

# INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

N° attribué par la bibliothèque

□□□□□□□□□□

## **THESE**

pour obtenir le grade de  
**DOCTEUR DE L'INPG**

**Spécialité : «Génie Industriel»**

préparée au laboratoire GILCO (Gestion Industrielle Logistique et Conception)  
dans le cadre de l'**Ecole Doctorale «Organisation Industrielle et Systèmes de Production»**

présentée et soutenue publiquement

par

Alberto JOSE FLORES

le 3 novembre 2005

## **Contribution aux méthodes de Conception modulaire de produits et processus Industriels**

**Directeur de thèse : Michel TOLLENAERE**

### **JURY**

M. Serge TICHKIEWITCH	INPG-ENSHMG Lab. Sols, Solides, Structures	Président
M. Michel ALDANONDO	ENSTIMAC-CR GI	Rapporteur
M. Bernard GRABOT	LGP-ENIT	Rapporteur
M. Michel TOLLENAERE	INPG-ENSGI-GILCO	Directeur de thèse
M. Bruno AGARD	École Polytechnique de Montréal	Examineur



*à Christelle,  
à mes parents*



## *Remerciements*

Mes premiers remerciements vont à Serge Tichkiewitch, du laboratoire « Sols, Solides, Structures », pour avoir porté un intérêt spécial à ce travail malgré son emploi de temps bien chargé, ainsi que pour avoir présidé le jury. Merci aussi à Bruno Agard (professeur de l'École Polytechnique de Montréal) pour avoir participé au jury comme examinateur.

Je remercie également l'évaluation rigoureuse de ce mémoire de Michel Aldanondo (ENSTIMAC), et de Bernard Grabot (LGP-ENIT), rapporteurs de ma thèse. Leurs remarques ont été particulièrement constructives et d'une aide significative dans la correction du manuscrit.

J'adresse mes vifs remerciements à Michel Tollenaere, professeur de l'INPGrenoble pour avoir encadré ma thèse. Ses précieux conseils m'ont permis d'organiser et d'améliorer mon travail de recherche.

J'exprime ma gratitude à Christelle Vitry, mon épouse, de m'avoir aidé à corriger les fautes de grammaire et d'orthographe de ce mémoire et de l'avoir rendu plus lisible. Lire et traquer les erreurs lui a demandé un effort considérable et je la remercie pour les nombreuses semaines qu'elle a bien voulu consacrer à ce travail.

Je tiens à remercier tous les membres du laboratoire GILCO. Les discussions à la cafétéria ou lors des conférences m'ont aidé à prendre du recul et à avoir une vision plus objective de mon travail.

Je suis tout particulièrement reconnaissant envers ceux et celles qui ont accepté de lire ce mémoire afin de m'indiquer quelques erreurs, je pense tout particulièrement à Catherine Da Cunha et à Khaled HADJ-HAMOU (chercheurs du laboratoire GILCO).

J'ai une pensée très forte pour mes parents, qui m'ont apporté leur soutien dès le début de mes études.



# Table des matières

Glossaire.....	VII
Liste d'illustrations.....	XI
Liste de tableaux.....	XV
Notations.....	1
Introduction.....	3
Contexte.....	3
Problématique.....	4
Contribution.....	5
Plan de lecture de la thèse.....	5
Chapitre 1. Gestion de la diversité.....	7
Introduction.....	7
1.1 Définition et historique de la diversité.....	7
1.2 Création de diversité ou développement de diversité ?.....	9
1.3 Niveaux de variété.....	10
1.4 Inconvénients d'offrir de la variété.....	12
1.4.1 Mauvaise appréciation du marché.....	12
1.4.2 Coûts et complexité.....	12
1.4.3 Qualité.....	13
1.5 Avantages d'offrir de la variété.....	14
1.5.1 Satisfaction du client.....	14
1.5.2 Réduction du risque.....	15
1.6 Niveau optimal de variété.....	15
1.7 Différentes stratégies pour offrir différents niveaux de variété.....	16
1.7.1 Personnalisation de masses, « Mass customization ».....	16
1.7.2 Modularité.....	19
1.8 Conclusion.....	20
Chapitre 2. Construction de produits modulaires.....	21
Introduction.....	21
2.1 Définition et historique de la modularité.....	21
2.2 Avantages.....	25
2.2.1 Flexibilité.....	25
2.2.2 Coûts.....	27
2.3 Limitations.....	28
2.4 Exemples d'applications réussies.....	29
2.5 Implications au niveau organisationnel.....	30
2.6 L'architecture du produits.....	32
2.6.1 L'utilisation des composants nécessaires.....	36
2.6.2 Interfaces.....	37
2.6.3 La relation composants - fonctions.....	37
2.6.4 La configuration de modules.....	39
2.7 Construction de produits modulaires, revue de la littérature.....	40
2.7.1 Classification systémique.....	40
2.7.1.1 Travaux orientés uniquement sur les éléments.....	41
2.7.1.2 Travaux orientés uniquement sur les relations.....	43
2.7.1.2.1 Le nombre d'interfaces entre modules.....	44
2.7.1.2.2 Standardisation d'interfaces entre modules :.....	46
2.7.1.3 Travaux orientés sur les éléments et les relations.....	46

## Table de matières

---

2.7.2	Classification par type d'outil .....	47
2.7.2.1	Méthodes pas-à-pas de construction de modules .....	47
2.7.2.2	Méthodes de représentation d'un système modulaire .....	50
2.7.2.3	Outils pour évaluer la modularité .....	50
2.7.2.4	Outils mathématiques et algorithmes .....	52
2.7.3	Littérature traitant des activités du cycle de vie du produit. ....	55
2.7.3.1	Conception et développement de produits .....	55
2.7.3.2	Production .....	56
2.7.3.3	Utilisation et Recyclage .....	56
2.8	Conclusions .....	57
Chapitre 3.	Conception de produits avec plateformes .....	59
Introduction	.....	59
3.1	Définition de plateforme .....	59
3.2	Avantages liés à l'utilisation de plateformes.....	60
3.3	Limites du concept plateforme .....	61
3.4	Exemples de réussite de l'application du concept plateforme. ....	61
3.5	Quand utiliser des plateformes .....	62
3.6	Construction de plateformes, revue de la littérature. ....	64
3.6.1	Méthodes pour construire des plateformes.....	64
3.6.2	Approches mathématiques .....	67
3.7	La différenciation retardée .....	70
3.7.1	Stratégies de différenciation retardée.....	70
3.7.2	Relation entre la différenciation retardée et l'utilisation de plateformes .....	71
3.8	Conclusion.....	73
Chapitre 4.	Définition de plateformes de différenciation retardée.....	75
Introduction	.....	75
4.1	Problématique.....	75
4.1.1	Problème d'ordonnancement de la séquence d'assemblage. ....	75
4.1.2	Problème de standardisation de composants.....	77
4.2	Résolution du problème de standardisation de composants.....	80
4.2.1	Introduction .....	80
4.2.2	Hypothèse et introduction .....	81
4.2.3	Méthode.....	82
4.2.3.1	Première étape : définition de données .....	84
4.2.3.2	Troisième étape .....	91
4.2.4	Conclusion.....	100
4.3	Résolution du problème de réorganisation de la séquence .....	101
4.3.1	Introduction .....	101
4.3.2	Méthode.....	102
4.3.3	Conclusion.....	110
4.4	Conclusion.....	111
Conclusions et perspectives	.....	115
Bibliographie	.....	119
Annexes	.....	127
A.	Analyse technique du fonctionnement du moteur électrique .....	127
B.	Matrice de relations entre interfaces de différents types de composants .....	130
C.	Valeurs des interfaces des versions de chaque type de composant.....	131
D.	Coûts des versions de chaque type de composant.....	132
E.	Algorithme en « Branch & Bound » .....	133
F.	Algorithme en « Recuit Simulé ».....	134



G. Versions initiales utilisées sur chaque produit par rapport à chaque type de composant.....	135
H. Algorithme en « Recuit Simulé ».....	136
I. Algorithme génétique.....	137
J. Algorithme en « Branch & Bound ».....	138
K. Méthode alternative D.O.E.....	140
L. Classification de la bibliographie.....	145



# Glossaire

Activités du cycle de vie du produit	<p>Activités de l'entreprise depuis la naissance des produits jusqu'à leur élimination. Exemples : Analyse des besoins, conception et définition du produit, organisation de l'industrialisation, homologation (validation et tests), production, commercialisation, utilisation, élimination du produit, ...</p> <p>Définition de l'auteur utilisée dans le contexte de cette thèse</p>
Architecture du produit	<p>L'architecture du produit est une représentation des produits où un système conceptuel des composants physiques est associé à un système conceptuel des éléments fonctionnels afin de concevoir différents produits dans l'étape de conception, Ulrich (1995).</p>
Besoin	<p>Nécessité éprouvée par un individu ou un groupe d'individus susceptible d'être satisfaite par un produit avec certaines caractéristiques</p> <p>Définition de l'auteur utilisée dans le contexte de cette thèse</p>
Besoins Techniques des produits	<p>Paramètres (voir définition de ce terme) d'un produit que les clients considèrent comme les caractéristiques importantes de différenciation des produits. Ces caractéristiques leur permettent de différencier un produit par rapport à un autre.</p> <p>Définition de l'auteur utilisée dans le contexte de cette thèse</p>
Composant de différenciation	<p>Composant utilisé uniquement dans un nombre réduit de produits permettant la différenciation de ces produits par rapport à d'autres.</p> <p>Définition de l'auteur utilisée dans le contexte de cette thèse</p>
Coût du management du composant	<p>Coûts liés à l'utilisation d'un composant particulier :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• coûts fixes, par exemple d'outillage ou de machines spéciales.</li> <li>• coûts variables, par exemple le prix du matériel, du processus de production, d'assemblage,...</li> </ul> <p>Définition de l'auteur utilisée dans le contexte de cette thèse</p>
Famille de produits	<p>Groupe de biens ou produits originaires d'une même firme, ayant des affinités par leur nature, leur destination, leur distribution, leur clientèle.</p> <p>Définition disponible sur : <a href="http://europa.eu.int/eurodicautom/Controller">http://europa.eu.int/eurodicautom/Controller</a> [référence du 23-08-2005]</p>
Fonction d'un composant	<p>Action d'un composant, ou de l'un de ses constituants, exprimée exclusivement en termes de finalité.</p> <p>Définition de l'auteur utilisée dans le contexte de cette thèse</p>

Fonction d'un produit	<p>Action d'un produit, ou celle de l'un de ses constituants, exprimée exclusivement en termes de finalité. Par exemple, pour une cafetière la fonction principale est de remplir une tasse de café. Les sous fonctions sont: chauffer l'eau, filtrer le café.....</p> <p>Définition de l'auteur utilisée dans le contexte de cette thèse</p>
Gamme de produits	<p>Désigne un ensemble de produits classés en fonction de leurs caractéristiques et de leur prix. Par exemple, produits haut de gamme, bas de gamme, de qualité supérieure, inférieure,....</p> <p>Définition et exemple disponible sur : <a href="http://atilf.atilf.fr/academie9.htm">http://atilf.atilf.fr/academie9.htm</a> [référence du 23-08-2005]</p>
Interface	<p>Paramètre d'un ou plusieurs composants ou modules. Ces caractéristiques permettent la compatibilité entre composants ou modules (d'assemblage par exemple). La dépendance relative des deux composants ou modules associés par le lien entre ces interfaces exprime leur compatibilité. Agard (2002), Sanchez (1999), Erixon (1998).</p>
Economies d'échelle	<p>Une entreprise réalise des économies d'échelle lorsqu'elle réduit ses coûts unitaires en produisant plus (c'est-à-dire lorsque les coûts moyens diminuent à mesure que la production augmente). Il faut pour cela qu'elle puisse répartir ses coûts fixes sur une production plus importante. On peut citer l'exemple de camion de plus grande taille permettant de transporter des volumes plus importants, mais ne nécessitant toujours qu'un chauffeur.</p> <p>Définition et exemple disponible sur : <a href="http://europa.eu.int/comm/competition/general_info/e_fr.html">http://europa.eu.int/comm/competition/general_info/e_fr.html</a> [référence du 23-08-2005]</p>
Economies de « scope » ou gamme	<p>Une entreprise réalise des économies de gamme lorsqu'elle réduit ses coûts de production en élargissant sa gamme de produits et de services (production conjointe). Il faut pour cela qu'elle puisse utiliser des composants identiques, les mêmes installations et le même personnel pour produire plusieurs produits. Par exemple, une banque peut vendre des produits d'assurance dans ses succursales locales afin de répartir ses coûts fixes (tels que le loyer des locaux) sur un plus grand nombre de produits.</p> <p>Définition et exemple disponible sur : <a href="http://europa.eu.int/comm/competition/general_info/e_fr.html">http://europa.eu.int/comm/competition/general_info/e_fr.html</a> [référence du 23-08-2005]</p>
Module	<p>Unité conçue pour être juxtaposée ou combinée avec d'autres. Un module est composé de sous modules ou composants. Les valeurs de ses paramètres (ou interfaces) définissent sa compatibilité avec d'autres modules ou composants. Exemple : cuisine modulaire.</p> <p>Définition de l'auteur utilisée dans le contexte de cette thèse</p>

Paramètres	<p>Spécifications physiques (par exemple, caractéristiques géométriques et dimensionnelles), et fonctionnelles (par exemple type de flux de matériel, d'énergie, de signal, ...).</p> <p>Définition de l'auteur utilisée dans le contexte de cette thèse</p>
Plateforme	<p>C'est un module commun ou réutilisé par différents produits qui, avec l'addition des autres composants ou modules, permet de développer une variété limitée de produits nécessaires. (Krishnan et Gupta, 2001), (Zamirowski, 1995).</p>
Plateforme de différenciation retardée	<p>On considère une « plateforme de différenciation retardée » comme un module commun utilisé sur un ensemble limité de produits. Ce module est assemblé et stocké à l'avance sur la ligne de production et les composants de différenciation sont ajoutés a posteriori sur la ligne de production.</p> <p>Définition de l'auteur utilisée dans le contexte de cette thèse</p>
Standard	<p>Conforme à une norme (synonyme de <i>normalisé</i>). Largement reconnu ou utilisé comme modèle d'autorité ou d'excellence : un travail de référence standard. Normal, familier, ou habituel. Généralement utilisé ou fourni : équipement standard de voiture.</p> <p>Définition disponible sur : <a href="http://www.dictionary.com">www.dictionary.com</a>.</p> <p>Dans le contexte de cette thèse « standard » est synonyme de commun : un composant commun à plusieurs produits.</p>
Standardisation	<p>Adapter à une norme, changer conformément à une norme.</p> <p>Définition disponible sur : <a href="http://www.dictionary.com">www.dictionary.com</a>.</p> <p>Dans le contexte de cette thèse « standardisation » est synonyme de formaliser un composant comme commun à différents produits.</p>
Point de différenciation	<p>Première opération de production où un processus particulier (d'usinage par exemple ou d'assemblage des composants) qui permet la différenciation d'un produit par rapport à un autre.</p> <p>Définition de l'auteur utilisée dans le contexte de cette thèse</p>
Séquence d'assemblage	<p>Ordre d'assemblage</p> <p>Définition de l'auteur utilisée dans le contexte de cette thèse</p>



## Liste d'illustrations

Figure 1-1. Types de variété, Uzumeri et Sanderson (1995).	8
Figure 1-2 Réduction du temps de développement, Smith et Reinsertsen (1991).	8
Figure 1-3. Relations entre les processus R&D et NPD, Mikkola (2003).	10
Figure 1-4. Exemple de segmentation par type et prix de GM. Martin et Ishii (1996).	11
Figure 1-5. Diversité visible, adapté de José et Tollenaere (2004).	13
Figure 1-6. Corrélation entre la qualité du produit et le temps d'assemblage, Erixon (1998).	14
Figure 1-7. Variété optimale de produits	15
Figure 1-8. Stratégies et niveaux de personnalisation, Thyssen et Hansen (2001).	16
Figure 1-9. Stratégies de personnalisation, Lampel et Mintzberg (1996).	17
Figure 1-10. Modularisation dans la chaîne de valeur, Pine (1993)	19
Figure 1-11 Niveau de variété de différents éléments du système	19
Figure 2-1. Variantes des modules pour offrir de la variété, Elgård et Miller (1998).	22
Figure 2-2. Famille de satellites à partir d'une plateforme, (adapté de Gonzalez, 2000)	24
Figure 2-3. L'influence de la conception sur le coût de production	25
Figure 2-4. Réduction du coût en %. Le symbole (+) indique une amélioration qu'il est impossible de mesurer, Erixon (1998) et Östgren (1994).	28
Figure 2-5. Comparaison par rapport à l'organisation, Sanchez et Collins (2001).	31
Figure 2-6. Intégration de différents systèmes dans un système monolithique, adapté de Zamirowski (1995).	32
Figure 2-7. Analyse de l'architecture d'une voiture.	33
Figure 2-8. Processus de développement des produits, Ulrich et Eppinger (2000).	34
Figure 2-9. Caractéristiques de l'architecture, Robertson et Ulrich (1998).	36
Figure 2-10. Types de relations entre composants (St) et fonctions (F), Chakrabarti (2001).	37
Figure 2-11. Types de configuration modulaire, Ulrich et Tung (1991).	40
Figure 2-12. Classification systémique dans la littérature	41
Figure 2-13. Niveau de complexité et couplage d'un système, Mikkola (1999)	45
Figure 2-14. Matrice de modules, Huang et Kusiak (1998).	45
Figure 2-15 Méthode MFD (Modular Function Deployment), Erixon, (1998)	49
Figure 2-16. QFD avec modularité comme le premier objectif de conception, Erixon, (1998)	49
Figure 2-17. Regroupement ou intégration de modules, Erixon (1998).	49
Figure 2-18. Modèle de graphe, Siddique et Rosen (1999).	50
Figure 2-19. Exemple d'évaluation de la modularité	51
Figure 2-20. Problématique du modèle de programmation non linéaire SMD	54
Figure 3-1. La plateforme est le cœur de la famille de produits	60
Figure 3-2. Matrice de décision pour l'utilisation ou non d'une plateforme.	62
Figure 3-3. Matrice pour l'analyse du marché, Zamirowski (1995).	63

## Liste d'illustrations

---

Figure 3-4. Données statistiques, moyennes et écart des attributs, Zamirowski (1995).....	63
Figure 3-5. Moyennes et variations des attributs dans différents segments, Zamirowski (1995).....	63
Figure 3-6. Chemin de décision de différents types de conception. ....	64
Figure 3-7. Trois études, Meyer et al.(1997).....	66
Figure 3-8. Dérivation horizontale (en produits) et verticale (de plateformes), Meyer et al.(1997). ....	66
Figure 3-9. Mise en place de plateformes, Gonzalez (2000). ....	68
Figure 3-10. Méthode en deux phases, Nayak et al. (2000).....	69
Figure 3-11. Utilisation d'une plateforme dans la ligne de production, (José et Tollenaere, 2005 B).....	71
Figure 3-12. La plateforme de produit ..... 71	71
Figure 3-13. La standardisation de composants.....	72
Figure 3-14. Restructuration du processus.....	73
Figure 3-15. Restructuration du processus avec un module.....	73
Figure 4-1. Tableau de bord, Martin et Ishii (1997).....	76
Figure 4-2 Diversité des composants et des opérations de fabrication, Martin et Ishii (1997).....	76
Figure 4-3. Nouvel ordre du processus de production, adapté de Martin et Ishii (1997).....	77
Figure 4-4. Meilleure séquence, adapté de Martin et Ishii (1997). ....	77
Figure 4-5. Standardisation de composants.....	78
Figure 4-6. Modèle PSG : augmentation d'une variété de composants avec une même variété de produits ..... 80	80
Figure 4-7. Modèle PSG : augmentation d'une variété de produits avec la même variété de composants ..... 81	81
Figure 4-8. Evaluation d'un composant ou module (adapté de Jianxin et Tseng, 1999). ....	82
Figure 4-9. Moteur électrique à courant continu, Simpson et al., (2001) ..... 83	83
Figure 4-10. Schéma de la méthode de standardisation.....	83
Figure 4-11. Valeurs des interfaces techniques du produit.....	84
Figure 4-12. Matrice de relations entre interfaces appelées, matrice « Cp1 ». ....	85
Figure 4-13. Fonction principale du lecteur de cassettes, Zamirowski (1995) ..... 86	86
Figure 4-14. Décomposition de la fonction principale du Walkman de Sony, Zamirowski, (1995).....	86
Figure 4-15. Décomposition de fonctions en sous fonctions ..... 86	86
Figure 4-16. Définition de sous fonctions par la technique FAST.....	87
Figure 4-17. Modèle FAST générique du moteur électrique. ....	87
Figure 4-18. Types de composant du moteur électrique à courant continu (bipolaire), Simpson et al. (2001).....	87
Figure 4-19. Décomposition des assemblages du moteur électrique à courant continu.....	88
Figure 4-20. Composants liés avec les fonctions du produit.....	88
Figure 4-21. Modèle PSG initial ..... 89	89
Figure 4-22. Composants réels utilisés. ....	90
Figure 4-23. Exemple des valeurs de la variable « CT » ..... 92	92
Figure 4-24. Modèle PSG avec une valeur importante de « $\alpha$ », José et Tollenaere(2005, A).....	96



Figure 4-25. Effet de l'élimination des interfaces sur le modèle PSG, José et Tollenaere (2005, A) .....	96
Figure 4-26. Modèle PSG avec une valeur importante de « $\delta$ », José et Tollenaere (2005, A) .....	96
Figure 4-27. Modèle PSG avec une valeur importante de « $\eta$ », José et Tollenaere (2005, A) .....	96
Figure 4-28. Choix de versions de composants de l'algorithme .....	97
Figure 4-29. Probabilité qu'une version bon marché soit commune à plusieurs produits.....	97
Figure 4-30. Tendance d'expression 3.2.12, et 3.2.13 par rapport au coefficient ( $\delta$ ).....	98
Figure 4-31. Tendance d'expression 3.2.11 et 3.2.13 par rapport au coefficient ( $\alpha$ ).....	98
Figure 4-32. Résultats d'algorithme en « recuit simulé », José et Tollenaere, 2005 (A).....	100
Figure 4-33. Décomposition des assemblages du moteur électrique à courant continu.....	101
Figure 4-34. Matrice de l'ordre d'assemblage .....	103
Figure 4-35. Configuration d'une séquence .....	103
Figure 4-36. Séquence d'exemple.....	103
Figure 4-37. Données d'entrée $Q_B^A$ .....	104
Figure 4-38. Résultats de l'algorithme génétique .....	106
Figure 4-39. Résultats de l'algorithme génétique .....	106
Figure 4-40. Résultat de GA dans la réorganisation de la séquence .....	107
Figure 4-41. Résultats d'algorithme en « recuit simulé » .....	107
Figure 4-42. Opérateurs de croisement.....	108
Figure 4-43. Choix des P.D.R's. ....	109
Figure 4-44. Configuration de P.D.R's locales ou modules.....	109
Figure 4-45. Données, $Q_B^A$ .....	110
Figure 4-46. Résultats avec algorithme Branch & Bound .....	110
Figure 4-47. Intégration des méthodes d'optimisation.....	112
Figure 4-48. PSG de l'état initial de l'architecture de la famille de produits .....	112
Figure 4-49. Données de restriction de précédence $Q_B^A$ .....	113
Figure 4-50. Résultats de l'intégration des algorithmes.....	113
Figure 4-51. Coût d'un composant en fonction de la demande .....	117
Figure 4-52. Géométrie du bobinage.....	128
Figure 4-53. Test avec 100 observations dans chaque instance.....	144
Figure 4-54. Test avec 200 observations dans chaque instance.....	144



## Liste de tableaux

Tableau 2-1 Comparaison entre la conception modulaire et la conception intégral. Corbett et al. (1991), Pahl et Beitz (1988), Nevins et Whitney (1989), Mikkola (2003), Thomke et al. (1998).....	34
Tableau 2-2. Tableau donnant les caractéristiques physiques d'un matériau .....	44
Tableau 2-3. Résultats de la fonction de modularité.....	52
Tableau 4-1. Références.....	76
Tableau 4-2. Coefficient, SP .....	93
Tableau 4-3. Références.....	112
Tableau 4-4. Résultats de l'intégration des méthodes.....	114



## Notations

$V_{j,p}^k$  : Valeur du "p<sup>ième</sup>" paramètre du "j<sup>ième</sup>" composant dans le "k<sup>ième</sup>" produit

$S_j^k$  : Coût du "j<sup>ième</sup>" composant utilisé dans le "k<sup>ième</sup>" produit

$Cp$  : Nombre total de types de composants

$Z$  : Nombre total de produits dans la famille

$\delta$  : Poids d'importance de la réduction du coût

$\alpha$  : Poids d'importance par rapport au respect des valeurs des paramètres de chaque produit.

$\eta$  : Poids d'importance de la réduction du délai de réponse.

$$SP_j^s = \begin{cases} 1 & \text{Si le "j<sup>ième</sup>" composant est assemblé dans la "S<sup>ième</sup>" étape de production} \\ 0 & \text{Si non} \end{cases}$$

$$Cp1_{j,p,f,t} = \begin{cases} 1 & \text{Si le "p<sup>ième</sup>" paramètre du "j<sup>ième</sup>" composant est lié avec le "t<sup>ième</sup>" paramètre du "f<sup>ième</sup>" composant} \\ 0 & \text{Si non} \end{cases}$$

$$Cp2_{j,p,v,g} = \begin{cases} 1 & \text{Si } V_{j,p}^v \neq V_{j,p}^g \\ 0 & \text{Si non} \end{cases}$$

$$CT_{j,v,f,g} = \begin{cases} 0 & \text{Si } \exists p \wedge \exists t \text{ tel que} \\ & ((Cp1_{j,p,f,t} = 1) \wedge ((Cp2_{j,p,v,g} = 1) \vee (Cp2_{j,t,v,g} = 1))) \forall j, v, f, g \\ 1 & \text{Si non} \end{cases}$$

$$X_{v,j}^k = \begin{cases} 1 & \text{Si la version du "j<sup>ième</sup>" type de composant du "k<sup>ième</sup>" produit} \\ & \text{est utilisé sur le "v<sup>ième</sup>" produit} \\ 0 & \text{Si non} \end{cases}$$

$$Q_B^A = \begin{cases} 1 & \text{Si le } B^{\text{ième}} \text{ type de noeud peut être assemblé} \\ & \text{avant le } A^{\text{ième}} \text{ type de noeud} \\ 0 & \text{Si non} \end{cases}$$

$$P_{v,s}^k = \sum_{f=1}^{CP} (X_{v,f}^k * SP_f^s) \quad \forall v, k, s$$

$$\overline{P}_{v,s}^k = \frac{P_{v,s}^k}{1 - \sum_{\substack{g=1 \\ g \neq v}}^Z \left( P_{v,s}^k * P_{g,s}^k * \prod_{f=1}^{s-1} \left( \sum_{n=1}^Z (P_{v,f}^n * P_{g,f}^n) \right) \right)}$$

$$\sum_{s=1}^{CP} \sum_{v=1}^Z \sum_{k=1}^Z \overline{P}_{v,s}^k : \text{Nombre total d'opérations différentes d'assemblage}$$

## Notations

---

ct : Total des paramètres indépendants du système

dt : Total des observations

kt : Total des instances

$W_t$  : Poids du besoin technique « t »

$UL_p$  : Valeur supérieure du paramètre indépendant « p »

$BL_p$  : Valeur inférieure du paramètre indépendant « p »

# Introduction

## Contexte

De nos jours, la capacité des entreprises à développer plus rapidement des produits a provoqué la mise sur le marché d'une importante variété de produits, Lee (1998). En effet, quelques entreprises (notamment dans le domaine de la construction de voitures, des télécommunications et des composants électroniques) ont été incitées à offrir une variété plus importante de produits à un prix réduit afin de survivre sur le marché, Mikkola (2003). Les industriels peuvent dans certains cas être confrontés à des problèmes pour répondre à une forte demande pour une grande diversité de produits. Fournir une variété de produits en quantités importantes peut s'avérer complexe et coûteux.

Lorsque l'on a besoin de développer des familles de produits très variées dans une entreprise, gérer cette variété peut occasionner une augmentation des coûts dans différentes activités du cycle de vie du produit, du fait notamment des complexités de conception, de gestion et de production inhérentes au nombre croissant des composants. En outre, là où il existe une grande diversité de produits, il est parfois difficile d'avoir des informations sur la demande, notamment lorsque l'on développe des produits nouveaux ou quand le fabricant n'est pas le revendeur final. La production en réponse à de fortes variations d'une demande imprévisible avec un stock réduit peut s'avérer problématique pour les industriels.

Pour ce faire, une des stratégies qui se présente est de développer des produits modulaires. Cette stratégie permet d'offrir un bon compromis entre la variété, la réduction de la complexité, de stocks, et la réduction du délai d'obtention d'un produit fini, Star (1965). Son principal avantage est l'interchangeabilité. La combinatoire de modules permet d'adapter facilement un produit pour en obtenir un autre.

L'utilisation de stocks de modules communs permet d'assembler et de différencier un produit par rapport à un autre, le plus tard possible dans la chaîne de fabrication. Le stockage d'un « portefeuille » de modules permet de réagir et d'assembler rapidement des modules selon les produits souhaités, tout en offrant a priori des avantages économiques, puisque la diversité de produits finaux (ressentie par le client) est obtenue par une combinatoire d'un nombre restreint de modules au lieu d'utiliser une combinatoire d'un nombre plus important de composants.

Cette stratégie implique deux phases : d'abord une production et un stockage des modules communs, ensuite un assemblage en fonction de la demande de produits une fois les commandes fermes obtenues.

Le système de production de la compagnie VALEO (producteur de faisceaux électriques automobiles) sert à illustrer l'application de cette technique : actuellement, VALEO doit fournir des faisceaux électriques dans un intervalle relativement court (son donneur d'ordres travaillant en synchrone). Le nombre de composants s'élève à plusieurs milliers de composants (versions de câbles, connecteurs, fixations) et doit satisfaire une variété de quelques centaines de faisceaux différents. Chaque faisceau représente un coût élevé (coûts de composants spéciaux et temps d'assemblage) et le client attend les composants strictement

nécessaires (car chaque composant supplémentaire provoque un surcoût). Agard (2002) montre comment la définition de modules (sous assemblages de câbles, connecteurs, fixations) permet d'optimiser le délai de fabrication des faisceaux. La substitution de modules permet la configuration et le développement de produits, et la substitution de quelques modules et la réutilisation des autres génèrent des avantages économiques.

Un concept intéressant dans ce sens est la plateforme. Dans la littérature sur la conception modulaire un module commun entre des produits est connu comme « plateforme », Krishnan (2001), Zamirowski (1995), Siddique (1999). On peut observer différents exemples sur le marché, par exemple les châssis des voitures sont des modules communs, qui avec l'addition de composants de différenciation permettent de différencier un produit d'un autre rapidement, réalisant, de ce fait, des économies.

L'utilisation d'une plateforme est devenue une stratégie intéressante lorsque le fabricant rencontre les problèmes d'incertitude par rapport à la demande et dans le cas où il existe une forte pression sur le coût, et que le délai d'obtention de produits finis est réduit.

Dans cette thèse on considère une « plateforme de différenciation retardée » comme un module commun utilisé sur un ensemble limité de produits. Ce module est assemblé et stocké à l'avance sur la ligne de production et les composants de différenciation sont ajoutés a posteriori sur la ligne de production afin de différencier un produit d'un autre.

Cette thèse se focalise sur l'analyse de ce concept.

## Problématique

Dans des situations de très grande diversité qui rendent possibles des millions de combinaisons de composants (cas de construction de voitures ou appareils électroniques), comment choisir les composants de cette plateforme de différenciation retardée ?

Le choix de la plateforme de différenciation retardée doit permettre de respecter les caractéristiques des produits à développer. En outre, le choix des composants d'une plateforme de différenciation retardée doit être en cohérence avec l'ordre de la séquence d'assemblage afin d'éviter d'inutiles opérations<sup>1</sup> sur la plateforme, et de stocker ces plateformes à l'avance pour ajouter les composants de différenciation a posteriori sur la ligne de production. Dans ce cas, comment réorganiser l'ordre d'assemblage ?

Ces dernières questions définissent la problématique de cette thèse : comment faire le choix des composants pour une plateforme de différenciation retardée et quel est l'ordre de la séquence d'assemblage.

Le but de cette étude est de proposer un outil d'aide à la décision permettant de déterminer la solution à ce problème. Pour cela nous traiterons ce problème avec deux méthodes. Une méthode pour le choix des composants, une autre pour le choix de l'ordre de la séquence d'assemblage.

---

<sup>1</sup> Par exemple assembler et désassembler



### Contribution

Le résultat espéré est l'élaboration d'outils d'aide à la mise en place d'une stratégie d'assemblage d'une famille de produits en utilisant une ou plusieurs plateformes de différenciation retardée optimales. Les plateformes de différenciation retardée permettent de différencier plus tard dans la chaîne de production un produit par rapport à un autre. L'avantage principal est de réduire le délai de réalisation des commandes de produits.

Nous allons proposer des plateformes de différenciation retardée à partir du choix des composants utilisés sur un ensemble de produits connus et conçus à l'avance, en prenant en compte, dans un premier temps, les informations sur leurs caractéristiques, les coûts et types d'opération d'assemblage de leurs séquences de production, et dans un deuxième temps à partir de la réorganisation de cette même séquence.

Cette thèse propose donc deux méthodes. La première tentera de quantifier les avantages offerts par le choix de versions de composants des plateformes de différenciation retardée en ce qui concerne le coût des produits, le nombre d'opérations différentes de production et le respect des caractéristiques des produits dont on a besoin dans une famille donnée. Cette étude est, à notre connaissance, originale. Un exemple sera utilisé qui permettra d'illustrer l'application de la méthode. Pour la deuxième méthode, le choix des plateformes de différenciation retardée prenant en compte l'ordre de la séquence de production et le nombre total d'opérations différentes d'assemblage qu'on pourra réduire, est aussi, à notre connaissance, original. Ici aussi, un exemple viendra illustrer notre propos.

Le positionnement des méthodes proposées par rapport à la littérature sera exposé dans le corps de la thèse.

### Plan de lecture de la thèse

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres :

Le Chapitre 1 traite d'une étude bibliographique sur différents aspects de la diversité.

Le Chapitre 2 traite du concept de « modularité » et des différents travaux focalisés sur l'utilisation de modules comme stratégie pour développer une variété de produits. Une classification des travaux est donnée.

Le Chapitre 3 traite du concept de « plateforme » comme méthode modulaire. L'application de cette méthode est d'importance dans un contexte de gestion d'une grande diversité de produits et d'une forte et imprévisible fluctuation de la demande.

Nous analyserons différents travaux de recherche sur la construction de plateformes et nous essayerons de répondre à quelques questions soulevées par certains d'entre eux sur le développement de ces plateformes. Une classification des travaux est donnée.

Dans le Chapitre 4, la problématique générale et les particularités pour la mise en place des plateformes de différenciation retardée sont étudiées et dérivées en deux propositions.



# Chapitre 1. Gestion de la diversité

## Introduction

Ce chapitre s'intéresse au concept de diversité industrielle. On fait référence à la définition de diversité industrielle (dans la partie 1.1) et aux différentes dimensions de la diversité industrielle (dans la partie 1.3). Ce chapitre discute les avantages et désavantages de gérer une diversité de produits (partie 1.4 et 1.5).

Une présentation des implications et stratégies pour la diversification de produits sera présentée dans les parties 1.6 et 1.7.

## 1.1 Définition et historique de la diversité

Le terme diversité est devenu un mot familier dans différents contextes. Il existe une diversité biologique, une diversité génétique, une diversité ethnique, et une diversité culturelle, etc. Dans un contexte industriel, le terme diversité peut faire référence à plusieurs aspects : diversité de métiers, de produits, d'actifs, de composants, etc.

La diversité est synonyme d'hétérogénéité. Hétérogène veut dire composé d'éléments de nature différente, qui n'a pas d'unité, (Le Petit Larousse, 2004).

### Définition 1 « Diversité »

Diversité : n. f. XII<sup>e</sup> siècle. Emprunté du latin *diversitas*, -atis, « diversité, variété, divergence », de *diversus*. État de ce qui est divers. La diversité des formes, des couleurs. La diversité des goûts, des opinions. La diversité des religions. Il y a une très grande, une infinie diversité dans les caractères. (Définition de l'académie française).

Les définitions plus techniques de la diversité de produits se focalisent sur l'identité des produits par rapport à leurs caractéristiques. La diversité est générée par l'existence de différences physiques ou fonctionnelles entre les produits.

C'est après la première guerre mondiale que l'on voit émerger une stratégie de diversification de produits.

Uzumeri et Sanderson (1995) s'attachent à l'idée que la décision d'appliquer une stratégie de diversification doit plutôt se faire en prenant en compte le type de produit à développer, voir Figure 1-1.

Effectivement, la diversification des produits est plus nécessaire sur certains types de produits sur le marché. Il y a des produits, par exemple les composants d'ordinateurs, qui sont lancés sur le marché plus régulièrement et plus rapidement que d'autres types de produits (par exemple, les outils de bricolage).

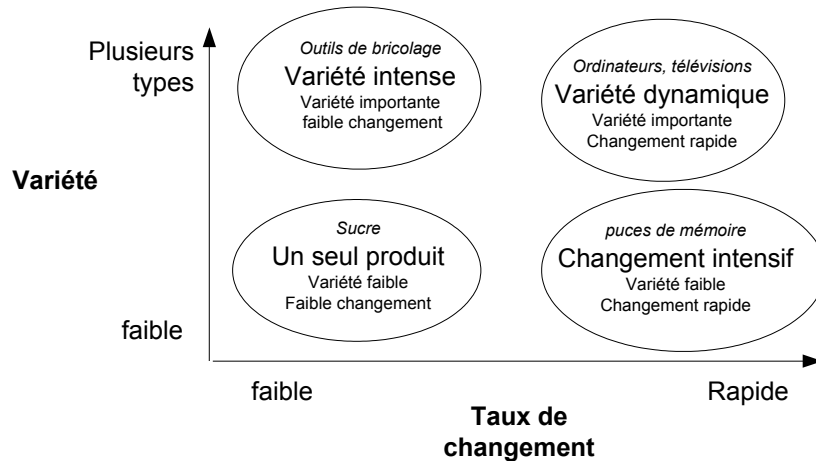


Figure 1-1. Types de variété, Uzumeri et Sanderson (1995).

Selon Pine (1993) le marché des produits en général ne peut pas être considéré comme un groupe homogène. Les besoins et préférences des individus sont variables à travers le temps et sont très variés du fait de la diversité de goûts, modes, statuts sociaux, habitat géographique, normes de différents pays, etc. On peut considérer que c'est le marché qui dicte la « rapidité » et les niches d'opportunité qui existent pour le développement d'une variété de produits.

Evans et Casteck (1998) et Lee (1998) abordent l'idée que la possibilité d'avoir un temps de développement et des cycles de vie plus courts pour les produits ont été des aspects déclencheurs de la diversification de produits dans différentes industries. Smith et Reinsertsen (1991) expliquent comment l'accélération du développement des produits a affecté les entreprises, voir Figure 1-2. Ils montrent comment cette accélération a eu lieu, et la manière dont les entreprises ont réussi à réduire le cycle de développement des produits et les avantages qu'ils en ont tiré.

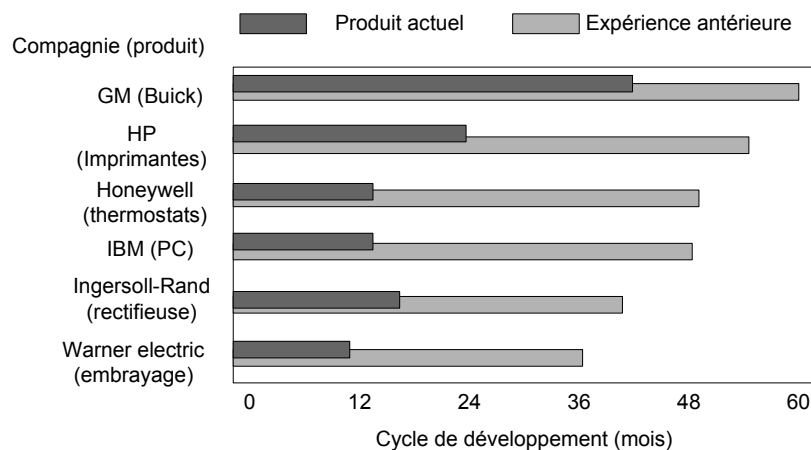


Figure 1-2 Réduction du temps de développement, Smith et Reinsertsen (1991).

Une question qui se pose dans la réduction du temps de développement de produits est de savoir quels produits justifient un développement rapide pour satisfaire la demande de diversité. C'est une question que les managers se posent régulièrement car l'accélération du développement de produits peut représenter un coût important.

Smith et Reinsertsen (1991), font une analyse dans ce sens, par rapport aux coûts et bénéfices obtenus par l'accélération du développement d'une diversité de produits prenant en compte les facteurs suivants : rapidité de développement, coût des produits, performance des produits (qualité) et dépenses de développement. L'analyse utilise un modèle économique pour simuler et optimiser de tels facteurs.

En synthèse, les entreprises ont donc été incitées à offrir une variété plus importante de produits. Dans le cas de produits à variété intense, variété dynamique ou de produits avec un changement intensif, parfois il est trop difficile de satisfaire toute la variété des préférences avec des produits personnalisés de façon économiquement viable pour l'entreprise (les parties suivantes expliqueront cette complexité). A cette contrainte on peut aussi ajouter le fait que le taux de changement exige non seulement un développement rapide (qui représente une analyse complexe) mais aussi, une production rapide des produits, ainsi que l'utilisation d'une diversité d'actifs souvent coûteux.

### 1.2 Création de diversité ou développement de diversité ?

La génération d'une variété de produits peut être faite par de simples adaptations ou changements sur des produits existants (développement de variété), ou par la création de produits innovants (création de variété). Dans ce sens, Erixon (1998) parle de trois stratégies de diversification de produits :

- Stratégie de développement de produits semi nouveaux : il s'agit du développement de produits nouveaux à partir d'un changement mineur dans la conception de produits existants. Ce concept est illustré par Henderson (1990), Abernathy (1988), Utterback (1994) comme « incremental innovation », c'est-à-dire qu'on obtient des produits à partir d'une adaptation minimale d'un produit préexistant afin de satisfaire de nouveaux marchés. On peut considérer que cette stratégie implique un risque au niveau de la différenciation des produits du fait qu'on réutilise des composants, des modes de fabrication existants, etc. Par contre, cette stratégie peut présenter des avantages au niveau des coûts.
- Stratégie de développement de nouveaux produits : elle concerne le développement de produits nouveaux à partir d'une adaptation ou amélioration radicale des produits existants.
- Stratégie de produits innovants : cela concerne le développement de produits qui n'existent pas dans l'offre actuelle. Ce concept est aussi illustré par Henderson (1990) et Tushman et al. (1997) comme « Radical Innovation ». Le développement de nouveaux concepts de conception repose sur les nouvelles technologies, les besoins du marché et les régulations gouvernementales. On peut considérer que le développement d'un produit radicalement différent implique l'utilisation de nouveaux composants et la réalisation d'efforts plus importants au niveau de la conception, de la recherche, de la réorganisation du système de production, etc.

Mikkola (2003) remarque qu'il existe deux activités de conception par rapport au niveau de personnalisation des produits :

- Développement de Produits Nouveaux (NPD) : il s'agit d'une activité qui se concentre sur la conception de prototypes de produits et le développement de processus de production.

- Recherche et Développement (R&D) : celle-ci est normalement classifiée en fondamentale et appliquée. Le but de la R&D appliquée dans le contexte industriel, est d'utiliser des connaissances scientifiques (issues de la recherche fondamentale) pour offrir une nouvelle technologie. Le terme R&D est souvent utilisé comme développement expérimental, qui évoque un travail systématique visant à créer des produits, matériels et services. Selon Hall (1994), cette activité inclut NPD.

Selon Mikkola (2003), il n'y a souvent pas de distinction claire entre R&D et NPD, cependant elle explique que le développement de produits innovants est pris en main par l'activité de R&D (fondamentale et appliquée) en complément de l'activité NPD. Le succès commercial d'un produit innovant basé sur la connaissance scientifique trouve régulièrement ses racines dans la recherche fondamentale. La stratégie de développement de produits nouveaux est plutôt prise en main par la R&D (appliquée) et NPD. La recherche appliquée et NPD sont effectués quand il existe une possibilité commerciale pour appliquer tel ou tel élément scientifique existant. La stratégie de développement de produits semi nouveaux est plutôt du ressort de NPD. En synthèse, ces idées amènent à affirmer que deux activités industrielles sont liées à la création ou au développement d'une diversité de produits : l'activité de recherche et développement (R&D), et l'activité de développement de produits nouveaux (NPD).

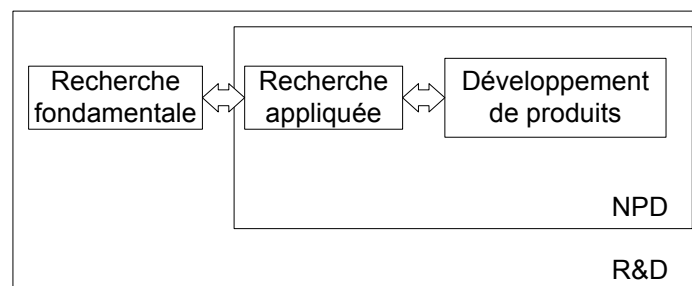


Figure 1-3. Relations entre les processus R&D et NPD, Mikkola (2003).

### 1.3 Niveaux de variété

Ciavaldini et Loubet (1995) s'attachent à différentes sources de diversité : diversité commerciale, diversité technique, et industrielle. Lors de la création d'un produit les départements de marketing choisissent, en fonction de prévisions de l'évolution du marché, l'offre des produits, ainsi que leurs caractéristiques, qui devront être proposés aux clients, ces notions sont considérées comme la « diversité commerciale » nécessaire. Une fois leurs produits et leurs caractéristiques choisis, le choix est répercuté dans un cahier des charges identifié comme « diversité technique ». Le choix de la diversité des composants et leurs opérations de production est appelé « diversité industrielle ».

Dans une autre classification, Agard (2002) mentionne la diversité fonctionnelle, technique, et la diversité du processus de fabrication.

- La diversité fonctionnelle est la définition des fonctions, tâches et caractéristiques des performances que les produits doivent réaliser.
- La diversité technique traduit sur le plan technique le choix des composants et l'ensemble de leurs spécifications précises pour satisfaire les fonctions dont on a besoin sur différents produits.

- La diversité du processus concerne les opérations de production nécessaires à l'obtention des produits. Il s'agit de l'ensemble du processus pour réaliser le choix technique.

Fujita (1999) propose une autre classification similaire : diversité des besoins du client (en termes de caractéristiques générales, par exemple le client « X » a besoin d'une voiture puissante), diversité des fonctions, et diversité des composants et modules de produits (nécessaires au fonctionnement des produits). Dans une autre classification, Erens (1997) mentionne la diversité fonctionnelle (comme la diversité des caractéristiques générales des produits), la diversité technique (diversité des fonctions techniques des produits), diversité physique (la diversité des composants nécessaires par rapport à la diversité technique).

En synthèse, on peut considérer que la diversité commerciale est la source de la diversité par rapport aux différentes activités du cycle de vie du produit.

#### *Types de variété*

Martin et Ishii (1999), mentionnent qu'il faut considérer deux types de variété quand on développe des produits : la variété spatiale et la variété générationnelle.

