée des produits faisant correspondre les décompositions aux différentes règles de réécriture. Par ailleurs, la problématique abordée au chapitre 4 (c'est-à-dire l'utilisation des matrices fonctions/composants) exploite de manière originale et intéressante les notions définies au chapitre 3. L'avantage de la modélisation par les matrices est de raccourcir la phase de développement en évitant les changements d'approche ou les corrections à répétition à la suite de la phase de réflexion sur le produit. D'un autre côté, la technique est simplifiable et adaptable à ses besoins, bien que pouvant être lourde et contraignante aux premiers abords.

Les travaux qui font l'objet de ce mémoire demandent encore un approfondissement, le sujet est complexe et vaste et demande encore réflexion. Cependant nous espérons que les modèles contenus dans ce mémoire permettront l'élaboration d'une méthodologie de gestion de la diversité d'une famille de produits.

Nous voyons comme poursuite de ces recherches d'une part :

- des études de cas industriels plus vastes pour valider encore mieux les modèles,
- le développement d'une plate-forme logicielle supportant ces modèles, suffisamment souple pour permettre l'élargissement de la variété sans perturber les modèles.

Notre approche propose un modèle permettant de représenter des connaissances sur une famille de produits. L'utilisation des règles de productions devrait permettre de coder un savoir sur les produits, de le partager et de le réutiliser, et ainsi de développer une capitalisation des connaissances réutilisables de façon appropriée par les concepteurs.

D'autre part une piste de recherche pourrait s'appuyer sur les réflexions développées au chapitre 4. Nous avons représenté les liens entre fonctions recherchées et classes de solutions technologiques d'une manière concise, visuelle et analytique par des matrices carrées. Sur l'exemple simple que nous avons traité, nous avons pu proposer des regroupements de solutions technologiques, créant par cela des modules. L'activité d'architecture d'un produit peut alors être définie comme le processus par lequel les éléments décomposés d'un produit sont rassemblés en sous-systèmes (modules) pour réaliser les fonctions principales et secondaires du produit. A partir de ces éléments, on pourrait envisager le développement d'une méthodologie plus globale pour réduire et gérer la complexité en conception.

Conclusion générale

Bibliographie

Agard B., « Conception et fabrication des familles de produits : Etat de l'art ». *RS Journal Européen des Systèmes Automatisés - JESA*, vol. 38 (1-2), pp. 59-84, 2004.

Agard B., « Contribution à une méthodologie de conception de produits à forte diversité ». *Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, France*, 2002.

Agard B., Kusiak A., « Data-mining-based methodology for the design of product families ». *Int. J. Prod. Res.*, vol. 42 (15), pp. 2955-2969, 2004.

Agard B., Tollenaere M., « Conception d'assemblage pour la customisation de masse ». *Mécanique et Industrie*, vol.3, pp. 113-119, 2002.

Agard B., Tollenaere M., « Méthodologie de conception des familles de produits ». *Journal Européen des Systèmes Automatisés - JESA*, vol. 37 (6), pp. 755-777, 2003.

Agard, B., Tollenaere M., «Design of Wire Harnesses for Mass Customization ». *Proceeding of 4th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering- IDMME'02*, Clermont – Ferrand, France, Mai 2002.

Aldanondo M., Clermont P., Geneste L., « Aide à la production de brut en production manufacturière à demande fluctuante ». *MOSIM'97*, Rouen, France, Juin 1997.

Bernard A., « Modèle et approches pour la conception et la production intégrée ». *APII – Journal Européen des Systèmes Automatisés - JESA* (34), 2000.

Blonco E., « L'émergence du produit dans la conception distribuée, vers de nouveaux modes de rationalisation dans la conception de systèmes mécaniques ». *Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier, France*, 1999.

Blostein D., Fahmy H., Grbavec A., « Graph Grammars and Their Application to Computer Science ». *Issues in the Practical Use of Graph Rewriting, lecture notes in Computer Science*, pp.38-55, Springer-Verlag, 1994.

Bonnevault C., Couffin F., Faure J., M., « Méthodes et modèles pour la description des processus de conception dans un contexte de travail coopératif » *Journée Recherche Concurrent Engineering, JRCE*, Paris, 24-25 janvier 2001.

Bouchard H., Tollenaere M., « Les SGDT : concepts fondamentaux et approche didactique », *2nd Congrès Franco Québécois de Génie Industriel*, Albi, France, 1997.