La variété spatiale est définie comme la variété que l'entreprise met sur le marché à un moment donné. Une variété de produits est offerte pour satisfaire les besoins de différents segments du marché à un moment précis dans le temps. Il considère deux types de segmentation :

- Segmentation par type : ces segments sont définis quand les clients désirent différentes fonctions ou caractéristiques de performance par rapport aux produits.
- Segmentation par coût : cette segmentation est définie quand il y a une gamme de coûts dans un segment « type ». La segmentation par coût est définie quand la demande de produits de différentes gammes exige qu'une compagnie développe une variété de produits de coûts différents sur chaque segment « type », voir Figure 1-4.

La variété générationnelle est définie comme la variété que la compagnie offre sur plusieurs générations de produits. A mesure que le portefeuille de produits vieillit, les compagnies développent des produits améliorés pour divers segments (de « type » ou « coût »). Cette variété de nouvelles générations s'obtient puisque des produits sont mis à jour constamment. Les principaux déclencheurs de la variété générationnelle sont les nouvelles exigences des clients, les pressions sur la réduction du coût, les nouvelles régulations gouvernementales et les standards.

	Family Sedan	Sport utility vehicle	Sports Car
Low cost	Prizm	Blazer	Sunfire
Mid Cost	Malibu	Bravada	Camaro
High Cost	Park Avenue	Escalade	Corvette

Figure 1-4. Exemple de segmentation par type et prix de GM. Martin et Ishii (1996).

### 1.4 Inconvénients d'offrir de la variété

#### 1.4.1 Mauvaise appréciation du marché

Les définitions les plus techniques en ce qui concerne la diversité se focalisent sur l'identité des produits en fonction de leurs caractéristiques physiques ou fonctionnelles. Cette diversité de produits, avec différentes caractéristiques de différenciation par rapport au point de vue du client, est considérée comme la diversité commerciale d'une entreprise. On peut dire que la mauvaise définition de la diversité commerciale peut amener à l'insatisfaction du client, et ainsi représenter un risque pour l'entreprise. Il est par fois difficile de déterminer les intervalles de tolérance, au sein desquels, les produits seront ou non considéré comme différents. Gérer une variété de produits avec des caractéristiques différentes peut représenter un risque économique si les produits ne sont pas correctement différenciés les uns par rapport aux autres.

#### 1.4.2 Coûts et complexité

Meyer et al.(1997) et Zamirowski et Otto (1999) expliquent que le développement d'une variété de produits est une activité complexe.

La diversité commerciale débouche sur la diversité technique. Cette diversité technique débouche sur le choix des composants et leurs opérations de production. Il est intéressant de noter que si les clients ou le marché sont attachés à la diversité commerciale (diversité des produits), les fabricants ou industriels considèrent quant à eux la diversité technique et industrielle comme source de complexité et de coûts dans les activités du cycle de vie du produit.

Développer une variété plus importante de produits amène à considérer de nouveaux composants, d'autres contraintes de conception et de production. Habituellement les coûts associés à l'utilisation de composants spéciaux sont nombreux : la chaîne de production doit traiter des processus de production spéciaux, utiliser de l'outillage spécialisé, des spécifications et des tolérances spéciales, fournir des efforts additionnels par rapport à l'organisation du personnel, réaliser plus d'installations et, dans certains cas, penser à de nouvelles réorganisations du système de production. Les opérations de production sont plus nombreuses et diverses ce qui impose d'avoir une meilleure organisation et de faire plus attention à l'ordonnancement des tâches. Cela amène aussi à avoir une organisation plus rigoureuse au niveau logistique. Les activités du cycle de vie du produit deviennent donc nombreuses, variées, compliquées et coûteuses. Martin et Ishii (1996) donnent la classification suivante de coûts liés à la variété :

- Coûts liés à la logistique : entretien et négociations avec les fournisseurs, expédition, documentation, management.
- Coûts liés aux matériels : prix par volume, manipulation de matériels,...
- Coûts liés à la main d'œuvre : Set up d'assemblages, formation, perte de temps pour courbe d'apprentissage, ...
- Coûts liés au stockage : coûts de matière première, stock du service après vente, stock de produits obsolètes, etc.



Remplir les conditions du client est cher d'un point de vue de la production. Une variété tangible de produits et de composants provoque en effet une variété intangible de ressources, voir Figure 1-5.

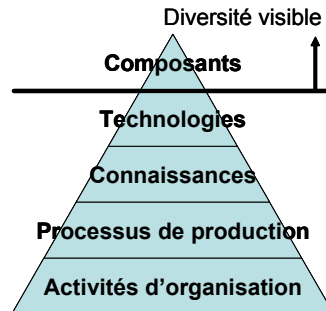


Figure 1-5. Diversité visible, adapté de José et Tollenaere (2004).

Cet aspect est aussi mentionné par Martin et Ishii (1996) comme la variété Stratégique et variété Tactique :

- La variété stratégique est ce qui est apparent aux clients. La définition de la variété stratégique implique l'interaction entre le marketing et le bureau d'études.
- La variété tactique se fait au niveau du bureau d'études et relève des décisions qui affectent la fabrication du produit, comme l'utilisation de différentes pièces et processus, mais qui ne sont pas évidents pour le client.

La variété stratégique est la seule source de complexité et de variété tactique.

### 1.4.3 Qualité

Gérer des activités complexes amène à des problèmes de qualité. La probabilité d'un mauvais choix de conception s'avère plus important. Par exemple, par rapport à la conception de produits, tester une quantité importante de composants et de caractéristiques diminue la facilité d'évaluation de la performance de conception. Ceci, en particulier, quand il existe un haut degré d'interdépendance entre les variables de conception (caractéristiques de conception). L'augmentation du volume de données techniques lié à des caractéristiques et des spécifications exige une meilleure gestion de la conception.

Par rapport à la production, le fait que les opérateurs doivent réaliser de nombreuses tâches différentes (d'assemblage, de procédures) de par l'utilisation de composants différents, amène à plus de risques d'erreurs. La complexification des activités et des tâches peut affecter la qualité des produits, les déplacements et les contrôles de qualité doivent donc être plus nombreux.

La complexification des opérations de production peut amener à une augmentation du temps moyen de production ou d'assemblage de produits. Dans ce sens, Erixon (1998), mentionne

qu'il existe une corrélation entre le nombre de défauts par opération de production et le temps moyen d'assemblage par opération, voir Figure 1-6

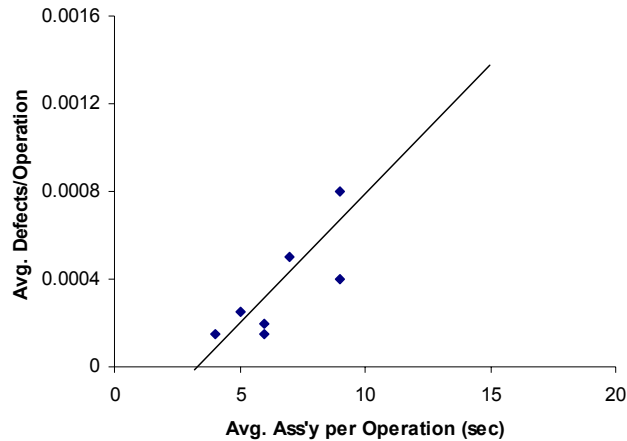


Figure 1-6. Corrélation entre la qualité du produit et le temps d'assemblage, Erixon (1998).

Desai et al. (2001) proposent une autre étude par rapport au lien qui existe entre diversité et qualité. Ils proposent une étude qui évalue la rentabilité par rapport à la gestion d'une diversité de produits en prenant en compte l'impact sur la qualité fonctionnelle des produits.

En conclusion, la diversité peut donc avoir un impact négatif sur la qualité. Les activités de production peuvent devenir complexes et exigent plus de temps.

## 1.5 Avantages d'offrir de la variété

### 1.5.1 Satisfaction du client

Une stratégie de diversification de produits finaux permet d'exploiter de nouveaux marchés avec de nouveaux produits. Cela permet d'assurer le positionnement de l'entreprise et de générer plus de bénéfices. En effet, dès les années soixante répondre exactement au désir et aux besoins des consommateurs est considéré comme une source de gains et une capacité accrue d'appropriation de segments du marché, Tarondeau (1998).

L'industrie des appareils photographiques illustre bien ce contexte. En 1987, quand Fuji a introduit la QuickSnap, un appareil de 35 mm jetable, Kodak n'avait pas de produit similaire. Mais en 1994 Kodak a offert le double de produits que Fuji et a obtenu plus de 70 pour cent du marché aux U.S.A. Une partie du succès de Kodak a été attribuée à la stratégie de développement d'une variété de produits liée à l'utilisation de modules communs. Kodak a redessiné ses modèles (un modèle de base plus quatre autres modèles additionnels) en partageant des composants et de processus de production, Wheelwright et al. (1995).

La satisfaction du client et l'augmentation de possibles ventes sont à mettre en relation avec le respect des critères et caractéristiques physiques ou fonctionnelles des produits. Le non respect de telles caractéristiques peut engendrer la perte de parts de marché.

### 1.5.2 Réduction du risque

Une stratégie de diversification de produits finaux permet aussi de réduire le risque de pertes de bénéfices au niveau global dans l'entreprise dus à la non vente de certains produits. Lorsque l'on lance des produits nouveaux et que l'on gère une variété plus importante, les pertes sur les produits non vendus sont amorties sur l'ensemble des bénéfices des produits vendus par l'entreprise. Si l'entreprise gère une variété réduite de produits, le risque d'un échec commercial peut avoir un effet négatif plus important dans l'entreprise.

### 1.6 Niveau optimal de variété

La non satisfaction des clients engendre, comme on l'a mentionné, des coûts d'opportunité. Les clients non satisfaits ne reviennent pas et vont chez la concurrence. D'un autre côté, la diversité des produits nécessite des ressources qui induisent des coûts (stocks, machines spéciales et divers coûts indirects). Il s'avère donc nécessaire d'évaluer les coûts par rapport aux bénéfices pour trouver une variété optimale, voir Figure 1-7. Tarondeau (1998) évoque ce problème de la diversité optimale.

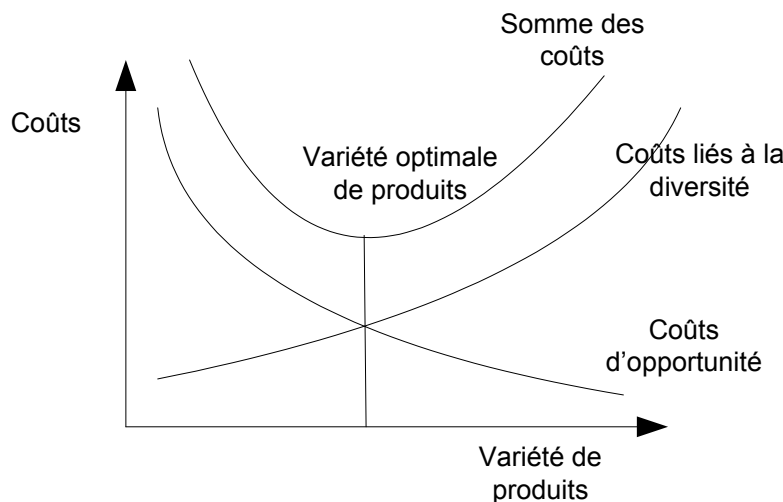


Figure 1-7. Variété optimale de produits

Si la perte de clients est plus coûteuse que la variété alors il s'avère nécessaire d'utiliser des produits spéciaux pour les clients. Si le coût de la variété est plus important que les coûts d'opportunité alors le choix optimal est d'utiliser une moindre quantité de variantes. La plupart sont des cas intermédiaires où il faut trouver un équilibre entre les bénéfices grâce aux économies d'échelles (du fait d'une variété réduite) et les bénéfices sur les ventes (du fait d'avoir une variété importante). Le problème de l'évaluation des avantages et des coûts liés à un tel équilibre se pose donc.

### 1.7 Différentes stratégies pour offrir différents niveaux de variété

Thyssen et Hansen (2001) donnent des stratégies précises liées à la demande, à la taille des lots de stockage et au degré de personnalisation des produits (voir Figure 1-8). Si la demande est moyenne, ils proposent une stratégie concentrée sur la production flexible comme étant la meilleure option. Dans ce cas, il faut disposer de procédures et d'opérations d'assemblage flexibles et adaptables comme, par exemple, des machines multifonctions. Pour une variété plus faible, la production de masse s'impose. McDonald's est un exemple parfait de cette stratégie, la variété des produits n'est pas importante et la production de menus est basée sur une production de masse des ingrédients : pain, viande, légumes.

Pour une variété faible à forte demande, l'utilisation d'un processus continu est la meilleure option (par exemple la production de sucre). Pour une variété plus forte avec une demande importante il est recommandé d'utiliser la stratégie de « Mass customization ».

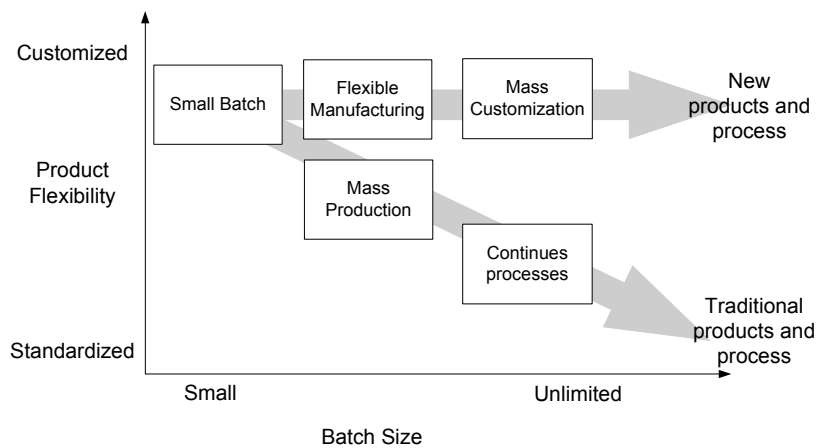


Figure 1-8. Stratégies et niveaux de personnalisation, Thyssen et Hansen (2001).

#### 1.7.1 Personnalisation de masses, « Mass customization »

La notion de « Mass customization » a émergé dans les années quatre-vingts. La définition la plus répandue de « Mass customization » par rapport à la conception de produits est celle de Pine (1993) :

##### Définition 2 « Mass customization »

Mass customization est une stratégie qui concerne la production de produits (ayant différentes spécifications) avec l'utilisation de composants différents qui peuvent être assemblés à partir d'un certain nombre de configurations, Pine (1993).

La demande croissante de la diversité de produits et la personnalisation de ces produits ont été des éléments déclencheurs de cette personnalisation de masses des produits. Ce concept a gagné plus d'intérêt depuis que les technologies de l'information et les systèmes de production flexible ont permis la production en masse avec un coût réduit.

L'objectif de « Mass Customization » est d'obtenir des produits personnalisés (pour obtenir des économies de scope<sup>2</sup>) à un prix réduit (pour obtenir des économies d'échelle).

Pour comprendre le concept de « Mass Customization », Lampel et Mintzberg (1996), et Mikkola (2003), proposent un ensemble de stratégies associées à un degré de personnalisation de produits, voir Figure 1-9. La personnalisation peut commencer par les activités les plus proches des clients, la standardisation (utilisation de composants et activités communs) par contre, peut commencer dans les premières activités du cycle de vie du produit, c'est-à-dire, la conception :

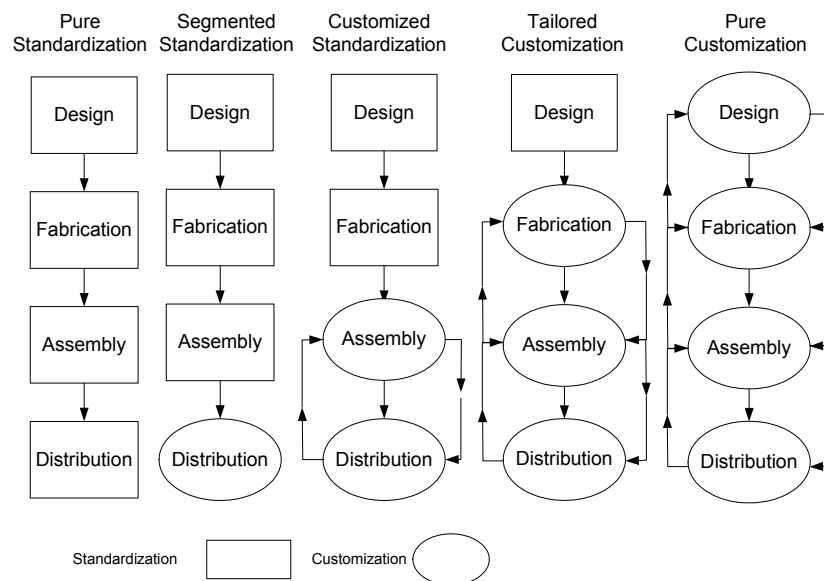


Figure 1-9. Stratégies de personnalisation<sup>3</sup>, Lampel et Mintzberg (1996).

- **Standardisation pure (pure standardization) :** cette stratégie vise le plus grand groupe d'acheteurs. Des produits communs sont produits pour satisfaire le plus grand nombre. Les acheteurs n'ont aucune influence directe sur la conception, la production, ou les décisions de distribution. Par exemple : le sucre, le papier.
- **Standardisation segmentée (segmented standardization) :** cette stratégie vise à satisfaire un groupe particulier de clients. La variété de produits est faible. Un produit de base est modifié pour couvrir un marché bien défini mais pas sur demande des clients. Les clients ont le choix parmi quelques produits sans avoir d'influence directe sur les décisions de conception ou de production. Les clients ont une influence limitée sur la distribution (activité de l'entreprise la plus proche des clients). Exemple : lait (entier, écrémé ou 0% de matière grasse)
- **Standardisation adaptée aux besoins du client (customized standardisation) :** cette stratégie permet de configurer et de choisir des produits à partir de composants définis à l'avance,

<sup>2</sup> Ce terme fait référence aux économies associées à la diversité ou marketing de produits. Par exemple pour un vendeur, les ventes peuvent être plus efficaces avec un portefeuille varié qu'avec un seul produit. Le coût de ventes (de voyages par exemple) est distribué sur une base de revenus plus importante. L'efficacité est améliorée et les coûts par produit sont réduits, Wikimedia, (2003).

<sup>3</sup> Les flèches correspondent au partage d'information et coordination

ces composants sont produits en série. Souvent, la variété des composants est très limitée. La fabrication est commune entre les produits (standard) et l'assemblage ne l'est pas. Les clients choisissent seulement la façon dont le produit est assemblé et distribué. Cette stratégie est mentionnée comme modularisation ou configuration. Exemple : les ordinateurs (Dell).

- Personnalisation (tailored customization) : cette stratégie adapte la fabrication, l'assemblage, et la distribution aux besoins du client. Le fabricant contrôle la conception et offre diverses options. Selon le produit, le fabricant peut être disposé à modifier la conception pour satisfaire les besoins de client. Exemple : vêtements faits sur commande.
- Personnalisation pure (Pure Customization): cette stratégie est l'opposé de la standardisation pure. Elle exige du client et du fabricant de collaborer comme associés pour développer le produit. Exemples : les satellites.

La stratégie « Customized standardisation » est inhérente à la « Mass Customisation » puisque l'on utilise des composants interchangeables, qui sont produits et fabriqués de la même façon, elle permet d'assembler un certain nombre de configurations de produits. Ceci permet d'obtenir des produits personnalisés à un coût réduit.

Pine (1993, chapitre 8), propose cinq méthodes pour réussir la personnalisation de masses. La liste commence avec la plus simple, et finit avec celle qui exige le changement le plus radical de l'organisation par rapport au développement de produits et à la production :

- Personnalisez des services avec des produits et des services standard. Cette méthode se focalise sur ces aspects : les produits sont développés et fabriqués de la même façon (composants avec une conception standard et production standard), la personnalisation intervient grâce à l'addition d'autres produits standards ou services personnalisés dans l'étape de distribution et marketing. Par exemple, beaucoup de compagnies aériennes offrent des services standards et la différenciation dans la « classe affaires » et dans la « première classe » se fait par le choix de différents services spéciaux : repas, accès à des films, magazines, journaux, téléphones, modems pour l'internet.
- Créez des produits et des services « personnalisables ». On réalise le développement de produits de façon à ce qu'ils soient adaptables (par exemple les têtes des rasoirs « Gillette » sont adaptables ou ajustables), ceux-ci sont produits de la même façon, et ils sont vendus et distribués comme des produits adaptables aux besoins du client.
- Faites la personnalisation au moment de la livraison. Les produits ont une conception standard, suivent un processus de production standard, mais sont vendus comme produits personnalisés avec l'assemblage de quelques composants de différenciation au moment de la distribution.
- Fournissez une réponse rapide dans toute la chaîne de valeur. Cette méthode est basée sur la réduction de la durée des cycles de développement, de production, marketing (temps de traitement de l'ordre de production) et de distribution. L'exigence d'une livraison rapide du client déclenche une réaction en chaîne qui découle du point de livraison vers la distribution, les processus marketing, les procédés de production, et finalement le procédé de développement.
- Selon Pine (1993), la meilleure option pour achever la personnalisation de masses est la création de produits modulaires qui peuvent être interchangeables et configurés dans une grande variété de produits et services, voir Figure 1-10. Des économies de « scope » sont obtenues en employant des modules (groupes de composants) à plusieurs reprises dans

différents produits, des économies d'échelle sont obtenues par l'utilisation de volumes plus importants de composants, et la personnalisation d'une variété de produits est obtenue par le nombre de produits qui peuvent être configurés.

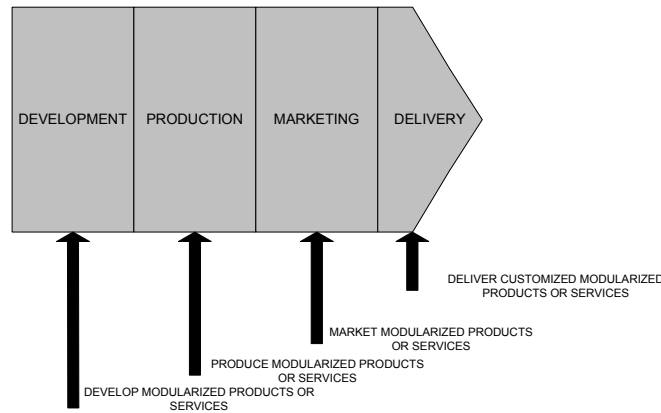


Figure 1-10. Modularisation dans la chaîne de valeur, Pine (1993)

### 1.7.2 Modularité

Sanchez (1999, 1997) explique que l'utilisation et la substitution de variantes de modules ou de composants peut atteindre des millions de configurations. En général, un produit composé de « x » composants ou modules fonctionnels {a,b,...,x}, ayant chacun différentes versions, peut être configuré {a1...ai,b1... bj, x1...xn}, ce qui donne {i\*j\* ...n} variations de produits. Une grande quantité de variantes de produits peut être obtenue à partir d'un nombre limité de versions de composants ou modules.

*Remarque : Dans cette thèse on considère qu'un module peut être lui-même constitué de modules, qu'un module peut être un composant d'un autre module, qu'un module peut avoir un ou plusieurs composants, et enfin qu'un module peut aussi être le produit final.*

On peut considérer que le nombre de configurations de produits ou de combinaisons de modules dépend du niveau de détail du système analysé, voir Figure 1-11.

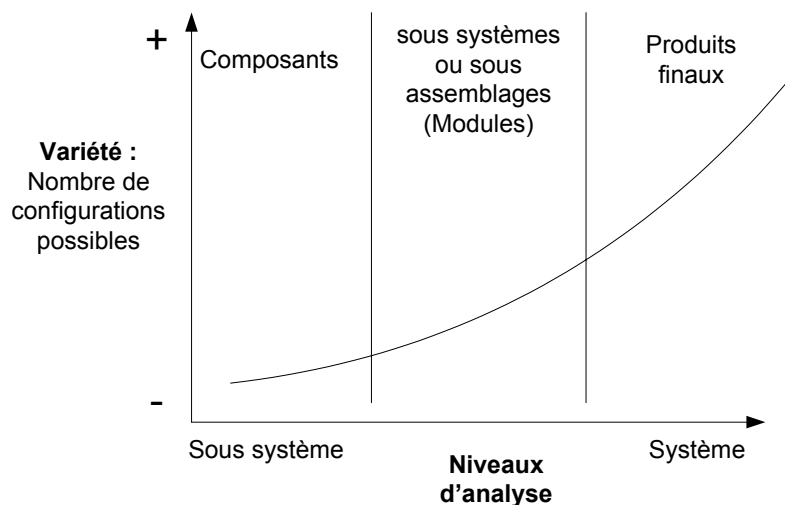


Figure 1-11 Niveau de variété de différents éléments du système

La Figure 1-11 suggère que la combinaison d'un ensemble de composants permet le développement d'une variété plus importante de modules (ou sous assemblages). La configuration de modules permet à son tour le développement d'une variété encore plus importante de produits finaux. Dans ce cadre, plus le système se rapproche du consommateur final, plus la diversité augmente, passant d'une dizaine de composants (pour les premiers fournisseurs de la chaîne logistique) à plusieurs millions d'options de produits. La capacité d'obtention d'une quantité de produits finaux dépend du nombre de combinaisons possibles de sous éléments (composants ou modules). On remarque ainsi que chaque acteur de la chaîne de valeur obtient une variété importante de produits (ou modules) à partir d'une variété faible de sous composants ou sous modules. Les entreprises qui fournissent les produits finaux ont une variété faible de modules (ou composants) à gérer par rapport au nombre important de produits finaux offerts. Plus le fournisseur se rapproche du consommateur final, plus il a la possibilité d'offrir une diversité importante. La capacité de configurer ou de personnaliser une masse de produits (Mass customization) est fonction du choix adéquat du portefeuille des composants ou/et des modules. Un tel choix doit se prendre en fonction des produits souhaités, cet aspect sera mentionné par la suite.

### 1.8 Conclusion

Une revue bibliographique très générale du concept « diversité industrielle » nous a permis de montrer différents concepts liés à ce terme.

Ce chapitre mentionne les différentes implications, les types de diversité et quelques stratégies pour satisfaire différents niveaux de diversité. Le concept de « Mass Customization » est mis en évidence comme une technique pour développer une forte variété de produits avec une demande importante. L'utilisation de modules de composants pour configurer des produits est identifiée dans la littérature comme la meilleure stratégie de personnalisation de masses de produits. L'intérêt de cette stratégie est son utilité pour développer une diversité importante mais limitée de produits, pour développer des produits ayant un taux de changement rapide sur le marché, et pour réagir à une fluctuation imprévisible de la demande.

Dans le chapitre suivant on montrera une revue générale du thème « modularité de produits », ainsi que son adéquation pour installer une politique de « Mass Customization » et de gestion d'une grande diversité de produits.



# Chapitre 2. Construction de produits modulaires

## Introduction

Dans ce chapitre nous nous intéresserons au concept de modularité comme stratégie pour la personnalisation de masses des produits « Mass customization ».

La stratégie appelée « modularité » a été mentionnée pour la première fois dans la littérature dans les années soixante. La modularité a comme objectif le regroupement de composants ou d'opérations de production afin de permettre une production plus pratique. Aujourd'hui, la modularité et l'utilisation de plateformes (modules communs entre produits) sont des outils prometteurs du fait qu'ils permettent de trouver un bon compromis entre l'augmentation de la diversité, la réduction du délai d'obtention de produits finaux et la réduction des coûts en découlant de la conception de produits.

Dans ce chapitre on passera en revue le concept de «modularité». Le contexte et la définition seront exposés dans la partie 2.1. Les avantages et limites seront mentionnés dans les parties 2.2 - 2.2.1 - 2.3. Quelques exemples d'applications réussies et leurs implications au niveau organisationnel sont exposés dans les parties 2.4, et 2.5. Le concept d'architecture modulaire est exposé dans la partie 2.6 et une revue des principaux travaux de recherche est exposée dans la partie 2.7.

## 2.1 Définition et historique de la modularité

En termes généraux, module est synonyme de groupe. On peut observer que le principe de regroupement se retrouve partout dans la nature, la formation d'ensembles permet de ranger, gérer, équilibrer, ou optimiser les sous parties d'un grand système. Par exemple, les atomes sont composés d'électrons, protons, neutrons. Fodor (1986), dans son livre «La modularité de l'esprit» considère que le système périphérique du cerveau est constitué de modules (dédiés au traitement spécifique et cloisonné de l'information), certains mobilisés en parallèle pour les tâches cognitives complexes. Le système nerveux central s'est lentement constitué dans l'évolution par apparition de modules fonctionnels de plus en plus efficaces<sup>4</sup>.

Pour la conception et l'industrialisation de produits on utilise cette méthodologie dans le même sens.

Ce concept a été mentionné pour la première fois dans la littérature d'ingénierie par Star (1965), qui a proposé l'utilisation de produits modulaires dans la production comme nouveau concept pour développer, gérer et mettre à jour une variété de produits.

---

<sup>4</sup> L'évolution modulaire est en fait l'un des fondements de la psychologie évolutive

La décomposition des systèmes complexes en pièces plus petites et plus maniables, a été également discutée dans la littérature de gestion et dans celle d'économie<sup>5</sup>.

La «modularisation» est une approche pour concevoir des produits et des processus de production par l'utilisation de sous systèmes ou sous ensembles qui peuvent être conçus de façon indépendante. Ces sous systèmes fonctionnent dans le système de manière harmonieuse, Baldwin et Clark, (1997). Par rapport à la production, la «modularisation» est une approche pour organiser les opérations de production plus efficacement par la décomposition ou le regroupement d'opérations de production en groupes plus simples. Par rapport à la conception de produits, la «modularisation» est une approche pour organiser les conceptions complexes de produits plus efficacement, par la décomposition ou regroupement de composants en groupes plus simples à utiliser. Il permet au concepteur de jouer avec des combinaisons de groupes de composants pour développer une grande quantité de produits.

Le développement de modules de composants lors de la conception est une stratégie qui aide à adapter une grande variété de produits à une demande élevée, dans un court délai. Cet aspect est en cohérence avec la personnalisation de masse des produits « Mass customization », Jianxin et Tseng (1999). La différence par rapport à la stratégie de fabrication flexible « Flexible Manufacturing » (voir Figure 1-8) qui est orientée vers le processus, l'utilisation des modules est une stratégie particulièrement utile dans la conception.

Selon la Figure 2-1 de Elgård et Miller (1998), qui donnent une excellente revue des concepts basiques de modularité, le nombre de produits qui peuvent être développés dépend du nombre de versions de modules et des caractéristiques d'interfaces (voir glossaire) qui permettent de les combiner.

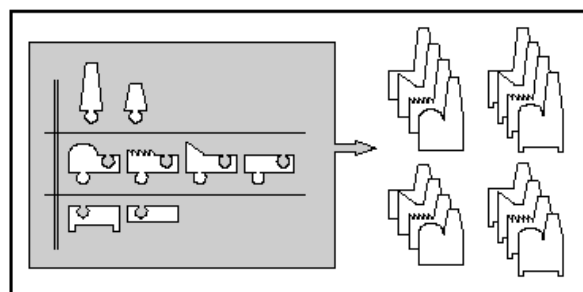


Figure 2-1. Variantes des modules pour offrir de la variété, Elgård et Miller (1998).

Voici quelques définitions formelles de modularité ainsi que quelques termes qui seront utilisés dans cette thèse :

### Définition 3 « Paramètre »

Ce sont des spécifications physiques (par exemple, des caractéristiques géométriques ou dimensionnelles), et fonctionnelles (par exemple, type de flux de matériel, d'énergie, de signal).

---

<sup>5</sup> Principes scientifiques de management par rapport à la standardisation ou spécialisation de la main d'oeuvre Taylor (1967), décomposition de systèmes (Simon 1996), et Smith (1776) vision de la division des activités de production et répartition de tâches.

### Définition 4 « Interfaces »

Ensemble des paramètres d'un ou plusieurs composants ou modules. Ces caractéristiques permettent la compatibilité entre composants ou modules (d'assemblage par exemple). La dépendance relative des deux composants ou modules associés par le lien entre ces interfaces exprime leur compatibilité. Agard (2002), Sanchez (1999), Erixon (1998).

### Définitions 5 « Module »

- Un module est un ensemble d'éléments standardisés ou de composants interchangeables. Galsworth et al. (1994, p.145).
- Un module est un ensemble complexe de composants qui correspond à une fonction spécifique d'un produit, il est interchangeable et peut être produit de façon indépendante. Wilhelm (1997).

En synthèse, on considère qu'il n'existe pas de définitions consensuelles. Dans le contexte de cette thèse, nous considérons qu'un module est une unité conçue pour être juxtaposée à d'autres ou combinée avec d'autres. Il est composé de sous modules ou composants. Les valeurs de ses paramètres (ou interfaces) définissent sa compatibilité avec d'autres modules ou composants.

### Définitions 6 « Modularité »

- C'est un type spécial de conception grâce auquel un groupe de composants est utilisé de manière indépendante en utilisant des interfaces standard, selon Sanchez et Mahoney (1996).
- Le terme de modularité est utilisé pour décrire l'usage de parties communes et indépendantes pour créer des variantes du produit, Huang et Kusiak (1998).
- C'est la conception d'un produit ou d'un processus complexe à partir de plus petits sous-ensembles qui peuvent être conçus indépendamment et qui sont responsables d'une ou plusieurs fonctions dans un système global. C'est donc une stratégie pour organiser efficacement les produits complexes et leurs processus de production. Baldwin et Clark (1997).
- C'est une approche de la conception de produits selon laquelle le produit est assemblé à partir d'un ensemble d'unités communes ou standard. Les différentes combinaisons d'assemblage d'un groupe donné d'unités permettent la conception de différents modèles et variations de produits finaux, Ernst et Kamrad (2000).

Par rapport au concept de « Modularité », il n'y pas de définitions consensuelles. On considère donc que ces définitions sont complémentaires.

### Définitions 7 « Produit Modulaire »

- C'est une architecture (voir glossaire) dans laquelle sont définies les interactions entre modules. Chaque module physique permet un ensemble de fonctions, Ulrich et Eppinger (2000).
- Dans l'architecture d'un produit modulaire la standardisation d'interfaces entre composants est spécifiée de façon à faciliter la substitution des composants et fonctions du produit, Sanchez et Mahoney (1996).

Par rapport au concept de « Produit Modulaire », il n'y pas de définitions consensuelles. Ces dernières définitions sont les plus citées et sont complémentaires. Dans cette thèse on considère ces deux définitions.

### Définition 8 « Plateforme »

- En ce qui concerne la conception de produits, une plateforme se rapporte à l'utilisation d'un module commun entre différents produits (Krishnan et Gupta, 2001), (Zamirowski, 1995). L'addition de quelques composants de différenciation (voir glossaire) permet de différencier un produit par rapport à un autre, Gonzalez (2000), Gonzalez et al. (2000), Voir Figure 2-2

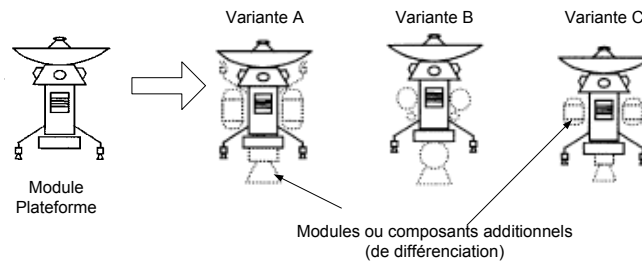


Figure 2-2. Famille de satellites à partir d'une plateforme, (adapté de Gonzalez, 2000)

La modularité peut être interprétée de différentes façons et peut être concentrée sur différentes activités du cycle de vie du produit, comme nous le verrons dans les parties suivantes. La modularité peut aussi viser à optimiser des critères globaux de la chaîne logistique, par exemple le choix de modules dans l'étape de conception peut être fait selon la localisation des fournisseurs de composants ou les avantages des différents sites de production afin de minimiser les coûts de transport ou de production des modules, voir par exemple Kidd (1998). La modularité peut aussi viser à optimiser des critères locaux des acteurs de cette même chaîne, par exemple la facilité de production de chacun d'eux. Il existe donc plusieurs travaux de recherche focalisés sur les différentes activités du cycle de vie du produit et sur les différents intervenants. Une classification de différents travaux sur les différents acteurs de la chaîne logistique (l'industrie, les fournisseurs, les clients finaux, les détaillants, le recyclage) et sur les activités du cycle de vie du produit (le développement de produits nouveaux, la production, le marketing, la distribution, le service après vente) est exposée dans Mikkola (2003 p. 92). Cette classification donne une idée des possibles champs de recherche.

Dans la littérature sur la modularité une grande partie des travaux est centrée sur l'utilisation de modules dans l'activité de conception (NPD). Cette tendance est à mettre en relation avec l'influence de la conception sur une grande partie des coûts de l'entreprise. Par exemple Ford (1988) explique que 70% du coût de production est défini pendant cette étape, voir Figure 2-3. L'activité de conception a pris une telle importance qu'on peut trouver différentes approches focalisées sur cet aspect afin d'optimiser d'autres activités de l'entreprise, par exemple le terme DFX (Design For « X », voir Veeralamolmal et al. (1999)).

L'utilisation de modules dans la conception est donc fortement liée à différents avantages obtenus dans les activités du cycle de vie du produit. La partie suivante montre une synthèse des avantages mentionnés dans la littérature.

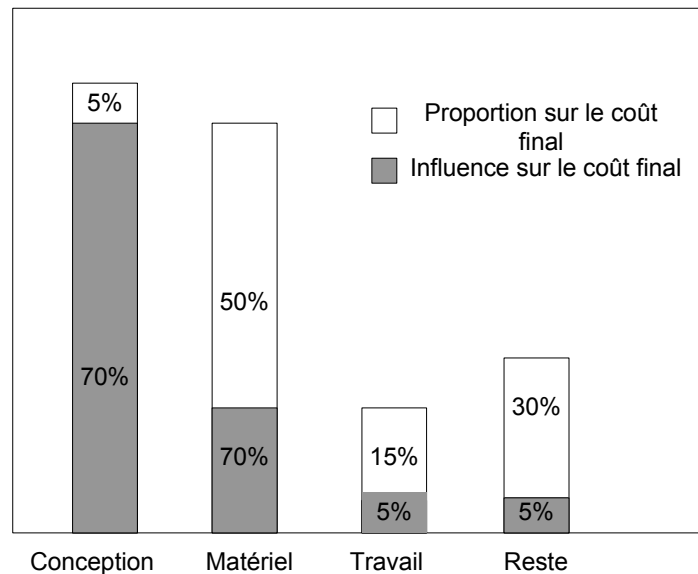


Figure 2-3. L'influence de la conception sur le coût de production

## 2.2 Avantages

En général l'application de cette philosophie permet l'obtention d'une grande variété de produits et la réduction des coûts, O'Grady (1999). Utiliser des modules permet plusieurs avantages dont les principaux sont la flexibilité (d'obtention de produits) et la réduction des coûts.

### 2.2.1 Flexibilité

Facilité ou flexibilité de conception de produits :

- La modularité facilite la tâche de réutiliser la conception d'un produit pour en concevoir un autre, Garud et Kumaraswamy (1995).
- S'il existe des interfaces définies à l'avance, l'adaptation de variantes de modules permet de différencier un produit d'un autre, et de développer différents produits, Zamirowski et Otto (1999). Les ordinateurs sont un bon exemple. Les ports de connexion sont standard et définis à l'avance sur le marché. Le développement, l'adaptation et la mise à disposition sur le marché de nouveaux modules (comme les moniteurs par exemple) peut s'avérer plus rapide tout en respectant les spécifications des interfaces ou ports de connexion<sup>6</sup>. Le concepteur n'a qu'à se concentrer sur le développement de la technologie à l'intérieur des modules. Henderson et Clark (1990) expliquent que le choix de nouvelles technologies et de composants à l'intérieur d'un module n'affecte pas le choix des composants dans des autres modules si les interfaces sont respectées. Ils expliquent qu'utiliser des modules permet de combiner différents types de technologies.
- Lorsque le choix d'un composant dans un module « A » n'affecte pas le choix des composants dans un module « B », les erreurs de conception se limitent à des modules indépendants. Un produit modulaire avec un faible degré d'interdépendance entre les variables de conception a moins de possibilités d'avoir des défauts de conception graves.

<sup>6</sup> Il est possible que des nouvelles interfaces soient adaptées à des modules existants sur le marché (par exemple les nouveaux ports de communication USB 2 peuvent être utilisés avec moniteurs ou claviers existants sur le marché).

De la même façon, les modules isolés qui peuvent être vérifiés de façon indépendante facilitent le test, le diagnostic et le contrôle de qualité dans la conception des produits. S'il existe des interfaces définies à l'avance, les erreurs de qualité peuvent être identifiées plus facilement et sont donc moins nombreuses.

- Le concept modulaire permet de travailler avec des groupes de spécialistes de technologies différentes. Par exemple les avions d'Airbus sont construits à partir de modules de technologies différentes : le moteur, le fuselage, le cockpit, etc. Avoir des modules isolés avec des technologies spécifiques permet aux experts de ces technologies de travailler ensemble de façon plus indépendante. Un aspect important est la définition d'interfaces entre les modules, afin de limiter le champ de travail technologique des équipes, Mikkola (1999), Sanchez et Mahoney (1996). Par exemple pour le développement d'une nouvelle génération d'ordinateurs, les spécialistes liés au développement d'un nouveau moniteur, doivent définir et respecter les spécifications des ports de connexion afin que le moniteur soit compatible avec le produit final. Le concept modulaire permet donc un développement concurrentiel plus organisé et sur des projets séparés. Le fait d'avoir des modules permet donc d'organiser les bureaux d'études en équipes de personnes de manière à pouvoir concevoir différents modules à la fois. Ceci est communément appelé « partitioning list » dans la littérature, Von Hippel, (1990).

Avantages de la flexibilité par rapport à la production :

- Sanchez (1993) rappelle que gérer des modules dans la production permet d'instaurer une politique de flexibilité d'assemblage.
- Avoir une politique d'assemblage de modules permet d'organiser les opérations d'assemblage par groupes et de reconfigurer la ligne de production plus facilement. La ligne d'assemblage peut être modifiée pour adapter les variantes des modules plus facilement pour obtenir différents produits à plus ou moins court terme (selon un planning de développement de produits), Agard (2002).
- La modularité facilite un assemblage plus rapide de produits car il est réalisé à partir de groupes de composants au lieu de composants individuels. L'assemblage de produits est moins complexe, plus léger, et facilite ainsi une production en masse plus importante et une meilleure réactivité.
- La ligne de production peut être divisée de telle façon que la production et l'assemblage de modules se fasse en parallèle. L'assemblage du produit peut être fait en synchrone, Erixon (1998).
- Les modules isolés peuvent être vérifiés avant leur assemblage et peuvent être désassemblés plus facilement pour leur réparation ou ajustement de manière indépendante.
- L'utilisation de modules permet d'installer une politique A.T.O (Assembly To Order), ou d'assemblage à la commande. Il n'est plus nécessaire d'avoir des produits finis stockés à l'avance, ce qui impliquait des coûts importants immobilisés. Il n'est plus nécessaire de fabriquer entièrement les produits à partir de composants individuels, ce qui impliquait un délai trop long. Le délai d'obtention d'un produit particulier dépend seulement du temps d'assemblage des modules qui le composent. Une politique A.T.O a donc des avantages face aux politiques de « production à la commande » et « production pour stock ».
- La différenciation retardée des produits dans la ligne de production est possible. Le stockage de modules permet la configuration des assemblages plus tard dans la chaîne de production quand les commandes arrivent.

- En ce qui concerne le transport, il est facilité par l'utilisation de modules puisqu'il permet d'optimiser l'espace. Le transport de modules occupe moins d'espace que celui de produits finis.

Avantages pour le recyclage du produit :

- La modularisation permet de retirer les assemblages de composants réutilisables et de recycler plus facilement les modules construits à partir d'un matériel identique, Hata et Kimura (2001).

### 2.2.2 Coûts

Avantages sur les coûts par rapport à la conception de nouveaux produits :

- S'il existe des interfaces standard entre des modules définis sur le marché, avoir une politique de modularité permet d'acheter la matière première (modules) auprès de différents fournisseurs, et de ce fait, cela augmente le pouvoir de négociation des prix, Sanchez (1995). Par exemple la définition des standards des ports de communication des ordinateurs a permis l'ouverture de la concurrence sur les accessoires informatiques comme les claviers, les souris, les moniteurs, etc.
- La modularité permet de développer une quantité importante de versions de produits à partir de combinaisons de modules communs. Cet aspect met en lumière l'utilisation d'une variété réduite et stable de composants pour développer une quantité importante de versions de produits, Sanchez (1999). Cette réutilisation de composants entre les produits permet de réduire les coûts de développement et de conception. C'est-à-dire que la modularité permet la réalisation d'économies d'échelle au niveau de la conception car l'utilisation de modules communs amène à partager les coûts fixes de conception entre produits, Mikkola (2003).
- Quant à l'achat de nouveaux composants, la réutilisation de modules rend possible la réduction de leur prix, puisque leur variété est faible et leur demande (ou utilisation) importante, Erixon (1998). Cet aspect est inestimable quand le développement d'un nouveau produit exige des composants chers.
- La réutilisation de modules ayant un cycle de vie relativement long permet un meilleur amortissement des investissements lourds, Erixon (1998).
- Le coût et les efforts d'incorporation de nouveaux composants dans un produit existant, qui est le coût d'adaptation d'incompatibilités entre composants, peut être réduit si les interfaces entre composants (ou modules) sont définies à l'avance (Garud et Kumaraswamy, 1995). La définition à l'avance d'interfaces<sup>7</sup> entre modules par les clients et fournisseurs permet de réduire le temps de développement de générations de produits, Erixon (1998). La réduction du temps de développement réduit les coûts de conception et offre la possibilité de se positionner plus rapidement sur les différents segments du marché.
- L'utilisation de modules permet de réaliser des économies de substitution, c'est-à-dire, de remplacer facilement un ensemble de composants par un autre moins coûteux.

---

<sup>7</sup> La partie 2.7.1.2.2 sera consacrée à la standardisation des interfaces.

Avantages sur les coûts par rapport à la production :

- La réutilisation de modules communs présente des avantages similaires à ceux de la conception. Utiliser des modules communs implique des opérations d'assemblage communes entre les produits. On utilise une moindre variété d'outillage et de machines spéciales, dont les coûts sont partagés par plusieurs produits. De la même façon, les coûts de stockage sont répartis sur plusieurs produits. Les coûts indirects liés à la production d'un portefeuille de modules sont partagés entre plusieurs produits ce qui permet des économies d'échelle, Zamirowski et Otto (1999).
- La réutilisation de modules met en lumière la réduction du temps d'adaptation et de set-ups dans le changement d'un produit à un autre sur la ligne de production. Ceci se traduit par une réduction des coûts, Zamirowski et Otto (1999).
- L'utilisation de modules permet un stockage dans un espace plus restreint ce qui réduit les coûts d'autant. Par exemple les produits de IKEA (magasin de vente d'articles domestiques) sont stockés par modules.
- Avoir des modules en stock réduit le risque d'arrêt de la ligne de production. La pression mentale des ouvriers est donc réduite, Erixon (1998).

Avantages sur le coût par rapport à l'utilisation du produit :

En ce qui concerne l'utilisation des produits sur le marché, le concept modulaire permet la configuration du produit par le client. Ceci fait économiser à l'entreprise le temps et les coûts consacrés à l'assemblage.

Comme conclusion, Erixon (1998) et Östgren (1994) montrent une étude comparant des différents paramètres, avant et après la mise en place de produits modulaires dans différentes entreprises, voir la Figure 2-4.