Boucher X., « Contribution méthodologique pour la gestion de filières métiers dans un contexte d'Ingénierie Concourante ». *Thèse de doctorat de l'Université Aix-Marseille III, France*, 1999.

Boudouh T., « Modélisation et évaluation d'organisations industrielles en ingénierie simultanée. Approche méthodologique pour la mise en œuvre de solutions de conception intégrée ». *Thèse de doctorat de l'Université de Bordeaux I*, France, 2000.

Boujut J., F., « Enjeux et formes des pratiques coopératives dans la conception ». Atelier PROSPER, Paris, 2000.

Bourjault A., « Contribution à une approche méthodologique de l'assemblage automatisé : élaboration automatique des séquences opératoire ». *Thèse de doctorat d'état de l'université de Franche-Comté*, 1984.

Boyer R., Freyssenet M., « Les uns fusionnent, les autres pas. La variété des stratégies de profit et des modèles productifs à l'ère de la mondialisation ». In *Reasons and Variety of M&A Processes. Actes du GERPISA n°36*, pp.33-56, mars 2004.

Brown D., C., « Defining Configuring, Artificial Intelligent for Engineering Design, Analysis and Manufacturing ». Special Issue: *Configuration Design*, vol. 12(4), pp. 301-306, 1998.

Brown D., C., Chandrasekaran B., « Expert system for a class of mechanical design activities, knowledge Engineering in Computer Aided Design ». *Elsevier*, Amsterdam, 1985.

Bunke H., « Attributed Programmed Graph Grammars and Their Application to Schematic Diagram Interpretation ». *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence - PAMI*, vol. 4(6), pp. 574-582, 1982.

Chandrasekaran B., « Design Problem Solving: A Task Analysis ». *AI Magazine*, vol. 11(4), pp. 59-71, 1990.

Clermont P., « Apport de réactivité dans le cycle de développement du produit: formalisation d'une démarche ». *Thèse de doctorat de l'Université de Bordeaux*, France, 1998.

Corbel P., « Fiche de synthèse : Economies d'échelle, économies d'apprentissage et Progrès technique ». URL : <http://www.ecogexport.com/economies/gainsprodimp.htm>, 2005.

Danloy J., Petit F., Leroy A., De Lit P., Rekiek B., « A pragmatic approach for precedence graph generation ». In *Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning - ISATP99*, pp. 387-392, Porto, Portugal, July 1999.

De Lit P., « A comprehensive and integrated approach for the design of a product family and its assembly system ». *Thèse de doctorat de l'Université Libre de Bruxelles*, Belgique, 2001.

De Terssac G., « Le travail de conception : de quoi parle-t-on ? ». *Coopération et conception*, Edition Octares, 1996.

DiMarco P., Eubanks C.F., Ishii K., « Compatibility analysis of product design for recyclability ». *Proceedings of the 1994 ASME Design Engineering*, Minneapolis, 1994.

Dixon J., R., « Designing with features: building manufacturing knowledge into more intelligent CAD systems ». *ASME Manufacturing Conference*, Atlanta, USA, 1998.

Dixon J., R., Duffey M., R., Irani R., K., Meunier K., L., Orelup M., F., « A proposed taxonomy of mechanical design problems ». *Proceedings of the ASME Computers in Engineering Conference*, American Society of Mechanical Engineers, San Francisco, 1988.

Djemel N., « Contribution a la conception des systèmes flexibles d'assemblage dans le cas multi-produits ». *Thèse de doctorat de l'université de Franche-Comté*, France, 1994.

Dooley L., O'sullivan D., « Systems innovation: managing manufacturing systems redesign ». *Int. J. Computer Integrated Manufacturing*, vol. 13(5), pp. 410-421, 2000.

Du X., Jiao J., Tseng M., M., « Architecture of Product family: Fundamentals and Methodology ». *Concurrent Engineering: Research and Applications*, vol. 9 (4), pp. 309-325, 2001.

Du X., Jiao J., Tseng M., M., « Graph Grammar Based Product Family Modeling ». *Concurrent Engineering: Research and Applications*, vol. 10 (2), pp. 113-128, 2002.

Dufrène L., « Contribution à une méthodologie de conception des systèmes d'assemblage pour familles de produits ». *Thèse de doctorat de l'université de Franche-Comté*, France, 1991.