	Electrolux Kitchen	FMG	Geotronics	Isaberg	Scania	Volvo	SEPSON	Electrolux Major Appl.
Délai totale d'assemblage	61	33		+	50		58	10
Travail en processus (W.I.P)	+	57		+	+		+	+
Temps d'assemblage	+	48		+	20	60	37	10
Matériel	+			6	0	-3	+	10
Logistique	+	+		+	+	-75	+	30
Qualité	+	+	37	+	75		+	+
Temps de développement des produits	30	+	+			+		60

Figure 2-4. Réduction du coût en %. Le symbole (+) indique une amélioration qu'il est impossible de mesurer, Erixon (1998) et Östgren (1994).

### 2.3 Limitations

En complément, dans la littérature on peut observer aussi quelques désavantages, par exemple Zamirowski et Otto (1999) indiquent qu'il est plus facile pour la concurrence de comprendre



le fonctionnement du produit modulaire et de le copier, tandis qu'un produit avec des composants et des fonctions plus intégrées est beaucoup plus subtil et obscur puisque les relations entre fonctions et composants ne sont pas évidentes pour la concurrence.

Les produits avec des composants communs (modules communs) n'auront pas le même niveau de performance que les produits avec composants spéciaux. La conception de produits modulaires avec des composants communs ne permet pas de satisfaire de façon précise les besoins de performance de ces produits.

La réutilisation de modules peut rendre un produit similaire à un autre. Les clients peuvent s'apercevoir de cette similarité, une partie du marché sera donc probablement insatisfaite.

Un autre désavantage, est le choix de modules. C'est une tâche difficile à mener du fait que le concepteur doit s'attacher à la performance des produits, inhérent à l'utilisation de composants spéciaux, tandis que la réduction des coûts obéit à la réutilisation d'un maximum de modules. Ceci correspond aux observations de Fine (1998). Il indique que le choix de la conception intégral (classique) est orienté vers la performance et la technicité du produit avec une configuration technologique, tandis qu'un projet de développement de produits modulaires a tendance à être focalisés sur des aspects comme la réduction de coûts et du délai de développement.

Par rapport à cet aspect Baldwin et Clark (1997) expliquent que le développement de produits modulaires est beaucoup plus difficile en ce qui concerne la conception classique qui utilise des composants fortement liés. Le concepteur doit évaluer la conception de produits et leurs processus de production afin de respecter l'harmonie fonctionnelle et de couplage entre les modules.

Le concepteur doit évaluer l'ensemble des composants modulaires qui doivent être interchangeables pour satisfaire le mieux possible les caractéristiques des produits qu'on a besoin de développer, ainsi que les économies réalisées grâce à la réutilisation de composants. L'évaluation du contenu des modules peut devenir complexe quand le concepteur n'est pas capable d'établir la relation entre la performance et les coûts indirects ou cachés des produits, Mikkola (2003).

Un autre inconvénient est qu'une fois l'architecture modulaire et les interfaces définies, il est difficile de les modifier. Par exemple la redéfinition des standards des ports de communication des ordinateurs sur le marché serait coûteuse. Le planning de produits à concevoir et le choix opportun de modules sont donc cruciaux pour s'assurer que la configuration d'un ensemble de modules permet le développement d'une grande variété de produits à travers le temps.

## 2.4 Exemples d'applications réussies

Quelques exemples réussis de l'utilisation de produits modulaires peuvent être appréciés sur le marché. Par exemple les montres « Swatch » sont assemblées avec différents modules : la couverture, le bracelet, etc. Les changements affectent seulement les paramètres comme la couleur et la taille qui font la différence sur le marché sans augmentation des coûts.

Ulrich et Eppinger (2000) mentionnent que le choix critique est de savoir regrouper des composants dans un module et de définir quels paramètres physiques doivent changer pour différencier les produits.

Les ordinateurs sont un autre exemple d'application réussie. Le clavier, le moniteur et l'unité centrale de calcul ont différents paramètres pour adapter leurs configurations aux besoins du client, Langlois et Robertson (1992).

Un autre exemple est celui des logiciels où des codes de programmes informatiques sont développés dans différents modules, et les groupes de développement travaillent sur différents modules de codes à la fois, Parnas et al. (1985). Les concepteurs de logiciels atteignent la modularité par l'indépendance des variables de codage. C'est-à-dire que les concepteurs de logiciels atteignent l'indépendance des groupes de codage informatique par la définition à l'avance des types de variables partagés entre ces groupes. L'objectif est de rendre les modules aussi indépendants que possible. La programmation modulaire permet à un module d'être écrit sans connaissance du code d'un autre module, et permet à des modules d'être rassemblés et remplacés sans avoir à reconcevoir le système tout entier. Les modules sont réutilisés sur plusieurs logiciels et les variables d'interface entre les modules sont définies à l'avance.

Un autre exemple est mentionné par Dahmus et al. (2000), celui des cafetières et des machines à thé qui partagent les mêmes modules, par exemple le système de chauffage. Le choix du module commun permet d'économiser les coûts tout en respectant les caractéristiques de deux produits différents. Meyer et al. (1997) donnent également d'autres exemples de l'utilisation des modules et des plateformes sur la conception des outils de bricolage.

Un exemple cité régulièrement dans la littérature, est le succès des produits Walkman de « Sony » pour lesquels la modularité des composants a permis à Sony de diversifier ses produits depuis 1979, Sanderson et Uzumeri (1995).

### 2.5 Implications au niveau organisationnel

En plus des aspects de conception, travailler avec des modules exige de considérer plusieurs points en ce qui concerne l'organisation. La gestion des modules pour concevoir d'autres produits nécessite une analyse soignée parce que le choix de conception de produits a une influence sur les activités de l'entreprise, par exemple de fabrication et de gestion. Ceci met en lumière l'affectation de différents critères de performance de la compagnie, par exemple :

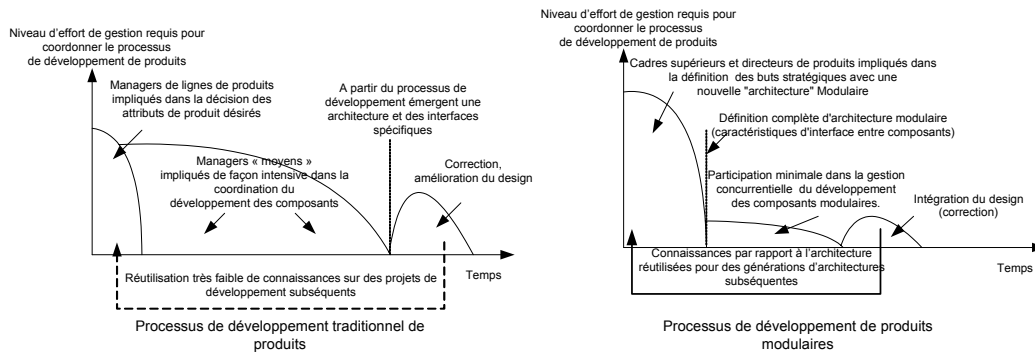
- le nombre et les types d'assemblages dans la chaîne de production
- la manière dont les modules sont fournis
- les coûts de stockage
- les économies sur le prix des composants et matériels
- les frais de transport
- la manière dont le produit est réparé, emballé, réutilisé ou recyclé<sup>8</sup>, etc.

Concevoir des produits modulaires exige plus d'engagement de la part des membres clé de la compagnie et acteurs du cycle de vie du produit dans les premières phases de conception des produits. On a besoin de plus d'expertise, de coordination, d'efforts, de temps. Tout ceci est donc plus coûteux que la conception de produits classiques parce qu'elle considère la

---

<sup>8</sup> à cause des lois ou politiques gouvernementales

conception de plusieurs produits différents en même temps, Sanchez et Collins (2001). La configuration de modules doit être compatible et respecter les caractéristiques fonctionnelles, esthétiques, etc., des différents produits finaux. Les efforts et les coûts sont concentrés sur la période initiale comme illustré par la Figure 2-5.



Selon Sanchez et Collins (2001) on a besoin de plus de temps pour développer une famille avec des modules, ceci laisse penser que si la variété de produit est faible sur le long terme, il n'est probablement pas nécessaire de fournir de gros efforts pour développer des modules compatibles. L'optimisation et la conception des produits de façon individuelle (conception intégrale) pourrait être plus rapide et serait une meilleure option. S'il y a une grande variété de produits dans la famille, une meilleure option serait donc de concevoir différents produits avec un ensemble de modules. La conception modulaire peut être justifiée pour un développement plus rapide de produits dérivés sur le long terme, ainsi que le fait que les groupes spécialisés des différentes disciplines peuvent travailler plus efficacement sur les modules liés à leur discipline (aspect déjà expliqué auparavant).

Sanchez et Mahoney (1996) donnent des conséquences plus générales sur l'organisation liées à la gestion de modules. Par exemple, utiliser des modules permet de gérer des organisations modulaires. L'activité de conception d'un groupe de concepteurs aura une influence faible sur l'activité de conception des autres groupes modulaires. De la même façon, la meilleure distribution de l'information inhérente à la conception modulaire permet un apprentissage et des connaissances plus organisés et efficaces, à partir d'une information mieux structurée. Chaque groupe (dédié à un module) est plus autonome par rapport à l'organisation entière. Le développement de modules peut être fait en parallèle au lieu d'un développement séquentiel<sup>9</sup>.

Garud et al. (1995) donnent quelques autres implications par rapport à l'organisation des systèmes d'information et de capitalisation des connaissances dans la conception modulaire. Erixon (1998) mentionne quelques aspects organisationnels intéressants par rapport aux équipes d'ouvriers chargés des modules. Par exemple, les responsabilités au niveau de la production deviennent clarifiées et délimitées, l'évaluation de l'effort des équipes chargées de chaque module devient plus facile.

<sup>9</sup> C'est-à-dire un composant après l'autre par rapport à tout la conception du produit

En outre, l'organisation modulaire peut être adaptée à l'organisation de la chaîne logistique, Mikkola, (2003).

### 2.6 L'architecture du produits

Plusieurs travaux considèrent l'architecture du produit comme ligne de conduite pour le développement de famille de produits, Dahmus et al. (2000), Otto (2001), Jianxin et Tseng (1999).

#### Définition 9 « Architecture »

L'architecture du produit est une représentation générique des produits où un système conceptuel des composants physiques est associé à un système conceptuel des éléments fonctionnels afin de concevoir différents produits lors de l'étape de conception, Ulrich (1995).

Ulrich et Eppinger (2000) distinguent deux dimensions dans l'architecture : la fonctionnelle, qui est le groupe d'opérations et de tâches qui contribue à la fonctionnalité générale du produit, et la physique, qui se rapporte au groupe de composants physiques qui permet une ou plusieurs fonctions. L'architecture pourrait être considérée comme une configuration de composants du produit et des tâches que chaque composant doit réaliser.

L'analyse de l'architecture commence par un modèle conceptuel de toutes les fonctions internes (y compris les fonctions communes et optionnelles) d'une famille de produits pour prévoir leur performance interne. Selon Zamirowski (1995), le modèle conceptuel fonctionnel d'une famille de produits est appelé « modèle monolithique » car il intègre toutes les fonctions des produits de la famille. Zamirowski (1995) mentionne le processus suivant pour construire un tel modèle :

- Pour chaque produit, on construit d'abord une représentation fonctionnelle,
- ensuite, l'ensemble des modèles fonctionnels des produits est intégré dans le modèle « monolithique » de la famille. L'ensemble des fonctions communes et optionnelles des produits de la famille est mis en relation, voir Figure 2-6.

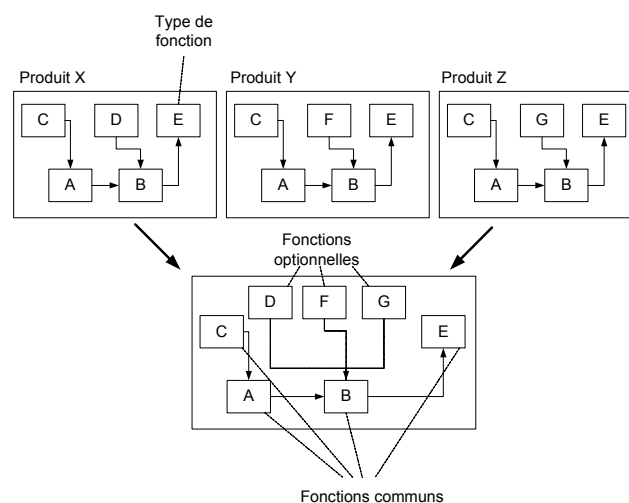


Figure 2-6. Intégration de différents systèmes dans un système monolithique, adapté de Zamirowski (1995).

L'analyse continue par une transformation de ce système en un système de composants physiques, voir Figure 2-7. Cette figure montre le modèle monolithique fonctionnel et physique d'une voiture.

On peut considérer le modèle monolithique « fonctionnel » comme un diagramme de relations entre fonctions qui sert à avoir une idée de la fonctionnalité des produits et de ce qu'ils doivent « faire ». Le modèle physique sert au concepteur à avoir une idée de ce que les éléments physiques (composants) doivent « être », en termes de spécifications.

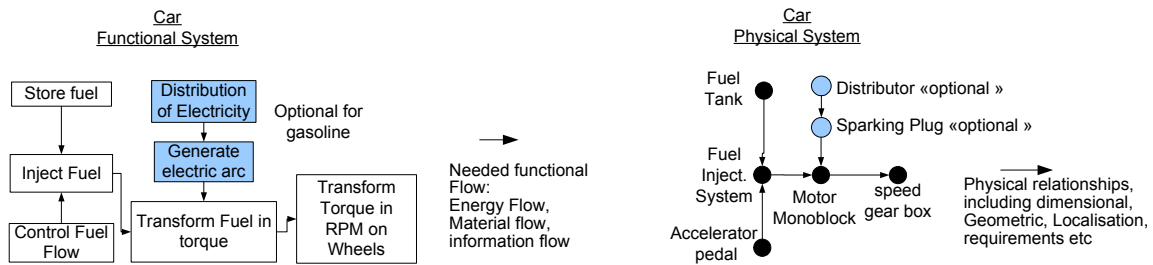


Figure 2-7. Analyse de l'architecture d'une voiture.

Selon Ulrich et Eppinger (2000), l'architecture est établie après la définition du marché potentiel, des tendances technologiques et l'identification de toutes les caractéristiques des produits dans la famille. L'architecture est définie selon la Figure 2-8, entre la phase de développement du concept et la conception des niveaux du système (hiérarchies d'assemblage).

Ulrich (1995) distingue deux types d'architectures :

1. L'architecture modulaire où on détermine des interfaces découplées entre les composants de telle manière que les changements architecturaux sur un composant ne mènent pas à des changements sur d'autres composants (d'une manière fonctionnelle et physique). Dans ce sens, Chakrabarti (2001) a mené une étude sur les rapports entre composants et fonctions. Habituellement, le type d'architecture modulaire doit être cohérent avec les stratégies de la compagnie, comme par exemple la mise à jour ou l'amélioration de produits, le développement de produits de haute performance, la réduction du coût des composants, la réduction des coûts de production, etc.
2. Conception intégrale : c'est une architecture fixe, spéciale et spécifique développée et visant à optimiser un seul produit. C'est la conception de produits classiques où des changements apportés à un composant ne peuvent pas être réalisés sans en modifier d'autres. Cette conception inclut les rapports et interfaces complexes et spéciales reliant des composants.

Quelques points qui permettent de mener une comparaison entre ces deux architectures sont énumérés dans le Tableau 2-1.

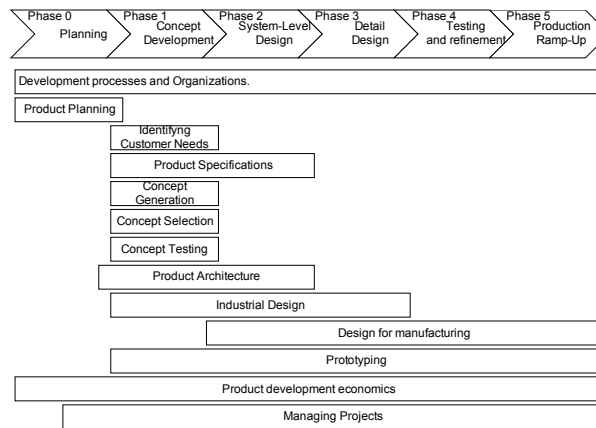


Figure 2-8. Processus de développement des produits, Ulrich et Eppinger (2000).

<i>Avantages de la conception modulaire</i>	<i>Avantages de la conception intégrale</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Spécialisation des tâches</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Apprentissage interactif</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nombre plus important de variantes de produits</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Performance avec technologies spéciales</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Economies d'échelle dues à des composants communs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Innovations systématiques</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduction des coûts d'inventaire et de logistique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Meilleur accès à l'information</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facilité de maintenance et réduction des coûts de maintenance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Protection de l'innovation contre l'imitation</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cycle de vie de produits plus courts avec amélioration continue et adaptation de produits existants.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Barrières pour éviter à la concurrence de fournir des produits similaires</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flexibilité dans la réutilisation de composants.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Personnalisation des produits</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facilité la sous-traitance des modules</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Confiance dans le système dû à l'apprentissage rapide et à la facilité d'une production en masse.</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Assemblage rapide et moindre temps de production.</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facilité d'assemblage à la commande et de la différenciation retardée des produits pour améliorer la réactivité à la demande du marché.</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Production parallèle de modules.</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Développement rapide de produits</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Exemples</b> : PC's, jouets Lego, PDA, stylos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Exemples</b> : CD, satellites, voitures de Formule-un.</li> </ul>

Tableau 2-1 Comparaison entre la conception modulaire et la conception intégral. Corbett et al. (1991), Pahl et Beitz (1988), Nevins et Whitney (1989), Mikkola (2003), Thomke et al. (1998).

Quelques autres avantages généraux des architectures modulaires sont discutés par Huang et Kusiak (1999).

Dans l'architecture du produit, la littérature porte un intérêt spécial aux architectures modulaires.

Mikkola (2000) indique que l'architecture modulaire du produit est l'arrangement des éléments fonctionnels dans des modules, et qu'elle pourrait être développée en définissant des liens entre des éléments fonctionnels et physiques en considérant les caractéristiques d'interface entre les composants ou les modules.

Zamirowski (1995) mentionne que l'objectif de définir une architecture (modulaire) est de regrouper un maximum de fonctions de façon à utiliser un minimum de modules possible pour les combiner et développer une variété de produits.

Ces travaux considèrent qu'un module a la possibilité de fournir une ou plusieurs fonctions au produit.

Définir des modules de fonctions permet d'adapter ou d'éliminer facilement un groupe de fonctions dans l'architecture du produit. L'objectif de l'analyse de conception, d'un point de vue architectural et modulaire, est de définir les fonctions communes et différentes entre les produits pour trouver des modules communs et différents, après avoir défini les caractéristiques des produits.

Il est facile de trouver quelques travaux centrés sur la définition de modules qui considèrent quelques règles dans ce sens. Par exemple, Stone et al. (1998), et Zamirowski et Otto (1999) mentionnent différentes règles pour développer une architecture modulaire du produit. Pahl et Beitz (1988) et Huang et Kusiak (1998), expliquent aussi que l'identification de modules doit être basée sur la similarité des caractéristiques suivantes des fonctions des composants : géométriques, de force, électriques, thermiques et photométriques.

Ulrich et Eppinger (2000) donnent également 4 étapes pour établir cette architecture :

1. Créez un schéma du produit : développez un modèle conceptuel des composants et des fonctions.
2. Groupez les éléments du schéma. Regroupez les composants à l'intérieur des modules selon :
  - la précision d'assemblage : deux composants doivent se trouver dans le même module quand ils exigent un assemblage précis pour éviter la répétition de ces opérations dans la chaîne de production.
  - le partage des fonctions : quand deux fonctions partagent les mêmes composants, ces éléments fonctionnels sont mieux contrôlés à l'intérieur d'un module<sup>10</sup>.
  - la similitude technologique : faites des modules basés sur la similitude technologique des composants ou sur les avantages de production des composants.
  - la localisation de changement : isolez dans un module les composants ayant une possibilité élevée de changement ou mise à jour.
  - le type de variété : isolez les composants qui sont différents d'un produit à un autre et qui sont substitués régulièrement.
  - la possibilité de standardisation : définissez un module commun si les mêmes composants sont partagés entre les produits. Par exemple la cartouche « jet d'encre » des imprimantes.
  - les interfaces : groupez les composants qui partagent le même type de spécifications fonctionnelles (par exemple des fonctions avec le même type de flux d'énergie, matériel,...)
3. Créez une disposition géométrique : observez une disposition ou un croquis de la conception afin de détecter des interfaces et des modules.

---

<sup>10</sup> Par exemple la moto de BMW modèle R1100RS : le moteur est la source d'énergie et l'appui structurel de la moto. La structure classique de support tubulaire n'est pas employée. Les fonctions de « puissance » et « support » dans ce cas-ci forment un module (c'est-à-dire le moteur).

4. Identifiez les interactions fondamentales et fortuites dans le schéma : trouver des rapports forts dans le modèle conceptuel aide à trouver des modules et des groupes de personnes responsables de tels modules.

Les travaux mentionnés par la suite, dans la partie 2.7.1.1 (classification « restructuration ») se focalisent aussi sur la définition d'une architecture modulaire.

Il existe quelques considérations sur la construction d'une architecture modulaire. Les parties suivantes exposent une synthèse de ces considérations.

### 2.6.1 L'utilisation des composants nécessaires

Un des principaux objectifs de recherche dans ce sens est de maximiser l'utilisation de modules communs pour réduire les coûts et systématiser les économies. Un autre objectif est aussi d'avoir des produits distincts. Ceci s'avère paradoxal, car on a besoin de composants et de modules différents pour respecter les besoins du client par rapport aux aspects fonctionnels et physiques et on veut maximiser l'utilisation de modules communs pour réduire les coûts et systématiser les économies.

Dans ce cadre, Robertson et Ulrich (1998) expliquent que l'objectif est d'avoir une architecture qui permette d'avoir des produits différents qui partagent quand même un maximum de composants, voir Figure 2-9

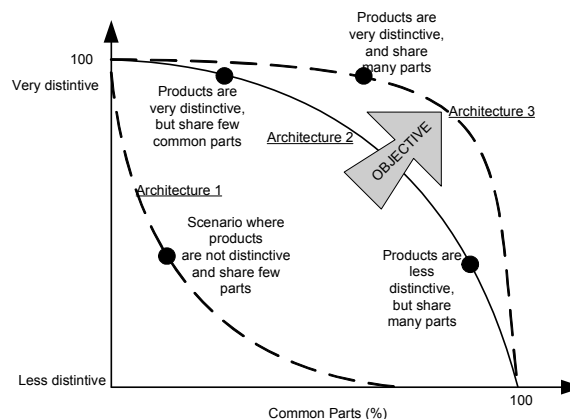


Figure 2-9. Caractéristiques de l'architecture, Robertson et Ulrich (1998)

Par rapport à la construction de modules, certains travaux se focalisent sur le contenu des modules en fonction de leurs types de composants. La problématique de ces travaux est de limiter au maximum, dans chaque produit, le suréquipement et le sous-équipement en termes de types de composants. Chaque produit est le résultat d'une configuration de l'ensemble des modules. Evans (1963) a développé un outil mathématique dans ce sens, sur lequel sont basés plusieurs autres travaux, par exemple le travail de Viriththamulla (1991). Evans (1963) explique comment regrouper un ensemble de différents types de composants, définis à l'avance, en modules. La combinaison de ces modules permet de développer un ensemble de produits. L'objectif est de réutiliser un maximum de modules dans différents produits, de minimiser le suréquipement et le sous-équipement par rapport aux types de composants. Et chaque module doit avoir les types de composants nécessaires à chaque produit. Ce travail est expliqué plus en détails dans la partie 2.7.2.4.



## 2.6.2 Interfaces

Un aspect important des caractéristiques des modules est représenté par les interfaces. Les interfaces garantissent la bonne intégrité et adaptabilité des modules et leur compatibilité. Quelques auteurs considèrent l'aspect d'interface comme base pour l'identification modulaire, Sanchez et Mahoney (1996), Mikkola (1999, 2000).

Selon Garud (1995), la compatibilité entre les composants dans les configurations modulaires repose sur trois aspects :

1. L'intégrité : c'est le degré de bonne fonctionnalité d'un composant par rapport aux autres composants d'un système.
2. Modularité : elle représente la possibilité d'un module d'être produit de manière séparée sans prendre le risque d'affecter l'intégrité du produit.
3. Adaptabilité : c'est la capacité de nouveaux composants à être utilisés avec des composants ultérieurs, tout en respectant l'intégrité fonctionnelle (la modularité facilite cette tâche).

Les caractéristiques d'interface limitent le nombre de combinaisons modulaires. Un module sera substitué facilement dans un produit existant, pour développer d'autres produits, s'il existe un nombre faible de spécifications de « couplage » (interfaces) à respecter par rapport au système. Cette notion est valide aussi dans la ligne de production.

Les caractéristiques d'interface se rapportent à des caractéristiques physiques d'accouplement. Quelques auteurs mentionnent également des spécifications du flux de matériel, du signal ou du flux d'énergie. Le concept d'interface sera mentionné plus en détails dans les parties suivants.

## 2.6.3 La relation composants - fonctions

Chakrabarti (2001), explique que la construction des modules est basée sur l'analyse des fonctions de chaque composant. Un composant doit être considéré comme partie d'un module (au lieu d'un autre) selon 4 types de relations, voir Figure 2-10.

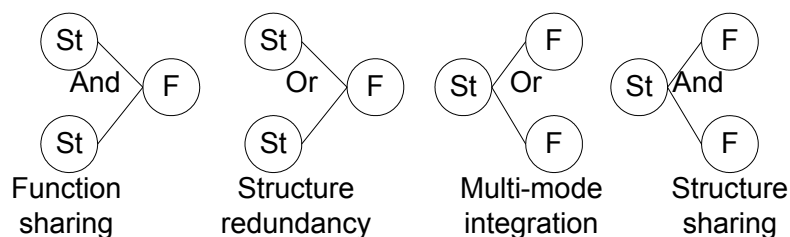


Figure 2-10. Types de relations entre composants (St) et fonctions (F), Chakrabarti (2001).

La relation « Function sharing » fait référence à l'utilisation de deux composants ou plus pour une fonction du produit. La relation « Structure redundancy » fait référence à l'utilisation d'un ou autres composants optionnels pour une fonction du produit. La relation « Multi-Mode integration » explique l'utilisation d'un composant pour telle ou telle fonction. La relation « Structure sharing » fait référence à l'utilisation d'un composant pour deux ou plus fonctions du produit.

Un des objectifs de la modularité est l'interchangeabilité de caractéristiques et de fonctions des produits. Les modules de composants doivent donc correspondre à des modules de fonctions, Erens (1997), Chakrabarti (2001).

Les composants ayant une relation « Functions sharing » et « Structure redundancy » doivent donc être inclus dans un même module. De la même façon, un seul module doit comporter les composants ayant une relation « Multiple-mode integration » et « Structure sharing ». Dans le cas contraire, la substitution d'un module ne permettra pas de changer un ensemble de fonctions du produit de la façon souhaitée.

Erens (1997) mentionne également qu'un module de composants doit correspondre à un groupe de fonctions. De cette manière un module de fonctions doit correspondre à un ensemble de caractéristiques dont le client a besoin. La substitution de modules doit donc permettre la personnalisation de produits pour les différents clients. Dans ce cadre, il expose quatre types de relations fonctions - composants : 1:1 (un composant nécessaire à une fonction), 1:N (un composant nécessaire à N fonctions), N:1 (N composants sont nécessaires à une fonction), N:N (N composants sont nécessaires à N fonctions).

Il y a de possibles avantages et désavantages liés à l'utilisation de certains modules par rapport aux différents types de relations :

### *Avantages et désavantages par rapport au coût du produit :*

- **Avantages :** Les modules qui contiennent des composants ayant les relations « Multiple-mode integration » et « Structure sharing » présentent normalement plus d'avantages économiques dans le rapport « coût/nombre de fonctions », puisqu'un module comporte une faible quantité de composants (€) et une quantité plus importante de fonctions. Ces avantages économiques sont importants quand il existe des relations de type 1:N.
- **Désavantages :** Les modules qui contiennent des composants ayant des relations « Functions sharing » et « Structure redundancy », présentent normalement plus de désavantages économiques dans le rapport « coût / nombre de fonctions », puisqu'un module comporte une quantité importante de composants (€) et une faible quantité de fonctions du produit. Ces désavantages sont plus importants quand existe des relations de type N:1.

### *Avantages et désavantages par rapport à la personnalisation du produit :*

- **Avantages :** La substitution de modules avec des composants ayant des relations « Multiple-mode integration » et « Structure sharing » peut être particulièrement utile, notamment quand on a besoin de changer ou d'adapter la fonctionnalité d'un produit pour en développer un autre. La substitution d'un tel module permet de substituer un grand nombre de fonctions du produit. Ces avantages sont importants quand il existe des relations de type 1:N.
- **Désavantages :** Lorsque des modules doivent être employés à la fois dans des produits haut de gamme (performants) et bas de gamme, certains produits peuvent être conçus avec des composants non nécessaires ce qui génère un coût excessif de conception. Cet aspect peut être considéré comme suréquipement. Une situation similaire surgit quand les produits haut de gamme sont conçus avec des composants bas de gamme ayant comme résultat un manque de qualité. Le suréquipement peut se traduire en fonctions excédentaires et le sous équipement en fonctions manquantes. Dans les deux cas, on peut

parler donc de sur et sous fonctionnalité. La réutilisation de modules peut amener à la sur ou sous performance et au sur ou sous équipement notamment quand les modules ont des composants avec des liens « Structure sharing » de type 1:N ou N:N.

La littérature sur la modularité des produits commence à s'intéresser à l'analyse des relations entre composants et fonctions. Par exemple, Zamirowski (1995) propose une analyse approfondie dans le domaine de la construction de modules par rapport aux relations entre composants et fonctions. Il montre une analyse des liens composants - fonctions afin de choisir les meilleurs modules interchangeables qui serviront à adapter un produit pour en obtenir un autre et les meilleurs modules qui seront réutilisés entre différents produits.

Développer différents produits avec différentes caractéristiques implique donc une analyse des types de relations dans l'architecture afin de construire des modules.

### 2.6.4 La configuration de modules

Un produit peut se construire à partir de différentes configurations. Différents types de configuration s'utilisent sur différents types de produits.

Afin d'utiliser différentes configurations modulaires dans l'architecture Ulrich et Tung (1991) proposent six catégories de configurations, voir Figure 2-11 :

- **Component Sharing** : Dans cette configuration, un même composant ou module est employé dans de multiples produits pour obtenir des économies de « scope ». La plupart des composants de ces produits sont différents. Selon Pine (1993), cette configuration est employée quand on a besoin de réduire le coût et le nombre de composants différents sur une ligne de produits qui a une variété importante de composants.
- **Component Swapping** : Ici, différents composants sont adaptés à un module basique, en créant autant de produits que de composants adaptés. La différence par rapport à « Component Sharing » est une question de degré ou nombre de composants communs entre les produits.
- **Cut-To-Fit** : Ce type de configuration est similaire aux deux types précédents, à l'exception qu'un ou plusieurs modules sont modifiés dans certaines limites (de taille par exemple). On change les caractéristiques d'un ou plusieurs modules sur la configuration modulaire pour différencier un produit par rapport à un autre. Cette technique est utile pour les produits dont la valeur ajoutée repose considérablement sur un module qui peut être constamment changé selon les besoins des clients.
- **Mix** : Ce type de configuration peut utiliser les configurations précédentes, la distinction est que les composants sont mélangés entre eux ce qui permet qu'ils deviennent différents. Par exemple le mélange de différentes couleurs de peinture permet d'obtenir d'autres couleurs.
- **Bus** : Ce type de modularité emploie un module de base qui permet d'adapter un certain nombre de composants différents (en plusieurs versions) pour obtenir des produits différents. Par exemple la carte mère des ordinateurs, module de base, permet d'adapter un certain nombre de pouces de mémoire différents pour obtenir des ordinateurs différents. Ce module de base est appelé « plateforme » dans la littérature Gonzalez (2000), Gonzalez et al. (2000).
- **Sectionnel** : Ce type de modularité fournit le plus grand degré de variété et de possibilité de personnalisation de produits. La modularité « sectionnelle » permet la configuration

d'un nombre infini de différents types de composants ou modules de manière arbitraire. Chaque composant est relié à l'autre en respectant des interfaces standard. L'exemple classique est le jeu « Lego » qui utilise des modules avec leurs interfaces de fermeture en cylindre. Le nombre d'objets qui peuvent être construits est illimité.

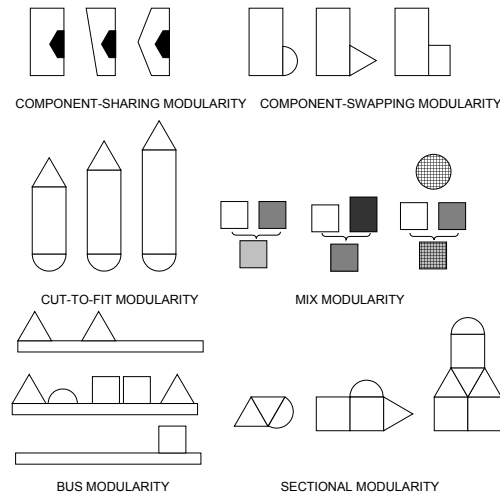


Figure 2-11. Types de configuration modulaire, Ulrich et Tung (1991)

Huang et Kusiak (1998) proposent également d'autres configurations modulaires, ils mentionnent l'utilisation de différents types de modules : 1) modules de base : où chaque module représente une fonction. 2) module auxiliaire : où chaque module représente des fonctions « auxiliaires » pour créer différents produits. 3) modules adaptatifs : qui sont utilisées quand les modules (et leurs fonctions) sont employées pour adapter un produit existant. 4) Non modules : conçus individuellement pour des fonctions spécifiques relatives à un produit.

## 2.7 Construction de produits modulaires, revue de la littérature.

Pour une première vue générale des méthodologies de conception modulaire de produits, le lecteur peut se référer à Fixson (2001), et Joines et Culberth (1996). Cette partie passe en revue la littérature de quelques travaux intéressants afin de concevoir des produits modulaires. Les travaux de cette partie couvrent différents domaines et dimensions de génie industriel. Afin d'avoir une vision structurée de la littérature on peut proposer différentes classifications des travaux. On peut proposer donc trois classifications : une classification systémique, la classification par type d'outil et la littérature traitant des activités du cycle de vie du produit.

### 2.7.1 Classification systémique

Une première dimension peut être une approche systémique. Les travaux de cette classification sont orientés vers la modularisation d'un système. Ces travaux prennent en compte un système comme un ensemble d'éléments. L'objectif de ces travaux est d'utiliser ou de concevoir des groupes d'éléments. Parmi ces travaux on peut donc en mentionner quelques uns, par exemple :

- Ceux qui s'orientent vers l'évaluation des caractéristiques (excepté les interfaces) des éléments du système pour choisir les modules.

- Ceux qui s'intéressent aux interfaces ou liens entre ces éléments
- Ceux qui combinent ces deux approches.

### 2.7.1.1 Travaux orientés uniquement sur les éléments

On peut considérer qu'il existe trois types de travaux dans ce domaine, voir Figure 2-12 :

**Simple :** Dans ce type de travaux, les éléments d'une architecture sont substitués à d'autres éléments de manière à améliorer différents critères. Ces éléments peuvent être des fonctions, si l'analyse se focalise sur un système fonctionnel, ou des composants, si l'analyse se focalise sur un système physique (de composants physiques). Dans ces travaux, il s'avère nécessaire d'avoir une architecture ou une configuration définie à l'avance. Les types génériques d'éléments fonctionnels et physiques à substituer sont prédéfinis.

**Accumulatifs :** On regroupe de petits éléments (physiques et fonctionnels) dans des éléments plus grands pour construire des modules.

**De restructuration :** On réorganise et on associe les fonctions aux éléments physiques (composants) de manière à définir la configuration de modules. L'architecture est construite par de grands ou de petits modules.

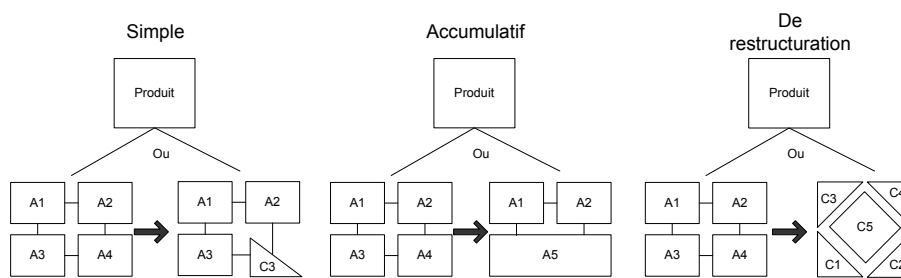


Figure 2-12. Classification systémique dans la littérature

Comme travaux dans le domaine « *simple* » on peut mentionner Ulrich et Brandeau (2000) qui développent deux algorithmes pour trouver le niveau optimal de composants communs dans l'architecture pour développer différents types de produits. Un autre, de David et al. (1998), évalue différentes options de modules de composants (avec une conception similaire), leur objectif est de maximiser le nombre de composants et de modules communs entre les produits et de minimiser le coût d'adaptation de tels modules dans la conception et la production. Jianxin et Tseng (1999) expliquent comment évaluer les différentes versions de modules en mesurant leurs coûts et l'utilité pour différencier les caractéristiques des produits. Meyer et al. (1997, chapitre 4) expliquent comment comparer les sous systèmes de la concurrence par rapport à la conception des produits. L'étude comporte l'évaluation et l'utilisation des modules de la concurrence par rapport à la relation performance/coût. Entre autres, on peut trouver Otto (2001), Otto et al. (2000), Huang et Kusiak (1999), qui ont aussi apporté leur contribution à ce domaine.

Comme travaux dans le domaine « *accumulatif* » on peut citer ceux visant à accumuler des opérations de production dans un module. Ces travaux sont liés au terme « technologie de groupe » (Group Technology) et seront abordés dans les parties suivantes. Par rapport à la construction de modules à partir de composants quelques travaux intéressants sont ceux de A.

Kusiak<sup>11</sup>. Il donne différents algorithmes et utilise quelques outils pour accumuler les composants en groupes.

Par rapport aux travaux dans le domaine de « *restructuration* » on peut citer Chakrabarti (2001), ainsi que Otto et al. (2001), qui utilisent une matrice pour choisir les modules des composants communs parmi différents produits qui partagent des fonctions similaires. Ils proposent la classification suivante pour les identifier :

- « Dominant flow » : à partir d'un module conceptuel monolithique de fonctions dans l'architecture de produits, un module peut être constitué en regroupant un ensemble de fonctions qui utilisent le même type de flux (électrique, matériel, force etc.)
- « Branching flow » : dans un modèle conceptuel fonctionnel de l'architecture, différents modules peuvent être constitués en regroupant les ensembles de fonctions qui composent des « branches de fonctions similaires ».
- « Conversion-transmission » : regroupe des fonctions qui changent ou transforment de la même façon les flux décrits en « dominant flow ». Par exemple, les fonctions qui transforment le mouvement mécanique en flux électrique peuvent être regroupées dans un module.
- « Fonction shared » : constitue un module commun à partir d'un ensemble de fonctions qui sont communes entre différents produits dans une famille de produits. Zamirowski (1995) appelle cette règle « Similarity/repetition » pour regrouper dans un module des fonctions similaires (avec le même type d'entrées et sorties).
- « The unique fonction » : Réciproquement à la règle « fonction shared », un module peut être formé d'un ensemble de fonctions qui sont uniques à un produit en particulier.
- Zamirowski (1995) propose en plus « Causally-linked functions » : C'est un module dans lequel les fonctions ou groupes de fonctions sont liées entre elles dans le modèle conceptuel, c'est-à-dire, que l'existence de l'une dépend de l'existence d'une ou plusieurs autres.

Un autre travail de « *restructuration* » peut être trouvé dans Fujita (2002). Il montre une analyse des besoins du marché pour définir les attributs des produits, traduit ces attributs dans un modèle fonctionnel, et celui-ci en composants. Il utilise une méthode d'optimisation pour assigner les modules de composants par rapport à leurs fonctions.

Hata et Kimura (2001) ont développé un outil pour regrouper en modules, différents composants par rapport au nombre de relations fonctionnelles. Les relations fonctionnelles d'un composant font référence aux flux d'énergie, signal et flux de matériels que ce composant entretient avec les autres. Si le nombre de relations fonctionnelles entre un composant et un autre est important, le lien est considéré comme fort. Cette information constitue un critère important pour regrouper ces deux composants dans un seul module.

Dahumus et al (2000) utilisent une matrice dans laquelle sont définies les fonctions (horizontalement) et produits (verticalement) pour identifier des modules de composants similaires.

Otto (2001) essaye de traduire les besoins du client en fonctions, grâce à trois heuristiques, il regroupe les fonctions en modules afin de pouvoir gérer une grande variété de produits :

---

<sup>11</sup> Différents travaux seront mentionnés, par exemple Huang et Kusiak (1998).

- Heuristique de regroupement par similitude ou répétition : les groupes de fonctions qui partagent les mêmes types d'entrées et de sorties de flux fonctionnel et qui sont réutilisés dans le même produit sont regroupés dans un module.
- Heuristique de regroupement de fonctions communes : les groupes de fonctions qui sont employés dans différents produits peuvent être consolidés dans un module, et être employés à plusieurs reprises dans chaque produit de la famille. Les fonctions communes composent une "plateforme".
- Heuristique de regroupement de fonctions uniques : les groupes de fonction qui apparaissent seulement dans un produit peuvent être consolidés dans un module. Ce module est utilisé seulement dans ce produit.

### 2.7.1.2 Travaux orientés uniquement sur les relations

Ces travaux se focalisent particulièrement sur le terme « interfaces des composants ». Star (1965) explique que l'utilisation des interfaces dans le produit est le cœur de la conception modulaire. Sanchez et Mahoney (1996) expliquent la façon dont l'utilisation d'interfaces standard dans la structure du produit facilite la création de divers produits de manière très efficace. Garud et Kumaraswamy (1995) ont aussi réalisé des travaux dans cette direction, plus particulièrement sur la production de composants modulaires conformes aux interfaces, dans le but de créer des architectures de produit flexibles.

Sanchez (1999) classe les interfaces de la façon suivante :

- Interfaces d'accouplement : spécifications par rapport à la manière dont un composant doit être attaché ou assemblé à un autre.
- Interfaces spatiales : il s'agit des caractéristiques au niveau dimensionnel et de la localisation d'un composant par rapport à un autre.
- Interfaces de transfert : spécifications par rapport à la façon dont un composant transmet de l'énergie mécanique, électrique, ou tout autre flux.
- Contrôle et communication : spécifications par rapport à la manière dont un composant communique avec un autre. Par exemple, l'information entre composants électroniques.
- Interfaces d'environnement : spécifications de l'état (souvent nocif) d'un composant en état de fonctionnement qui peut nuire au fonctionnement d'un autre (température, corrosion, etc.).
- Interface d'ambiance : spécifications par rapport aux tolérances en fonction des interfaces d'environnement.
- Interfaces d'utilisation : spécifications relatives à la manière dont les utilisateurs pourront utiliser les produits.

D'autres travaux considèrent que les spécifications (ou paramètres) peuvent être définis de façon générique par des rapports ou liens mathématiques ou des contraintes techniques à travers l'architecture. Dans ce sens Tollenaere (1998, chapitre 19) explique qu'un produit est en réalité un système de liens entre paramètres de conception. Par exemple  $A=B+1$ , où "B" est un paramètre indépendant, "A" est un paramètre dépendant de "B". Ces deux types de paramètres peuvent être ou non d'un même composant. En synthèse, la définition d'une caractéristique dépend de la définition d'une autre. Selon Tollenaere (1998, chapitre 19) les types de relations entre paramètres ou définition de contraintes peuvent être de type :

- numérique : équation ou inéquation
- de typage :  $x \in R$
- booléen :  $(x \wedge \bar{y}) \vee (y \wedge \bar{z}) = \text{vrai}$
- ensembliste :  $(x \cap y) \cup z = \{a, d, g, h\}$
- symbolique : elles se mettent toutes sous une forme conditionnelle et disjonctive de type SI... ALORS... SINON.
- Semi symboliques numériques : par exemple l'affectation de valeurs d'une variable comme proposé dans le tableau ci-dessous :

Matériau	G	E	..	Rm	Re	A%	p
AcierE24-2	8000	210000	...	340	235	...	7800
AU4G	...	...	...	...	...	...	...

Tableau 2-2. Tableau donnant les caractéristiques physiques d'un matériau

Martin et Ishii, (2002) expliquent qu'un produit peut être vu comme un système d'éléments (composants) liés entre eux à partir de spécifications, en utilisant une matrice. Ils utilisent une matrice pour visualiser la relation mathématique (intersection dans la matrice) entre les paramètres indépendants (verticalement) et dépendants (horizontalement) des composants.

D'autres axes de recherche dans ce sens ont été suivis, particulièrement par l'utilisation des outils de la PPC (Programmation Par Contraintes), dans la littérature de l'ingénierie de conception. Ces travaux se focalisent sur l'évaluation d'un ensemble de contraintes pour trouver les valeurs valides d'un ensemble de paramètres pour différents produits, ayant a priori connaissance des valeurs des paramètres indépendants. Les travaux de Hadj-Hamou (2002) et Michel Aldanondo sur la « configuration de produits » vont dans cette direction.

Une analyse des différents travaux par rapport au concept d'interfaces nous permet d'affirmer qu'un produit peut devenir plus adaptable ou modulaire à partir de deux aspects :

- Le nombre d'interfaces entre les modules
- La standardisation des interfaces entre les modules.

### 2.7.1.2.1 Le nombre d'interfaces entre modules

Selon Erixon (1998), une architecture est inefficace pour le développement de produits si on a besoin d'adapter un grand nombre d'interfaces de couplage entre modules.

Un aspect important dans ce sens est le choix de la taille des modules ou la délimitation du contenu des modules. On peut mentionner qu'un élément devient donc plus interchangeable s'il contient une faible quantité d'interfaces à respecter par rapport au système (par rapport à d'autres modules ou composants du produit). L'adaptabilité des nouveaux produits, tant au niveau de la conception que de l'assemblage, dépend du nombre d'interfaces de chaque module.

Mikkola (1999) analyse, dans ce sens, le niveau d'interchangeabilité (modularisation) de différents éléments d'un système, voir Figure 2-13. Elle explique qu'un système composé



d'un ensemble de sous éléments doit respecter habituellement une quantité importante de spécifications ou interfaces d'accouplement. Les sous éléments doivent respecter une quantité plus faible.

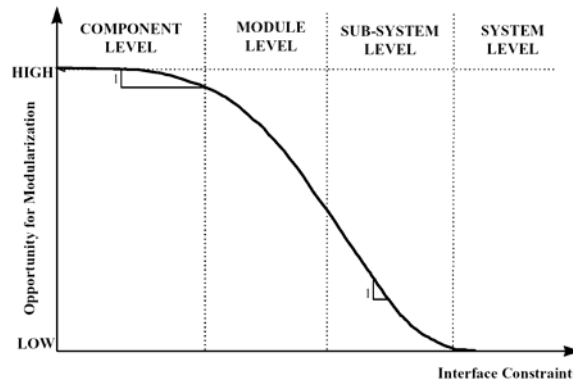


Figure 2-13. Niveau de complexité et couplage d'un système, Mikkola (1999)

Habituellement un système a plus de contraintes d'accouplement que les sous systèmes. Par exemple, l'assemblage ou la conception d'un moteur de voiture exige de respecter une quantité plus importante de contraintes qu'un simple composant du moteur. Les spécifications du moteur doivent être en harmonie avec les dimensions de la boîte de vitesse, du réservoir de réfrigération, du centre de gravité de la voiture, de la place du volant, etc.

La hiérarchie du système dicte la complexité des caractéristiques d'interface, l'interchangeabilité et la modularisation d'une architecture.

Certains travaux ont développé des méthodes pour regrouper les modules en se basant sur le nombre d'interfaces entre composants. Leur objectif est de permettre de gérer des modules de composants fortement liés ayant un faible nombre d'interfaces entre eux (modules). Par exemple, Huang et Kusiak (1998), Kusiak et Huang (1997) qui utilisent différents algorithmes pour regrouper les composants, voir Figure 2-14.

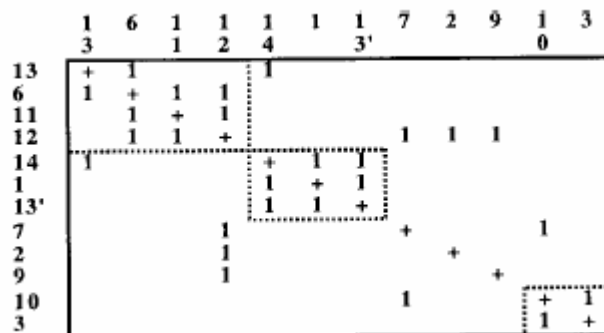


Figure 2-14. Matrice de modules, Huang et Kusiak (1998).

La figure montre une matrice composants - composants, les intersections représentent les relations d'interfaces de couplage. Après l'application d'un algorithme, les composants ayant de nombreuses relations sont regroupés en modules de façon à ce que les interfaces entre les modules soient peu nombreuses. Entre autres on peut mentionner Messac et al. (2000), Mikkola (1999 b), et pour la construction de plateformes on peut se diriger vers Nayak et al. (2000).

### 2.7.1.2.2 Standardisation d'interfaces entre modules :

Mikkola 2003, mentionne que la facilité d'adaptation d'une architecture afin de développer d'autres produits est en fonction de la possibilité de substitution de composants (ou modules). Cette possibilité de substitution est en fonction du degré de synergie entre les composants (ou modules).

Schilling et Steensma (2001), mentionnent que tout système a un degré de synergie (« synergie specificity »), et celle-ci peut être réduite grâce à la définition d'interfaces ou paramètres standard. Un produit peut être adapté plus facilement avec de nouveaux modules s'il existe des interfaces standard dans le marché. Par exemple, les ports de communication USB sur les ordinateurs sont définis comme interfaces standard sur le marché. Les utilisateurs peuvent configurer un ordinateur par l'assemblage de différents moniteurs. Les interfaces standard facilitent donc le couplage et la compatibilité des modules pour la configuration d'une variété importante de produits.

Sanchez et Mahoney (1996) expliquent qu'un produit devient modulaire quand les caractéristiques d'interface de ses composants permettent leur substitution. Le problème essentiel pour le marché est de définir, de manière consensuelle, les interfaces standard et adéquates à un moment donné, celles qui faciliteront la conception et les performances des produits dérivés.

Une analyse de ce genre est en dehors des objectifs de cette thèse. Cependant, le lecteur peut considérer qu'un aspect important est l'analyse des différents produits à développer selon les prévisions des besoins du marché. Le manque de coordination dans le marché ou la non prévision de possibles produits ou modules à développer exige l'actualisation et l'évolution constante des interfaces de connections entre modules. Tel a été le cas de certains ports de communication des ordinateurs. Le port de communication USB 2 a été développé à partir du port USB standard. Cette interface a été lancée sur marché pour améliorer un produit existant.

### 2.7.1.3 Travaux orientés sur les éléments et les relations

A notre connaissance il existe peu de travaux qui prennent en compte en même temps les éléments et les relations (interfaces) pour la définition de produits modulaires. Cependant on peut mentionner quelques travaux qui d'une certaine façon prennent en compte ces deux aspects. Par exemple, Hata et Kimura (2001), qui ont développé une procédure dans la sélection de modules de composants : dans une première phase, les modules sont regroupés par rapport aux relations physique – fonctionnelle (relations des interfaces) entre les éléments, dans la deuxième phase, les composants sont regroupés en modules selon des critères de cycle de vie du produit. Ils utilisent un modèle mathématique pour minimiser le nombre d'interfaces hors des modules par rapport au nombre d'interfaces dans les modules. Entre autres, Simpson et al. (1996, 2001) assignent les fonctions nécessaires aux produits. A partir de la définition des fonctions, on évalue les paramètres de conception (ou interfaces) qui pourront avoir de l'influence pour la différenciation de produits. L'objectif d'une telle étude est de définir les

paramètres qui n'ont pas besoin de changer, de façon à avoir un système robuste dont le changement de quelques éléments (composants) permette de développer une variété de produits.

### 2.7.2 Classification par type d'outil

Cette partie essaye de passer superficiellement en revue la classification « types d'outils ». Cette partie montre quelques travaux focalisés sur le développement ou l'utilisation des outils pour définir des modules soit dans l'étape de conception ou lors de la production. Cette partie est divisé en :

- travaux qui se focalisent sur les méthodes pas à pas qui suivent des étapes
- travaux qui utilisent des méthodes de représentation d'un système
- travaux qui se focalisent sur l'application d'un outil mathématique ou algorithme.

#### 2.7.2.1 Méthodes pas-à-pas de construction de modules

Il existe quelques méthodes de regroupement de modules, par exemple :

- Les méthodes de définition de clusters de composants. Plusieurs travaux mentionnés dans les parties suivants s'intéressent au concept de « technologie de groupe », ces travaux suivent une série d'étapes pour construire des clusters ou modules.
- D'autres méthodes utilisent des graphes et des matrices pour faire des partitions d'ensembles de composants, par exemple le travail de Huang et Kusiak (1998), Kumar et Chandraskharan (1990)<sup>12</sup>.

Un autre exemple de méthode modulaire se trouve dans Otto (2001), qui mentionne différentes manières de traduire les exigences du marché en fonctions du produit. Il a développé trois heuristiques (déjà mentionnées) pour regrouper en modules de telles fonctions du produit. Il propose de suivre les phases suivantes :

- analyser les besoins et le type d'utilisation du produit par les clients
- identifier les fonctions d'une famille de produits
- regrouper les fonctions par rapport à différentes heuristiques
- faire la sélection de modules de composants par rapport à des caractéristiques technologiques et physiques
- faire la comparaison et la sélection d'architectures de produits

Dahmus et al. (2000) mentionnent une autre méthode considérant les points suivants pour réaliser une architecture modulaire :

- évaluer la variance par rapport aux caractéristiques des produits sur le marché (quels sont les segments ?).
- définir les types d'utilisation des produits après l'achat. Il est indispensable d'avoir une bonne connaissance des exigences par rapport aux produits nécessaires afin de définir le

---

<sup>12</sup> Il mentionne quelques méthodes de partition modulaire avec l'utilisation de matrices

type de configuration nécessaire : soit les modules permutables sur des interfaces standard, soit une plateforme facilement réglable.

- définir la tendance en termes de changements technologiques. C'est-à-dire : quelle est la vitesse d'évolution de la technologie sur le marché par rapport aux divers modules ? Changent-ils avant que la mise à jour de produits soit exigée ?
- Considérer le terme « Design for "X" ». C'est-à-dire, comment la conception, la production, les critères d'approvisionnement et le cycle de vie du produit servent à déterminer le choix des modules.

Erixon (1998) mentionne une autre méthode<sup>13</sup> basée sur les facteurs du cycle de vie du produit pour construire des modules de composants. La méthode comporte cinq étapes, voir Figure 2-15 :

- Clarifier les exigences des clients : cette première étape emploie une matrice type QFD (Quality Function Deployment) pour identifier les meilleurs composants en fonction des exigences des clients, avec la modularité comme considération particulière, Figure 2-16.
- Choisir les solutions techniques : les fonctions du produit sont analysées et traduites en solutions techniques. Pour chaque fonction du produit, différents composants sont proposés. Une sélection de ces composants est faite par l'évaluation de différents critères de production (délai de production, qualité, coûts logistiques, coûts de stockage).
- Développement de prototypes : cette étape est centrée sur la définition de modules, et c'est le cœur de cette méthode. Cette étape emploie une matrice MIM (Module Indicator Matrix), celle-ci sert à examiner les corrélations entre les critères de sélection de modules (normalement, ce sont les critères en relation avec les activités du cycle de vie du produit, par exemple facilité de conception, recyclage etc.) et les composants sélectionnés dans l'étape antérieure. Un questionnaire est fourni pour soutenir cette activité. Les composants (verticalement) sont évalués par rapport aux critères (horizontaux) selon le questionnaire fourni, voir la Figure 2-17. Les composants avec une meilleure note sont appelés « porteurs ». Le reste des composants qui ont une bonne note dans les mêmes critères que les composants porteurs sont assemblés avec ces derniers pour former des modules. Par exemple, les composants « Grip » et « Cover » sont inclus dans un module avec le composant porteur « housing ».
- Evaluer les concepts : les effets de la sélection de modules de l'étape antérieure sont évalués. On évalue les critères comme le nombre d'interfaces entre modules, et l'amélioration de critères de performance des activités du cycle de vie du produit, par exemple : critères d'amélioration du temps de développement de produits dérivés, coûts de produits, coût de production, délai d'assemblage, facilité de recyclage de mêmes matériaux, etc.
- Améliorer votre sélection de modules : l'étape antérieure permet de donner une note d'évaluation au choix modulaire de la troisième étape. Dans cette cinquième étape on améliore le choix de modules en prenant en compte les critères de la quatrième.

Quelques autres méthodes sont exposées dans le tableau de l'annexe L. A titre de critique, ces méthodes par étapes restent très théoriques. Il n'existe pas de consensus par rapport à la meilleure méthode de conception. En outre, la plupart des méthodes ne sont pas validées par différentes applications en contexte réel.

---

<sup>13</sup> Cette méthode peut être considérée de type « simple » dans la classification systémique

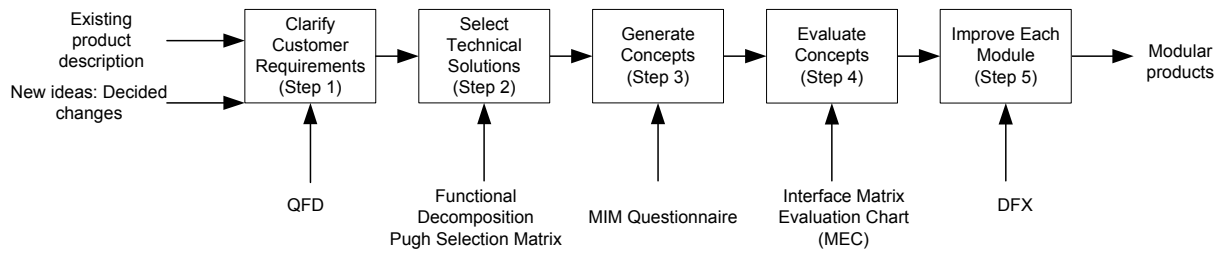


Figure 2-15 Méthode MFD (Modular Function Deployment), Erixon, (1998)

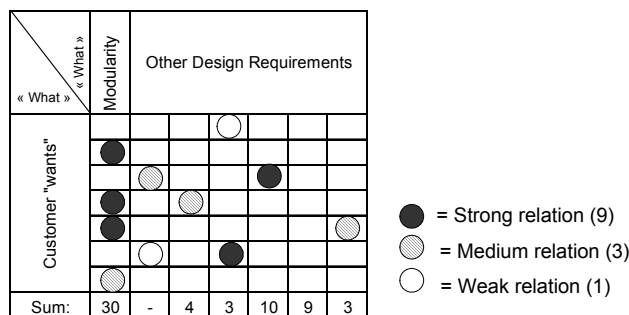


Figure 2-16. QFD avec modularité comme le premier objectif de conception, Erixon, (1998)

Module Driver		Function carrier																							
		Fan	Noise absorbent, fan	Electric motor	Damper	Noise absorbent, moto	Chassis	Bag	Filter	Trinistor+Knob	Switch+Knob	Housing	Wire+contact	Grip	Rear wheel	Front wheel	Accessoires	Bumper	Cover	Indicator	Seal cover	O-ring	Wire collector	Bag lock	Brake-knob
Design and Development	Carry-over	●		●					●	■		■			●	○			●			●			■
	Technology push																								
	Product Plan																								
Variance	Technical spec.	○	○	○				○	○	○		■													
	Styling								●	●	○	●	○					○							●
Manuf.	Common unit	■	■	■	●	●	●	●	■	■	■	○		■	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	■
	Process/Org.	●		●			●	●			●														
Quality	Separate testing			●							○														
Purchase	Black-box engineer							●	●			●													
	Service/maint.			■					○	■	○														
	Upgrading								●																
	Recycling			●			●					●											○		
Weight of Driver vertically summarized		24	4	43	9	9	27	27	32	34	18	27	16	9	4	18	10	9	9	18	9	9	19	9	15
Module candidates		X	X			X	X	X	X	X		X											X		

Figure 2-17. Regroupement ou intégration de modules, Erixon (1998).

### 2.7.2.2 Méthodes de représentation d'un système modulaire

Quelques travaux considèrent l'utilisation des modèles de représentation pour les systèmes modulaires. Par exemple Siddique et Rosen (1999) utilisent un modèle de graphes pour représenter l'architecture des produits afin de trouver des modules de fonctions et de composants, voir Figure 2-18. Cette figure représente une série d'étapes afin de développer plusieurs systèmes à différents niveaux de détails. L'architecture est développée afin de concevoir une série de cafetières. L'analyse commence par la définition très générale des fonctions principales d'une cafetière, voir le système fonctionnel (à gauche). Ce système fonctionnel montre les différentes tâches principales que la cafetière doit effectuer. Ensuite, le système fonctionnel est détaillé en sous fonctions (voir, par exemple, « Water Entrance » et « Water Storage »). Ceci nous permet de trouver les composants responsables de chaque groupe de sous fonctions, voir le système physique (à droite).

Bongulielmi et al. (2001), représentent des modules des caractéristiques de conception dans une matrice pour visualiser la variété de modules offerte à chaque segment. Hadj-Hamou-Hamou (2002), emploie une approche appelée « graphe de pack » pour représenter les configurations possibles de modules appelées « puits ». Chambolle (1999) emploie une approche STEP pour représenter le système des composants et de la variété de produits. Kusiak et Larson (1995) emploient des modèles de « graphes » et une matrice pour représenter trois systèmes : produit, décompositions de problèmes et décomposition du processus de production, ayant pour objectif de diviser et d'analyser les décompositions modulaires dans ces derniers domaines. Nous pourrions également mentionner, entre d'autres, les travaux de David et al. (1998), Kumar et Chandraskharan (1990).

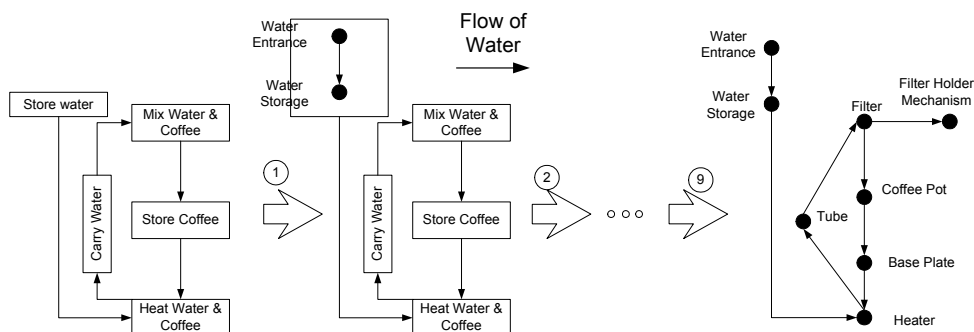


Figure 2-18. Modèle de graphe, Siddique et Rosen (1999).

### 2.7.2.3 Outils pour évaluer la modularité

Quelques travaux mentionnent diverses méthodes pour mesurer la modularité (voir définition de modularité) dans la conception de produits, celles-ci emploient des index d'efficacité. Par exemple, Mikkola (2003) mentionne la façon dont un produit peut être facilement adapté pour développer différents produits en mesurant sa modularité. Elle mentionne la modularité comme synonyme du nombre de relations techniques ou interfaces entre composants. Elle explique que si un produit est fortement modulaire, il peut être employé pour concevoir facilement d'autres produits. Voici comment elle évalue la modularité :

$$M(\mu) = e^{-\mu^2 / 2Ns\delta}; \quad \delta_i = \frac{\sum K_c}{N_c}; \quad \delta = \frac{\sum_{i=1}^I \delta_i}{I}; \quad s = \frac{\text{Nombre de produits}}{K_{NTF}}$$

Où:

$M(\mu)$  = Fonction de modularité d'un produit

$N_c$  = Nombre total de sous systèmes ou modules

$N$  = Nombre total de sous composants

$I$  = Nombre de sous composants à l'intérieur des sous systèmes

$\delta_i$  = Nombre d'interfaces par sous système.

$\mu$  = Nombre de sous composants nouveaux et spéciaux utilisés pour différencier un produit précis. Ces sous systèmes sont appelés NTF (« New To Firm components »).

$K_{NTF(avg)}$  = Nombre moyen d'interfaces des NTF.

$K_c$  = Nombre d'interfaces de chaque sous composant

$\delta$  = Degré de couplage du système

$S$  = Facteur de substitution

La Figure 2-19 montre un exemple, elle illustre une architecture de type « A » et une architecture de type « B », ceux-ci sont composés de modules et de sous composants. Chacune comporte des sous composants spéciaux et communs entre produits. Chaque élément est lié par interfaces de couplage.

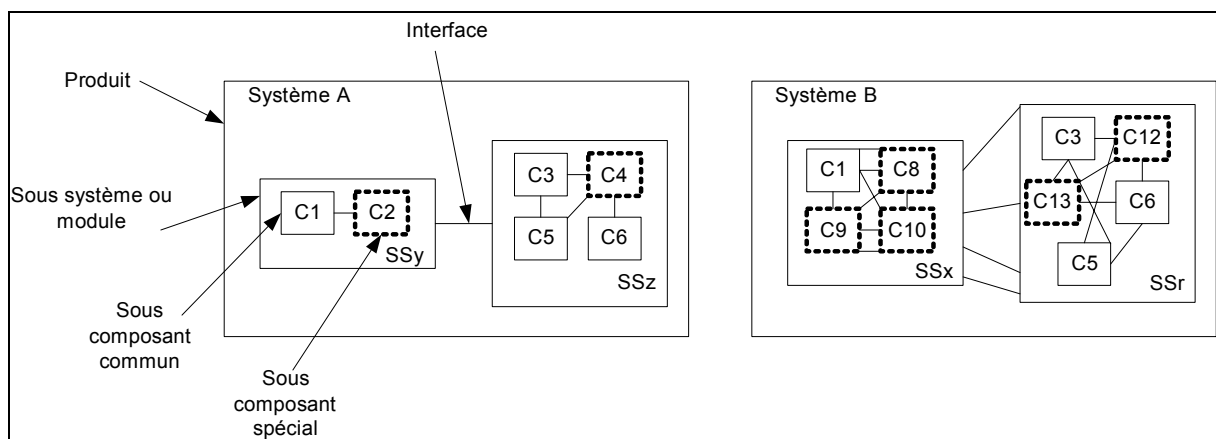


Figure 2-19. Exemple d'évaluation de la modularité

De l'architecture de type « A » on obtient 5 produits différents et de l'architecture de type « B » on obtient 10 produits différents. Selon la fonction de modularité, l'architecture de type « A » est plus modulaire et interchangeable que l'architecture de type « B » puisque le degré de couplage entre les éléments est inférieur. L'architecture de type « A » peut être plus facilement reconfigurée afin d'obtenir différents produits, voir le Tableau 2-3 :

Architecture de type « A » Nombre de produits = 5 $\mu = 2$ $N = 6$ $s = 5/2 = 2,5$ $\delta = (10/6)/2 = 0,833$ $M(\mu) = 0,852$	Architecture de type « B » Nombre de produits = 10 $\mu = 5$ $N = 9$ $s = 10/5 = 2$ $\delta = (26/9)/2 = 1,444$ $M(\mu) = 0,618$
--	--

Tableau 2-3. Résultats de la fonction de modularité

Erixon (1998) mesure le modularité d'un ensemble de modules avec l'index «  $E_{var}$  » :

$$E_{var} = \frac{N_{var}}{N_{tot}}$$

$N_{var}$  = Nombre de variantes de produits (requis par des clients) qui peuvent être réalisées.

$N_{tot}$  = Nombre total des modules différents requis pour obtenir toutes la variété de produits.

Une valeur basse de  $E_{var}$  indique une similitude élevée entre les variantes de produits, ce qui a beaucoup d'avantages par exemple, une moindre quantité de set up, d'outils de production, une planification simplifiée de la production, etc.

Kumar et Chandraskharan (1990) mentionnent des mesures d'efficacité dans la construction de modules par le calcul du pourcentage des composants dans et hors des modules.

Hata et Kimura (2001) développent deux manières d'évaluer un module :

- le pourcentage des composants dans un module avec les mêmes attributs par rapport aux critères du cycle de vie du produit.
- le pourcentage d'interfaces à l'intérieur des modules par rapport au nombre d'interfaces à l'extérieur des modules.

La méthode de Kumar et Chandraskharan (1990), mentionnée antérieurement, peut être particulièrement utile et simple. Cette méthode est suffisamment générique et peut être adaptée dans une méthode matricielle<sup>14</sup> de regroupement d'éléments, et pour la résolution de problèmes de programmation mathématique.

### 2.7.2.4 Outils mathématiques et algorithmes

Pour la définition de modules, plusieurs algorithmes, liés au concept de « technologie de groupe », ont été proposés. Habituellement, ce concept est focalisé sur le regroupement des opérations de production, c'est-à-dire, faire des modules d'opérations de production afin de faciliter la production. Les algorithmes de base par rapport au concept « technologie de groupe » sont : l'algorithme "MODROC" de Chandrasekharan et Rajagopalan (1986), l'algorithme appelé "Production Flow Analysis" de Burbidge (1982), l'algorithme « Single Linkage Clustering » de McAuley (1972), l'algorithme « Rank order Clustering » de King et

<sup>14</sup> Voir par exemple Huang et Kusiak (1998) et Kusiak (1999, chapitres 2, 3, 11, et 12).



Nakornchai (1982), l'algorithme "Bond Energy" de McCormick et al. (1972), et l'algorithme "Numerical Taxonomy" de Carrie (1973).

D'autres algorithmes, qui ne figurent pas dans ce classement, sont considérés comme très importants pour construire des modules d'opérations. Nous pouvons citer, par exemple « the closest neighbor algorithm » de Boe et Cheng (1991), ainsi que les algorithmes de King (1980), Kusiak et Wang (1995) et l'algorithme génétique de Joines et Culberth (1996).

Plusieurs problèmes d'optimisation liés au concept de « technologie de groupe » ont été proposés, par exemple Kusiak (1987). Un travail très cité de programmation mathématique est celui de Evans (1963) qui utilise un modèle de programmation non linéaire appelé SMD (Single Module Design). Son programme mathématique pour la construction de différents produits avec un seul module est représenté de la façon suivante :

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{j=1}^n d_j Y_j \sum_{i=1}^m C_i X_i \\ & \text{Subject to :} \\ & X_i Y_j \geq R_{ij} \\ & X_i > 0, \forall i, Y_j > 0, \forall j \end{aligned}$$

Où :

$n$  = nombre de produits.

$m$  = nombre de composants

$X_i$  = nombre de composants  $i$  dans le module

$Y_j$  = nombre de modules dans le produit  $j$

$R_{ij}$  = nombre de composants  $i$  requis dans le produit  $j$

$d_j$  = demande du produit  $j$

$C_i$  = coût du composant  $i$

Cette formulation permet d'optimiser le choix de composants à l'intérieur d'un seul module ( $X_i$ ). Le choix prend en compte le fait que le même module sera utilisé en quantités différentes dans des produits différents ( $Y_j$ ). Le problème se focalise sur la minimisation du coût total lié à la quantité du module utilisée et au choix des composants. La Figure 2-20 illustre l'information disponible et les problèmes que résout cette formulation d'optimisation.

Ce problème de programmation a été adapté dans un autre problème de programmation non linéaire MMD (Multiple Modular Design problem) pour l'utilisation de plusieurs modules différents sur plusieurs produits.

Une classification intéressante par rapport aux travaux de programmation mathématique est dans Viriththamulla (1991) et Goldenberg (1984).

Parmi quelques outils mathématiques intéressants pour construire des modules, on peut trouver le travail de Huang et Kusiak (1998). Ils emploient un algorithme et une matrice pour organiser les modules et identifier les composants de différenciation entre les produits. La méthode permet d'identifier le nombre de modules et le nombre de composants de différenciation à employer afin de satisfaire la variété de produits. Kusiak (1999, chapitres 2, 3, 11, et 12) mentionne aussi quelques algorithmes intéressants pour trouver des modules dans l'architecture du produit.

Information disponible	Problèmes à résoudre	Possibles solutions																																																																								
<p><b>Produit A</b> a besoin de : 1 composant C1 2 composants C2</p> <p><b>Produit B</b> a besoin de : 2 composants C2 1 composants C3</p> <p><b>Produit C</b> a besoin de : 1 composant C4 2 composants C3 1 Composant C5</p> <p>Demande : Produit A = 2000 Produit B = 5000 Produit C = 3000</p> <p>C1 = 30€ C2 = 5€ C3 = 15€ C4 = 50€ C5 = 10€</p>	<p>Comment faire le choix d'un seul type de module ?</p> <p>Comment faire le choix d'un module qui contienne les composants dont on a besoin dans chaque produit ?</p> <p>Comment faire le choix d'un module qui réduise le coût et nombre de composants non utilisés ?</p> <p>Quelle quantité de ce module utiliser pour chaque produit ?</p>	<table border="1"> <tr> <td>C1</td><td>C1</td><td>C1</td><td>C4</td><td>C1</td><td>C1</td> </tr> <tr> <td>C3</td><td>C1</td><td>C2</td><td>C2</td><td>C3</td><td>C2</td> </tr> <tr> <td></td><td></td><td>C2</td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>C1</td><td>C2</td><td>C1</td><td>C4</td><td>C1</td><td>C4</td> </tr> <tr> <td>C2</td><td>C2</td><td>C3</td><td>C2</td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td></td><td></td><td>C5</td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>C1</td><td>C2</td><td>C1</td><td>C3</td><td>C1</td><td>C2</td> </tr> <tr> <td>C2</td><td>C2</td><td>C3</td><td>C4</td><td>C2</td><td>C5</td> </tr> <tr> <td>C4</td><td></td><td>C4</td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>C1</td><td>C1</td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>C1</td><td>C2</td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>C5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> </table> <p>.....ETC.....ETC.....ETC..... ..</p>	C1	C1	C1	C4	C1	C1	C3	C1	C2	C2	C3	C2			C2				C1	C2	C1	C4	C1	C4	C2	C2	C3	C2					C5				C1	C2	C1	C3	C1	C2	C2	C2	C3	C4	C2	C5	C4		C4				C1	C1					C1	C2					C5					
C1	C1	C1	C4	C1	C1																																																																					
C3	C1	C2	C2	C3	C2																																																																					
		C2																																																																								
C1	C2	C1	C4	C1	C4																																																																					
C2	C2	C3	C2																																																																							
		C5																																																																								
C1	C2	C1	C3	C1	C2																																																																					
C2	C2	C3	C4	C2	C5																																																																					
C4		C4																																																																								
C1	C1																																																																									
C1	C2																																																																									
C5																																																																										

Figure 2-20. Problématique du modèle de programmation non linéaire SMD

David et al. (1998) ont développé un outil pour évaluer différents critères liés à la substitution de différents modules dans l'architecture du produit. La méthode considère les contraintes en termes de coûts, de délai d'obtention des produits et de la place du module dans la séquence d'assemblage.

Kusiak et Wang (1995) exposent un outil pour trouver des modules d'opérations de production avec une matrice « activité - activité ». Ils évaluent la modularité de la matrice avec des fonctions qui évaluent la densité des modules ("densité" = nombre d'activités dans chaque module). Ils trouvent les chemins opérationnels critiques dans la chaîne de production, ce travail peut être considéré comme un outil dans le concept « technologie de groupe ».

Agard (2002) mentionne un algorithme pour optimiser la partition d'un groupe de composants dans les modules. Il tient compte de l'économie de temps si certains modules isolés sont produits par des fournisseurs externes.

Thomas (1991) donne un algorithme qui montre comment différents composants peuvent devenir communs à plusieurs produits. L'algorithme fait la comparaison de chaque composant avec d'autres, afin de regrouper des modules de composants communs. Un modèle mathématique est employé pour minimiser les coûts ainsi que l'écart par rapport aux besoins fonctionnels des produits finaux.

King (1980) a développé un des premiers algorithmes pour former un module qui fait maintenant partie des méthodes « Array based methods » du concept « technologie de groupe ». Il explique la façon de regrouper des machines à l'intérieur de cellules (modules). Il emploie une matrice "composant-machine".

On peut trouver aussi des méthodes d'intelligence artificielle. Certaines applications récentes sont intéressantes, par exemple : « Fuzzy c-mean cluster » de Chu et Hayya (1991) et le

système expert de Kusiak (1998). Malheureusement, ces types de méthodes peuvent être difficiles à appliquer dans un contexte pratique du fait de la spécificité ou particularité des problèmes industriels traités.

### 2.7.3 Littérature traitant des activités du cycle de vie du produit.

La conception basée sur les activités de cycle de vie du produit a été un thème de recherche depuis 1990. Cet aspect est habituellement connu comme « Design for X » dans la littérature sur la conception de produits. Veeralamolmal et al. (1999) mentionnent par exemple: Design for Assembly (DfA), Design for manufacturing (DfM), Design for Environment (DfE). Le lecteur peut se diriger vers Ulrich et Eppinger (2000) ou Pahl et Betiz (1998), pour un guide général sur le développement ou la conception de produits considérant d'autres activités du cycle de vie du produit.

Dans la conception de modules, nous pouvons également trouver : « Modularity for Conception » (MID), « Modularity for production » (MIP), « Modularity for Use » (MIU), de Baldwin et Clark, (2000). Hata et Kimura (2001) mentionnent qu'il faut prendre en compte différents aspects du cycle de vie du produit pour construire des modules par exemple :

- Ne combinez pas (dans un module) les composants faits à partir de matériels différents. L'utilisation de modules doit faciliter le recyclage.
- Ne combinez pas les composants (dans un module) qui ont un temps de vie différent. Les composants doivent avoir le même taux d'usure. L'utilisation de modules doit faciliter le service au client.
- Ne combinez pas les composants qui ont différents intervalles d'entretien et de mise à niveau. L'utilisation de modules doit faciliter la maintenance et le développement des produits dérivés.

Les parties suivantes montrent une classification des travaux sur la construction de modules visant à faciliter différentes activités du cycle de vie du produit.

#### 2.7.3.1 Conception et développement de produits

Dans ce chapitre on ne rentrera pas en détail puisque la plupart des concepts et travaux mentionnés dans cette thèse visent à faciliter le processus de conception et de développement des produits.

Cependant, on peut mentionner que dans l'étape de la conception du produit le fait d'avoir des modules permet principalement deux choses : d'abord le contrôle des variables de la conception de manière séparée, et ensuite de visualiser la fonctionnalité d'un produit de façon plus ordonnée, comme on l'avait mentionné auparavant.

Le fait d'avoir des modules permet aussi d'organiser les bureaux d'études en équipes de personnes de manière à pouvoir concevoir différents modules à la fois. La question cruciale est de savoir quels sont les modules qui facilitent le travail collaboratif présent et futur de la conception de produits.

### 2.7.3.2 Production

On peut considérer qu'il existe deux types de travaux centrés sur la construction de modules liés à des critères de production :

- ceux visant à organiser des modules ou des cellules d'opérations de production, par exemple ceux focalisés sur le concept « technologie de groupe » mentionné auparavant.
- ceux visant à réorganiser des modules de composants afin d'optimiser les critères de production, par exemple le temps et le coût de production. Ces travaux tendent à faciliter l'activité de conception de produits. On remarque, parmi quelques travaux, ceux de Da Cunha (2004) qui a développé une étude pour le choix de la composition de modules à pré assembler pour minimiser le temps d'assemblage final. Citons également Agard (2002), ou Ulrich et Brandeau (2000). Les travaux portant sur la construction de plateformes et sur la différenciation retardée, développés dans les parties suivants, vont dans cette même direction.

### 2.7.3.3 Utilisation et Recyclage

Certains travaux expliquent que la construction de modules de composants facilite la reconfiguration et l'utilisation des produits par le client final. L'utilisation de modules permet aux clients de transformer le produit final, par exemple, la distribution des sièges de l'habitacle de certaines voitures est configurable.

Cette facilité pour reconfigurer un produit facilite aussi le désassemblage des composants pour le recyclage.

En résumé, en ce qui concerne l'utilisation et le recyclage de produits, à notre connaissance, il existe très peu de travaux qui expliquent comment construire des modules. Cependant, le lecteur peut se diriger vers Tseng et Jianxin (1996), et Newcomb et al. (1998) qui mentionnent les implications de l'utilisation de modules pour le recyclage et l'utilisation de produits.

Hata et Kimura (2001) mentionnent un modèle mathématique pour faire des modules de composants dans ce domaine. Ils regroupent les composants en modules s'ils partagent les mêmes attributs suivants :

- le même traitement de récupération,
- les mêmes caractéristiques du matériel pour le recyclage,
- le même temps de cycle de vie physique, c'est-à-dire la même durée de vie des matériaux,
- le même temps de cycle de vie fonctionnel, c'est-à-dire la même durée de fonctionnement.

Ils mentionnent aussi différents points pour construire des modules. Par exemple :

- ne pas combiner les composants faits avec différents matériaux dans un même module,
- ne pas combiner les composants avec différents cycles de vie,
- ne pas combiner pas les composants avec différents intervalles d'entretien<sup>15</sup>.

---

<sup>15</sup> Cette règle de conception, ainsi que d'autres, peuvent se rapporter aux normes internationales.

### 2.8 Conclusions

Dans ce chapitre nous avons passé en revue de manière générale le concept de modularisation de produits, nous avons ainsi pu clarifier le contexte de travail de cette thèse et les différents concepts qui seront utilisés par la suite.

Les Parties 2.2 et 2.3 ont permis d'identifier également quelques avantages et désavantages du concept de modularité.

La description des implications par rapport à l'organisation de l'entreprise (exposé dans la partie 2.5) permet d'illustrer le cadre de l'adéquation d'une politique modulaire.

La description de quelques exemples industriels (partie 2.4) a permis de montrer les différentes applications du concept de modularité et les avantages obtenus grâce à « Mass Customization » par certaines compagnies.

La définition du concept d'architecture modulaire, dans la partie 2.6, a permis de discuter sur quelques aspects associés à la conception modulaire dans la conception de produits.

La description de travaux de recherche (partie 2.7) a illustré l'intérêt de cette stratégie afin de concevoir des produits et processus de production de la meilleur façon possible. Cette partie a montré également les différentes dimensions de recherche, la classification de la littérature donne également une idée générale du sujet.

Cette thèse s'intéresse particulièrement au développement des méthodes de conception de produits visant à faciliter l'étape de conception dans la classification : « travaux traitant des éléments et de leurs relations », voir partie 2.7.1.3. Cette étude ne s'intéresse pas aux aspects organisationnels ou au regroupement des opérations de production.

Cette thèse se concentre sur l'utilisation de la configuration modulaire « Bus », voir partie 2.6.4, pour la configuration de produits.

La partie suivante discute sur le sujet de l'utilisation de plateformes et leur relation avec la configuration modulaire « bus » de produits. Différentes idées sont liées à cette méthode modulaire. Une revue générale de ce concept est donc donnée dans la partie suivante.



# Chapitre 3. Conception de produits avec plateformes

## Introduction

Dans ce chapitre nous nous intéresserons à l'utilisation de plateformes comme stratégie modulaire pour la personnalisation de masses de produits.

Le contexte de l'utilisation de plateformes et la définition « plateforme » sont décrits dans la partie 3.1. Les avantages et limites de l'utilisation de plateformes par rapport à la personnalisation de masses de produits (« Mass Customization ») sont mentionnés dans les parties 3.2 et 3.3. Une étude bibliographique sur quelques travaux de recherche est exposée dans la partie 3.6. Le rapport entre l'utilisation de plateformes et la différenciation retardée de produits est exposé dans la partie 3.7.

### 3.1 Définition de plateforme

Dans la littérature de gestion, on peut trouver différentes définitions très générales du concept de plateforme, par exemple :

- Les plateformes sont les biens intellectuels et actifs partagés à travers une famille de produits (Robertson et Ulrich 1998).
- Une plateforme est un ensemble de ressources, composants, interfaces, processus, technologies et connaissances qui sont partagés à travers les multiples produits offerts par une entreprise (Gonzalez 2000).
- Une plateforme est un ensemble de pièces, sous-systèmes et processus de fabrication qui sont mis en commun dans un ensemble de produits, et qui facilitent le développement et la production des produits dérivés. Ceci permet de réaliser des économies par rapport aux coûts et au temps d'obtention de produits finaux (Meyer et Lehnerd, 1997), ces aspects seront analysés plus en détail dans les parties suivantes.

En ce qui concerne à la conception de produits, une plateforme se rapporte à l'utilisation d'un module de composants commun pour le développement de différents produits, (Krishnan et Gupta, 2001), (Zamirowski, 1995).

Gonzalez et al. (2000), et Gonzalez (2000) mentionnent que l'assemblage de quelques composants de différenciation (voir glossaire), assemblés a posteriori sur une plateforme, permet de développer différents produits. On peut considérer que l'utilisation d'une plateforme se rapporte au module de base de la configuration modulaire « Bus », voir partie 2.6.4. Dans celle-ci, différents composants sont adaptés à un module basique, qui permet de créer autant de produits qu'il y a de composants de différenciation disponibles.

Une plateforme peut donc être considérée comme un module commun et un élément « noyau », elle sert de base technique pour la production d'une variété limitée de produits, voir Figure 3-1.

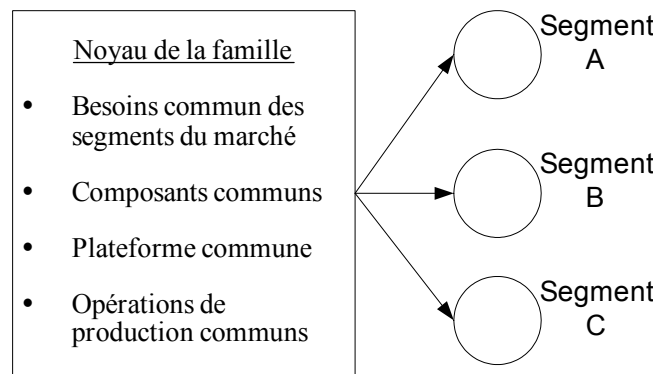


Figure 3-1. La plateforme est le cœur de la famille de produits

### 3.2 Avantages liés à l'utilisation de plateformes

L'utilisation de plateformes permet d'obtenir différents avantages.

Avantages liés à la conception de produits :

Parmi quelques avantages mentionnés dans la littérature (Meyer et al. 1997, Gonzalez 2000) liée au concept de plateforme on peut trouver la réduction du nombre de composants nécessaires à l'obtention de produits différents. Ceci implique la possibilité de commander des quantités plus importantes de composants communs aux fournisseurs et ainsi, de réaliser des économies d'échelle.

Kidd (1998) explique que cette stratégie permet de réduire les coûts de transport (puisque les composants proviennent des mêmes fournisseurs), de réduire la quantité de stocks spécialisés. Cela permet aussi de développer plus rapidement des produits puisque l'utilisation de composants communs réduit le nombre de tests de conception nécessaires. Les coûts de conception totaux s'en trouvent également réduits du fait que l'on évite les investissements dans de nouvelles technologies. Krishnan et Gupta (2001) expliquent également que la réutilisation d'un même sous assemblage permet de réduire les coûts fixes de développement. De la même façon, la réduction de la complexité permet à l'entreprise d'investir plus de temps et d'efforts dans la conception et le développement, ce qui a comme conséquence de meilleures architectures et des coûts variables unitaires inférieurs pour chaque produit.

Avantages liés à la production :

L'utilisation de plateformes permet la réutilisation d'actifs existants dans l'entreprise, par exemple ses systèmes d'organisation et production. Meyer et al. (1997), et Gonzalez (2000) expliquent que l'utilisation d'un ensemble de composants communs permet d'utiliser une moindre diversité d'opérations de production, ce qui permet de réduire la quantité de set-ups.

En outre, cela permet d'éviter les coûts relatifs aux investissements dans de nouvelles opérations et systèmes de production. Les opérations spéciales et spécifiques sont moins nombreuses.

L'utilisation de plateformes permet de réagir vite pour obtenir une diversité et une masse importante de produits, puisqu'on a besoin d'un nombre réduit d'opérations et de composants



de différenciation pour différencier un produit d'un autre ou pour produire une quantité quelle qu'elle soit. Par exemple Kidd (1998) explique qu'on peut obtenir une flexibilité plus importante et une facilité de production de grandes quantités en réponse à une demande imprévisible.

Krishnan et Gupta, (2001), expliquent qu'avoir des systèmes de production communs entre les produits, avec l'utilisation de plateformes, permet d'obtenir des coûts inférieurs du fait de la gestion de volumes plus importants.

En outre, on peut considérer que les stocks de production sont plus homogènes, puisque le nombre de composants spéciaux nécessaires est inférieur. Le nombre d'investissements sur stocks de composants spéciaux immobilisés est inférieur. La rotation du stock est plus importante puisque le même module est réutilisé dans plusieurs produits.

### 3.3 Limites du concept plateforme

L'utilisation de plateformes présente cependant aussi quelques désavantages. Par exemple Krishnan et Gupta (2001) mentionnent que lorsque les composants communs doivent être employés dans différents produits, certains peuvent être conçus avec des composants haut de gamme et performants non nécessaires ce qui génère un coût excédent de conception ou « sur conception ». Une situation similaire surgit quand des produits sont conçus de façon inefficace avec des composants bas de gamme, ayant ainsi une mauvaise qualité. C'est souvent le cas dans la pratique. En raison de volumes significatifs de production vendus, le coût du « sur conception » ou « sous conception » réduit la rentabilité de l'approche plateforme. Dans un tel cas, la compagnie doit faire une évaluation précise des coûts et avantages d'utiliser des plateformes.

Gonzalez (2000) mentionne deux désavantages :

- Normalement, ce qui doit être sacrifié pour obtenir des avantages globaux à partir de la conception de la famille de produits avec des plateformes, c'est la performance des différents produits. C'est-à-dire qu'afin d'obtenir une meilleure conception globale d'une famille dans son ensemble, la performance individuelle de certains produits peut être engagée.
- Un deuxième souci est la flexibilité : une plateforme pourra être suffisamment robuste, satisfaire les changements par rapport aux caractéristiques des produits et sera peut-être viable économiquement, cependant elle peut se révéler plus coûteuse dans l'étape de lancement qu'une alternative classique de conception individuel. Concevoir un module qui soit compatible avec différents produits, peut exiger plus de temps et d'efforts de conception.

### 3.4 Exemples de réussite de l'application du concept plateforme.

Malgré la difficulté que représente la considération de multiples produits simultanément pendant la conception d'une famille de produits, l'impact des plateformes dans quelques industries a été énorme. Volkswagen réalise \$1.7 milliards d'économies annuellement par

rapport aux coûts de développement et aux coûts de production et 25% d'économies sur l'outillage spécialisé de production (Bremmer, 1999). Sony a employé trois plateformes pour développer des centaines de produits différents à partir de sa ligne de produits Walkman (Sanderson et Uzumeri 1995). Black & Decker a établi une ligne de produits dérivés autour d'un moteur électrique (Meyer et al.1997). Ford a rigoureusement réduit le coût de production des moteurs V-8, par le changement de la conception classique (conception intégral) vers une famille de moteurs à partir d'une approche plateforme (Sanderson, 1991).

Les plateformes existent même dans des produits plus complexes, comme les avions ou les satellites. Par exemple, Airbus bénéficie de quelques avantages sur Boeing en matière de réduction des coûts en utilisant un ensemble de composants communs, par exemple le cockpit de l'avion A330 est utilisé sur différentes tailles d'avions de passagers.

### 3.5 Quand utiliser des plateformes

A notre connaissance, il n'y pas d'approches formelles (répandues et universelles) pour prendre la décision d'utiliser ou non une plateforme dans l'architecture d'une famille de produits. Plusieurs travaux se focalisent sur l'optimisation de différents critères pour prendre une telle décision. Cependant, on peut se servir de quelques guides pratiques mentionnés dans la littérature, par exemple, Otto et al. (2001) donnent une matrice de décision afin de savoir quand utiliser une plateforme ou non, voir Figure 3-2.

Haut : Problèmes évidents pour produire de la variété, marges de bénéfices nuls  Difficulté et coût pour offrir variété	Utilisez une plateforme	Analysez pour décider
	N'importe quel choix	Offrez des produits spécifiques
Bas : La variété ne pose pas de problème, grande marge de bénéfice	Bas	haut

Importance de variété  
pour le marché

Figure 3-2. Matrice de décision pour l'utilisation ou non d'une plateforme.

En abscisse, on évalue la difficulté d'offrir de la variété, c'est-à-dire, la complexité de concevoir, produire, maintenir ou recycler un niveau de diversité de produits en utilisant une certaine diversité de composants. En complément, le coût se rapporte au temps que prend la gestion et l'assemblage d'une grande quantité de composants différents. L'axe en ordonnée, fait référence au niveau de diversité de produits dont le marché a besoin, c'est-à-dire le niveau de demande et le niveau de personnalisation d'une telle demande en termes de besoins par les différents segments du marché.

Une autre approche se trouve dans les travaux de Zamirovski (1995) et Gonzalez (2000). Ils ont cherché à réaliser une analyse des besoins du marché pour déterminer quand utiliser des

plateformes, des modules simples ou des conceptions intégrales. Afin de connaître les besoins du marché, ils réalisent une étude statistique du marché, la Figure 3-3 montre une matrice pour recueillir des informations et réaliser une telle étude statistique. La matrice montre les attributs d'un « appareil photographique », chaque attribut a une échelle de performance avec des indices selon le niveau de performance. Cette matrice est utilisée pour recueillir et évaluer les données statistiques moyennes et les écarts des besoins de chaque segment, les résultats sont mis sur un tableau, voir Figure 3-4.

Criteria	\$15 less	Current Price			\$15 more
Size	Shoebox 1	2	Camera 3	4	Walkman 5
Light Adjustment	only in daylight 1	2	3 Settings 3	4	Automatic 5
Focusing	Fixed 1	2	3 Settings 3	4	Automatic 5
Ruggedness	Survives 1 Drop 1	2	5 Drops 3	4	10 Drops 5
Picture Quality	Fuzzy 1	2	Current 3	4	35mm 5
Film Pack Capacity	5 Exposures 1	2	10 Exposures 3	4	20 Exposures 5
Style	15 years out of date 1	2	Current 3	4	Wicked Cool 5

Figure 3-3. Matrice pour l'analyse du marché, Zamirowski (1995).

	Segment 1		Segment 2		Segment 3		Population	
	$\bar{\mu}_1$	$\bar{\sigma}_1$	$\bar{\mu}_2$	$\bar{\sigma}_2$	$\bar{\mu}_3$	$\bar{\sigma}_3$	$\bar{\mu}_{pop}$	$\bar{\sigma}_{pop}$
Size	3.533	0.516	3.700	0.949	3.800	0.632	4.333	0.816
Light Adjustment	2.533	1.187	4.600	0.843	3.300	0.483	3.667	0.724
Focusing	3.000	0.000	4.600	0.843	3.900	0.876	3.933	0.961
Ruggedness	3.333	0.488	3.000	0.000	2.800	1.033	3.533	0.990
Picture Quality	3.267	0.458	3.800	0.422	3.700	0.949	4.267	0.704
Film Pack Capacity	4.800	0.414	3.000	0.471	3.500	0.527	3.800	0.862
Style	3.000	0.000	2.700	0.675	3.800	1.317	2.923	1.188

Figure 3-4. Données statistiques, moyennes et écart des attributs, Zamirowski (1995).