Dupont L., Erol M., Cormier G., Turkkan N., « La standardisation des composantes : modèles et algorithmes ». *3^{ème} congrès international franco québécois de Génie industriel*, Montréal, Mai 1999.

Engels G., Schürr A., « Encapsulated Hierarchical Graphs, Graph Types, and Meta Type ». *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, vol.2, 1995. URL: <http://www.elsevier.nl/located/entcs/volumes2.html>.

Eppinger S., D., Salminen V., « Patterns of product development interactions ». *International Conference on Engineering Design – ICED*, Glasgow, August, 2001.

Erens F., J., « *The Synthesis of Variety: Developing Product Families* ». *PhD thesis*, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, The Netherlands, 1996.

Erens F., J., Verhulst K., « Architectures for product families ». *Computers in Industry*, vol.33 pp.165-178, 1997.

Erol M., « Prise en compte de la flexibilité dans la planification dynamique », *Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble*, France, 1999.

Eynard B., « Modélisation du produit et des activités de conception, contribution à la conduite et à la traçabilité des processus de conception ». *Thèse de Doctorat, de l'Université de Bordeaux*, France, 1999.

Falkenauer E., Delchambre A., « A genetic algorithm for bin packing and line balancing ». In *Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.186-1192, Los Alamitos, CA, May 1992. IEEE Computer Society Press.

Fan I., S., Liu C., K., « Product family and variants: Definition and models ». In J. Ashayeri, W. G. Sullivan, and M. M. Ahmad, editors, *Flexible Automation and Intelligent Manufacturing 1999*, Tilburg, The Netherlands, June 1999.

Foulard C., « *La modélisation en entreprise, CIM-OSA et ingénierie simultanée* », Hermes, France, 1994.

Fujita K., Sakaguchi H., Akagi S., « Product variety deployment and its optimization under modular architecture and module commonalization ». *Proceeding of DETC'99*. Las Vegas, Nevada, USA, September, 1999.

Gales L., Mansour-Cole D., « User involvement innovation projects: Toward an information processing model », *Journal of Engineering and Technology Management JET-M*. vol.12, pp. 77-109, 1995.

Gero J., S., « *Artificial Intelligence in design* ». *Computational Mechanics Publications*, Springer-Verlag, Southampton, UK, 1989.

Gero J., S., « Design prototype: a knowledge representation schema for design ». *AI Magazine*, vol.11 (4), pp. 26-36, 1990.

Gero J., S., « Mass customization of creative designs ». , *International Conference on Engineering Design ICED'01*, Glasgow, 2001.

Gershenson J.K., Prasad G.J., Allamneni S., « Modular product design: a life cycle view ». *Journal of Integrated Design and Process Science*, vol.3 (4), pp. 13-26, 1999.

Gershenson J.K., Prasad G.J., Zhang Y., « Product modularity: measures and design methods ». *Journal of Engineering Design*, vol.15 (2), pp. 33-51, 2004.

Gigch J., P., V., « System design modeling and metamodeling ». *Plenum Press*, New York and London, 1991.

Girad P., Merlo C., Doumeingts G., « Capitalisation des connaissances en ingénierie de la conception ». *Proceeding of 4th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering- IDMME'02*, Clermont – Ferrand, France, Mai 2002.

Guéna F., « Réutilisation de solutions génériques pour résoudre des problèmes de conception ». *Thèse de doctorat de l' Institut Blaise Pascal, Paris VI*, France, 1992.

Harani Y., « Une approche multi modèles pour la capitalisation des connaissances dans le domaine de la conception ». *Thèse doctorat de l'Université de Grenoble*, France, 1997.

Hatchuel A., Weill B., « La théorie C-K, Fondement et usage d'une théorie unifiée de la conception ». *International Conference in the sciences of Design*, Lyon, France, 2002.

Henrioud J., M., « Contribution à la conceptualisation de l'assemblage automatisé : nouvelle approche en vue de la détermination des processus d'assemblages ». *Thèse de doctorat d'état de l'université de Franche-Comté*, 1989.

Hillstrom F., « Applying axiomatic design to interface analysis in modular product development. ». *Advances in Design Automation ASME*, pp. 67-76, 1994.

Huang G., Q., « *Design for X: concurrent engineering imperatives* ». Chapman et Hall, 1996.

Ishii K., Juengel C., Eubanks C.F., « Design for product variety: key to product line structuring ». *Proceedings of the 1995 ASME Design Engineering Technical Conferences – 7th International Conference on design Theory and Methodology*, Boston, 1995.

Jetin B., « Economies d'échelle et économies de variété dans les Pays en Voie de Développement (PVD) : le cas des industries automobiles brésilienne et Sud – coréenne ». Dans positionnement sur le marché et flexibilité productive. *Actes du GERPISA n° 12*, pp. 71-88, décembre 1994.

Jiao J., Tseng M., « An information Modeling Framework for Product Families to support Mass Customization Production ». *CIRP Annals*, vol. 48(1), pp.93-98, 1999.

Jiao J., Tseng M., M., Duffy V., G., Lin F., « Product family modeling for mass customization ». *Computer Ind. Engng.*, vol.35 (3-4), pp. 495-498, 1998.

Jiao J., Tseng M., M., Q., Zou Y., « Generic bill of materials and Operations for high-variety production management ». *Concurrent Engineering: Research and Applications*, vol. 8 (4), pp. 297-322, 2000.

Jiao R., J., Huang G., G., Q., Tseng M., M., « Concurrent Enterprising for Mass Customization ». *Concurrent Engineering: Research and Applications*, vol.12 (2) pp. 83-88, 2004.

José A., Tollenaere M., « Using modules and platforms for product family development: design and organizational implications ». *Proceeding of 5th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering-IDMME'04*, Bath, UK, April 5-7, 2004.

Kanis H., «Usage centred re research for everyday product design ». *Applied Ergonomics*, vol.29 (1), pp. 75-82, 1998.

Kelada J., « La gestion des opérations et de la production : sa place dans l'entreprise ». *Gestion des opérations et de la production* Edition Gaetan Morin, 1994.

Kosanke K., Nell J. G., « Enterprise Engineering and Integration: Building International Consensus ». Springer Verlag – Berlin, 1997.

Kota S., Ward A., C., « Functions, structures and constraints ».In *Conceptual Design*, ed. A.C. Ward, University of Michigan, 1991.

Krause F., L., Kimura F., Kjellberg T., Lu S., C., Y., « Product Modeling ». *CIRP Annals*, vol. (42), pp. 695-706, 1993.

Kusiak A., Wang J., « Decomposition in Concurrent Design, Engineering ». *Concurrent Engineering*, J. Wiley, 1993.

Laakko T., Mäntylä M., « Feature-based modelling of product families ». In *ASME International Computers in Engineering Conference*, vol.1, pp.45-54, 1994.

Lartigue N., « Knowledge and design ». *International Congress- SIA-* September, France, 2003.

Lee H., L., Tang C., S., « Variability reduction through operations reversal », *Management Science*, vol. 44(2), pp. 162-172, 1998.

Lee H., Tang C., « Modelling the cost and benefits of delayed product differentiation ». *Management Science*, vol. 43 (2) pp. 40-53, 1997.

Lefebvre P., Roos P., Sardas J-C., « From the management of expertise to the management of design ». *EURAM Conference*, Stockholm, 2002.

Martin M.V., Ishii K., « Design for variety: development of complexity indices and design charts. » *Proceedings of the 1997 ASME Design Engineering Technical Conferences – 2nd International Conference on design Theory and Methodology*, Sacramento, 1997.

Mayer R., E., « Human nonadversary problem solving, Human and machine problem solving ». *Plenum*, New York, 1989.

McKay A., Bloor M., S., de Pennington A., « A framework for product data ». *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol.8 (5) pp.825-838, 1996.

Meinadier J., P., « Ingénierie et intégration des systèmes ». *Editions Hermès, Paris*, 1998.

Meinadier J., P., « L'intégration des systèmes ». *Presse Universitaire de France*, 1997.

Meinadier J., P., « Le métier d'intégration de systèmes ». *Lavoisier*, 2002.

Menand S., « Modélisation pour la réutilisation du processus de conception multi acteur de produits industriels ». *Thèse de Doctorat, Grenoble, France*, 2002.

Meunier M., « Eléments méthodologiques pour la conception de systèmes flexibles d'assemblage ». *Thèse de doctorat de l'Université de Franche-Comté, France*, 1989.

Meyer H., M., « Revitalize your product lines through continuous platform renewal ». *Research Technology Management*, vol. 40 (2) pp.17-28, 1997.