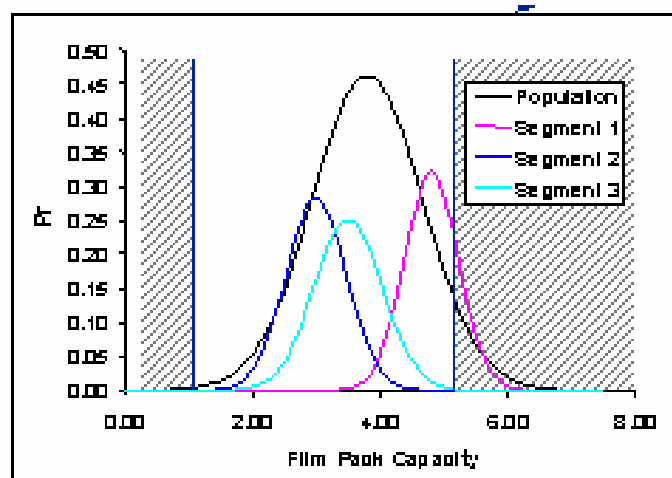


Figure 3-5. Moyennes et variations des attributs dans différents segments, Zamirowski (1995).

La Figure 3-5 est un graphique des résultats de l'attribut « film pack capacity ». La Figure 3-6 montre les cas de choix de différents types d'architectures selon les résultats de la Figure 3-5. Si la moyenne entre les segments n'est pas fixe par rapport à un attribut, l'utilisation d'une plateforme serait la meilleure option, c'est-à-dire que les composants liés avec un tel attribut seront mieux gérés dans une plateforme pour satisfaire la diversité de produits de chaque segment. Si la moyenne entre les segments est égale et leur écart type n'est pas large alors les segments ont en général les mêmes besoins, lesquels seraient satisfaits avec une même architecture intégrale (un même produit). Si l'écart type est large et si, en plus, l'écart type des segments est similaire à la valeur de l'écart type de la population, un produit ajustable pourrait aider à adapter un autre produit pour le produit d'un segment. Si l'écart des segments n'est pas similaire à la valeur de l'écart type de la population, le producteur a une forte variété de produits à satisfaire, une approche modulaire pourrait aider à satisfaire la diversité (représenté par l'écart type) de chaque segment. Agard (2002, p. 64) donne une analyse similaire, mais prend en compte la variable de temps pour calculer l'écart type.

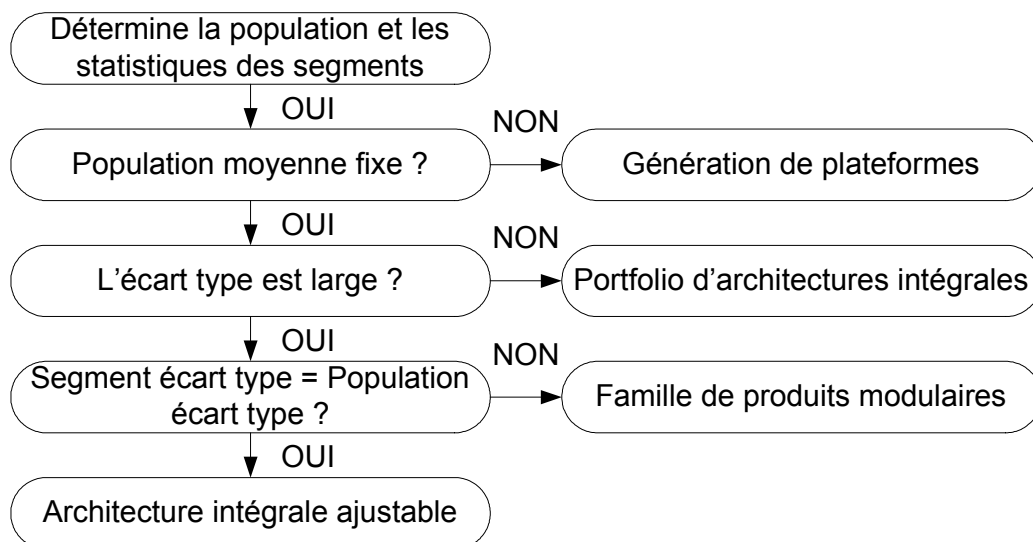


Figure 3-6. Chemin de décision de différents types de conception.

### 3.6 Construction de plateformes, revue de la littérature.

Cette partie mentionne quelques travaux intéressants par rapport à la définition de plateformes pour développer une variété de produits. Ces travaux couvrent différents domaines et dimensions de l'ingénierie en production. Nous allons mentionner deux classifications de travaux : quelques méthodes, qui seront mentionnées dans la partie 3.6.1, et quelques outils mathématiques, qui seront mentionnés dans la partie 3.6.2.

#### 3.6.1 Méthodes pour construire des plateformes.

Il existe quelques méthodes de regroupement de composants pour former des plateformes, par exemple on peut mentionner Robertson et Ulrich (1998) qui essaient de réunir dans une plateforme certains composants qui seront partagés par un ensemble de produits. Les composants choisis dans ces plateformes sont ceux qui ont deux caractéristiques principales :

- Ceux qui permettent des avantages menant à des économies d'échelle (voir glossaire) importantes s'ils sont réutilisés dans plusieurs produits,
- Ceux qui n'ont aucune relation avec les caractéristiques importantes de différenciation des produits du point de vue des clients, ou ceux qui ont une relation avec des caractéristiques de faible importance pour la différenciation de produits. En termes techniques, ce sont ceux liés aux fonctions de faible ou nulle importance du produit par rapport à la différenciation fonctionnelle des produits.

Parmi d'autres méthodes intéressantes on peut trouver celle de Meyer et al. (1997) qui mentionnent une méthode pour développer une famille de produits avec des plateformes; la méthode est montrée dans la Figure 3-7. La méthode se compose de trois études :

- Evaluation du marché : il faut réaliser la segmentation du marché et identifier les besoins du client et la performance du produit de chaque segment. Une analyse soignée des fonctionnalités du produit est faite pendant cette phase. Cette étape traite de la définition de la grille des produits du marché, voir Figure 3-7.
- Evaluation de la plateforme optimale pour la dérivation efficace de produits : il faut étudier les différentes options de plateformes ayant des interfaces particulières permettant d'adapter la conception de nouvelles plateformes (différenciation horizontale ou verticale de la conception), voir la Figure 3-8.
- Réalisation d'une étude pour évaluer la possibilité d'utiliser des éléments communs par rapport à chaque bloc dimensionnel « building block dimensions », voir Figure 3-7.

Otto et al. (2001) mentionnent une méthode basée sur des règles de regroupement des fonctions du produit. Ce travail prend les caractéristiques esthétiques des produits pour choisir des modules communs. Ils emploient une matrice pour grouper de tels modules.

Robertson et Ulrich (1998) utilisent trois phases pour la planification du développement d'une plateforme :

- Employer une planification du produit<sup>16</sup> pour décrire les produits que la compagnie offrira à l'avenir et le genre de clients qui utiliseront les produits.
- Faire un plan de différenciation qui décrive comment les produits vont être différents l'un par rapport à l'autre (par rapport aux attributs et caractéristiques).
- Faire un plan de standardisation qui décrive quels modules vont être différents et lesquels seront communs entre les produits.

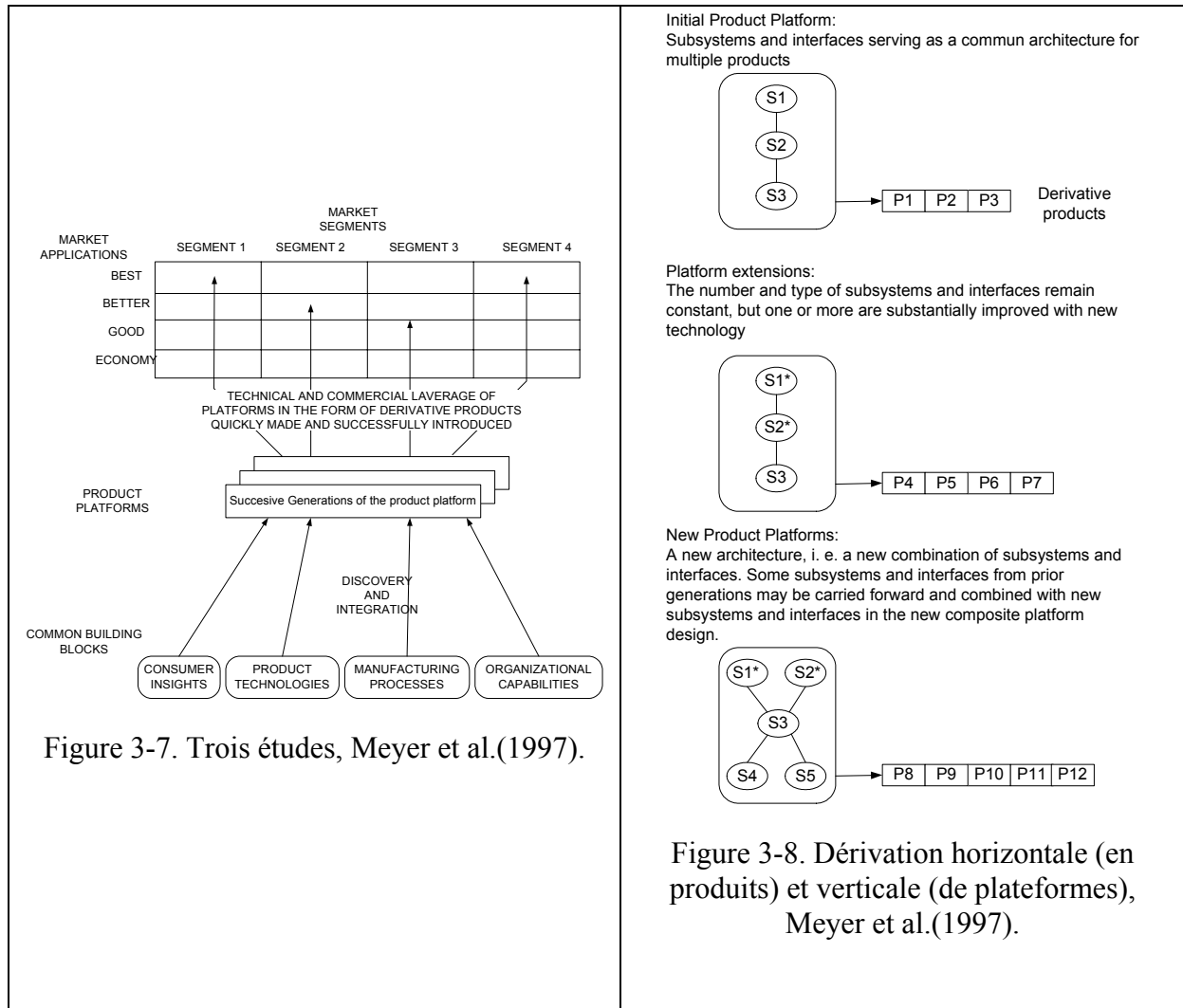
Ils évaluent le coût des modules communs et de différenciation. Leur analyse met en évidence les modules qui permettent la différenciation des caractéristiques des produits. Les modules qui permettent la différenciation de produits, et qui ont des coûts faibles, sont définis comme modules de différenciation, dans le cas contraire, s'ils ne permettent pas la différenciation de produits ou s'ils sont chers, ils sont sélectionnés comme plateformes.

Venkat et Rahul (2002) emploient une méthode à trois phases pour développer différents produits avec un groupe de modules communs (plateformes) :

---

<sup>16</sup> Diagramme type PERT

- Dans la première phase, ils font une représentation fonctionnelle de tous les produits pour pouvoir trouver des modules.
- Dans la seconde, ils emploient une étude d'optimisation (analyse « Pareto ») dans l'architecture du produit pour trouver la configuration des modules qui permette la fonctionnalité de chaque produit.
- La troisième est une technique pour affiner la conception de chaque produit.



Jianxin et Tseng (1999) traitent le problème de trouver modules communs (plateformes) et de trouver les modules spéciaux pour la différenciation de produits en utilisant une analyse en trois dimensions (fonctionnelle, technique et physique). Une telle analyse est un outil pour développer une architecture modulaire commun pour la conception de produits :

- dans la dimension fonctionnelle, ils regroupent les fonctions similaires dans des modules. Ils emploient une formulation mathématique pour distinguer les attributs similaires de chaque module fonctionnel.
- dans la dimension technique, ils emploient une matrice (paramètres de conception versus fonctions) et emploient l'algorithme de Newcomb et al. (1998) pour trouver des modules de fonctions dans cette matrice.

- dans la dimension physique ils font une évaluation des restrictions physiques et de la viabilité de la configuration modulaire des produits.

Martin et Ishii (1997) exposent une méthode pour évaluer le niveau des composants communs dans une architecture. Ils expliquent comment évaluer l'influence de la quantité de composants communs avant le point de différenciation dans la chaîne de production. Plusieurs coûts sont évalués dans ce travail pour calculer le point optimal de différenciation et le nombre optimal de composants communs qui permette de construire un groupe optimal.

### 3.6.2 Approches mathématiques

Une première vue générale de la bibliographie qui expose des outils mathématiques pour la construction de plateformes montre l'intérêt de former des plateformes de composants ou éléments par l'optimisation de différents critères du cycle de vie du produit. Comme on pourra observer dans ce chapitre, différents travaux se focalisent principalement sur l'optimisation des avantages liés à la réutilisation de composants, par exemple les aspects relatifs aux économies d'échelle, la réduction du délai de fabrication, etc.

Parmi quelques algorithmes, nous pourrions mentionner par exemple Otto et al. (2000) qui ont développé un modèle mathématique réduisant au minimum le nombre de modules différents requis dans chaque produit. Le modèle est sujet aux contraintes de la famille de produits et à des contraintes de compatibilité entre modules.

Fellini et Papalambros (2000) ont développé plusieurs problèmes mathématiques. Chacun a comme objectif de trouver les valeurs d'interfaces des modules du produit. Le travail expose un modèle mathématique multi objectif qui intègre ces problèmes mathématiques pour trouver une plateforme. Celui-ci a comme objectif de maximiser les économies d'échelle dans la famille de produits proposée.

Krishnan et Gupta (2001), ont développé un modèle mathématique qui vise à optimiser les bénéfices comme les économies d'échelle, le coût de « sur conception » et de « sous conception » de la conception de produits d'une famille. Les résultats du modèle permettent de décider d'utiliser une des options suivantes pour la conception de produits : une plateforme, un produit individuel pour chaque segment, un seul produit pour tout le marché, l'utilisation du produit destiné à un segment pour tout le marché. La méthode choisit la meilleure option en fonction de la variété de produits et d'économies d'échelle souhaitées.

Pedersen et al. (2001) mentionnent une « taxonomie numérique », il s'agit d'une classification similaire à celles faites dans le domaine de la biologie pour classer les organismes. La classification dans ce cas sert à classer les produits avec un arbre qui représente les générations et les évolutions des produits. Ils emploient des algorithmes pour le regroupement des composants ayant des attributs similaires dans des modules et évaluent le niveau optimal de composants communs dans l'architecture de produits.

Swaminathan et al. (1998) ont produit un algorithme qui considère la demande stochastique des produits, ils mesurent le niveau d'éléments communs entre les produits et les possibles économies en utilisant des plateformes (appelées « vanilla boxes » ou « V.B »). Leur algorithme se compose de deux étapes :

- On construit de manière optimale un portefeuille de « V.B »
- On choisit la meilleure V.B.

Ils prennent en compte une capacité limitée de temps d'assemblage. Leur objectif est de réduire les coûts de stockage ainsi que les coûts de rupture de stocks. Les résultats sont analysés en mesurant la corrélation avec les demandes de produits. Un travail similaire est dans Swaminathan et al. (1999).

Gonzalez et al. (2000) donnent un modèle mathématique pour former une plateforme pour un groupe défini de produits. Le modèle mathématique évalue chaque configuration possible et mesure l'adaptabilité des plateformes pour développer une variété limitée de produits.

Gonzalez (2000) mentionne un modèle mathématique d'optimisation. Il aborde d'autres critères comme la probabilité de succès d'une solution plateforme, les performances techniques souhaitées de chaque produit, le coût global de la famille et les meilleurs paramètres de différenciation parmi les composants. Leur méthode d'optimisation est exposée en synthèse dans la Figure 3-9. Un exemple de la conception d'une famille de satellites est exposé. Son modèle comporte un processus de négociation de quatre étapes :

1. Dans la première étape, les besoins, les caractéristiques de performance, les contraintes et les coûts de chaque produit sont définis à l'avance.
2. Une plateforme provisoire est définie ; celle-ci essaie de satisfaire au mieux les caractéristiques et contraintes de chaque produit.
3. Autour de la plateforme, on évalue la possibilité de développer les différents produits.
4. Si la plateforme n'est pas conforme ou optimale pour la conception des produits, on négocie ou on adapte une autre plateforme.

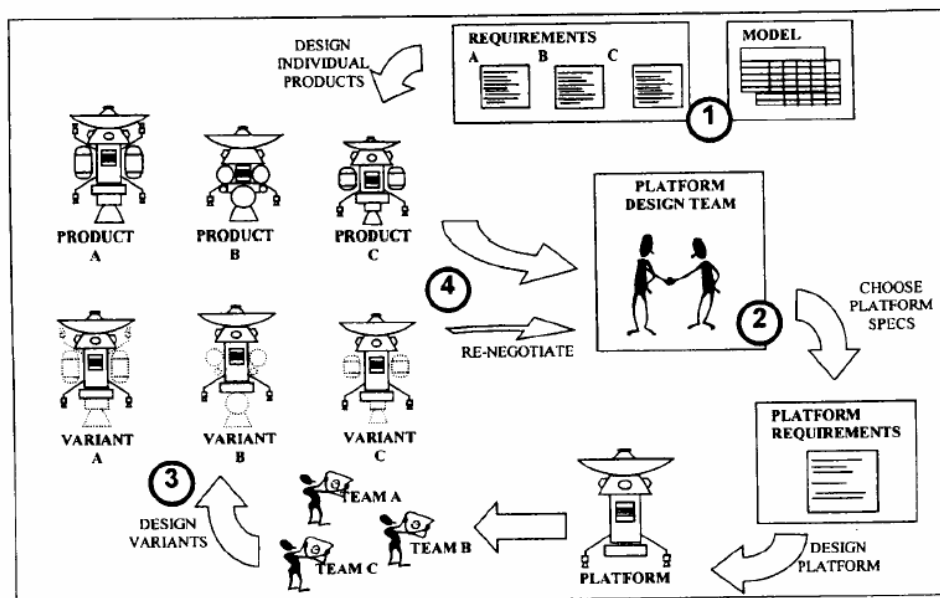


Figure 3-9. Mise en place de plateformes, Gonzalez (2000).

Nayak et al. (2000) mentionnent une méthode pour développer une plateforme et pour trouver des caractéristiques de différenciation et communes des composants (ce qui permet de trouver



des composants communs et de différenciation). Une synthèse de la méthode est montrée dans la Figure 3-10 : dans une première étape, ils emploient une méthode de programmation mathématique appelée DSP pour trouver une plateforme et les caractéristiques de différenciation de composants pour une famille de produits. Dans la deuxième étape, ils emploient un DSP adapté pour trouver différentes valeurs des paramètres (valeurs des caractéristiques de différenciation de composants) de chaque produit. Un travail intéressant dans ce sens est celui de Simpson et al. (1996) qui analysent les caractéristiques nécessaires de chaque produit de la famille et évaluent la capacité des caractéristiques des composants pour différencier les produits. Les composants de différenciation sont identifiés.

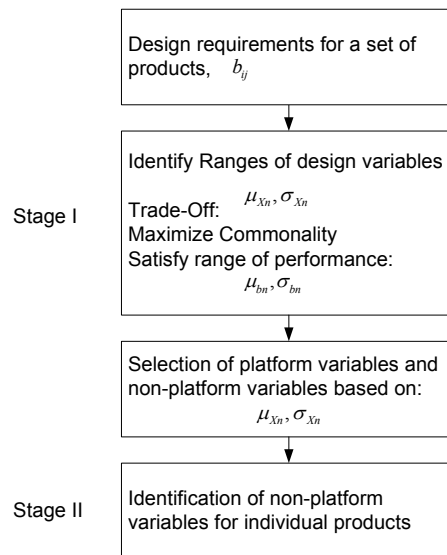


Figure 3-10. Méthode en deux phases, Nayak et al. (2000)

Lee et Tang (1997) présentent une formulation mathématique qui évalue différents coûts :

- Coûts de conception
- Processus de conception modulaire.
- Coûts de restructuration (réorganisation du processus de production pour permettre la différenciation retardée)

Le modèle maximise le nombre de composants communs entre un ensemble de produits, et le retardement du point de différenciation le long de la chaîne de production. Le modèle évalue l'évolution des coûts de production, de stocks, de set-up, etc. du fait du changement du point de différenciation dans la ligne de production.

Dobrescu et le Reich (2001) mentionnent une méthode pour concevoir des produits avec des plateformes « individuelles ». Leur méthode permet de faire le choix d'une plateforme optimale à partir d'un portefeuille de plateformes individuelles. La formulation mathématique permet un tel choix par rapport au niveau maximum d'éléments communs entre les différents produits, la fonctionnalité obtenue dans chaque produit, le nombre de fonctions des composants de différenciation et l'effort physique d'adapter de tels composants dans les produits.

Viriththamulla (1991) emploie une approche de programmation mathématique pour créer différents produits en utilisant un nombre minimum de modules et de composants différents.

Le modèle minimise la sur conception ou sous conception de composants, de façon à couvrir les besoins en termes d'attributs dans chaque produit. Une telle étude représente une bonne base pour une étude de construction de plateformes.

Pour plus de détails, le lecteur peut se diriger vers José et Tollenare (2005, C) qui présentent, de façon synthétisée, une analyse bibliographique des concepts « modularité » et « plateformes » dans la conception de produits.

A partir de l'analyse de ces travaux on peut mentionner qu'il n'existe pas une méthode consensuelle pour former des plateformes. On a observé que les problèmes d'optimisation soit ne sont pas suffisamment génériques, soit ne regroupent pas de critères importants du processus de production.

Dans cette thèse on considère que le terme « plateforme » est fortement lié avec la différenciation retardée des produits dans la ligne de production. La partie suivante expose cette relation « plateforme – différenciation retardée ».

### 3.7 La différenciation retardée

Un concept intéressant que certains travaux de recherche (David et al. 1998), (Martin et Ishii, 1997), (Lee et Tang, 1997) et que certains industriels prennent en compte pour résoudre le problème de la réactivité face à la diversité, est donc la différenciation retardée ou « Postponement<sup>17</sup> ». Ce concept, comme on l'a mentionné, est centré sur la différenciation des caractéristiques des produits plus tard dans la chaîne de production ou logistique.

#### 3.7.1 Stratégies de différenciation retardée

Zinn (1990), donne différentes options de différenciation retardée :

Différenciation retardée par l'étiquetage : dans une telle stratégie, des produits identiques sont stockés sans aucune étiquette. L'étiquette indiquant la marque désirée est ajoutée une fois la commande du client arrivée. Le coût de stockage est réduit parce que les stocks différents selon les produits ne sont plus nécessaires.

Différenciation retardée par le packaging : avec un produit identique, les distributeurs peuvent ajouter un packaging différent pour chaque client. Par exemple des vins de Californie sont transportés en vrac et ensuite mis en bouteilles dans des centres de distribution régionaux.

Différenciation par l'assemblage : l'assemblage du produit est retardé jusqu'à ce que les commandes des clients arrivent. Ce type de différenciation devrait être considéré quand les produits ont des configurations similaires. L'industrie des ordinateurs est un bon exemple : les clients peuvent acheter des ordinateurs directement assemblés au magasin selon leurs désirs, les composants tels que les unités de disques ou la taille de la mémoire sont assemblés une fois la commande passée. Cette stratégie réduit les coûts de stockages puisque le stock n'est composé que de modules communs et non d'ordinateurs complets.

Différenciation retardée par la fabrication : les composants sont transportés à un stock, où la fabrication est accomplie en fonction des commandes des clients. La distribution du jus d'orange brésilien aux Etas-Unis suit le même modèle, le sirop est transporté vers les

---

<sup>17</sup> Terme en anglais

fabricants délocalisés ensuite du sucre et de l'eau sont ajoutés et la mise en bouteilles intervient. Le processus de fabrication peut varier en fonction des commandes, mais on utilise les mêmes composants.

La différenciation retardée peut être prise en charge par le fabricant, par le distributeur ou même par l'utilisateur final (l'industriel peut favoriser la différenciation par les utilisateurs en fabriquant des produits modulaires facilement adaptables).

### 3.7.2 Relation entre la différenciation retardée et l'utilisation de plateformes

Lee et Tang (1997) et Martin et Ishii (1997) expliquent qu'utiliser un ensemble commun de composants et ajouter des composants de différenciation plus tard dans la ligne de production permet de retarder la différenciation des produits.

La production et le stockage de plateformes à l'avance, et l'assemblage de composants de différenciation plus tard, impliquent la différenciation retardée sur le processus de production. La Figure 3-11 montre un exemple : le système de suspension (une plateforme) peut être employé sur différents produits avec seulement quelques additions de composants à la fin de la ligne de production. Dans une telle stratégie, des composants communs peuvent être partagés de façon à retarder le point de différenciation (l'étape de production après laquelle les produits ont leur identité de différenciation). Dans des étapes postérieures de production, les composants spéciaux sont assemblés donnant ainsi leur identité aux produits finaux.

On remarque ainsi que l'utilisation d'une plateforme commune implique aussi le partage d'un processus de production commun. La Figure 3-12 présente cette idée.

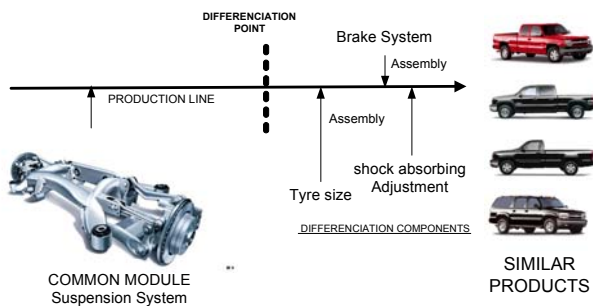


Figure 3-11. Utilisation d'une plateforme dans la ligne de production, (José et Tollenaere, 2005 B).

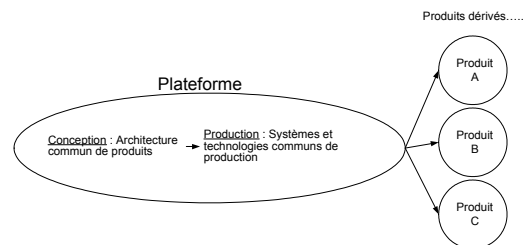


Figure 3-12. La plateforme de produit

Avant le point de différenciation, le processus de production n'a pas de stocks personnalisés de travaux en cours (ou W.I.P<sup>18</sup>). Au point de différenciation, les étapes du processus et le travail en cours sont communs aux produits. Après le point de différenciation, les stocks sont adaptés ou personnalisés en fonction des besoins du client. Ainsi, la différenciation retardée optimise la réduction du délai de personnalisation des produits. Il suffit de disposer de stocks de plateformes déjà prêtes quand la commande de produits arrive.

Le choix des composants communs et de différenciation joue un rôle important dans la définition du point de différenciation.

<sup>18</sup> Work in process

Lee et Tang (1997) mentionnent différentes stratégies pour faciliter la différenciation retardée:

- La standardisation de composants : la Figure 3-13 montre l'exemple utilisé pour expliquer cette stratégie. Le processus de production de deux types d'imprimantes (une en couleurs une en noir et blanc) se compose de trois étapes : l'assemblage initial (PCA : printed circuit board), assemblage final et le test (FA&T), puis l'étape de personnalisation (Customization). Dans chaque étape, différentes versions des composants sont ajoutées. Par exemple, le composant « Head driver board » est ajouté lors de la première étape et le composant « Print mechanism interface » lors de la deuxième étape. Standardiser les versions des ces deux composants permet de retarder la différenciation. La standardisation de composants a permis de réduire de « six » à « quatre » le nombre total d'opérations différentes de production.

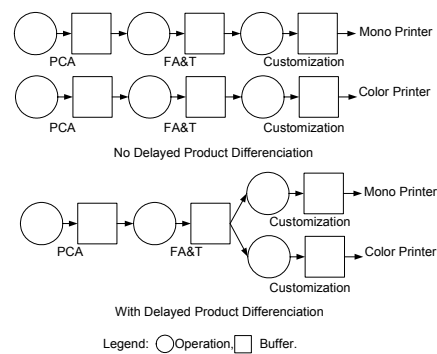
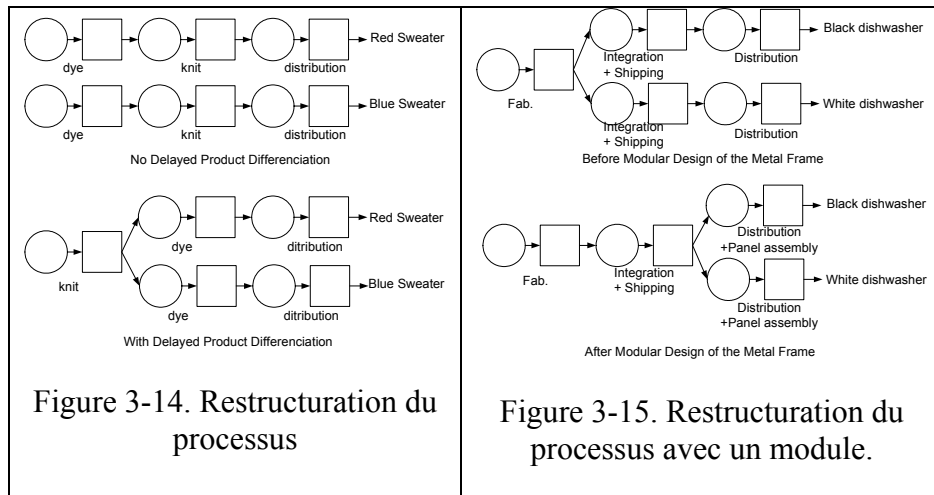


Figure 3-13. La standardisation de composants.

- Restructuration du processus : la Figure 3-14 montre le système de fabrication l'entreprise Benetton. Le processus de fabrication des pulls se compose de trois étapes principales : teinte, tricotage et distribution. À l'étape de la teinte, des matières premières (fils blancs) sont teintés en différentes couleurs. Après cette étape, les fils sont alors tricotés pour les transformer en pulls, et sont distribués. La durée de l'opération de teinte est beaucoup plus courte que le processus de tricotage. L'alternative d'inverser les deux premières étapes est une bonne option. Avoir un stock de pulls (blancs) tricotés permet de différencier rapidement les couleurs de pulls en plongeant les pulls dans différents bains de couleurs pour satisfaire la demande. La réorganisation de la séquence permet donc de réduire le nombre des opérations de différenciation, les stocks personnalisés ainsi que le temps de réponse. La réorganisation de la séquence a permis de réduire de « six » à « cinq » le nombre total d'opérations différentes de production.
- Modularisation : il s'agit d'un type de restructuration partiel du processus, c'est-à-dire qu'un module de composants est assemblé plus tard ou plus tôt par rapport à leur étape originale de production. Par exemple, la Figure 3-15 montre le système de production pour l'assemblage de deux lave-vaisselle (un noir et un blanc). Le processus de fabrication est divisé en 3 opérations : fabrication, intégration, distribution. La couverture de métal (de couleur différente pour différencier les produits), assemblée à l'origine dans l'étape d'intégration, est maintenant assemblée par le distributeur. La différenciation entre les produits est donc retardée d'une opération.



A partir de ces trois stratégies, on peut déduire que la différenciation retardée est déterminée par la conception des produits et/ou leur processus de production de sorte que le point de différenciation (l'étape de production après lequel les produits ont leur identité différenciée) soit retardé aussi longtemps que possible. Dans ces trois différentes stratégies, l'objectif est d'utiliser un ensemble de composants et d'opérations de production communes entre les produits dans les premières opérations de fabrication. Avoir un ensemble de composants et d'opérations de production communes permet de définir des plateformes pour la différenciation retardée, c'est-à-dire, d'avoir un module de composants commun entre les produits. La différenciation retardée peut, d'une certaine manière, permettre de définir des plateformes et vice versa.

Dans ce contexte on prend en compte la définition suivante afin de l'utiliser dans la partie suivante :

**Définitions 10 « Plateformes de différenciation retardée ».**

On considère une « plateforme de différenciation retardée » comme un module commun utilisé sur un ensemble limité de produits. Ce module est assemblé et stocké à l'avance sur la ligne de production et les composants de différenciation sont ajoutés a posteriori sur la ligne de production.

Pour des questions pratiques, on appelle une « plateforme de différenciation retardée » une « P.D.R »

A notre connaissance les méthodes et approches mathématiques présentées dans les parties 3.6.1 et 3.6.2 ne considèrent pas la différenciation retardée des produits comme un critère important. Aucun de ces travaux n'est donc retenu ou traité afin de continuer une recherche plus approfondie. Les apports de cette thèse ne partent donc pas d'un travail de recherche en particulier.

### 3.8 Conclusion

Ce chapitre a abordé une revue bibliographique du concept de plateforme. Différents aspects ont été discutés, par exemple, les différents avantages et désavantages ont été discutés dans la partie 3.2 et 3.3, et quelques applications industrielles ont été illustrées dans la partie 3.4. Finalement, une recherche bibliographique a permis de faire une classification de quelques

travaux dans la partie 3.6. La relation de plateformes avec la différenciation retardée des caractéristiques des produits dans la ligne de production a été discutée dans la partie 3.7.

On a vu, à partir de l'analyse générale de la littérature, que la conception efficace d'une plateforme est celle qui permet le meilleur développement de différents produits ainsi que la réalisation d'économies par rapport aux activités de cycle de vie de produit.

L'analyse bibliographique par rapport au concept de différenciation retardée laisse observer deux objectifs de recherche<sup>19</sup> :

- La standardisation de composants, c'est-à-dire, l'utilisation d'une architecture commune qui, avec des changements minimaux, permet de développer différents produits plus tard dans la chaîne de production. Ceci implique de développer une architecture "robuste " et adaptée aux tendances du marché. Le problème est de trouver quels composants peuvent être réutilisés pour différents produits. En relation avec l'utilisation de plateformes de différenciation retardée (P.D.R) le problème est de savoir quels composants utiliser dans celle-ci.
- L'ordre d'assemblage : l'intérêt se centre sur l'ordre de production pour faciliter la différenciation retardée. Par rapport à l'utilisation de plateformes de différenciation retardée le problème (« P.D.R ») est de trouver la séquence qui permet de les utiliser.

Quelques travaux comme Agard (2002), David et al. (1998), Lee et Tang (1997), Swaminathan et al. (1998), (1999) ont analysé le premier objectif de recherche. Lee et Tang (1997), Martin et Ishii (1997) ont analysé le deuxième objectif.

Cependant, aucun travail (à notre connaissance) ne se focalise sur la construction explicite d'une « P.D.R » qui prenne en compte le fait de retarder le point de différenciation, en relation avec les deux axes de recherche.

Le chapitre suivant, présente les méthodes proposées pour la construction des « P.D.R » par la standardisation de composants et par l'ordonnement de la séquence. La résolution de la problématique est à notre connaissance originale.

---

<sup>19</sup> Voir chapitre 3.7.1, stratégies pour faciliter la différenciation retardée

# Chapitre 4. Définition de plateformes de différenciation retardée

## Introduction

Le but des travaux de ce chapitre est de montrer deux méthodologies. Celles-ci sont des outils d'aide à la décision dans la conception d'une « P.D.R » et d'une famille de produits.

Ce chapitre commence par expliquer deux problèmes de recherche (dans la partie 4.1), d'abord la problématique d'ordonnancement de la séquence d'assemblage, puis la problématique de la standardisation des composants.

La partie 4.2 décrit la méthodologie adoptée pour la standardisation des composants et des algorithmes d'optimisation pour une telle stratégie. La partie 4.3 décrit la méthodologie adoptée pour l'ordonnancement de la séquence d'assemblage et les algorithmes d'optimisation pour cette stratégie<sup>20</sup>.

## 4.1 Problématique

Le problème de la standardisation de composants, et le problème de l'ordonnancement de la séquence de production seront expliqués avec l'exemple exposé par Martin et Ishii (1997).

### 4.1.1 Problème d'ordonnancement de la séquence d'assemblage.

Martin et Ishii (1997) exposent l'exemple suivant, il s'agit du tableau de bord d'une voiture. Le produit est montré dans la Figure 4-1 :

#### *Modèle PSG (Process Sequence Graph)*

La représentation graphique que cette étude utilise pour représenter le flux de production s'appelle PSG ("Process Sequence Graph"). La Figure 4-2 montre le PSG qui représente le flux de production pour assembler 18 tableaux de bord. Dans chaque étape de production on fait l'assemblage d'un type de composant en versions différentes selon le produit. Chaque type de composant correspond aux composants du Tableau 4-1. Les nœuds, de couleur différente, représentent les opérations d'assemblage des différentes versions de composants utilisées pour différencier un produit d'un autre. Par exemple, un nœud blanc représente l'utilisation d'une version particulière et un nœud vert représente l'utilisation d'une autre. Le processus de production permet d'obtenir 18 produits finaux, et il est facile d'observer les différents points de différenciation. La différenciation de tous les produits commence à la deuxième étape de production (l'insertion de différentes versions de la carte électronique, composant de type « sept »). Les nombres dans la ligne supérieure représentent le nombre de

---

<sup>20</sup> Les algorithmes présentés dans cette thèse ont été adoptés plus par raisons pratiques que pour de raisons de performance. Développer différents algorithmes afin de tester et choisir les meilleurs n'est pas l'objectif de cette thèse.

versions des différents types de composants. Les nombres de la ligne inférieure dénotent le nombre d'opérations différentes d'assemblage (assemblage de versions différentes de composants). Le nombre total d'opérations différentes d'assemblage (en bas à droite) est une mesure appropriée des coûts de production, puisque leur minimisation permet la réduction de la diversité de stocks, de la complexité de la logistique et du délai de réponse. La réduction du nombre total d'opérations différentes d'assemblage améliore les possibilités de construire des « P.D.R. ».

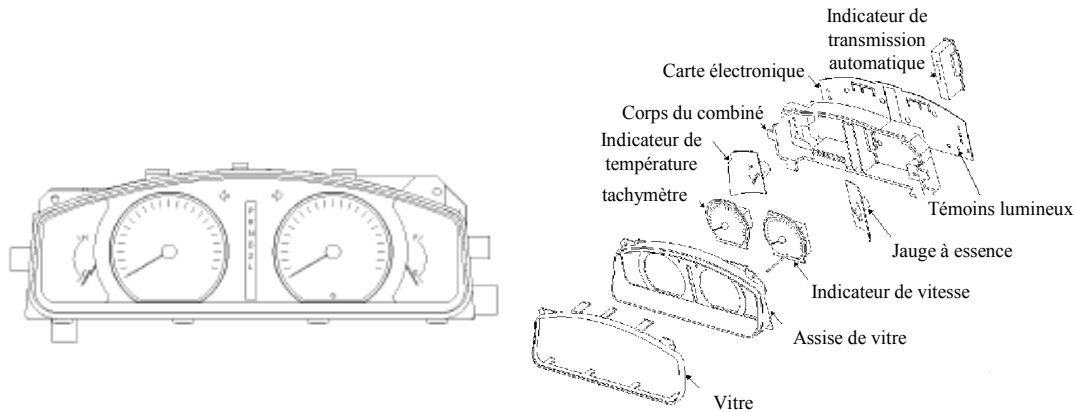


Figure 4-1. Tableau de bord, Martin et Ishii (1997)

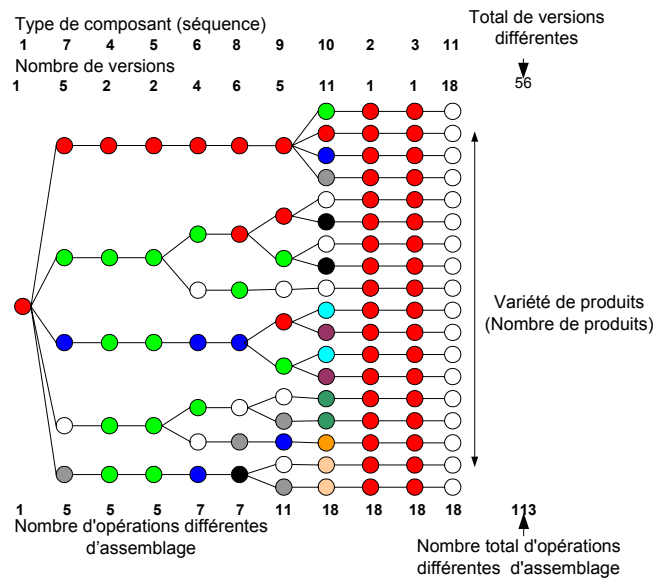


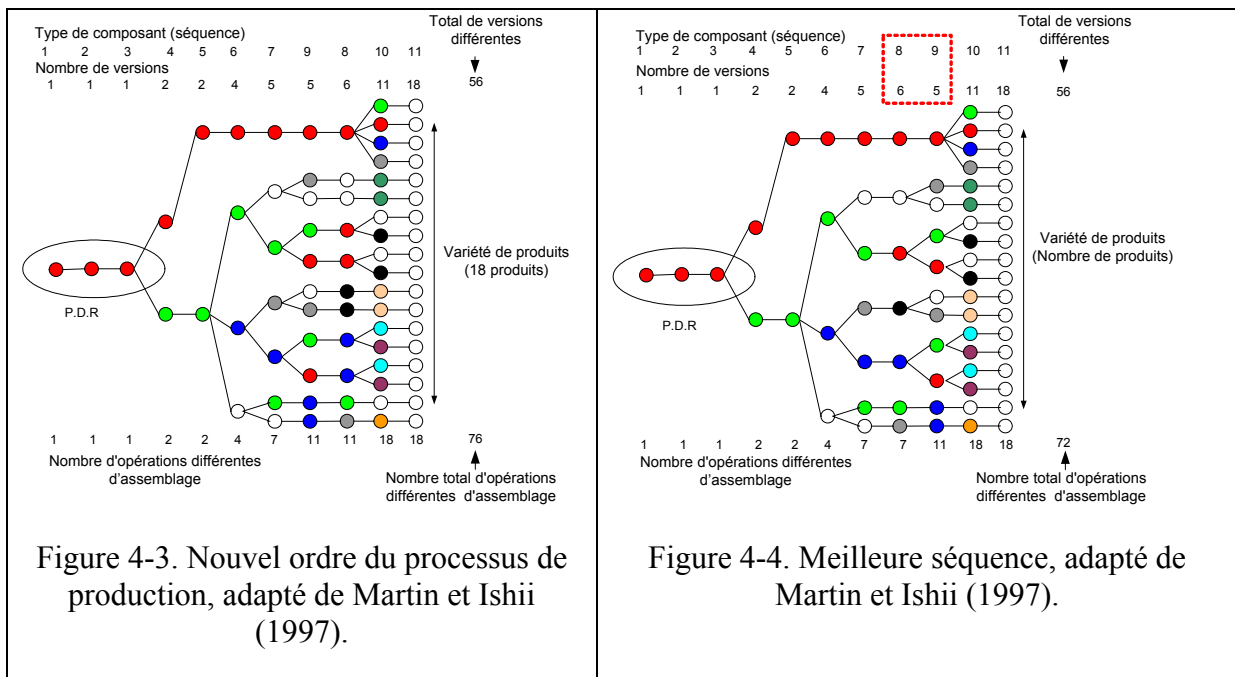
Figure 4-2 Diversité des composants et des opérations de fabrication, Martin et Ishii (1997)

Composant	Corps du combiné	Carte électronique	Indicateur de transmission automatique	Jauge à essence	Indicateur de température tachymètre	Indicateur de vitesse	Témoins lumineux	Assise de vitre	Vitre	Assemblage finale	
Type de composant :	1	7	4	5	6	8	9	10	2	3	11

Tableau 4-1. Références



Selon Martin et Ishii (1997), déterminer l'ordre du processus de production qui réduise le nombre total d'opérations différentes d'assemblage est un problème complexe. Une solution possible est de réorganiser le processus en ordre croissant par rapport au nombre de versions des composants, voir Figure 4-4 (c'est-à-dire, les composants de type « un », « deux » et « trois » ont seulement une version, ainsi ils peuvent être assemblés d'abord, le composant « quatre » et « cinq » ont deux versions différentes, ainsi ils peuvent être assemblés après, et ainsi de suite), voir Figure 4-3. Ceci permet de réduire de 113 à 76 le nombre total d'opérations différentes d'assemblage et d'utiliser une « P.D.R. ». On peut observer que l'addition de versions de différenciation, a posteriori, permet de différencier un produit d'un autre. Ils expliquent que cette méthode est efficace mais sous optimale, parce que dans cet exemple, assembler le composant de type « huit » (avec six versions différentes) avant le composant de type « neuf » (avec cinq versions différentes) réduirait encore plus le nombre total d'opérations différentes d'assemblage, voir Figure 4-4. Une méthode pour trouver la réduction maximale du total d'opérations différentes d'assemblage serait d'énumérer toutes les permutations possibles d'ordre de processus et de choisir la meilleure. Par conséquent, puisque le nombre de permutations est  $n!$ ,  $n =$  nombre d'étapes de processus, l'énumération et calcul de toutes les possibilités avec les ressources actuelles de calcul serait lente. Pour cet exemple ce serait  $10!$  (plus de 3.6 millions de permutations). Alors les questions qui se posent sont : comment choisir l'ordre d'assemblage optimal ? Quelle méthode d'optimisation peut s'appliquer ? Tel est le problème d'ordonnement de la séquence d'assemblage.



*Remarque importante : dans cette thèse on considère que le produit final (tableaux de bord) n'est pas destiné au client final, mais qu'il sera assemblé dans un système (ou autre produit). Le modèle PSG prend donc en compte le composant de type « onze » dans l'indicateur « nombre total d'opérations différentes d'assemblage ».*

### 4.1.2 Problème de standardisation de composants

Une autre solution possible pour réduire le nombre total d'opérations d'assemblage différentes peut être la réduction (ou la réutilisation) de versions de composants entre produits, voir Figure 4-5, (voir la stratégie de standardisation de Lee et Tang, 1997, partie

3.7.2). Ceci permet d'augmenter la possibilité d'ajouter des composants à l'intérieur des « P.D.R. ».

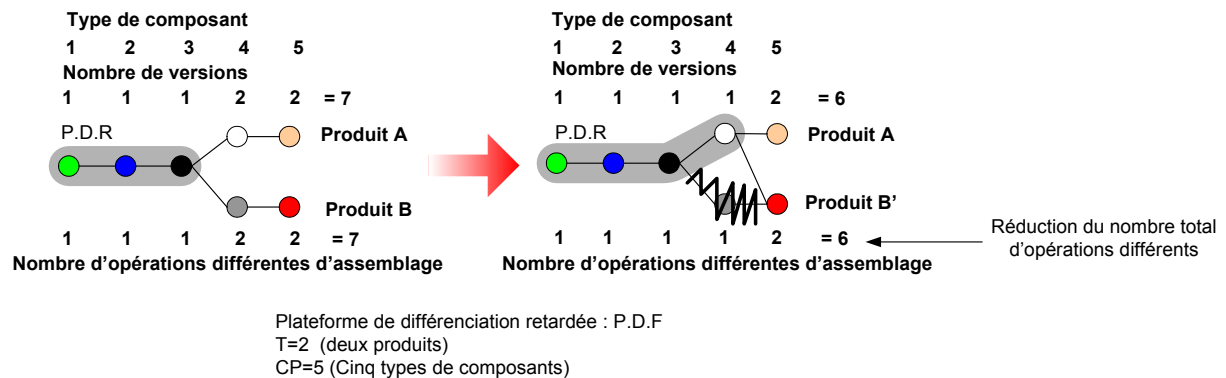


Figure 4-5. Standardisation de composants.