Meyer H., M., Lopez L., « Technology strategy in a software products company ». *Journal of Product Innovation Management*, vol. 12 (4) pp.294-306, 1995.

Micaëlli J.P., Forest J., « *Artificialisme, Introduction à une théorie de la conception* ». Collection Epistémologie, INSA de Lyon, 2003.

Midler C., « Evolution des modèles d'organisation et régulation économiques de la conception ». *Annales des mines*, 1997.

Miller T., Liberatore M., « Seasonal exponential smoothing with damped trends, an application for production planning ». *International Journal of Forecasting*, vol.9 (4) pp.509-515, 1993.

Ming-Chyuan L., Lung-An C., « A Matrix Approach to the Customer-oriented Product design ». *Concurrent Engineering: Research and Applications*, vol. 13 (2), pp. 95-109, 2005.

Mtopi F., B., E., Dulmet M., Bonjour E., « Concurrent design of product family: from the functional model to the material model ». *Proceeding of 3rd IFAC/IEEE/ACAC Conference on management and control of production and logistics, MCPL 2004*, pp.151-156, Santiago, Chile, 2004a.

Mtopi F., B., E., Dulmet M., Bonjour E., « Different models to support concurrent design of product family ». *Proceeding of 5th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering- IDMME'04*, Bath, UK, April 5-7, 2004b.

Mtopi F., B., E., Dulmet M., Bonjour E., « Product family in concurrent design ». *In proceeding of 10th IFAC/IFORS/IMACS/IFIP symposium on Large Scale Systems: Theory and Applications, LSS 2004*, vol. 1, pp.118-123, Osaka, Japan, 2004c.

Mullins S., Rinderle, J., R., « Grammatical Approaches to Engineering Deseign, Part I: An Introduction and Commentary ». *Research in Engineering Design*, vol. 2(3), pp. 121-135, 1991.

Pahl G., Beitz W., « *Engineering Design: a Systematic Approach* ». Springer-Verlag, London, 2nd édition, 1996.

Perrard C., Lutz P., Bourjault A., Henrioud J., M., « The MAYRAS software: An efficient tool for the rational design of assembly systems ». In *Proceedings of the 1993 International Conference on Assembly*, pp.77-85, Adelaide, Australia, November, 1993.

Pfaltz J., L., Rosenfeld A., « Web Grammars ». *Proc. Lst Int. Joint Conf. Artificial Intelligence*, Washington, D.C, pp. 609-619, 1969.

Pimmler T., Eppinger S., « Integration Analysis of Product Decompositions ». ASME Design Theory and Methodology Conference, Minneapolis, MN, September 1994.

Prasad B., « Concurrent Engineering Fundamentals ». vol. 1 et vol. 2, Prentice Halls, 1997.

Rampersad H., K., « *Integrated and Simultaneous Design for Robotic Assembly* ». Wiley Series in Product Development: Planning, Designing, Engineering. John Wiley and Sons, Inc., Chichester, United Kingdom, 1994.

Rekiek B., De Lit P., Pellichero F., L'Eglise T., Fouda P., Falkenauer E., Delchambre A., « Evolving to integrate logical and physical layout of assembly lines ». In H. R. Parsaei, M. Gen, H. L. Leep, and J. P. Wong, editors, *Proceedings of the 4th International Conference on Engineering Design and Automation (EDA 2000)*, pp. 499-504, Orlando, Florida, August 2000.

Rekiek B., « Multiple-objectives genetic algorithm ». In *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO-99)*, Orlando, Florida, July 1999.

Rosenfeld A., Milgram D., L., « Web Automata and Web Grammars ». *Machine Intelligence vol. 7*, pp. 307-324, Wiley, New York, 1972.

Sako M., « Modularity and outsourcing: the nature of co-evolution of product architecture and organisation architecture in the global automotive industry ». *11 ème rencontre Internationale de Gerpisa*, juin, Paris, 2003.

Savolainen, T., Beeckmann D., Groumpos P., Jagdev H., « Positioning of modelling approaches, methods and tools ». *Computers in Industry*, vol. 25(3) pp.255-262, 1995.

Shehab, E.M., Abdalla H.S., « An Integrated Prototype Systems for Cost-Effective Design ». *Concurrent Engineering: Research and Applications*, vol. 9 (4), pp. 243-256, 2001.