Cependant, la réduction des versions des produits peut impliquer une analyse complexe parce que le concepteur des produits a besoin de définir un équilibre entre le nombre des versions spéciales et le nombre de versions communes sur l'ensemble des produits. Le dilemme dans ce sens est :

- on doit adapter les produits aux besoins des clients avec des versions spécifiques de composants pour respecter les caractéristiques finales des produits,
- ou
- on doit réutiliser des versions entre les produits afin d'économiser de l'argent, et de réduire le nombre total d'opérations différentes d'assemblage.

Les parties antérieures mentionnent que la capacité de développement de produits différents est liée à l'utilisation de composants spéciaux ou de versions spéciales. Paradoxalement, les avantages d'économies d'échelle sont liés au nombre de composants communs (nombre de versions réutilisées).

Un nombre important de versions réutilisées peut engager les caractéristiques des produits et peuvent devenir similaires. La réutilisation excessive de versions de composants implique d'avoir un écart important entre ce que les clients attendaient et ce que les clients reçoivent en termes de caractéristiques des produits. Par exemple dans la Figure 4-5 la substitution de la version du composant de type 4 sur le produit « B » a comme résultat un produit transformé « B' ». Ce produit « B' » a vraisemblablement de nouvelles caractéristiques. Le problème est donc d'évaluer l'écart des caractéristiques entre tout produit original « P » et tout produit « P' », ayant  $P \in \{A, B\}$  et  $P' \in \{A', B'\}$ . C'est-à-dire, d'évaluer quelles sont les différences entre les ensembles A et A', B et B' par rapport à certaines spécifications (ou caractéristiques).

L'évaluation de l'écart des caractéristiques entre tout « P » et « P' » permettra de mesurer la pertinence de s'éloigner des caractéristiques originales des produits afin de réduire le coût de ces produits et de réduire le nombre total d'opérations différentes d'assemblage par la réutilisation de versions de composants.

La problématique est donc centrée sur la réduction, de façon pertinente, de la variété des versions de composants utilisées.

Pour réduire de façon optimale le nombre de versions de composants on a besoin d'évaluer, par rapport à différents avantages, la substitution de chaque version par une autre sur chaque type de composants et sur chaque produit. Le nombre de possibles substitutions à évaluer est égal à :

$$T^{CP} \quad (1)$$

T : total de produits dans la famille

CP : Quantité totale de types de composants différents, voir Figure 4-5.

Sur chaque configuration possible, les avantages à évaluer peuvent être : la réduction du coût des produits, la réduction du nombre total d'opérations différentes d'assemblage, la réduction de l'écart entre tout produit « P » et tout produit « P' » par rapport à un certain nombre de caractéristiques.

Pour évaluer et choisir la configuration optimale de versions de composants pour les produits, on se pose les questions suivantes :

- Quelle est la configuration optimale de versions de composants dans le système PSG afin de réduire les coûts de produits et le nombre total d'opérations différentes d'assemblage ?
- Comment associer l'écart, ou les différences, entre tout produit « P » et tout produit « P' » à l'utilisation de différentes versions de composants sur l'ensemble des produits ?

Divers problèmes sont évidents dans l'évaluation des différentes configurations de versions de composants pour chaque produit :

- Par rapport à la personnalisation de produits, les problèmes sont :
  - évaluer la compatibilité entre les versions de différents types de composants dans les différents produits.
  - évaluer les caractéristiques finales des produits, c'est-à-dire les caractéristiques de produits « P' » ayant de nouvelles versions de composants.
- Par rapport aux économies de substitution, le problème est :
  - évaluer la réduction du nombre total d'opérations différentes d'assemblage (index qui permet d'évaluer la réduction du temps de réponse).
  - évaluer la réduction des coûts de produits.

*Remarque importante par rapport à la compatibilité entre versions : Dans cette thèse on considère qu'une version d'un composant est compatible avec une autre version si les valeurs de leurs spécifications sont cohérentes. Voici un exemple : si on considère quatre versions :  $X^1, X^2, Y^1, Y^2$ , c'est-à-dire, deux versions du composant de type « X » et deux versions du composant de type « Y », et qu' on considère les informations suivantes :*

- Les spécifications de chaque version sont :  
 $X^1 : \{Hauteur = 8 \text{ cm}, longueur = 8 \text{ cm}, \dots\}$

$X^2 : \{Hauteur = 11 \text{ cm}, longueur = 8 \text{ cm}, \dots\}$

$Y^1 : \{épaisseur = 3 \text{ cm}, \dots\}$

$Y^2 : \{épaisseur = 6 \text{ cm}, \dots\}$

- La relation des spécifications entre toute version du composant de type « X » et toute version du composant de type « Y » est définie comme :

$$Hauteur = épaisseur + 5 \text{ cm.}$$

Alors on peut affirmer que la version  $X^1$  est compatible que avec  $Y^1$  et la version  $X^2$  est compatible que avec  $Y^2$ .

## 4.2 Résolution du problème de standardisation de composants

### 4.2.1 Introduction

Cette partie montre la méthode utilisée pour la résolution de la problématique du choix des versions de composants pour chaque produit, expliquée dans la partie 4.1.2. Celle-ci mentionne que l'objectif est de maximiser la réutilisation de versions de composants entre produits afin de construire de P.D.R's.

Dans cette étude, on considère que la capacité de développement d'une diversité de produits et les avantages économiques liés à la réutilisation des composants ne sont pas forcément en conflit. Avec une diversité faible ou importante de versions de composants, la capacité de développer une diversité de produits ne se voit pas nécessairement affectée, voir la Figure 4-6. La figure montre comment avec une variété différente de versions, on peut développer la même variété de produits.

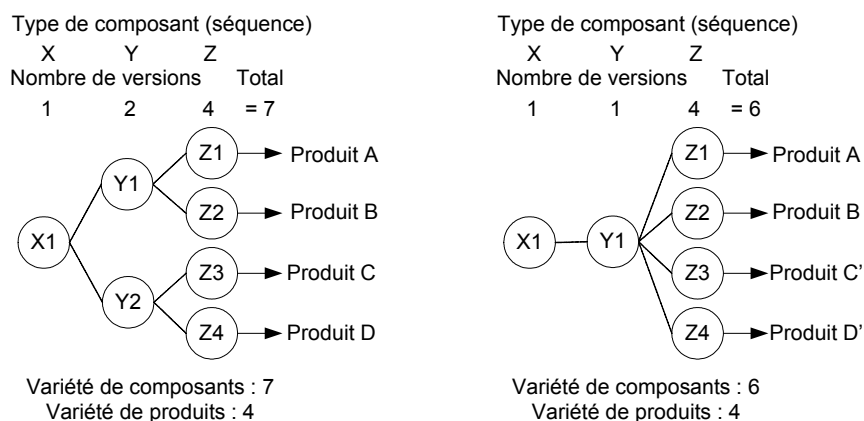


Figure 4-6. Modèle PSG : augmentation d'une variété de composants avec une même variété de produits

De la même façon, une diversité faible ou importante de produits peut être obtenue avec une même diversité de composants (voir la Figure 4-7). En conclusion, la diversité de produits et la réduction de composants ne sont pas forcément des objectifs contradictoires.

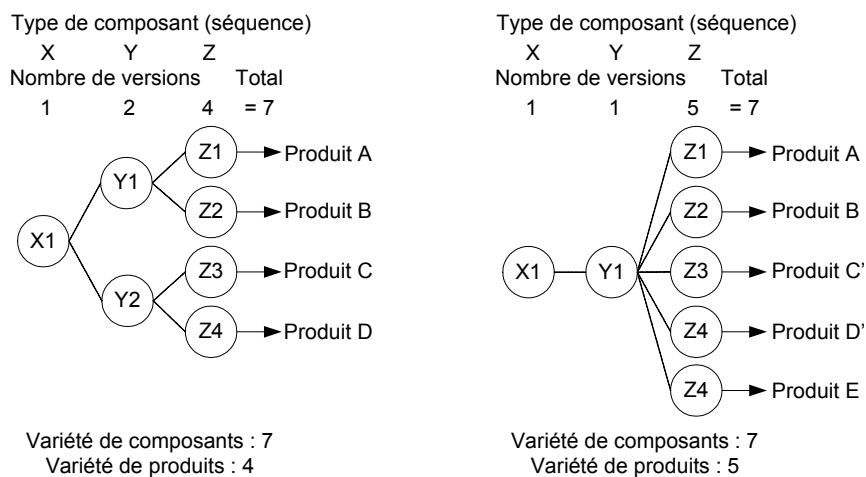


Figure 4-7. Modèle PSG : augmentation d'une variété de produits avec la même variété de composants

Le problème qui se pose dans la réduction de la diversité de composants est d'évaluer si la substitution de composants permet de développer les produits dont on a besoin. Par exemple, dans la substitution du composant Y2 par Y1 dans le produit C (Figure 4-6, droite), et qui donne comme résultat le produit C', les questions qui se posent sont : les clients considèrent-ils C et C' comme égaux ? Si non, quelles sont les différences ? Quels sont les avantages économiques d'utiliser des composants communs ? Quelle est la réduction des coûts des produits et du nombre total d'opérations différentes d'assemblage ?

Pour répondre à ces questions et développer notre méthode, on considère l'hypothèse décrite dans la partie suivante.

### 4.2.2 Hypothèse et introduction

Jianxin et Tseng (1999) proposent une matrice pour le choix de réutiliser ou non un composant (ou module) entre plusieurs produits. Ils expliquent qu'un composant ou module doit être commun entre des produits selon deux variables, voir Figure 4-8 :

- Les économies : c'est-à-dire, la mesure avec laquelle on aura des économies par rapport aux coûts des activités du cycle de vie des produits<sup>21</sup> (coefficient sur l'axe vertical). Par exemple, Gonzalez (2000) explique qu'un produit est le résultat de l'utilisation de différents actifs : 1) les composants, 2) les caractéristiques d'un système de fabrication 3) les activités d'organisation, et des aspects humains comme la connaissance, etc. Le nombre de ces actifs est variable selon le nombre de composants ou modules communs.

<sup>21</sup> Ce type d'analyse est exposé avec plus de détails dans José et Tollenaere (2004)

- Le rôle qu'un composant ou module joue dans la différenciation de produits : c'est-à-dire, le nombre de caractéristiques fonctionnelles et physiques des produits qui sont affectés par la utilisation d'un composant ou module au lieu d'un autre (coefficient sur l'axe horizontal)<sup>22</sup>.

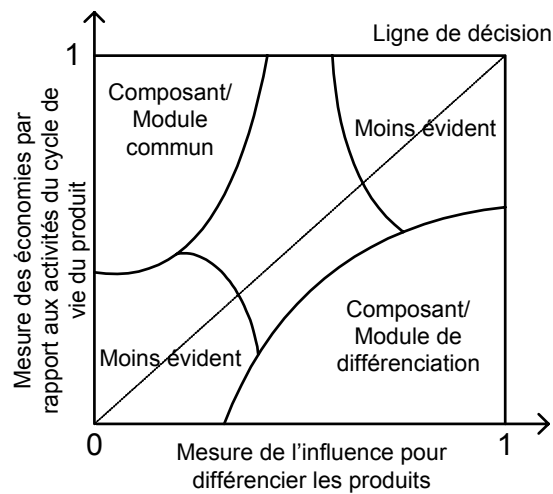


Figure 4-8. Evaluation d'un composant ou module (adapté de Jianxin et Tseng, 1999).

Voici un exemple : les voitures 407 et 407SW de Peugeot ont besoin de portes identiques de « X » centimètres de hauteur. Cependant, une version de porte qui peut être adaptée sur un modèle, ne peut pas l'être sur un autre, parce que d'autres caractéristiques (par exemple d'épaisseur et de longueur de la voiture) jouent un rôle important. Cette porte joue un rôle sur la différenciation et ne peut pas être commune entre les différents produits. L'adaptation de cette version de porte sur une voiture incompatible pourrait se révéler coûteuse, puisque l'adaptation ne peut pas se faire sans l'adaptation d'autres composants ou modules ce qui implique de changer complètement l'aspect de la voiture. Lorsqu'un composant ou module a une influence sur la différenciation des produits et que les économies de substitution ne justifient pas une telle adaptation, il est donc plus pertinent de gérer une telle version de porte comme élément de différenciation. Dans le cas contraire, il sera donc plus pertinent de le gérer comme élément commun. Jianxin et Tseng (1999) mentionnent dans ce sens que les composants ou modules communs entre produits devront être ceux qui n'ont pas d'utilité sur une architecture pour différencier les produits par rapport à la perception du client, et Robertson et Ulrich (1998) mentionnent que les composants ou modules communs entre produits devront être ceux avec des meilleures perspectives de réduction de coûts.

L'hypothèse de cette méthode est : un type de composant aura plus tendance à faire partie d'une P.D.R (c'est-à-dire à être commun) s'il permet des économies importantes et s'il joue un rôle faible dans la différenciation des produits.

### 4.2.3 Méthode

Pour exposer la méthode et vérifier l'hypothèse on utilisera comme exemple le développement d'un ensemble de moteurs électriques à courant continu. La Figure 4-9, montre le produit :

<sup>22</sup> Un travail qui essaie d'évaluer cet aspect se trouve dans Martin et Ishii, (2002).

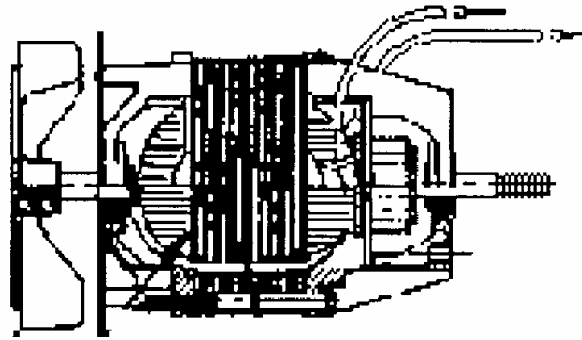


Figure 4-9. Moteur électrique à courant continu, Simpson et al., (2001)

Pour structurer et optimiser un modèle PSG la méthode propose une série d'étapes, voir Figure 4-10 :

1. Définition des produits nécessaires : nombre de produits différents et leurs caractéristiques de différenciation.
2. Définition de l'architecture générique à partir de laquelle on définit deux points :
  - Identification de versions de composants nécessaires dans chaque produit, ce qui permettra de définir les coûts et de calculer les économies de substitution dans l'étape d'optimisation.
  - Définition des interfaces, ce qui permettra de définir la compatibilité entre composants et produits dans l'étape d'optimisation.
3. Optimisation : un algorithme utilise les données « coûts des versions des composants » et « interfaces » pour évaluer le choix de versions de composants dans le modèle PSG.

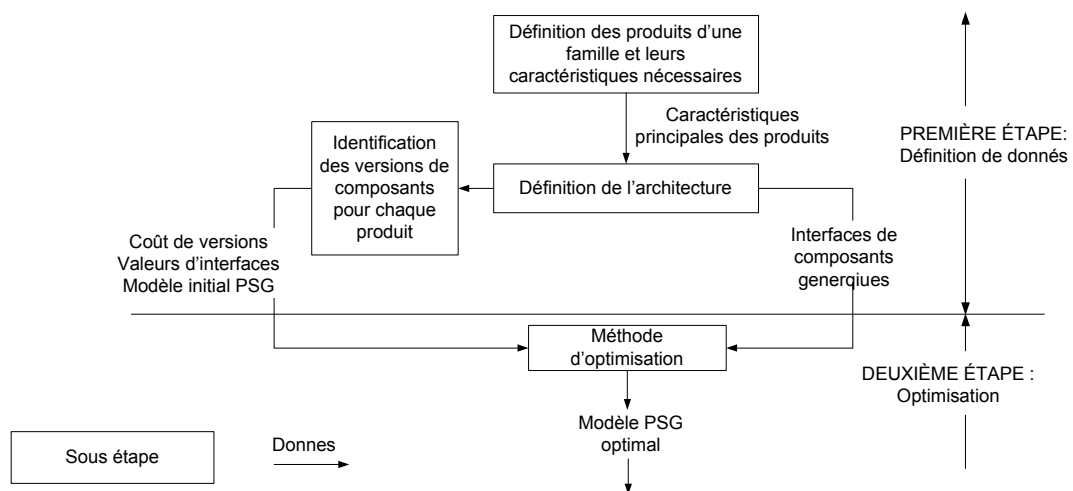


Figure 4-10. Schéma de la méthode de standardisation.

### 4.2.3.1 Première étape : définition de données

#### 1) Définition des produits d'une famille et leurs caractéristiques nécessaires

Dans cette étape on définit deux données d'entrée :

- le nombre de produits différents
- les caractéristiques de différenciation de tels produits. C'est-à-dire, les caractéristiques que les clients utilisent comme référence pour différencier un produit d'un autre. Ces caractéristiques se traduisent en interfaces techniques des produits dans un contexte industriel, ces que l'on appelle, dans cette étude, besoins techniques.

Pour illustrer cette étape, le développement d'une famille de 9 produits (moteurs électriques) est employé. Les 9 produits sont différents par rapport aux valeurs des interfaces ou besoins techniques suivants :

- couple
- masse
- efficacité

Les valeurs des besoins techniques sont exposées dans la Figure 4-11. Cette étape est le résultat d'une étude du marché qui est hors des objectifs de cette thèse.

	Produit 1	Produit 2	Produit 3	Produit 4	Produit 5	Produit 6	Produit 7	Produit 8	Produit 9
Couple	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5
Efficacité	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5
Masse	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.9

Figure 4-11. Valeurs des interfaces techniques du produit.

#### 2) Définition de l'architecture

Cette étape est centrée sur la définition de l'architecture du produit. L'objectif est de définir les relations des interfaces entre composants et de définir les valeurs des interfaces<sup>23</sup> de chaque version de composant pour évaluer la compatibilité entre les versions de composants dans l'étape de optimisation.

*Exemple pour illustrer l'évaluation de la compatibilité entre deux versions de composants :*

*Si on considère quatre versions de composants :  $X^1, X^2, Y^1, Y^2$ , c'est-à-dire, deux versions du composant de type « X » et deux versions du composant de type « Y ». Et si on considère les informations suivantes :*

---

<sup>23</sup> Synonyme des caractéristiques des versions de composants



- La relation des interfaces (paramètres) entre tout composant de type « X » et tout composant de type « Y » est défini comme :

*Hauteur de X = épaisseur de Y + 5 cm.*

- Les valeurs des interfaces (paramètres) de chaque version sont :

*Pour X<sup>1</sup> : {Hauteur = 8 cm, longueur = 8 cm, .....}*

*Pour X<sup>2</sup> : {Hauteur = 11 cm, longueur = 8 cm, .....}*

*Pour Y<sup>1</sup> : {épaisseur = 3 cm, .....}*

*Pour Y<sup>2</sup> : {épaisseur = 6 cm, .....}*

Alors on peut affirmer que la version X<sup>1</sup> n'est compatible qu'avec Y<sup>1</sup> et la version X<sup>2</sup> n'est compatible qu'avec la version Y<sup>2</sup>.

Pour définir la compatibilité entre deux versions de « X » et « Y » on utilise donc deux critères :

- Les valeurs des interfaces des versions de « X » et « Y ».
- L'existence d'une relation entre les interfaces des composants « X » et « Y ». Ces relations peuvent être formalisées comme l'expression « Cp1 » :

$$Cp1_{j,p,f,t} = \begin{cases} 1 & \text{Si le "p"}^{i\text{ème}} \text{ paramètre du "j"}^{i\text{ème}} \text{ composant est lié avec le "t"}^{i\text{ème}} \\ & \text{paramètre du "f"}^{i\text{ème}} \text{ composant} \\ 0 & \text{Si non} \end{cases}$$

Cette expression peut être illustré sur une matrice binaire, voir la Figure 4-12. La matrice montre la relation « Hauteur de X = épaisseur de Y + 5 cm ».

En synthèse, s'il y a une relation  $Cp1_{X^1,Y^1} = 1$ , et si la valeur de l'interface « p » de la version « X<sup>1</sup> » est différente de celle de la version « X<sup>2</sup> », alors on peut affirmer que la version X<sup>1</sup> n'est compatible qu'avec Y<sup>1</sup> et que la version X<sup>2</sup> n'est compatible qu'avec la version Y<sup>2</sup>. De la même façon, s'il y a une relation  $Cp1_{X^2,Y^2} = 1$ , et si la valeur de l'interface « f » de la version « Y<sup>1</sup> » est différente de celle de la version « Y<sup>2</sup> », alors on peut affirmer que la version X<sup>1</sup> n'est compatible qu'avec Y<sup>1</sup> et la version X<sup>2</sup> n'est compatible qu'avec Y<sup>2</sup>.

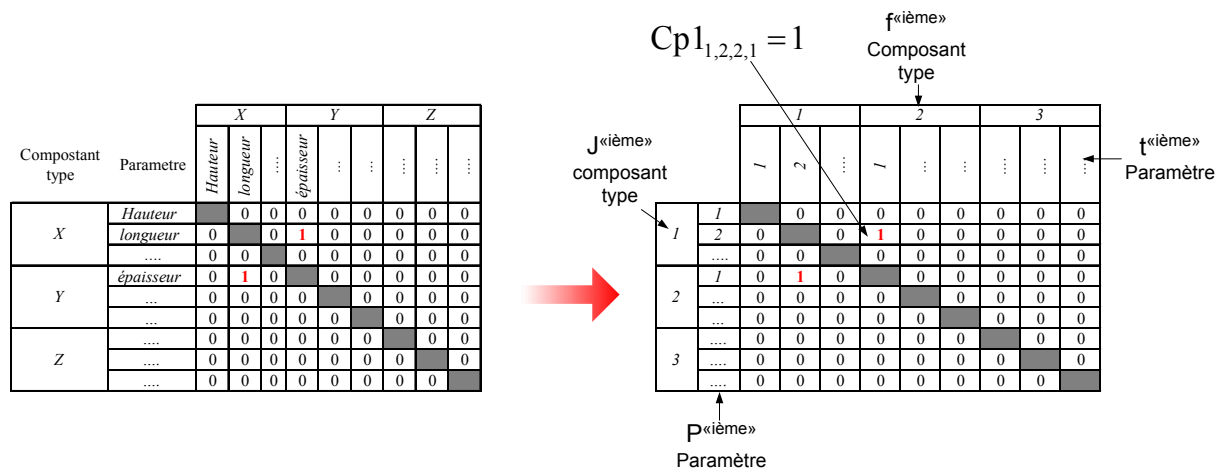


Figure 4-12. Matrice de relations entre interfaces appelées, matrice « Cp1 ».

Pour définir l'architecture on commence par la définition du système fonctionnel. Un système fonctionnel est une représentation schématique de fonctions génériques du produit. Pour modéliser un tel système, plusieurs travaux utilisent la technique FSMT « Function Structure Modeling Technique » de Pahl et Beitz (1988). Cette technique sert à modéliser les interfaces fonctionnelles de flux d'énergie, de matériel et d'information dans le système de fonctions du produit. Pour montrer la logique de cette technique, un exemple de la fonction principale d'un lecteur de cassettes est exposé dans la Figure 4-13. « Tape » et « Batteries » sont les flux d'entrée du système. La décomposition de cette fonction principale en sous fonctions apparaît dans la Figure 4-14.

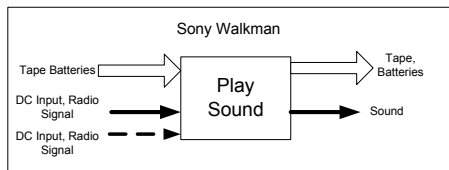


Figure 4-13. Fonction principale du lecteur de cassettes, Zamirowski (1995)

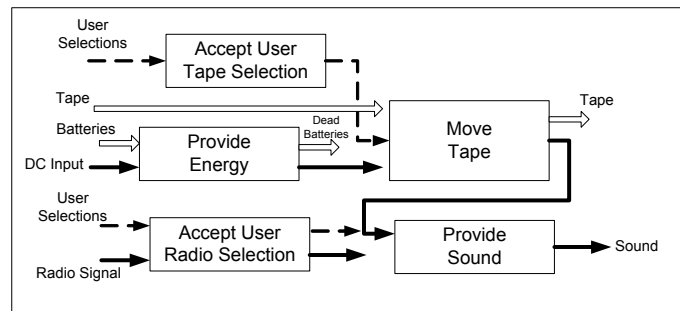


Figure 4-14. Décomposition de la fonction principale du Walkman de Sony, Zamirowski, (1995)

Le passage d'un niveau supérieur (Figure 4-13) à un niveau inférieur (Figure 4-14) obéit à un principe de décomposition qui aboutit à une hiérarchie de fonctions. Toute fonction peut être décomposée en sous fonctions. La logique de cette décomposition est exposée dans la Figure 4-15. La méthode FAST (Function Analysis System Technique, X50-153) vise particulièrement à conduire cette analyse fonctionnelle, en répondant aux questions suivantes :

- Pourquoi la fonction existe-t-elle ? C'est-à-dire, pour assurer quelles fonctions supérieures ?
- Comment est-elle assurée ? C'est-à-dire, par quelles sous fonctions est-elle assurée ?
- Quand ? (voir Figure 4-16).

La construction de tels systèmes se fait, bien sûr, selon les suppositions du concepteur.

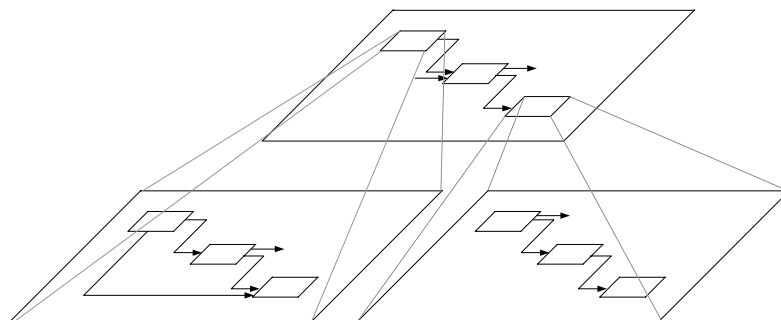


Figure 4-15. Décomposition de fonctions en sous fonctions

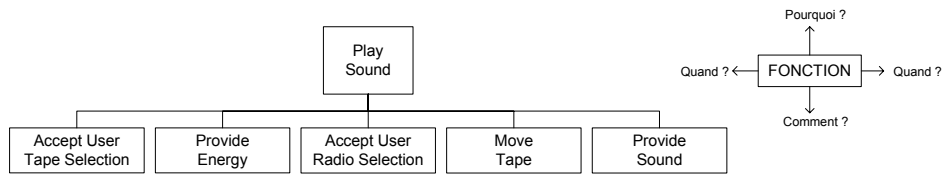


Figure 4-16. Définition de sous fonctions par la technique FAST.

La Figure 4-17 expose la décomposition des fonctions du moteur avec la technique « FAST ». On considère deux fonctions principales<sup>24</sup> et deux arbres. De telles fonctions obéissent à une analyse de l'annexe A :

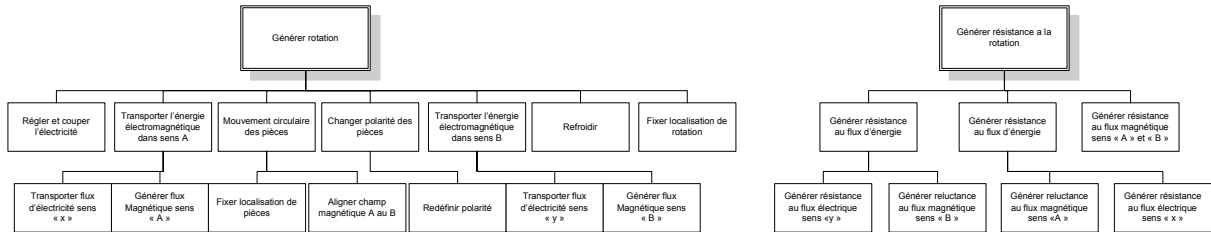


Figure 4-17. Modèle FAST générique du moteur électrique.

Les types de composants du moteur électrique à courant continu sont connus dans le contexte technique. Simpson et al. (2001) définissent les types de composants du moteur électrique<sup>25</sup>, voir la Figure 4-18. La décomposition hiérarchique des types de composants est exposée dans la Figure 4-19. La traduction du modèle FAST fonctionnel au modèle FAST physique est exposée dans la Figure 4-20. La décomposition hiérarchique physique est montrée sur les lignes de la matrice, les colonnes correspondent aux fonctions. L'intersection fait référence aux types de composants nécessaires pour l'exécution d'une ou plusieurs fonctions. La mise en relation entre les types de composants et les fonctions est supportée par l'analyse de l'annexe A, et se fait bien sûr, selon les suppositions du concepteur.

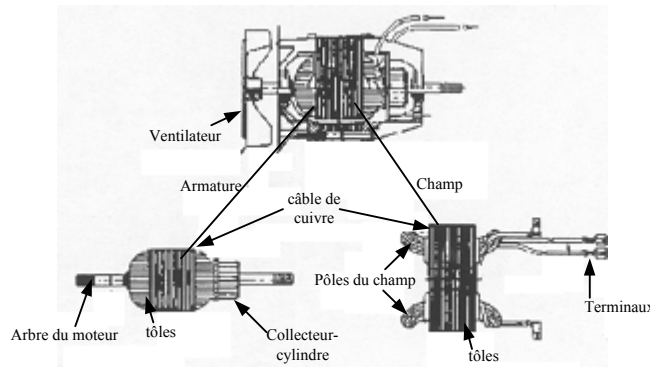


Figure 4-18. Types de composant du moteur électrique à courant continu (bipolaire), Simpson et al. (2001)

<sup>24</sup>La fonction principale du moteur est « la génération de rotation » cependant, en termes techniques, il est évident que la résistance électrique est occasionnée par le réchauffement dû à la rotation. Une deuxième fonction principale (bien que négative) est donc la « résistance à la rotation », voir l'annexe A. Résultats. Lorsque l'on analyse les fonctions d'un produit, il est pertinent de prendre en compte les fonctions négatives du produit qui peuvent affecter la performance des produits.

<sup>25</sup> La définition de composants est hors des objectifs de cette thèse



Simpson et al (2001), exposée dans l'annexe A. L'ensemble des contraintes (équations) de cette analyse exprime la relation entre les interfaces dépendantes et indépendantes.

Les types de composants et interfaces (paramètres) réels correspondent à ceux de la Figure 4-22.

Le lecteur peut se diriger vers Martin et Ishii, (2002) où est exposée une autre option pour construire une matrice des relations entre interfaces.

*3 ) Identification des versions de composants pour chaque produit*

Une fois que les interfaces de l'architecture sont définies, on procède à l'assignation des versions des composants pour chaque produit. L'identification des caractéristiques de chaque version est faite par l'assignation des valeurs de leurs interfaces. Ces valeurs sont calculées afin de respecter les besoins techniques. L'annexe « A » a été transformée en une feuille de calcul Excel, également en code en C++ pour faire les calculs. A titre d'exemple, les valeurs des interfaces de chaque version sont exposées dans l'annexe C.

A titre d'exemple, les coûts de chaque version sont définis dans l'annexe D. On peut observer que l'assignation des coûts a été effectuée de façon particulière. On considère deux situations, soit le composant est acheté, soit le composant est assemblé à partir de sous composants dans l'usine. Voici un exemple : si on considère qu'un composant  $X_{1,1}$  est assemblé dans l'usine à partir des sous composants  $\{X_{1,1,1}, X_{1,1,2}, X_{1,1,3}, X_{1,1,4}, X_{1,1,5}, \dots\}$ , alors le coût de  $X_{1,1}$  fait référence au coût d'assemblage de ces sous composants, dans le cas contraire il fait référence au coût d'achat de  $X_{1,1}$  aux fournisseurs.

La matrice de l'architecture permet d'analyser si un type de composant joue un rôle important dans la différenciation des produits. Si les interfaces du produit sont liées avec les interfaces d'un composant, alors la valeur d'une ou plusieurs interfaces du produit est affectée par la substitution d'une version de composant. Si c'est le cas, ce type composant joue un rôle important dans la différenciation de produits.

Ces deux premières étapes de la méthode donnent comme résultat le modèle PSG initial de la Figure 4-21.

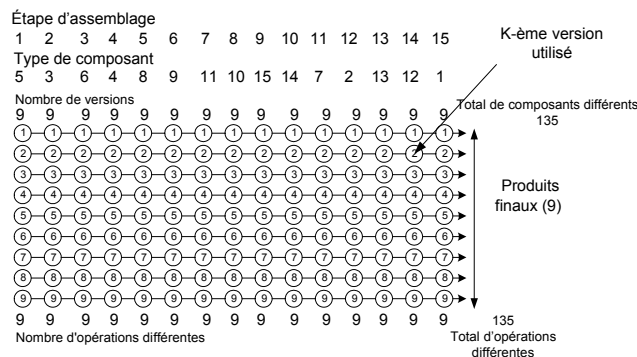


Figure 4-21. Modèle PSG initial

Composant	Paramètre "p" <sup>28</sup>	Composant réel	Description du paramètre	Paramètre fonctionnel			Paramètre physique			Code	
				Flux d'énergie	Flux de matériel	Flux d'information	Spec. Localisation	Spec. état physique	Spec. géométrique		
Composant 1	1	Moteur électrique DC	Couple	X						torque	
	2		Efficacité	X						effic	
	3		Puissance	X						Power	
	4		Intensité magnétique	X						SAT	
	5		Paramètres du processus prod.						X	-	
	6		Masse						X	Mass	
	7		Perte de puissance	X						Loss	
	8		Reluctance total du moteur	X						RR	
Composant 2	1	Armature	Vitesse de rotation	X						Speed	
	2		Paramètres du processus prod.						X	-	
	3		Coefficient Magnétique					X		Kt	
	4		Coefficient dimensionnel						X	Pi	
Composant 3	1	Tôles de l'armature	Paramètres du processus prod.						X	-	
	2		Diamètre						X	RDIAM	
	3		Longueur						X	LENGHTarm	
	4		Densité de matériel					X		DSTEEL	
	5		Reluctance	X						RRR	
	6		Perméabilité magnétique du matériel					X		MUR	
	7		Superficie transversale						X	AR	
	8		Diamètre Intérieur						X	Dintarm	
	9		Masse de la tôle						X	MROTOR	
	10		Coefficient dimensionnel						X	Pi	
Composant 4	1	Cable de bobinage armature	Paramètres du processus prod.						X	-	
	2		Superficie transversale						X	AWA	
	3		Nombre de tours (largeur)						X	Narm	
	4		Résistance	X						Ra	
	5		Coefficient du matériel (cuivre)					X		RESIST	
	6		Densité du matériel					X		DCOPPR	
	7		Masse du câble						X	MWINDarm	
Composant 5	1	Arbre	Paramètres du processus prod.						X	-	
	2		Diamètre						X	Darb	
	3		Coefficient dimensionnel					X		Pi	
	4		Masse						X	Marb	
	5		Longueur						X	Larbre	
Composant 6	1	Collecteurs	Paramètres du processus prod.						X	-	
2	Diamètre Intérieur							X	DintC		
Composant 7	1	Champ	Paramètres du processus prod.						X	-	
Composant 8	1	Tôles du champ	Paramètres du processus prod.						X	-	
	2		Rayon						X	RADIUS	
	3		Epaisseur						X	THICK	
	4		Reluctance	X						RRS	
	5		Longueur						X	LENGHT	
	6		Distance de parcours du flux magnétique						X	LC	
	7		Coefficient dimensionnel						X	Pi	
	8		Perméabilité magnétique du matériel					X		MUR	
	9		Masse						X	MSTATOR	
	10		Superficie de coup						X	AS	
Composant 9	1	Cable de bobinage du champ	Paramètres du processus prod.						X	-	
	2		Superficie transversale						X	Awf	
	3		Nombre de tours (largeur)						X	NFIELD	
	4		Flux magnétique	X						PHI	
	5		Flux total d'électricité bobinage	X						FFF	
	6		Résistance	X						Rs	
	7		Coefficient du matériel					X		RESIST	
	8		Densité du matériel					X		DCOPPR	
	9		Masse du câble						X	MWINDchamp	
Composant 10	1	Pôles	Paramètres du processus prod.						X	-	
	2		Flux total d'électricité bobinage	X						FFF	
	3		Taille						X	SizeP	
Composant 11	1	Terminaux	Paramètres du processus prod.						X	-	
	2		Flux total d'électricité bobinage	X						FFF	
Composant 12	1	Ventilateur	Taille						X	SizeT	
	2		Paramètres du processus prod.						X	-	
	3		Diamètre intérieur						X	DintV	
Composant 13	1	Espace d'air	Diamètre extérieur						X	RDIAMV	
	2		Paramètres du processus prod.						X	-	
	3		Espace vide qu'occupe l'air (gap)						X	LGAP	
	4		Reluctance	X						RRR	
Composant 14	1	Interrupteur	Superficie transversale d'air						X	Aa	
	2		Perméabilité magnétique de l'air					X		MUO	
	3		Paramètres du processus prod.						X	-	
	4		Courant électrique	X						X	CURRINT
	5		Taille							X	SizeInt
Composant 15	1	Structure	Voltage					X		VOLTAGE	
	2		Paramètres du processus prod.						X	-	
	3		Longueur de la structure						X	LST	
	4		Volume						X	VsS	
			Diamètre extérieur					X	RDIAS		

Figure 4-22. Composants réels utilisés<sup>28</sup>.

<sup>28</sup> Dans certains composants, on considère que quelques caractéristiques sont liées aux caractéristiques d'assemblage. Par exemple, le temps d'assemblage du câble de bobinage est fonction de sa largeur (paramètre nombre de tours). On ne peut pas changer de version sans changer le temps d'assemblage sur un produit. Donc certains « paramètres processus de production » sont liés à différents paramètres sur la matrice de compatibilité (celle-ci à titre d'exemple). Kameyama (1993) explique que les contraintes du processus doivent être inclus comme interfaces.

Les données recueillies jusqu'à ici sont utilisées dans l'étape d'optimisation. Cette étape fait le choix de substitution ou non des versions de chaque produit afin d'utiliser une ou plusieurs P.D.R.

#### 4.2.3.2 Troisième étape

La notation suivante est employée pour le problème d'optimisation.

##### **Notations**

$V_{j,p}^k$  : Valeur du "p<sup>ième</sup>" interface du "j<sup>ième</sup>" composant dans le "k<sup>ième</sup>" produit

$S_j^k$  : Coût du "j<sup>ième</sup>" composant utilisé dans le "k<sup>ième</sup>" produit

$Cp$  : Nombre total de types de composants

$Z$  : Nombre total de "k<sup>ième</sup>" produits dans la famille

$\alpha$  : Poids d'importance du respect des valeurs des interfaces de chaque produit.

$\delta$  : Poids d'importance de la réduction du coût

$\eta$  : Poids d'importance de la réduction du délai de réponse.

$$SP_j^s = \begin{cases} 1 & \text{Si le "j<sup>ième</sup>" composant est assemblé dans la "S<sup>ième</sup>" étape de production} \\ 0 & \text{Si non} \end{cases} \quad (3.2.1)$$

$$Cp1_{j,p,f,t} = \begin{cases} 1 & \text{Si le "p<sup>ième</sup>" paramètre du "j<sup>ième</sup>" composant est lié avec le "t<sup>ième</sup>"} \\ & \text{paramètre du "f<sup>ième</sup>" composant} \\ 0 & \text{Si non} \end{cases} \quad (3.2.2)$$

$$Cp2_{j,p,v,g} = \begin{cases} 1 & \text{Si } V_{j,p}^v \neq V_{j,p}^g \\ 0 & \text{Si non} \end{cases} \quad (3.2.3)$$

$$CT_{j,v,f,g} = \begin{cases} 0 & \text{Si } \exists p \wedge \exists t \text{ tel que} \\ & ((Cp1_{j,p,f,t} = 1) \wedge ((Cp2_{j,p,v,g} = 1) \vee (Cp2_{j,t,v,g} = 1))) \quad \forall j, v, f, g \\ 1 & \text{Si non} \end{cases} \quad (3.2.4)$$

$$X_{v,j}^k = \begin{cases} 1 & \text{Si la version du "j<sup>ième</sup>" type de composant du "k<sup>ième</sup>" produit} \\ & \text{est utilisé sur le "v<sup>ième</sup>" produit} \\ 0 & \text{Si non} \end{cases} \quad (3.2.5)$$

$$P_{v,s}^k = \sum_{f=1}^{Cp} (X_{v,f}^k * SP_f^s) \quad \forall v, k, s \quad (3.2.6)$$

$$\overline{P}_{v,s}^k = \frac{P_{v,s}^k}{1 - \sum_{\substack{g=1 \\ g \neq v}}^Z \left( P_{v,s}^k * P_{g,s}^k * \prod_{f=1}^{s-1} \left( \sum_{n=1}^Z (P_{v,f}^n * P_{g,f}^n) \right) \right)} \quad (3.2.7)$$

Les équations (3.2.2), (3.2.3), et (3.2.4) servent à évaluer la compatibilité entre différentes versions dans chaque produit.

L'expression (3.2.2) évalue s'il y a une relation d'interfaces entre les différents types de composants. L'expression (3.2.3) évalue si les valeurs des interfaces des différentes versions sont différentes. L'expression (3.2.4) représente une matrice binaire. L'intersection entre un composant type « j » version « v » et un composant type « f » version « g » est égal a « un » s'ils sont compatibles et « zéro » si non. La Figure 4-23 montre un exemple.

		« f <sup>ième</sup> » type de composant																				
		Composant A					Composant B					Composant C					Composant D					
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
« j <sup>ième</sup> » type de composant	Composant A	1																				
		2																				
		3																				
		4																				
		5																				
	Composant B	1	1	1	1	1	1															
		2	1	0	1	1	1															
		3	1	1	0	1	0															
		4	1	0	1	1	1															
		5	1	1	1	1	1															
	Composant C	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1										
		2	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0										
		3	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1										
		4	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1										
		5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1										
	Composant D	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0					
		2	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0					
		3	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1					
		4	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0					
		5	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0					

Figure 4-23. Exemple des valeurs de la variable « CT »

L'équation (3.2.1) assigne le « j<sup>ième</sup> » type de composant à la « s<sup>ième</sup> » étape dans la ligne d'assemblage du modèle PSG. L'équation (3.2.7) calcule le nombre total d'opérations différentes d'assemblage du modèle PSG.

Le problème d'optimisation est formulé de la façon suivante :

**Ayant :**

$$V_{j,p}^k, S_{j,j}^k, Cp, Z, \alpha, \delta, \eta, SP_j^s, Cp1_{j,p,f,t}, Cp2_{j,p,v,g}$$

**Trouver les versions de l'ensemble de produits**

$$X_{v,j}^k \quad \forall j, v, k \tag{3.2.8}$$

**Qui satisfait :**

Une version de chaque type de composant pour chaque produit de la famille

$$\sum_{k=1}^Z X_{v,j}^k = 1 ; \quad \forall j, v \tag{3.2.9}$$

La compatibilité doit être respectée entre les versions de composants.

$$X_{v,f}^g * \sum_{k=1, k \neq g}^Z (CT_{f,g,j,k} * X_{v,j}^k) \geq 1 \quad \forall f, g, v \tag{3.2.10}$$



**Minimiser :**

Les différences ou écart type entre tout produit original « P » et tout produit « P' » par rapport aux besoins techniques<sup>29</sup>.

$$\left( \sum_{D \in \{1,2,6\}} \sum_{v=1}^Z \left( X_{v,1}^k * \sum_{k=1}^Z \sqrt{(V_{1,D}^k - V_{1,D}^v)^2} \right) \right) * \alpha \tag{3.2.11}$$

+

Le coût des produits selon  $X_{v,j}^k$  :

$$\left( \sum_{j=1}^{CP} \sum_{v=1}^Z \sum_{k=1}^Z (X_{v,j}^k * S_j^k) \right) * \delta \tag{3.2.12}$$

+

Le nombre total d'opérations différentes<sup>30</sup> d'assemblage

$$\sum_{s=1}^{CP} \sum_{v=1}^Z \sum_{k=1}^Z P_{v,s} * \eta \tag{3.2.13}$$

*Remarque : Les algorithmes présentés n'optimisent pas les sous gradients.*

**Résultats :**

Les données d'entrée par rapport au coefficient  $V_{j,p}^k$  sont dans l'annexe C, et pour le coefficient  $S_j^k$  dans l'annexe D. On considère CP=15 composants, Z=9 produits dans la famille, les données de  $SP_j^s$  sont le Tableau 4-2, pour  $Cp1_{j,p,f,t}$  l'annexe B est utilisée,  $CT_{j,v,f,g}$  est calculé par  $Cp2_{j,p,v,g}$  et  $Cp1_{j,p,f,t}$ .

Le problème d'optimisation présente trois problèmes, ces caractéristiques laissent penser qu'il s'agit d'un problème d'optimisation complexe :

- la fonction objectif est quadratique, puisque l'expression (3.2.13) est quadratique,
- la contrainte (3.2.10) est quadratique,
- le nombre de combinaisons des versions pour chaque produit augmente de façon exponentielle quand le nombre de composants et de versions augmente.

Composant Physique		Operation															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Composant 1	Composant 2		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	Composant 3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Composant 4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Composant 5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Composant 6	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Composant 7		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
	Composant 8	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Composant 9	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Composant 10	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
	Composant 11	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
Composant 12		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
Composant 13		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
Composant 14		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
Composant 15		0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	

Tableau 4-2. Coefficient, SP

<sup>29</sup> Les besoins techniques {Couple, Efficacité, Masse} du produit, sont les interfaces 1, 2, 6 du composant type « un ».

<sup>30</sup> S'il existe un nombre réduit d'opérations d'assemblage différentes, alors la différenciation est retardée.

Le problème d'optimisation peut être résolu avec une méthode exacte, si le nombre de solutions valides est faible. Si le nombre de solutions valides est conséquent<sup>31</sup>, on considère que le problème est complexe et peut être résolu avec un algorithme d'approximation.

Le nombre de solution valides est faible si : il existe un nombre faible de versions de composants, ou si un nombre restreint de versions est compatible avec d'autres (c'est le cas quand l'expression 3.2.10 est restrictive).

Comme méthode exacte, on a développé un algorithme « Branch & Bound » exposé dans l'annexe E. Comme méthode d'approximation, on a développé un algorithme en recuit simulé exposé dans l'annexe F.

Il est difficile d'affirmer quand choisir tel ou tel algorithme, cependant si la valeur de  $T^{CP}$  (CP : Quantité totale de types de composants différents, T : total de produits dans la famille) est inférieure à environ « 1, e+9 », l'algorithme Branch & Bound peut donner des résultats rapidement, lorsque la contrainte (3.2.10) est restrictive cet algorithme peut résoudre des problèmes plus complexes. Si la valeur de  $T^{CP}$  est supérieur à environ « 1, e+9 », l'algorithme en recuit simulé peut donner de meilleurs résultats.

### *Algorithme Branch & Bound :*

Dans l'exemple de cette étude, la contrainte de compatibilité eq. (3.2.10) est restrictive, ce qui permet d'obtenir rapidement des résultats avec cet algorithme.

L'algorithme Branch & Bound évalue chaque version de chaque type de composant pour chaque produit. Dans chaque branche (version d'un type de composant) l'algorithme évalue :

- La fonction objectif. Si la nouvelle solution est supérieure de la solution obtenue antérieurement, la branche (version) est considérée comme sous optimale et éliminée de l'espace de solution.
- Si la branche n'est pas compatible avec les branches supérieures, évaluées auparavant dans l'arbre, et avec les possibles branches inférieures à évaluer, elle est alors éliminée de l'espace de solution. La compatibilité est vérifiée avec l'expression (3.2.10).