Siddique Z., « Common platform development: designing for product variety ». *Ph.D Thesis. Georgia Institute of Technology*, USA, 2000.

Siddique Z., Rosen D., W., « On the applicability of product variety design concepts to automotive platform commonality ». *Proceedings of the 1998 ASME Design Engineering Technical Conferences*, Atlanta, 1999.

Siddique Z., Rosen D., W., « Product platform design: A graph grammar approach ». In *Proceedings of the DETC'99: 1999 ASME Design Engineering Technical Conferences*, Las Vegas, Nevada, September 1999.

Siddique Z., Rosen D., W., Wang N., « On the Applicability of Product Variety Design Concepts to Automotive Platform Commonality », *Proceedings of DETC'98: 1998 ASME Design Engineering Technical Conferences*, Sept 13-16, Atlanta, Georgia, 98-DECT / DTM-5661, 1998.

Simon H.A., « *Sciences des systèmes, sciences de l'artificiel* ». Version traduite en français par J-L. Le Moigne, édition Dunod, France, 1997.

Simpson T., « *A Concept Exploration Method for Product Family Design* ». PhD thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, 1998.

Simpson T., W., Maier J., R., A., Mistree F., « A product platform concept exploration method for product family design ». *Proceeding of 1999 ASME Design Engineering Technical Conference. DETC99/DTM-8761*, Las Vegas, 1999.

Smith G., F., Browne G., J., « Conceptual foundations of design problem solving ». *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 23 (5), pp. 1209-1219, 1993.

Sohlenius G., « Concurrent Engineering ». *Annals of CIRP*, vol. 41, pp. 645-655, 1992.

Sriram D., Stephanopoulos G., Logcher R., Gossard D., « *knowledge based system: application in engineering design* ». *AI Magazine*, vol. 10 (3), pp. 79-95, 1989.

Stadzisz P., C., « Contribution à une méthodologie de conception intégrée des familles des produits pour l'assemblage ». Thèse de doctorat de l'université de Franche-Comté, France, 1997.

Stadzisz P., C., Henrioud J., M., « An integrated approach for the design of multi-product assembly systems ». *Computers in Industry*, vol. 36, pp. 21-29, 1998.

Subbu R., Sanderson A., C., Hocaoglu C., Graves R., J., « Evolutionary decision support for distributed virtual design in modular product manufacturing ». *Production Planning and Control*, vol. 10(7), pp. 627-642, 1999.

Subramanian A., « Innovativeness: Redefining the Concept ». *Journal of Engineering and Technology Management (JET-M)*, vol.13, pp. 223-243, 1996.

Suh N., P., « *The Principles of Design* ». New York Oxford, Oxford University Press, 1990.

Tarondeau J., C., « *Stratégie Industrielle* ». Ed. Vuibert, Collection: Gestion, 2nd édition, 1998.

Tichkiewitch S., Chapa E., Belloy P., « Un modèle produit multi-vues pour la conception intégrée ». *Productivity in world without borders conference*, Montréal, 1995.

Tseng M., M., Jiao J., « A variant approach to product definition by recognizing functional requirement patterns ». *Computers ind. Engng.* vol. 33 (3-4), pp. 629-633, 1997.

Ulrich K., « The Role of Product Architecture in the Manufacturing Firm ». *Research Policy*, vol. 24(3) pp. 419-440, 1995.

Ulrich K., Tung K., « Fundamentals of product modularity ». In *Issues in Design Manufacture Integration*, vol. 39. ASME, 1991.

Vargas C., « Modélisation du processus de conception en ingénierie des systèmes mécaniques. Application à la conception d'une culasse automobile ». *Thèse de doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan*, France, 1995.

Vargas C., Saucier A., « A language and a tool for the development of a computer aided mechanical design application ». *ISATA*, 1995.

Whitney D., E., « Computer-Aided Design of flexible assembly systems-First Rapport ». *Rapport CSDL-R-1947*, 1986.

Zhang Y., Gesrshenson J.K., Allamnei, S., « An initial study of the retirement costs of modular products ». *Proceedings of the 2001 ASME Design Engineering Technical Conferences – 13th International Conference on design Theory and Methodology*, Pittsburgh, 2001.

Zinn W., « Should we assemble products before an order is received? ». *Business Horizons*, March-April, pp. 70-73, 1990.