Si on donne un poids différents aux coefficients  $\{\delta, \alpha, \eta\}$ , l'algorithme choisit différentes configurations des versions pour chaque produit. La Figure 4-21 expose le modèle initial PSG avec un premier coût de 44.95 euros. La Figure 4-26 expose le résultat en utilisant,  $\alpha=0, \delta=1, \eta=0$ . Un poids important sur le coût ( $\delta=1$ , de l'expression 3.2.11) réduit le coût de la famille à 37.74 euros. L'algorithme choisit des composants communs pour tous les produits. Le délai de réponse de l'assemblage est réduit de 135 à 15 opérations différentes d'assemblage. La P.D.R est composée de quinze types de composants. L'écart type des besoins techniques (expression 3.2.10) est important, 1.8613 unités. Donc, la satisfaction des clients est réduite puisque les produits ont des caractéristiques différentes de celles qu'ils attendaient. Les coûts sont réduits mais le mécontentement des clients a été augmenté.

---

<sup>31</sup> Sur certains exemples la quantité de solutions valides est conséquente et difficile à évaluer. Faire cette évaluation est en de hors les objectifs de cette thèse. Définir la complexité du problème d'optimisation est aussi en de hors les objectifs de cette thèse.

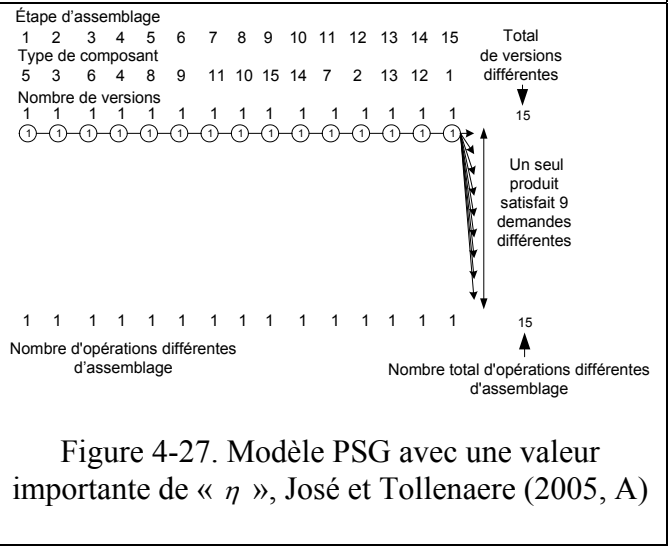
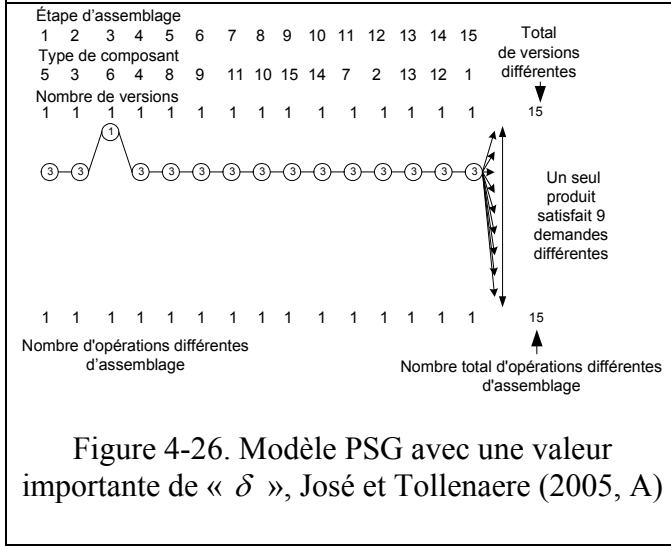
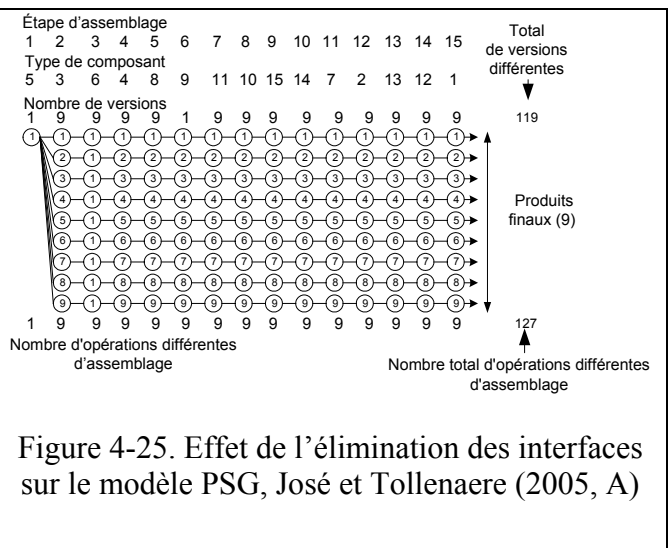
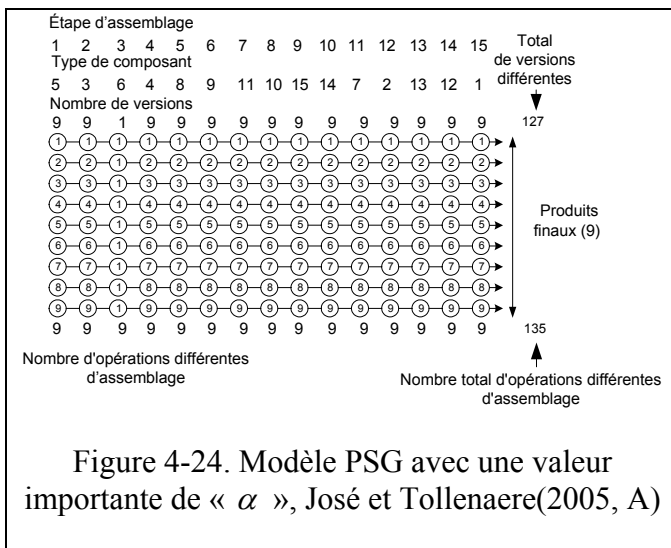
L'algorithme a choisi une telle configuration puisque le composant de type 6 est compatible avec tous les autres types de composants. L'algorithme a donc choisi la version la moins chère. En outre, l'algorithme évalue des groupes de composants compatibles et choisit le meilleur groupe (selon les valeurs  $\alpha$ ,  $\delta$ ,  $\eta$ ). Dans ce cas-ci, il choisit le groupe de versions du produit 3.

Avec les valeurs  $\alpha=1, \delta=0, \eta=0$  l'algorithme donne les résultats exposés dans la Figure 4-24. Les résultats montrent le choix d'un maximum de composants spéciaux, à l'exception du composant de type 6 qui est commun et compatible avec n'importe quel composant (l'algorithme choisit donc la version la moins chère). Le coût pour l'ensemble des produits est élevé, c'est à dire 44.9136 euros. L'écart type par rapport aux besoins techniques des produits est de zéro unités. Le délai de réponse n'est pas réduit puisqu'il n'y a aucune opération d'assemblage commune avant le composant de type 6. Aucune P.D.R n'est possible.

Un autre test qui utilise les valeurs  $\alpha=1, \delta=0, \eta=0$ , montre que l'élimination des relations des interfaces entre les composants (de manière à ce qu'une interface dépendante d'une autre interface, ne le soit plus) permet de réduire le coût et le temps d'assemblage. Par exemple, si on élimine les relations des interfaces du composant de type 5 (ce qui permet que ce composant soit compatible avec n'importe quel autre type de composant), l'algorithme choisit la version la moins chère pour tous les produits, voir la Figure 4-25. Le coût est réduit de 44.9136 euros à 43.58 et le délai de réponse de 135 opérations d'assemblage différentes à 127. Le délai est réduit puisque le composant de type 5 est assemblé dans la première étape. Le composant de type 5 est une P.D.R pour l'ensemble des produits.

La Figure 4-27 expose des autres résultats avec les valeurs  $\alpha=0, \delta=0, \eta=1$ . Une valeur élevée de «  $\eta$  » doit, en théorie, permettre à l'algorithme de choisir des versions communes sur les premières opérations d'assemblage. La contrainte de compatibilité (3.2.10) restreint le nombre de combinaisons entre les versions de composants. L'algorithme choisit donc un groupe de versions compatibles. Le coût est réduit à 38.18 euros, le délai de 135 à 15 opérations d'assemblage différentes. Cependant, l'écart type est importante : 2.2198 unités.

Une autre analyse développée dans cette étude teste chaque valeur de  $\alpha$  et de  $\delta$  pour un type de composant et dans un produit. L'analyse est faite avec l'algorithme Branch & Bound. La Figure 4-28(A), montre cette analyse avec le produit « 8 », composant de type 4 selon différentes valeurs de  $\alpha$  et de  $\delta$ . L'ensemble des points représente deux jours de calcul. Chaque point représente le résultat de la simulation avec une valeur de  $\alpha$  et de  $\delta$ . C'est-à-dire la version du composant de type 4 dans le produit « 8 » est substituée par la version utilisée dans un produit « x » selon les valeurs de  $\alpha$  et de  $\delta$ . Par exemple, pour la valeur  $\alpha=0.5$  et  $\delta=0.5$ , l'algorithme choisit la version utilisée par le produit « 4 » dans le produit « 8 » par rapport au composant de type 4. Avec,  $\alpha=1$  et  $\delta=0$ , l'algorithme choisit la version utilisée par le produit « 3 ». Avec,  $\alpha=0$  et  $\delta=1$ , l'algorithme choisit la version utilisée originellement (« 8 »). Ces résultats sont évidents puisque quand le coût est important, l'algorithme choisit la version la moins chère, cependant, quand le respect des valeurs des besoins techniques est important, l'algorithme choisit la version originale. Selon les valeurs de  $\alpha$  et  $\delta$  l'algorithme choisit la version qui permet un bon compromis entre le coût et le respect des valeurs des besoins techniques pour l'ensemble des produits.



La Figure 4-28(B), montre l'effet de la réduction du coût de la version utilisée sur le produit « 3 ». La possibilité que le produit « 8 » utilise la version du produit « 3 » est plus importante. La synthèse de cette logique est exposée dans la Figure 4-29. Ce qui permet d'affirmer que plus la version d'un produit par rapport à un type de composant présente d'avantages économiques (économies de substitution), plus on pourra la réutiliser dans des produits différents.

La Figure 4-28 (B), permet aussi d'évaluer si un type de composant est ou non un composant de différenciation, et, le cas échéant, dans quelle mesure il permet la différenciation des produits. On peut considérer ce critère comme le nombre de fois que l'algorithme choisit la version originale pour le même produit (par exemple, le choix de la version du produit « 8 » pour le même produit « 8 ») selon différentes valeurs de  $\alpha$  et  $\delta$ . Si le choix d'une autre version est difficilement justifié par la réduction de coûts, alors l'algorithme n'en choisit pas d'autre que la version originale. Si la zone de choix de la même version originale est importante (voir la Figure 4-28 (B)) alors ce type de composant est important pour la différenciation des produits.

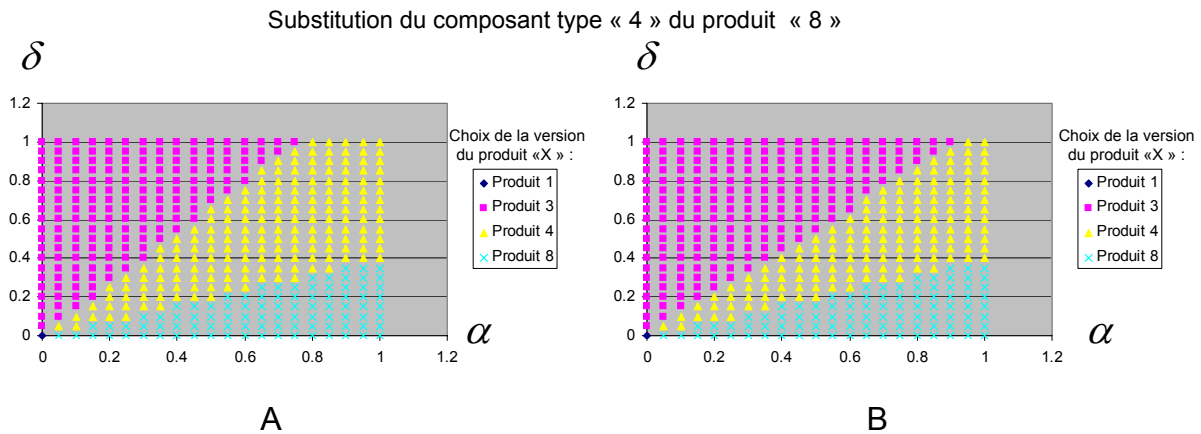


Figure 4-28. Choix de versions de composants de l’algorithme

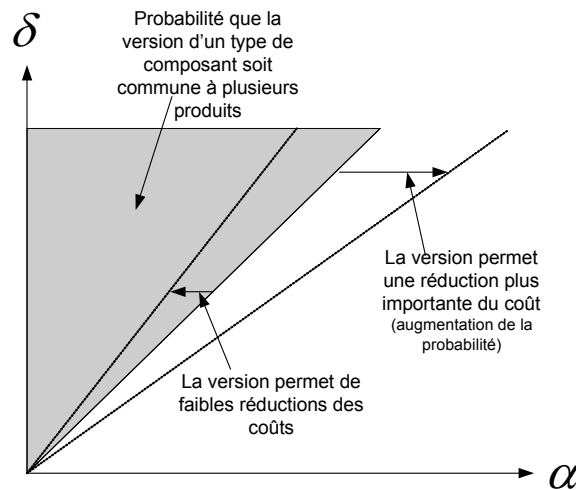


Figure 4-29. Probabilité qu’une version bon marché soit commune à plusieurs produits

Ces analyses permettent d’affirmer que lorsqu’un type de composant a une influence sur la différenciation des produits et que les économies de substitution justifient le changement de version d’un composant, il est plus pertinent de réutiliser la version la moins chère, dans le cas contraire, il est plus pertinent d’utiliser une version spéciale.

Ces études permettent de prouver l’hypothèse de cette analyse (Figure 4-8), puisqu’une version d’un type de composant ayant une forte relation avec les valeurs des besoins techniques par rapport aux avantages économiques est mieux placée comme version de différenciation, dans le cas contraire elle doit être commune entre les différents produits.

*Algorithme en recuit simulé :*

Une relaxation lagrangienne de la contrainte 3.2.10 a été effectuée pour avoir la fonction objectif suivante : Fonction objectif = A+B+C+D

$$\text{Equation (3.2.11)} \longrightarrow A = \left( \sum_{D=1}^{RT} \sum_{v=1}^Z \left( X_{v,1}^k * \sum_{k=1}^Z \sqrt{(V_{1,D}^k - V_{1,D}^v)^2} \right) \right) * \alpha$$

$$\text{Equation (3.2.12)} \longrightarrow B = \left( \sum_{j=1}^{CP} \sum_{v=1}^Z \sum_{k=1}^Z (X_{v,j}^k * S_j^k) \right) * \delta$$

$$\text{Equation (3.2.13)} \longrightarrow C = \sum_{s=1}^{CP} \sum_{v=1}^Z \sum_{k=1}^Z P_{v,s}^k * \eta$$

$$\text{Equation (3.2.10)} \longrightarrow D = \left( \sum_{k=1}^Z \sum_{g=1}^Z \sum_{f=1}^{CP} \sum_{j=1}^{CP} \sum_{v=1}^Z X_{v,j}^k * X_{v,j}^k * (CT_{j,k,f,g})^2 \right) * \mu$$

Pour tester cet algorithme, les sous gradients utilisés  $\delta$ ,  $\alpha$ ,  $\eta$ ,  $\mu$  sont définis de la façon suivante :

$$\begin{aligned} A &= (\text{Maximum valeur possible d'expression 3.2.11}) - (\text{Minimum valeur possible d'expression 3.2.11}) \\ B &= (\text{Maximum valeur possible d'expression 3.2.12}) - (\text{Minimum valeur possible d'expression 3.2.12}) \\ C &= (\text{Maximum valeur possible d'expression 3.2.13}) - (\text{Minimum valeur possible d'expression 3.2.13}) \\ D &= (\text{Maximum valeur possible d'expression 3.2.10}) - (\text{Minimum valeur possible d'expression 3.2.10}) \\ \delta &= \frac{A}{\text{Max.}\{A; B; C; D\}}; \quad \alpha = \frac{B}{\text{Max.}\{A; B; C; D\}}; \quad \eta = \frac{C}{\text{Max.}\{A; B; C; D\}}; \quad \mu = \frac{D}{\text{Max.}\{A; B; C; D\}} \end{aligned}$$

Exemples :

$$\text{Quand on dit } \delta = 1, \text{ on prend en compte: } \delta = \left( \frac{A}{\text{Max.}\{A; B; C; D\}} \right) * 1$$

$$\text{Quand on dit } \alpha = 0.5, \text{ on prend en compte sur les algorithmes: } \alpha = \left( \frac{B}{\text{Max.}\{A; B; C; D\}} \right) * 0.5$$

La Figure 4-30 et la Figure 4-31 exposent quelques résultats avec l'algorithme. La Figure 4-30 expose l'influence de la valeur  $\delta$  (poids sur la réduction des coûts) sur les expressions 3.2.12 et 3.2.13. La Figure 4-31 expose l'influence de la valeur  $\alpha$  (poids de la réduction de l'écart type entre les produits « P » et « P' ») sur les expressions 3.2.11 et 3.2.13.

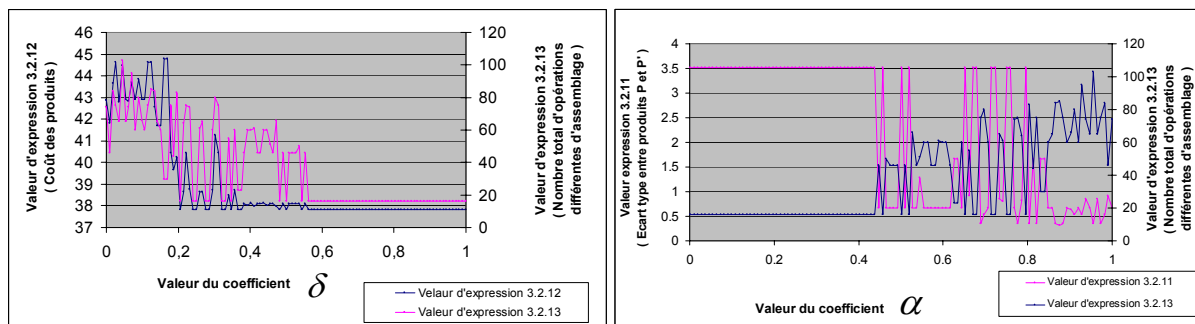


Figure 4-30. Tendence d'expression 3.2.12, et Figure 4-31. Tendence d'expression 3.2.11 et 3.2.13 par rapport au coefficient ( $\delta$ )

La Figure 4-32 montre en synthèse le comportement des résultats<sup>32</sup> de la Figure 4-30 et la Figure 4-31. La Figure 4-32 montre les résultats des simulations avec différents instances de «  $\delta$  » et de «  $\alpha$  ». La première simulation commence avec une valeur importante de «  $\delta$  » et une valeur faible de «  $\alpha$  ». Pour les simulations suivantes, la valeur de «  $\alpha$  » augmente et la valeur de «  $\delta$  » diminue. On peut observer comment l'augmentation de la valeur de «  $\delta$  » a pour conséquences de :

- Minimiser le nombre total d'opérations différentes d'assemblage, calculé par l'expression 3.2.13
- L'algorithme minimise le nombre de versions de composants et minimise le coût de la famille de produits, calculé par l'expression 3.2.12. L'algorithme réutilise les versions les moins chères.
- Augmenter l'écart type entre les produits « P » et « P' », calculé par l'expression 3.2.11

En outre, on peut observer comment l'augmentation de la valeur de «  $\alpha$  » a pour conséquences de :

- Augmenter le coût des produits de la famille, calculé par l'expression 3.2.12. L'algorithme ne réutilise pas les versions les moins chères sur différents produits, donc le coût des produits augmente.
- Minimiser l'écart type entre les produits « P » et « P' », calculé par l'expression 3.2.11
- Augmenter le nombre total d'opérations différentes d'assemblage, calculé par l'expression 3.2.13

On peut observer sur la Figure 4-30 qu'il existe une corrélation entre le coût des produits et le nombre total d'opérations différentes d'assemblage (délai de réponse). Cela peut être dû au fait que la réutilisation de versions de composants pour différents produits, en plus de réduire le coût, réduit le nombre total d'opérations différentes d'assemblage nécessaires, et ceci retarde le point de différenciation (si les composants réutilisés sont ceux assemblés dans les premières étapes de la séquence).

Antérieurement on avait mentionné que la réduction du nombre total d'opérations différentes d'assemblage augmentait la possibilité d'employer des plateformes, et que la satisfaction des clients dépendait de l'écart type entre tout produit P et P'. La Figure 4-32 permet donc d'affirmer que la réduction du nombre total d'opérations différentes d'assemblage, la réduction du coût des produits, et la possibilité d'employer des plateformes peuvent se faire au détriment de la satisfaction des clients.

*Remarque : si le lecteur ne dispose pas de données en ce qui concerne des aspects tels que les coûts des composants pour évaluer les possibles économie de substitution, l'annexe K montre une méthode (complémentaire et alternative) qui évalue seulement le rôle que joue chaque composant dans la différenciation des produits, ce qui permet d'avoir une idée de quels composants pourront être réutilisés entre les produits.*

---

<sup>32</sup> Les calculs prennent toujours en compte les valeurs de  $\eta = 0$  et  $\mu = 1$ . Les résultats ne garantissent pas toujours le respect de l'expression « 3.2.10 ».

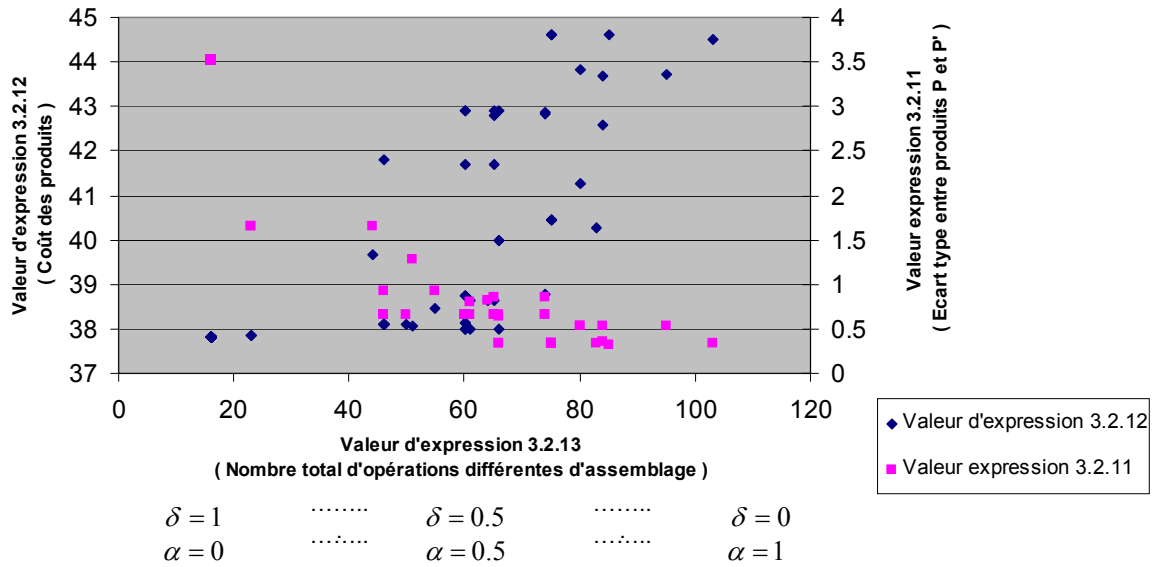


Figure 4-32. Résultats d’algorithme en « recuit simulé », José et Tollenaere, 2005 (A).

#### 4.2.4 Conclusion

La Figure 4-32 a montré que la réduction des coûts se fait au détriment de la satisfaction du client et vice versa.

Le choix de réutiliser des versions de composants liés aux caractéristiques importantes des produits, implique de réduire la possibilité de différencier un produit par rapport à un autre et de réaliser des économies de substitution. Le choix d’utiliser des composants spéciaux liés aux caractéristiques importantes des produits, implique de ne pas pouvoir réaliser d’économies de substitution et d’avoir des produits suffisamment différents. En résumé, si les interfaces d’un type de composant sont liées avec celles du système (caractéristiques du produit), les avantages des économies de substitution et les avantages de la diversité ne sont pas indépendants ; le concepteur doit donner la priorité à l’un au détriment de l’autre, ou choisir l’un des deux.

Si les interfaces d’un type de composant ne sont pas liées à celles du système, les avantages des économies de substitution et les avantages de la diversité sont indépendants. La réutilisation des versions les moins chères de ce type de composant permet la réduction des coûts et le développement produits différents en même temps.

Cette partie a montré que les facteurs importants dans la décision de définir une version de composant communs sont :

- le rôle que le type de composant joue dans la différenciation des produits,
- les économies que ceux-ci permettent de réaliser sur les produits.

En outre, cette partie a expliqué comment le nombre d’interfaces dicte la compatibilité entre les composants. Les versions de composants qui sont compatibles avec un grand nombre de versions de composants peuvent devenir plus facilement communs entre les produits. Si celles-ci sont assemblées dans les premières étapes de la ligne d’assemblage, elles auront une forte probabilité d’être incluses dans une « P.D.R. ». Ceci a comme effet une réduction du



nombre total d'opérations de production différentes, et l'obtention d'économies de substitution.

La partie suivante décrit la deuxième méthode pour la construction des « P.D.R. ».

### 4.3 Résolution du problème de réorganisation de la séquence

#### 4.3.1 Introduction

Cette partie montre la méthode utilisée pour la résolution de la problématique de la réorganisation de la séquence, expliquée dans la partie 4.1.1. Celle-ci mentionne que l'objectif est de trouver l'ordre de la séquence d'assemblage, ayant un nombre de permutations égal à «  $n!$  » ( $n$  = nombre des étapes du processus), qui permette la construction des P.D.R.

Un aspect important pour proposer une méthode est la restriction de précédence entre différents types de composants. Pour expliquer cet aspect, on analysera l'exemple du moteur électrique (exposé auparavant). La décomposition de l'assemblage du moteur électrique est exposée dans la Figure 4-33. Le moteur est composé de quatorze types de composants et étapes d'assemblage ( $n = 14$ ). Le nombre de permutations n'est pas  $14!$  puisque les 14 composants sont localisés dans différents sous assemblages dans la décomposition du produit. Un composant (p.e. l'arbre) ne peut être assemblé directement sur les produits (p.e. le moteur électrique) qu'après avoir été assemblé dans un sous assemblage (p.e. l'armature). Le produit final (le moteur) comporte 6 sous assemblages, de sorte que le nombre possible de permutations au premier niveau de hiérarchie est  $6!$ . L'armature et le champ ont chacun 4 sous composants, donc le troisième niveau de la hiérarchie en aurait  $8!$  "sous permutations". Le nombre final de permutations de la séquence du processus seraient alors :  $6! \cdot (8!)$  (29 030 400 permutations valides<sup>33</sup>). À première vue, le problème semble être complexe, en raison du nombre de composants. En réalité cet exemple est beaucoup plus simple du fait que les sous assemblages (armature, champ, ventilateur, etc.) doivent être assemblés après leurs sous composants. Ainsi, l'ordre d'assemblage (ou restriction de précédence) réduit le nombre de permutations du problème.

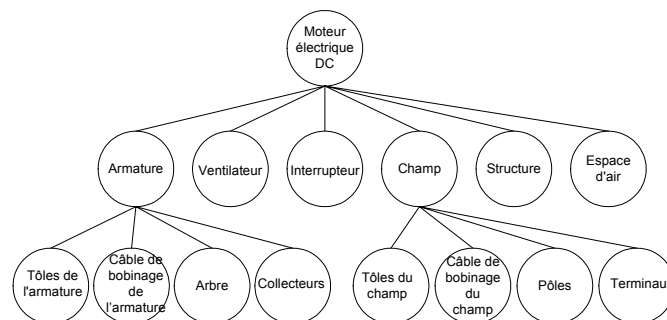


Figure 4-33. Décomposition des assemblages du moteur électrique à courant continu

<sup>33</sup> Scénario où aucun sous assemblage ne peut être assemblé avant les assemblages « pères » ou de niveau supérieur. Par exemple les assemblages du 3ième niveau ne peuvent pas être assemblés avant ceux du 2ième niveau.

La méthode de ce chapitre considère que les problèmes simples peuvent être résolus par des méthodes d'optimisation exactes ou même avec une méthode simple d'énumération. Les problèmes complexes, qui ont un grand nombre de permutations, peuvent être résolus par des méthodes d'approximation.

### 4.3.2 Méthode

Dans la prochaine partie, le modèle mathématique pour résoudre le problème de la réorganisation de la séquence du processus est exposé. Pour les deux types de problèmes (complexes et simples) nous avons développé deux algorithmes : un algorithme génétique (GA) pour des problèmes complexes, exposé dans l'annexe I, et un algorithme en Branch & Bound (B&B) pour des problèmes simples, exposé dans l'annexe J. Les résultats utilisant les algorithmes GA et B&B dans le problème du tableau de bord de Martin et d'Ishii (1997), voir la Figure 4-1, sont exposés après le problème d'optimisation<sup>34</sup>.

#### Notations

$Cp$  : Nombre total de types de composants

$Z$  : Nombre total de produits dans la famille

$$SP_j^S = \begin{cases} 1 & \text{Si le "j}^{\text{ième}}\text{" composant type est assemblé dans la "S}^{\text{ième}}\text{" étape} \\ 0 & \text{Si non} \end{cases} \quad (3.3.1)$$

$$X_{v,j}^k = \begin{cases} 1 & \text{Si la version du "j}^{\text{ième}}\text{" type de composant du "k}^{\text{ième}}\text{" produit} \\ & \text{est utilisé sur le "v}^{\text{ième}}\text{" produit} \\ 0 & \text{Si non} \end{cases} \quad (3.3.2)$$

$$P_{v,s}^k = \sum_{f=1}^{CP} (X_{v,f}^k * SP_f^s) \quad \forall v, k, s \quad (3.3.3)$$

$$\overline{P}_{v,s}^k = \frac{P_{v,s}^k}{1 - \sum_{\substack{g=1 \\ g \neq v}}^Z \left( P_{v,s}^k * P_{g,s}^k * \prod_{f=1}^{s-1} \left( \sum_{n=1}^Z (P_{v,f}^n * P_{g,f}^n) \right) \right)} \quad (3.3.4)$$

$$\sum_{s=1}^{CP} \sum_{v=1}^Z \sum_{k=1}^Z \overline{P}_{v,s}^k : \text{Nombre total d'opérations différentes d'assemblage} \quad (3.3.5)$$

$$Q_B^A = \begin{cases} 1 & \text{Si le B}^{\text{ième}} \text{ type de composant peut être assemblé} \\ & \text{avant le A}^{\text{ième}} \text{ type de composant} \\ 0 & \text{Si non} \end{cases} \quad (3.3.6)$$

L'expression (3.3.1) est employée pour évaluer et définir un ordre de la séquence d'assemblage. La Figure 4-35 expose un exemple, la valeur  $SP_4^2=1$  signifie que le composant de type « 4 »,  $j = 4$ , est assemblé dans la « deuxième » étape,  $S = 2$ , et ainsi de suite. La Figure 4-36 montre comment le composant de type « 4 » est assemblé dans la « deuxième » étape. L'assemblage ou produit final ( $j=11$ ) est obtenu lors de l'étape finale.

<sup>34</sup> Remarque : Les algorithmes présentés n'optimisent pas les sous gradients.

L'équation (3.3.2) aide à évaluer le nombre de versions de composants communs entre produits. Le nombre de versions de composants communs (expression 3.3.2) et la séquence de montage (expression 3.3.1) sont employés pour calculer le nombre total d'opérations différentes d'assemblage (du modèle PSG) dans l'expression 3.3.5.

L'équation (3.3.6) est la restriction de précédence d'assemblage, qui définit quels types de composants peuvent être assemblés après d'autres. Pour définir  $Q_B^A$ , le lecteur peut se rapporter à la matrice de la Figure 4-34. L'exemple montre que les composants de type "2" et "3" (B=2 et B=3) ne peuvent pas être assemblés avant le composant type "1", (A=1). L'intersection entre le même type composant (e. g. A=1, B=1) est toujours considérée comme zéro.

	A=1	A=2	A=3
B=1	0	1	1
B=2	0	0	1
B=3	0	1	0

Figure 4-34. Matrice de l'ordre d'assemblage

*Etape de la séquence "s"*

	1	2	3	4	Z
1	1	0	0	0	-
2	0	0	0	0	-
3	0	0	0	0	-
4	0	1	0	0	-
.	-	-	-	-	-
Z	-	-	-	-	-

$SP_4^2 = 1$

Figure 4-35. Configuration d'une séquence

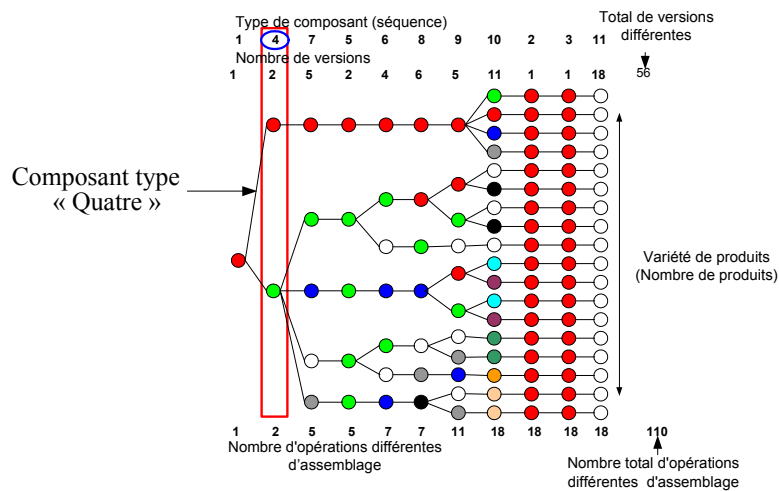


Figure 4-36. Séquence d'exemple.

Le problème d'optimisation est formulé de la façon suivante :

**Ayant :**

$$C_p, Z, X_{v,j}^k, Q_B^A$$

**trouvez la séquence d'assemblage optimale :**

$$SP_j^s$$

$$(3.3.7)$$

**qui satisfasse :**

Une « S<sup>ième</sup> » étape de production pour chaque « j<sup>ième</sup> » type de composant

$$\sum_{s=1}^{CP} SP_j^s = 1 \quad \forall j \quad (3.3.8)$$

Un « j<sup>ième</sup> » type de composant pour chaque « S<sup>ième</sup> » étape de production

$$\sum_{j=1}^{CP} SP_j^s = 1 \quad \forall s \quad (3.3.9)$$

La restriction de précédence (dans l'assemblage), entre un « A<sup>ième</sup> » type de composant et un « B<sup>ième</sup> » type de composant, doit être respectée :

$$\sum_{f=1}^{CP} \left( \sum_{B=1}^{CP} \left( \sum_{j=f}^{CP} \left( SP_B^f * \sum_{A=1}^{CP} \left( SP_A^j * (Q_B^A - 1) * (Q_B^A - 1) \right) \right) \right) \right) = 0 \quad (3.3.10)$$

**Minimiser :**

Le nombre total d'opérations différentes d'assemblage :

$$\left( \sum_{s=1}^{CP} \sum_{v=1}^Z \sum_{k=1}^{Z=k} P_{v,s} \right) \quad (3.3.11)$$

*Résultats du GA :*

Les données d'entrée pour la constante  $X_{v,j}^k$  sont exposées dans l'annexe G. Les données d'entrée pour la constante  $Q_B^A$  sont exposées sur la Figure 4-37.

		A										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
B	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
	6	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
	7	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
	9	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figure 4-37. Données d'entrée  $Q_B^A$

Les valeurs de CP=11 et de Z=18 ont été considérées. Le problème a été résolu en utilisant 5 opérateurs dans l'algorithme génétique : Sélection, Croisement, Mutation, Inversion, Mutation cataclysmique (Eshelman, 1991). Une population de 15 séquences a été employée dans chaque génération. Chaque séquence de chaque génération, est considérée comme une solution possible. Chaque solution possible est considérée comme un individu ou chromosome. Chaque chromosome (ou séquence) est composé de la configuration des valeurs suivantes :

$$\{SP_1^1, SP_1^2, \dots, SP_1^{CP}, SP_2^1, \dots, SP_2^{CP}, \dots, SP_{CP}^1, \dots, SP_{CP}^{CP}\}$$

Chaque élément dans le chromosome est considéré comme un gène. L'objectif de cet algorithme est de simuler un certain nombre de générations de chromosomes avec les cinq

opérateurs génétiques et de trouver les valeurs des gènes d'un chromosome optimal par rapport à la minimisation d'une fonction de « Performance ». Une relaxation lagrangienne de contraintes a été faite afin d'utiliser une fonction de performance. Comme fonction de performance, on a considéré l'équation (3.3.11) qui comprend les équations de pénalité (3.3.8), (3.3.9), (3.3.10) :

$$\text{Equation (3.3.11)} \longrightarrow A = \left( \sum_{s=1}^{CP} \sum_{v=1}^Z \sum_{k=1}^Z P_{v,s} \right) * \gamma$$

$$\text{Equation (3.3.8)} \longrightarrow B = \left( \sqrt{\left( \sum_{s=1}^{CP} SP_j^s \right) - 1} * \left( \sum_{s=1}^{CP} SP_j^s \right) - 1 \right) * \psi$$

$$\text{Equation (3.3.9)} \longrightarrow C = \left( \sqrt{\left( \left( \sum_{j=1}^{CP} SP_j^s \right) - 1 \right) * \left( \sum_{j=1}^{CP} SP_j^s \right) - 1} \right) * \omega$$

$$\text{Equation (3.3.10)} \longrightarrow D = \sum_{j=1}^{CP} \left( \sum_{B=1}^{CP} \left( \sum_{j=f}^{CP} \left( SP_B^f * \sum_{A=1}^{CP} \left( SP_A^j * (Q_B^A - 1) * (Q_B^A - 1) \right) \right) \right) \right) * \varphi$$

$$\text{Fonction de performance} = A+B+C+D$$

Les sous gradients  $\gamma$  ,  $\psi$  ,  $\omega$  ,  $\varphi$  sont définis de la façon suivante :

$$A = (\text{Maximum valeur possible d'expression 3.3.11}) - (\text{Minimum valeur possible d'expression 3.3.11})$$

$$B = (\text{Maximum valeur possible d'expression 3.3.8}) - (\text{Minimum valeur possible d'expression 3.3.8})$$

$$C = (\text{Maximum valeur possible d'expression 3.3.9}) - (\text{Minimum valeur possible d'expression 3.3.9})$$

$$D = (\text{Maximum valeur possible d'expression 3.3.10}) - (\text{Minimum valeur possible d'expression 3.3.10})$$

$$\gamma = \frac{A}{\text{Max.}\{A; B; C; D\}}; \quad \psi = \frac{B}{\text{Max.}\{A; B; C; D\}}; \quad \omega = \frac{C}{\text{Max.}\{A; B; C; D\}}; \quad \varphi = \frac{D}{\text{Max.}\{A; B; C; D\}}$$

Exemples :

$$\text{Quand on dit } \gamma = 1, \text{ on prend en compte: } \gamma = \left( \frac{A}{\text{Max.}\{A; B; C; D\}} \right) * 1$$

$$\text{Quand on dit } \psi = 0.5, \text{ on prend en compte sur les algorithmes: } \psi = \left( \frac{B}{\text{Max.}\{A; B; C; D\}} \right) * 0.5$$

La Figure 4-38 et la Figure 4-39 exposent les résultats après plusieurs générations. Il peut être observé qu'après 1500 générations, l'algorithme commence à converger vers une solution locale. Le meilleur chromosome est le #15 dans la génération 1423, voir la Figure 4-38. Ainsi, la meilleure séquence après 2000 générations est l'ordre d'assemblage {1,3,4,9,10,2,5,6,7,8,11} ce qui veut dire : mettre en place l'ordre d'assemblage {Corps du combiné, Vitre, Indicateur de transmission automatique, Indicateur de vitesse, Témoins lumineux, Assise de vitre, Jauge à essence, Indicateur de température, Carte électronique, Tachymètre, Assemblage final} ayant 75 comme nombre total d'opérations différentes d'assemblage. Le PSG est exposé dans la Figure 4-40. Le nombre total d'opérations



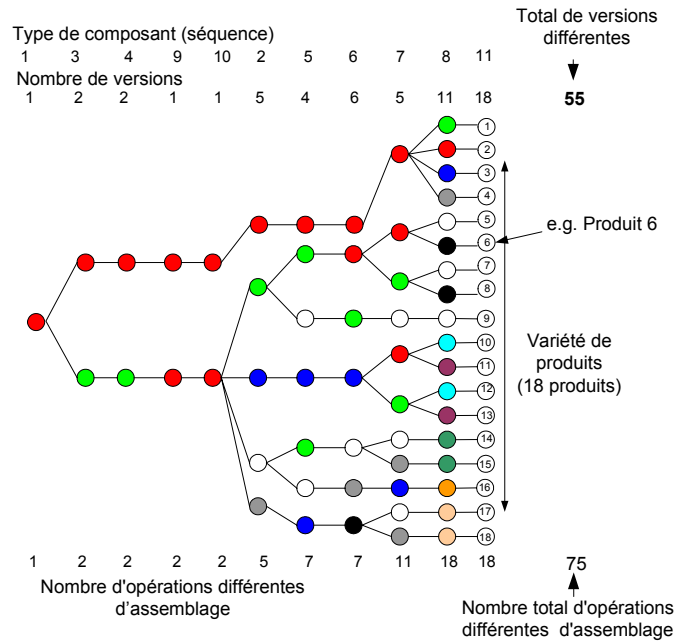


Figure 4-40. Résultat de GA dans la réorganisation de la séquence

L'algorithme GA a été comparé avec un algorithme en recuit simulé (exposé dans l'annexe H), les résultats de l'algorithme sont montrés dans la Figure 4-41. Ces résultats correspondent au même temps de calcul que l'algorithme génétique (c'est à dire 45 minutes environ). On peut observer que l'algorithme réduit à peine la fonction objectif, et que le nombre total d'opérations différentes d'assemblage reste encore très élevé.

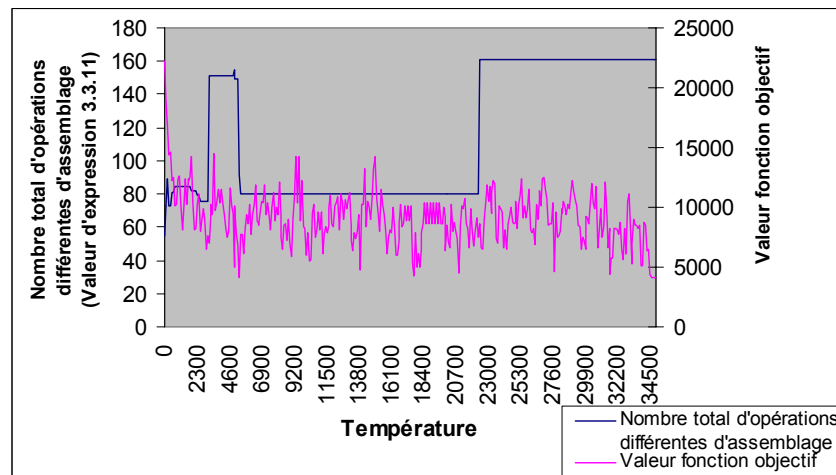


Figure 4-41. Résultats d'algorithme en « recuit simulé »

L'algorithme GA donne plus rapidement de meilleurs résultats quand l'opérateur « d'inversion<sup>35</sup> » est inclus (pour cet exemple). En tant qu'opérateur de "Sélection", la méthode "Stochastic Universal Sampling method" (connue sous le nom de "roulette") a été employée. Cependant, pour des problèmes plus complexes la méthode "Fitness Ranking Selection" donne de meilleurs résultats.

<sup>35</sup> L'opérateur d'inversion permute deux gènes (choisis au hasard) dans un chromosome selon un taux de probabilité. L'algorithme réduit le temps de calcul, du fait qu'il permet de chercher la place adéquat des gènes (selon leur valeur) sur le chromosome.

La méthode "Fitness Ranking Selection" donne de meilleurs résultats du fait qu'elle évite que les valeurs des gènes des chromosomes performants soient propagées de façon excessive dans chaque génération. Ceci permet une recherche de solutions plus aléatoire grâce à la combinaison de chromosomes plus hétérogènes dans chaque génération. Le temps de calcul, régulièrement plus important avec cette méthode, est réduit grâce à l'utilisation de l'opérateur d'inversion. Nous avons comparé deux types d'opérateurs de « Croisement » : « One-point Crossover » et « Uniform Crossover », voir Figure 4-42. Uniform Crossover, donne de meilleurs résultats dans ce problème. On a employé un taux de croisement de 0.8, un taux de mutation de 0.01, et un taux d'inversion de 0.1. Les valeurs des sous gradients ont été  $\gamma = 1, \psi = 500, \omega = 500, \varphi = 100$  afin de trouver permutations valides.

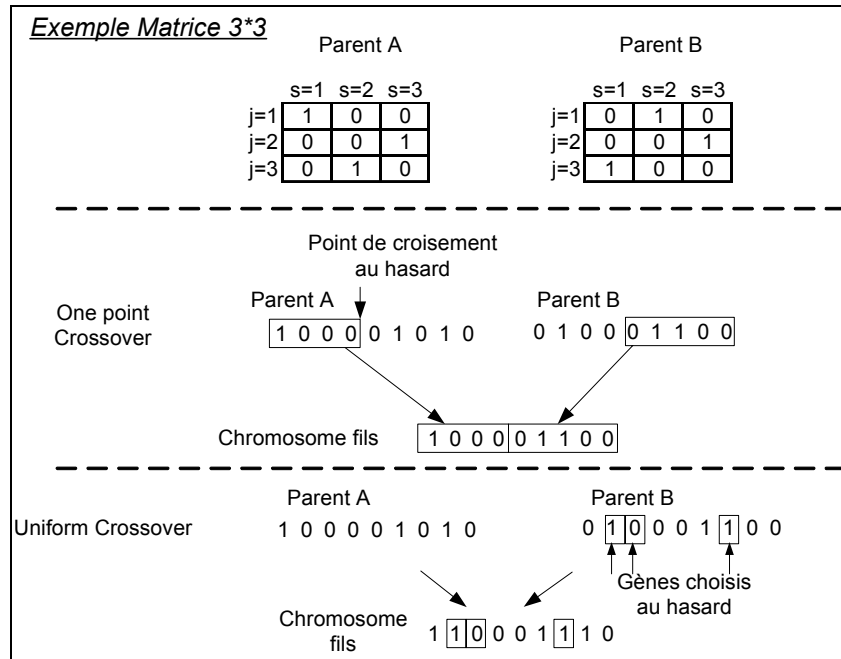


Figure 4-42. Opérateurs de croisement

Le résultat (la Figure 4-40) permet de définir différentes « P.D.R. ». Par exemple les produits {1, 2, 3, 4} utiliseront la même « P.D.R. » si celle-ci est composée de 9 composants, c'est-à-dire des composants de type {1, 3, 4, 9, 10, 2, 5, 6, 7}. Les produits {17, 18} utiliseront la même « P.D.R. » si celle-ci est composée des composants de types {1, 3, 4, 9, 10, 2, 5, 6}. Pour différencier le produit 17 du 18, il est nécessaire d'assembler des versions différentes des composants de type {7, 8}.

Le lecteur peut ainsi décider d'utiliser plusieurs « P.D.R. » de « taille » différente. Par exemple sur la Figure 4-43 la « P.D.R. » « A » peut être utilisée à cause du besoin de respecter le délai de « quatre opérations de différenciation » sur le produit 6, ce qui permettrait de personnaliser dans le même délai les produits {5, 7, 8, 9}, si cela était nécessaire. La « P.D.R. » « B » permettra de personnaliser dans un délai de deux opérations n'importe quel produit {1, 2, 3, 4}. Le lecteur devra faire une analyse des besoins en termes d'exigences en ce qui concerne le temps de réponse de chaque produit. Le lecteur devra aussi prendre en compte qu'il existe des coûts liés au stockage. Il est évident que le lecteur devra choisir les « P.D.R. » en fonction du plus court délai exigé parmi les produits. Par exemple, il faudra utiliser la « P.D.R. » « B » si un des produits {1, 2, 3, 4} a besoin d'un délai de 2 opérations de différenciation. Les algorithmes présentés dans cette partie permettent de retarder le point de différenciation de façon à ce que le concepteur ait la possibilité de choisir



les « P.D.R. » (avec une quantité importante de composants) pour une quantité plus importante de produits.

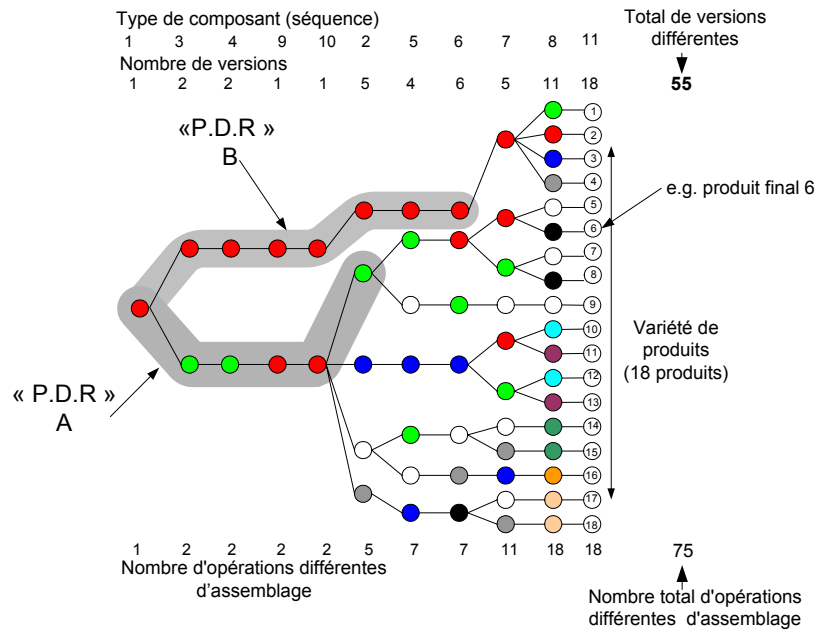


Figure 4-43. Choix des P.D.R's.

Une autre approche des résultats obtenus est d'utiliser des modules de différenciation pour réduire le délai de production, voir Figure 4-44. Par exemple si le produit « 9 » a besoin d'un délai court, le stockage du module « 1 » permettra de réduire le délai. Pour obtenir le produit « 9 », il serait nécessaire d'assembler la « P.D.R. » « A », le module « 1 » et la version utilisée sur ce produit du composant de type « 8 ».

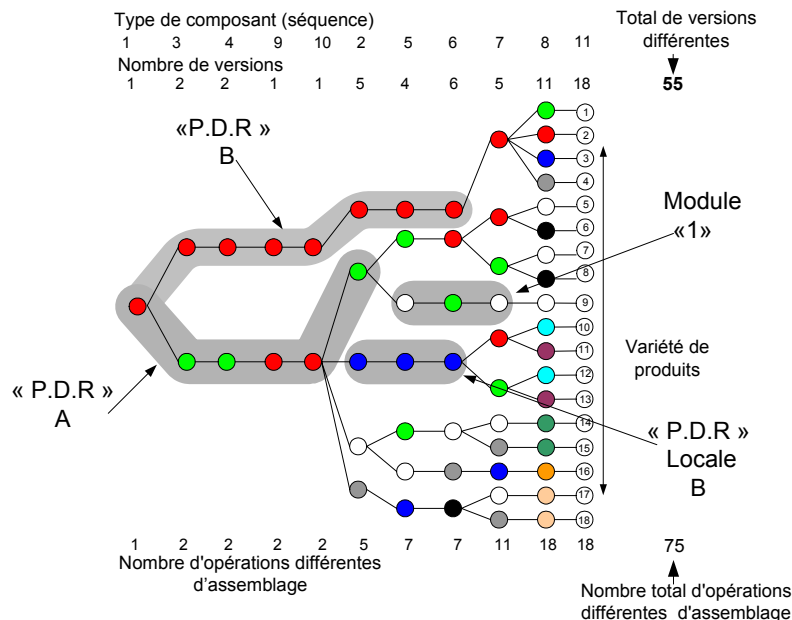


Figure 4-44. Configuration de P.D.R's locales ou modules

De la même façon, le concepteur pourra décider de former des « P.D.R. » « locales », par exemple la « P.D.R. » « B » est partagée entre les produits 10, 11, 12, 13. Pour obtenir un de

ces produits, l'assemblage de la « P.D.R. » « B », de la « P.D.R. » locale « D », et des versions différentes des composants de type {7, 8} seraient nécessaires. L'utilisation de « P.D.R. » locales permet aussi de réduire le délai d'obtention des produits.

*Résultats avec algorithme B&B :*

On considère justifiable l'utilisation de cet algorithme si le nombre de permutations  $n!$  possibles est faible, c'est-à-dire, environ moins de  $7!$ . Toutefois, l'algorithme pourrait résoudre les problèmes de  $8!$ ,  $9!$ ,  $10!$  si le problème permet de trouver des solutions très satisfaisantes très tôt dans le processus d'évaluation et d'élimination (principe de fonctionnement du Branch & Bound) ou si la variable  $Q_B^A$  est très restrictive (voir contrainte 3.3.10).

Pour tester l'algorithme B&B, on a utilisé le même exemple. On a réduit le nombre de solutions valides avec de nouvelles données par rapport à «  $Q_B^A$  » exposées dans la Figure 4-45. L'algorithme donne la séquence {4, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 1, 11} en 25 minutes de calcul, en ayant 127 opérations différentes, voir Figure 4-46. Ces résultats permettent d'affirmer qu'il est possible d'optimiser un problème de réorganisation de la séquence dans un temps réduit si la variable «  $Q_B^A$  » est très restrictive.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figure 4-45. Données,  $Q_B^A$

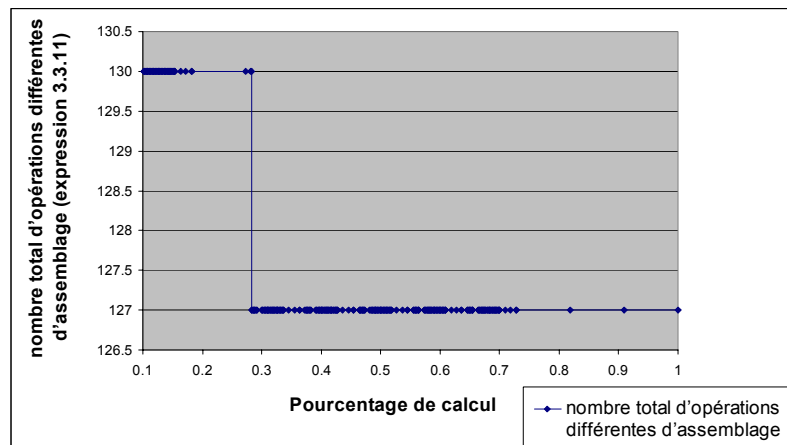


Figure 4-46. Résultats avec algorithme Branch & Bound

### 4.3.3 Conclusion

Comme on l'a mentionné auparavant, la réorganisation de la séquence d'assemblage permet de construire une ou plusieurs « P.D.R. » pour une famille de produits. Si on obtient l'ordonnancement optimal, il est possible de maximiser les composants dans une ou plusieurs « P.D.R. ». Ceci permet d'obtenir les avantages suivants :

- la réduction du nombre d'opérations nécessaires pour différencier un produit d'un autre (nombre d'opérations de différenciation),
- retarder la différenciation des produits dans la ligne de production,
- réduire le délai de production de chaque produit.

Il a été constaté que la réduction du nombre total d'opérations différentes d'assemblage a une forte relation avec la construction des « P.D.R ».

Les études de cette partie se sont appliquées à répondre aux questions de départ par rapport à la problématique d'ordonnement de la séquence d'assemblage : comment choisir l'ordre d'assemblage optimal ? Quelle méthode d'optimisation peut-on appliquer ?

### 4.4 Conclusion

Dans la résolution du problème de réorganisation de la séquence, il a été constaté que la réorganisation du processus permet de réduire le nombre total d'opérations différentes d'assemblage. La réduction du nombre total d'opérations différentes d'assemblage permet d'augmenter la possibilité de différencier plus tard, dans la chaîne de production, un produit par rapport à un autre. En outre, il a été constaté que la réduction du nombre total d'opérations différentes d'assemblage permet d'augmenter la possibilité de construire des « plateformes de différenciation retardée » et de maximiser le nombre de produits où celles-ci seront utilisées.

Dans la résolution du problème de la redéfinition des versions des composants d'un ensemble de produits, il a été constaté que la compatibilité des différentes versions de composants permet d'optimiser le choix des versions de composants sur l'ensemble des produits. En outre, la compatibilité des versions de composants permet aussi de réduire le nombre total d'opérations différentes d'assemblage. La réduction du nombre total d'opérations différentes permet de construire des « plateformes de différenciation retardée ». En outre, il a été constaté que la réduction du nombre total d'opérations différentes d'assemblage, la réutilisation de versions de composants, la réduction des coûts, et la possibilité d'employer des plateformes de différenciation retardée peuvent se faire au détriment de la satisfaction des clients, et vice versa. C'est à dire que la satisfaction des clients peut impliquer l'utilisation d'un nombre important d'opérations différentes d'assemblage et de versions différentes de composants, ainsi que l'augmentation des coûts et l'utilisation d'une quantité faible de plateformes de différenciation retardée.

On peut déduire comme conclusion de ce chapitre qu'une idée intéressante est l'intégration des deux méthodes. La méthode de standardisation (de la partie 4.2) permet, à partir d'une séquence d'assemblage, de déterminer les versions de composants pour chaque produit. La méthode d'ordonnement de la séquence d'assemblage (partie 4.3) permet, à partir du choix de versions de composants pour chaque produit, de déterminer la séquence d'assemblage. Lorsque les résultats d'une méthode sont des données nécessaires à l'autre on peut donc confirmer que les deux méthodes peuvent être complémentaires, voir Figure 4-47.

L'intégration des deux méthodes et l'optimisation sur plusieurs itérations (l'une après l'autre) peuvent permettre d'obtenir de bons résultats. Le choix d'une séquence d'assemblage optimale permet le choix d'un set de versions de composants optimaux pour l'ensemble de produits. Un nouveau set de versions de composants optimaux permet de redéfinir une nouvelle séquence encore meilleure, et ainsi de suite. Ce cycle peut être répété en continu jusqu'à arriver à une convergence ou solution optimale. Ce processus itératif peut donc améliorer en théorie la construction d'une plateforme de différenciation retardée après plusieurs interactions.

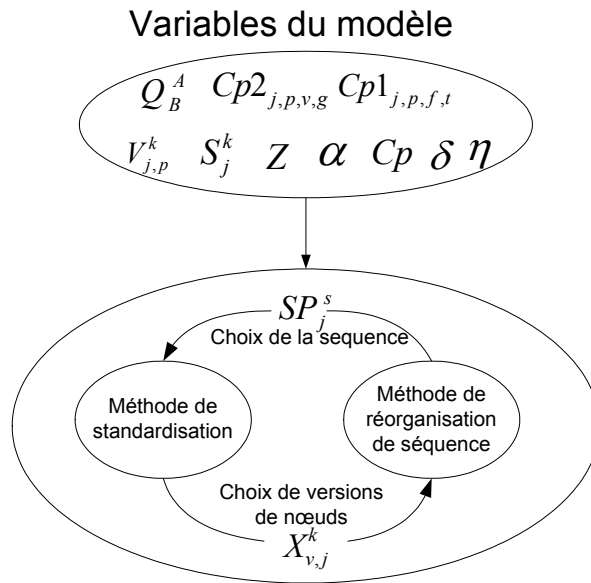


Figure 4-47. Intégration des méthodes d'optimisation

Pour conclure ces études une analyse de cette intégration a été faite. L'analyse suivante, montre le test d'un seul cycle ou itération. Le test est effectué sur l'exemple du « Moteur électrique à courant continu ». Les versions initiales de  $X_{v,j}^k$  sont celles de la Figure 4-48. Chaque type de composant correspond aux composants réels du Tableau 4-3.

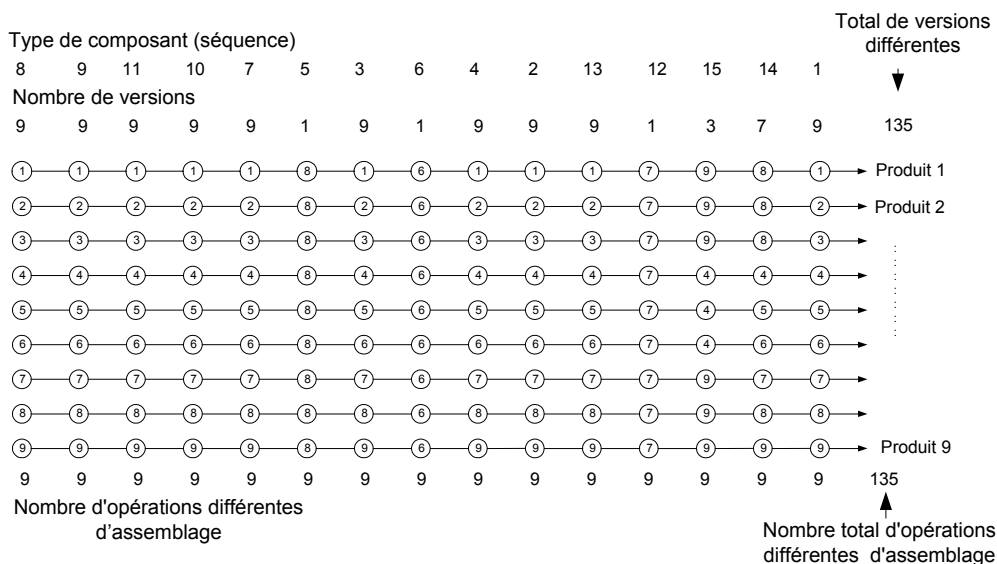


Figure 4-48. PSG de l'état initial de l'architecture de la famille de produits

Composant	Moteur électrique DC	Armature	Ventilateur	Interrupteur	Champ	Structure	Espace d'air	Tôles de l'armature	Câble de bobinage de l'armature	Arbre	Collecteurs	Tôles du champ	Câble de bobinage du champ	Pôles	Terminaux
Type de composant :	1	2	12	14	7	15	13	3	4	5	6	8	9	10	11

Tableau 4-3. Références

*Résultats :*

Comme méthode de standardisation l'algorithme en recuit simulé a été utilisé. Pour la réorganisation de la séquence l'algorithme « génétique » a été utilisé.

Les données du test sont :  $\alpha=1$ ,  $\delta=0$ , et  $\eta=0$ , CP=15, Z=9. Les données par rapport à  $V_{j,p}^k$  sont celles de l'annexe C, mais en considérant la nouvelle configuration initiale (Figure 4-48). Les données de  $S_j^k$  sont celles de l'annexe D (aussi par rapport à la configuration initiale de la Figure 4-48). Par rapport à  $Cp1_{j,p,f,t}$  l'annexe B est utilisée, cependant les interfaces des composants 5, 6, 12, 15, 14 ont été éliminées. La variable CT est calculée avec  $V_{j,p}^k$  et  $Cp1_{j,p,f,t}$ . Les données de  $Q_B^A$  sont exposées dans la Figure 4-49.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
12	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1
13	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
14	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1
15	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0

Figure 4-49. Données de restriction de précedence  $Q_B^A$

Les résultats d'une seule itération sont montrés dans la Figure 4-50. Ces résultats correspondent à 3.6 heures de calcul de l'algorithme « génétique » et 3 heures pour l'algorithme en « recuit simulé ».

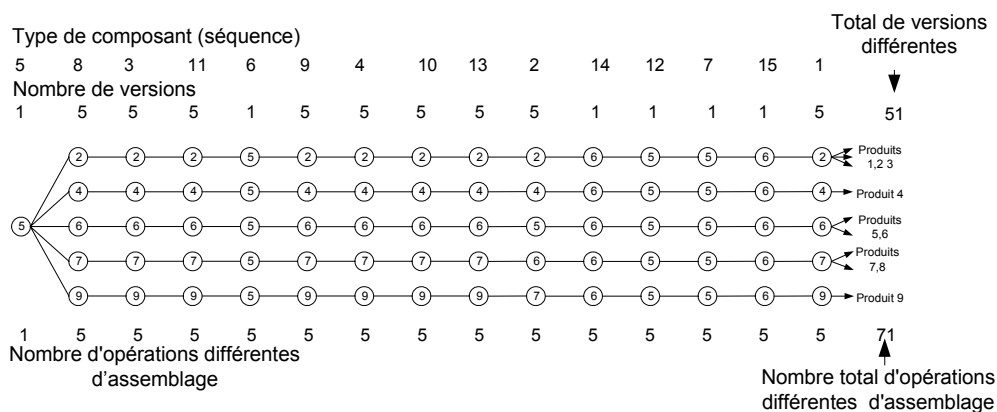


Figure 4-50. Résultats de l'intégration des algorithmes.

L'intégration des deux algorithmes permet de réduire le nombre de versions de composants nécessaires pour la famille de produits. A partir du choix des versions de composants, l'algorithme génétique fait le choix de l'ordre de la séquence. On peut observer qu'il existe une plateforme de différenciation retardée, le composant de type « 5 », pour l'ensemble des produits. Il existe aussi une sous plateforme pour les produits {1, 2, 3}, celle-ci est composée

de 14 composants. Cette sous plateforme est un produit complet (de 14 composants). Aussi, on peut composer une sous plateforme de 14 composants pour les produits {5,6}, une autre pour les produits {7,8}. Quelques résultats après l'application de chaque algorithme sont montrés dans le Tableau 4-4.

	Donnes initiales	Algorithme en "Recuit Simulé"	Algorithme "Génétique"
Nombre de composants incompatibles, expression (3.2.9)	x	9	x
Variance des besoins techniques, expression (3.2.10)	x	0.3466	x
Coût de la famille expression (3.2.11)	x	45.74	x
No. d'opérations de différenciation	135	75	71
Nombre de composants différents	95	51	51
Nombre de violations restriction (3.3.8)	x	x	0
Nombre de violations restriction (3.3.9)	x	x	0
Nombre de violations restriction (3.3.10)	x	x	0

Tableau 4-4. Résultats de l'intégration des méthodes

Cette intégration, et ces méthodes représentent un premier effort dans la conception de produits à partir de plateformes de différenciation retardée. D'autres études peuvent s'intéresser à l'amélioration de l'intégration de ces deux méthodes.

# Conclusions et perspectives

## Conclusions

Le travail présenté dans cette thèse a montré la mise en place de deux techniques pour la construction optimale de plateformes de différenciation retardée, celles-ci aident à obtenir une diversité définie de produits avec les différents avantages.

Cette thèse a commencé par l'exposition des problèmes qu'implique le développement d'une diversité de produits (dans le Chapitre 1) et on s'est intéressé au concept de « Mass Customization » comme stratégie pour développer une forte variété de produits avec une forte demande.

Une stratégie en relation avec la « Mass Customization » est la modularisation de produits. Le Chapitre 2 a présenté les principaux aspects et implications de la conception de produits modulaires. Le chapitre a aussi proposé une revue bibliographique et une classification de quelques méthodes et travaux.

Une plateforme est utilisée dans une configuration modulaire « bus ». Un axe de recherche récemment abordé dans cette littérature est donc le concept « plateforme ». Le Chapitre 3 a présenté les principaux aspects de cette dernière stratégie. Une revue bibliographique a été présentée. L'analyse bibliographique a permis de déterminer deux objectifs de recherche par rapport à ce concept : un premier par rapport à la standardisation (ou réduction) de composants différents entre produits, et un deuxième sur la réorganisation de la séquence de production. Dans le Chapitre 4, une méthode pour chaque objectif de recherche a été proposée. La partie 4.2, a montré la première méthode, qui comporte la formalisation d'un problème mathématique d'optimisation et deux algorithmes pour résoudre ce problème. Les algorithmes permettent la sélection des composants communs et la construction de plateformes de différenciation retardée par rapport à trois critères : le respect des caractéristiques nécessaires des produits, la réduction du coût et la réduction du délai d'assemblage (nombre d'opérations différentes). Ces algorithmes ont permis, d'une part de vérifier l'hypothèse présentée et d'autre part de présenter certains tests. La partie 4.3 a montré la deuxième méthode, qui comporte la formalisation d'un problème mathématique d'optimisation et deux algorithmes pour résoudre ce problème. Les algorithmes permettent le choix de l'ordre d'assemblage de façon optimale et la construction de plateformes de différenciation retardée par rapport à un critère : la réduction du délai d'assemblage (évalué par le nombre total d'opérations différentes d'assemblage). Ces algorithmes ont permis de réaliser certains tests.

En conclusion les travaux de cette thèse ont proposé deux méthodes avec une approche qui n'avait pas été prise en compte dans la littérature (à notre connaissance).

A l'exception de certains travaux, presque aucun travail ne s'était focalisé sur la construction explicite d'une plateforme de différenciation retardée qui prenne en compte le fait de retarder le point de différenciation, en fonction des deux axes de recherche présentés auparavant.

### Perspectives

Les travaux présentés dans cette thèse peuvent donner lieu à plusieurs suites. D'autres travaux peuvent se focaliser sur d'autres types de configuration modulaire, par exemple : « Cut-To-Fit », « Component sharing », « Component Swapping », etc.

Une étude à suivre peut s'orienter vers le développement d'autres algorithmes qui pourraient permettre d'obtenir meilleurs résultats, et de le faire plus rapidement, par rapport aux exemples d'optimisation présentés dans cette thèse.

Une autre étude à suivre peut se centrer sur la validation des méthodes présentées sur autres problèmes industriels.

### Perspectives sur la problématique de standardisation de composants

#### **Prise en compte d'autres critères du cycle de vie du produit :**

De futurs travaux de recherche pourraient être focalisés sur d'autres critères du cycle de vie du produit par rapport à cet axe de recherche. Voici quelques exemples :

Un critère possible peut être l'évaluation du « coût de stockage » contre « le temps de set-up des opérations de production ». L'utilisation de plateformes de différenciation retardée est liée à la quantité d'opérations différentes, et donc, à un certain nombre de set-ups. Aussi, l'utilisation de plateformes de différenciation retardée implique un stockage et un coût de stockage (et un coût d'investissement immobilisé). L'utilisation de plateformes de différenciation retardée augmente donc le coût de stockage et réduit le nombre de set-ups. Dans le cadre du choix de versions de composants pour la construction de plateforme de différenciation retardée, une méthode d'optimisation peut évaluer dans ce sens si la réduction du temps dédié aux « Set up » est justifiée par l'augmentation du coût du stockage ou vice versa. Les variables possibles à considérer seraient donc le coût de stockage et temps de set up des opérations de production de chaque version de composant.

Une autre analyse pourra prendre en compte d'autres critères comme par exemple «le délai de production ou temps d'assemblage » versus « le coût de stockage » par rapport à chaque version de composant. Une méthode d'optimisation peut évaluer dans ce sens si l'augmentation du « délai de production » est justifiée par la réduction du coût du stockage (en avance) ou vice versa.

Une autre analyse pourra prendre en compte ces deux autres critères « coûts de substitution » contre « les économies de substitution ». La substitution de chaque type de composant implique un coût fixe (coûts de mise au point de la conception, coûts de tests etc.). Aussi, la substitution de composants permet, dans certains cas, d'avoir des économies importantes, notamment quand la substitution de composants est faite sur des produits avec une forte demande ayant des composants chers, (aspect connu comme économies de substitution). Dans un tel cas, une étude permettra d'évaluer si changer la conception d'un produit (coûts de substitution) pour utiliser des plateformes de différenciation retardée est justifié par les économies de substitution.

Une autre analyse pourra prendre en compte ces deux autres critères : « économies d'échelle » et « demande de chaque produit ». Si on considère que la demande des composants (et produits) joue un rôle important dans la définition de leur coût unitaire, alors un aspect



important est donc la détermination des économies d'échelle (voir glossaire). Une des équations qui peut représenter la tendance du coût unitaire de chaque composant en fonction de la demande (quantité utilisé du composant) peut être :

$$A^j = \alpha + \beta * e^{(-Q_j / \sigma_j)}$$

Où :

$A^j$  = Index du coût unitaire du composant « j », voir Figure 4-51.

$Q_j$  = Demande du composant « j ».

$\alpha$  = Index relatif au coût variable du composant. (Cela peut être le pourcentage du coût variable par rapport au coût total du composant « j »).

$\beta$  = Index relatif au coût fixe du composant. Cela peut être le pourcentage du coût fixe par rapport au coût total du composant « j »

$\sigma_j$  = Index du niveau de complexité du composant « j ».

Normalement, le prix obtenu (par quantité) du fournisseur est en fonction de la complexité de la conception d'un composant. Par exemple la complexité et le coût d'une ou plusieurs copies d'un logiciel est presque nul pour un fournisseur de logiciels. Cependant, la complexité et le coût d'une ou plusieurs copies d'un satellite peut être aussi coûteuse que la première version. La complexité joue donc un rôle important dans la définition du prix unitaire d'un composant. Mikkola (1999) expose dans se sens une méthode pour calculer un indicateur ou coefficient du niveau de complexité d'un composant.

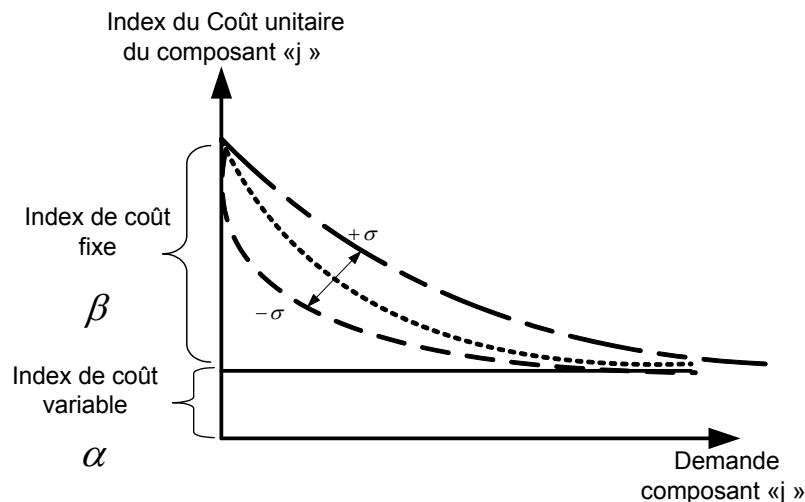


Figure 4-51. Coût d'un composant en fonction de la demande

Une entreprise réalise des économies d'échelle lorsqu'elle réduit ses coûts unitaires en produisant plus. Il faut pour cela qu'elle puisse répartir ses coûts fixes sur une production (ou demande) plus importante, c'est-à-dire qu'elle puisse réduire ses coûts fixes unitaires. La question dans cette analyse serait : la substitution de versions de composants dans chaque

produit pour construire des plateformes de différenciation retardée permet-elle des économies d'échelle et d'augmenter la demande des versions communes ? La demande de tels produits est-elle assez importante pour permettre des économies d'échelle ? Un modèle mathématique pour la construction de plateformes de différenciation retardée qui prend en compte les économies d'échelle par rapport à la demande de chaque composant pourrait donc être possible.

### **Choix de versions de composants inexistantes :**

Le modèle mathématique présenté dans cette thèse choisit une version, parmi un ensemble de versions de composants existants, pour chaque produit. L'identité de chaque version de chaque composant est définie par les valeurs de leurs interfaces. Une méthode pourrait se focaliser sur l'évaluation des valeurs des interfaces comprises dans des « rangs valides ». Une telle méthode pourra permettre d'évaluer et de choisir de versions possibles de composants inexistantes. Le coût des différents types de composants pourra être lié à la valeur des interfaces (continue) de façon à ce qu'une méthode d'optimisation puisse choisir des versions optimales pour construire des plateformes de différenciation retardée. Par exemple, le coût d'un composant est défini parfois en fonction de son « volume ». Cependant, la résolution d'une telle problématique pourrait être complexe, car un algorithme d'optimisation doit évaluer dans ce sens un grand nombre de configurations possibles de versions de composants.

### Perspectives sur la réorganisation de la séquence de production

Nous avons évoqué le « nombre d'opérations d'assemblage différentes » comme un critère d'optimisation pour réorganiser la séquence d'assemblage et trouver des plateformes de différenciation retardée. Une autre formulation mathématique peut employer d'autres critères. Un autre critère d'optimisation peut être le « nombre de composants » dans les plateformes de différenciation retardée. Dans ce sens, le lecteur peut se servir des travaux focalisés sur des index d'efficacité de construction de modules, voir par exemple la littérature de la partie 2.7.2.3.

Un autre critère peut être le temps réel du délai de production. Les différentes opérations de production ont un délai différent, donc une autre approche pourrait être le choix de la séquence optimale pour construire des plateformes de différenciation retardée en fonction de la réduction réelle du délai de production.

Un autre critère peut prendre en compte le nombre et le temps dédiés aux opérations de « set up ». Chaque opération de production différente du système peut comporter un temps de reconfiguration ou de préparation. Le nombre de ces opérations de « set up » est fonction du nombre d'opérations différentes du système. Une autre approche pourrait permettre le choix de la séquence optimale pour construire des plateformes de différenciation retardée en fonction de la réduction du temps dédié aux opérations de « set up ».

-Fin-

# Bibliographie

## A

- Abernathy, W.J. and Utterback, J.M., "Patterns of Industrial Innovation" in Thushman, M.L. and Moore, W.L. (Eds.). Ballinger Publishing Company, (1988), 25-36. (Reading in the Management of Innovation).
- Agard B., "Contribution à une méthodologie de conception de produits à forte diversité" thèse de doctorat du INPG, Grenoble, France, (2002).

## B

- Baldwin C.Y and Clark K.B., "Managing in an age of modularity", Harvard Business Review, (1997), 75(5): 84-93.
- Baldwin C. Y. and Clark Kim B., "Design Rules. Volume 1: The Power of Modularity". Cambridge, Massachusetts, MIT Press, (2000).
- Boe W. and Cheng C. H., "A close neighbour algorithm for design cellular manufacturing systems". IJPR, (1991), 29(10):2097-2116.
- Bongulielmi L., Henseler P., Puls Ch. and Meier M., "The K-and V-Matrix method - An approach in analysis and description of variant products". International Conference on engineering design ICED 01 Glasgow, U.K., August 21-23 (2001): 8 p.
- Bremmer R., "Cutting Edge Platforms", Financial Times Automotive World, (1999), September: 30-38.
- Burbidge J.L., "The simplification of material flow systems". International Journal of Production Research, (1982), vol. 20: 339-359.

## C

- Carrie A. S., "Numerical taxonomy applied to group technology and plant layout". IJPR, (1973), 11(4): 399-416.
- Chakrabarti A., "Sharing in design - categories, importance, and issues". International Conference on Engineering Design ICED 01, Glasgow, U.K. August 21-23, (2001): 8 p.
- Chambolle F., "Un modèle produit piloté par les processus d'élaboration. Application au secteur automobile dans l'environnement STEP". thèse de doctorat du Laboratoire «Productique Logistique», École Centrale Paris, France, (1999).
- Chandrasekharan M. P. and Rajagopalan R., "Modroc: an extension of rank order clustering for group technology". Int. J. Prod. Res., (1986), vol. 24, no. 5: 1221-1233.
- Chu C. H and Hayya J. C., "A fuzzy clustering approach to manufacturing cell formation". Int. J. Prod. Res., (1991), 29(7): 1975-1487.
- Ciavaldini B. and Loubet J.L., " La diversité dans l'industrie automobile française: Hésitations et enjeux". Gérer et comprendre, décembre (1995), (41):4-19,.
- Corbett J., Dooner M., Meleka J., and Pym C., "Design for Manufacturing: Strategies, Principles, and Techniques". New York: Addison Wesley, (1991).

## D

- Da cunha C., « Définition et gestion de produits semi-finis pour une production de type assemblage à la commande » thèse de doctorat du INPG, Grenoble, France, (2004).
- Dahmus B. J., Gonzalez-Zugasti J. P. and Otto K. N., "Modular Product Architecture". Design Studies , (2000), 22(5): 409-424.
- David H., Kusiak A., Tseng T., " Delayed Product Differentiation: A Design and Manufacturing Perspective". Computer-Aided Design. (1998), 30, 2: 105-113.

## Références bibliographiques

---

Desai, Preyas, Sunder K., Suresh R. and Kannan S., "Product Differentiation and Commonality in Design: Balancing Revenues and Cost Drivers." *Management Science*, (2001), 47(1): 37-51.

Dieser S., Système d'enseignement [base de données de applets java en ligne]. Augsburg, (Allemagne) : [1999- ]. [réf. du 12 août 2005]. Format World Wide Web. Disponible sur : [http://www.walterfendt.de/ph11f/electricmotor\\_f.htm](http://www.walterfendt.de/ph11f/electricmotor_f.htm)

Dobrescu G. and Reich. Y., "Design of a Gradual Modular Platform and Variants for a Layout Product Family". International Conference on Engineering Design. ICED 01 GLASGOW, August 21-23 (2001), 8 p.

## E

Elgård P. and Miller T.D., "Defining Modules, Modularity and Modularization", Design for Integration in Manufacturing. Proceedings of the 13th IPS Research Seminar, Aalborg University, Denmark, (1998), 19 p.

Erens F. and Verhulst K., "Architectures for product families". *Computers in Industry*, (1997), 33 (2-3): 165-178.

Erixon G., "Modular Function Deployment - A method for product modularization". Thèse de doctorat du The Royal Institute of Technology, Dept. Of Manufacturing Systems, Stockholm, Suede, (1998).

Ernst R. and Kamrad B., "Evaluation of supply chain structures through modularization and postponement", *European Journal of Operational Research*, (2000), 124: 495-510.

Eshelman L., "The CHC Adaptive Search Algorithm. Foundations of Genetic Algorithms" G.J.E. Rawlins, Ed., *Foundations of Genetic Algorithms*, (Morgan Kaufmann publishers), (1991): 265-283.

Evans R. and Castek, D., "Customer support logistics – The key to customer satisfaction," in Gattorna (Ed.), *Strategic Supply Chain Alignment : Best practice in supply chain management*. Gower Publishing Limited, (1998), Chapter 4: 60-76.

Evans, D., "Modular Design – A special case in nonlinear programming", *Operations Research*, (1963), Volume 11, July-August: 637 – 647.

## F

Fellini R., Papalambros P., Weber T., "Application of a product platform design process to automotive powertrains". 8th, AIAA/USA/NASA/ISSMO. Symposium on Multidisciplinary Analysis And Optimization. Long Beach, CA. U.S.A, 6-8 Sept. (2000), 9 p.

Fine C.H., "Clockspeed – Winning Industry Control in the Age of Temporary Advantage", Reading, MA: Perseus Books, (1998).

Fixson S.K., "Three Perspectives on Modularity a literature Review of a Product Concept For Assembled Hardware Products". [en ligne] Massachusetts Institute of Technology Engineering Systems Division, Working Paper Series ESD-WP-2001-06, (2001), [réf du 13 Août 2005] 49p. Disponible sur : <http://esd.mit.edu/WPS/esd-wp-2001-06.pdf>

Fodor Jerry, « La modularité de l'esprit », Editions de Minuit, (1986), 148 p.

Ford M., "Design for Assembly: Ford's Better Idea to Improve Products", *Manufacturing Systems*, March (1988), 6(3): 22-24.

Fujita K., Sakaguchi H. and Akagi S., "Product Variety Deployment and its Optimization under Modular Architecture and Module Commonalization." 1999 ASME Design Engineering Technical Conferences, DFM-8923, Las Vegas, Nevada. (1999): 337-348.

Fujita K., "Product variety optimization under modular architecture", *Computer-Aided Design* October. (2002), Volume 34, Number 12: 953-965

## G

Galsworth G.D., "Smart, Simple Design". Essex Junction, Vermont, Oliver, (1994).

Garg A. and Tang C.S. "On postponement strategies for product families with multiple points of differentiation". *IIE Transactions* (1997). Vol. 29: 641-650.

- Garud R. and Kumaraswamy A., "Technological and Organizational Designs for Realizing Economies of Substitution." *Strategic Management Journal*, (1995), 16 (Summer): 93-109.
- Goldenberg J., "The Modular Design Problem with Linear Separable Side Constraints: Heuristics and Applications", Thèse de doctorat de "The University of Michigan", U.S.A, (1984).
- Gonzalez Z.J.P., Otto K., Baker J., "A method for Architecting Product Platforms" *Research in Engineering Design* (2000),12: 61-72.
- Gonzalez Z.J.P., "Models for Platform-Based Product Family Design", Thèse de doctorat du "Massachusetts Institute of Technology", (2000).

## H

- Hadj Hamou K., "Contribution à la conception de produits à forte diversité et de leur chaîne logistique : une approche par contraintes". Thèse de doctorat de Institut National Polytechnique de Toulouse, (2002).
- Hall P., "Innovation, Economics & Evolutions: Theoretical Perspectives on Changing Technology in Economics Systems". New York ; London : Harvester Wheatsheaf, (1994).
- Hata T. and Kimura F., "Design of product modularity for life cycle management". [en ligne] University of Tokio. Department of precision Engineering. (2001) [réf. du 13 Août 2005], 4 p, Disponible sur : [http://www.cim.pe.u-tokyo.ac.jp/lc/pub/2001/hata\\_ecodesign2001.pdf](http://www.cim.pe.u-tokyo.ac.jp/lc/pub/2001/hata_ecodesign2001.pdf)
- Henderson R.M. and Clark K.B., "Architectural Innovation : the reconfiguration of existing product technologies and the failure of established firms", *Administrative Science Quarterly*, (1990) 35: 9-30.
- Huang C.C, Kusiak A., "Synthesis of modular mechatronic products: a testability perspective", *IEEE/ASME Translation on Mechanotronics*, (1999) Vol. 4, No. 2 : 119-132
- Huang C.C., Kusiak A., "Modularity in Design of Products and Systems", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, (1998), Vol. 28, No. 1: 66-77.

## J

- Jianxin J. and Tseng M., "A methodology of developing product family architecture for mass customization". *Journal Of Intelligent Manufacturing*, (1999), 10: 3-20.
- Joines J., Culberth C. T., "Manufacturing cell Design: An Integer Programming Model Employing Genetic Algorithms". [en ligne] Department of Industrial Engineering North Carolina State University. 27695-7906. (1996) [réf. du 13 Août 2005], 32 p, Disponible sur : [http://citeseer.ist.psu.edu/cache/papers/cs/649/http://zSzzSzwww.fmmcenter.ncsu.edu/zSzfacz\\_staffzSzjoineszSzpaperszSz.zSzpaperszSziietran.pdf/joines96manufacturing.pdf](http://citeseer.ist.psu.edu/cache/papers/cs/649/http://zSzzSzwww.fmmcenter.ncsu.edu/zSzfacz_staffzSzjoineszSzpaperszSz.zSzpaperszSziietran.pdf/joines96manufacturing.pdf)
- José A., Tollenaere M. "Modular and Platform methods for product family design: Literature analysis." *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2005(C), 16(3): 373-392.
- José A., Tollenaere M., "Optimization of platforms for product family development", *IMACS World Congress*, Paris, France, 2005(A), 8p.
- José A., Tollenaere M., "Platform design for product family development". 6e Congrès international de génie industriel, Besançon, France, 2005(B), 9p.
- José A., Tollenaere M., "Using modules and platforms for product family development: design and organizational implications" *IDMME Congress proceedings*, Bath U.K, (2004), 12 p.

## K

- Kameyama K. K., "Real-time constraint checking in the design process," in *Concurrent Engineering: Automation, Tools and Techniques*, A. Kusiak, Ed. New York: Wiley, (1993), p. 117.
- Kidd S., "A Systematic Method for valuing a product platform strategy". Thèse de doctorat du MIT: Center for innovation in product development, (1998).
- King J.R. " Machine-component grouping in production flow analysis: An approach using a rank order clustering algorithm". *IJPR*, (1980), 18(2):213-232.

## Références bibliographiques

---

- King J.R. and Nakornchai V., "Machine-component group formation in group technology: Review and extension". *IJPR*, (1982), 20(2):117-133.
- Krishnan V., Gupta S., "Appropriateness and Impact of Platform- Based Product Development". *Management Science.* , January (2001) Vol 47, No. 1: 52-68
- Kumar C. S., Chandraskharan M. P., "Group efficacy : A quantitative criterion of goodness of block diagonal forms of binary matrices in group technologie". *International Journal of Production Research*, (1990), 28 : 233-244.
- Kusiak A., "Engineering Design: Products, Processes, and Systems". First edition, San Diego, CA: Academic Press. (1999), 427p.
- Kusiak A., "The generalized group technology concept". *IJPR*, (1987) 25(4):561-569.
- Kusiak A., "A knowledge based system for group technology". *IJPR*, (1998), 26: 887-905.
- Kusiak A., and Huang Chun-Che., "Design of Modular Digital Circuits for Testability" *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology Part C*, (1997), Vol. 20, NO. 1 January: 10 p.
- Kusiak A., Larson N., "Decomposition and Representation Methods in Mechanical Design". *Transactions of the ASME, Special 50th Anniversary Design Issue*, (1995), 117(June) : 17-24.
- Kusiak A., Wang J., He D.W., and Feng C.X., "A Structured Approach for Analysis of Design Processes", by A. , *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology - Part A*, (1995), 18(3): 664-673.

## L

- Lampel J. and Mintzberg H., "Customizing Customization", *Sloan Management Review*, (1996), Fall, Vol. 38, No. 1: 21-30.
- Langlois R. N., Robertson P.L., "Networks and innovation in a modular system: Lessons from the microcomputer and stereo component industries", *Research Policy*, (1992), 21,(4): 297-313.
- Le Petit Larousse Paris : ed. Larousse, 2004.
- Lee H., Tang C. S., "Modeling the costs and benefits of Delayed Product Differentiation ". *Management Science*. (1997), Vol. 43, No.1, January: 40-53.
- Lee, H., "Posponement for mass customization: Satisfying customer demands for taylor-made products" Gattorna , J. (ed.), Gower Publishing Limited, (in *Strategy Supply Chain Alignment : Best practice in supply chain management*), (1998), Chapter 5, 77-91.

## M

- Martin M, Ishii K., "Design for variety: a methodology for understanding the costs of product proliferation". Irvine, New York, USA: Design Engineering Technical Conference, ASME, 96DETC /DTM-1610 (1996), 9 p.
- Martin M.V., "Design for variety: a methodology for developing product platform architectures". thèse de doctorat : "Mechanical Engineering, Stanford University", Palo Alto Cal. U.S.A, (1999).
- Martin Mark V, and Ishii Kosuke. "Design for variety: developing standardized and modularized product platform architectures", *Res. Eng. Design* (2002) 13: 213-235
- Martin, M., and Ishii, K., "Design for Variety: Development of Complexity Indices and Design Charts" *Proceedings of the ASME, DETC97 / DFM-4359*, (1997), 9p.
- McAuley J., "Machine grouping for efficient production". *Production Engineer*, (1972), 51(2), 53-57.
- McCormick W. T. , Schweitzer Jr. P. J., and White T. W., "Problem decomposition and data reorganization by cluster technique". *Operations Research*, (1972), 20 (5): 993-1009.
- Messac A., Martinez M. P., and Simpson T. W., "Introduction of a Product Family Penalty Function Using Physical Programming," Long Beach, CA, 8th AIAA/NASA/USAF/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, September 6-8 (2000), 15 p.

Meyer M. H., Lehnerd A.P., "The Power of Product Platforms, Building Value and Cost Leadership," New York, N.Y. The free press. (1997), 267 p.

Mikkola J. H., "Modularization in New Product Development: A Mathematical Modeling Approach". [en ligne] Rebild, Denmark: DRUID Summer Conference on National Innovation Systems, Industrial Dynamics and Innovation Policy, June 9-12 (1999b), [réf du 13 Août 2005], 25 p. Disponible sur : <http://www.druid.dk/conf-papers/conf-papers-attach/hsuan.pdf#search='Modularization%20in%20New%20Product%20Development:%20A%20Mathematical%20'>

Mikkola J. H., "Product Architecture Design: Implications for Modularization and Interface Management" [en ligne] (2000), [réf du 13 Août 2005], 27 p. Disponible sur : <http://ep.lib.cbs.dk/download/ISBN/x648099139.pdf>

Mikkola J., "Modularization in New Product Development: Implications for Product Architectures, Supply Chain Management, and Industry Structures", " thèse de doctorat du « School of Technologies of Managing, Copenhagen Business School », Denmark, (2003).

Mikkola, J. H., "Modularization in Black-Box Design: Implications for Supplier-Buyer Partnerships" [en ligne]. Holte, Denmark: DRUID Winter Conference January 7-9, (1999), [réf du 13 Août 2005], 24 p. Disponible sur : <http://www.druid.dk/conferences/winter1999/conf-papers/hsuan.pdf>

## N

Nayak R.U., Chen W., Simpson T. W., "A Variation - Based Methodology - Based Method for Product Family Design" Proceedings of DETC'00 ASME, Design Engineering Technical Conferences Baltimore, Maryland, DETC00/DAC-14264, September 10-13, (2000), 10 p.

Nelson S., Parkinson M. and Papalambros P., "Multicriteria Optimization in Product Platform Design." Las Vegas, Nevada. ASME Design Engineering Technical Conferences, DETC99/DAC-8676. (1999), 8 p.

Nevins J. L. and Whitney D. E., "Concurrent Design of Products & Processes: A Strategy for the Next Generation in Manufacturing". New York: McGraw-Hill. (1989).

Newcomb, P.J., Bert Bras and David W. Rosen, "Implications of Modularity on Product Design for the Life Cycle." Journal of Mechanical Design, (1998), 120(3): 483-491.

## O

O'Grady P., "The Age of Modularity - Using the new world of modular products to revolutionize your corporation", Adams and Steele Publishing, (1999).

Östgren B., "Modularisation or the Product gives Effects in the Entire Production", thèse de doctorat du "Dept. of manufacturing Systems: The Royal Institute of Technology" Stockholm, Suede, (1994).

Otto K. and Gonzalez Z.J.P., "Modular Platform-Based Product Family Design". Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference Baltimore, DETC2000/DAC-14238, Maryland, USA, September 10-13, (2000), 11 p.

Otto K. and Sudjianto A., "Modularization To Support Multiple Brand Platforms". Proceedings of DETC: ASME Design Engineering Technical Conferences, DETC2001/DTM-21695, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, September 9-12, (2001), 14 p.

Otto K., "Identifying Product Family Architecture Modularity Using Function and Variety heuristics" [ en ligne] Pré-publication de M.I.T, Center for Innovation in Product Development. (2001). 12 p. [réf du 13 Août 2004] Disponible sur : <http://design.mit.edu/Papers/>

## P

Pahl G. and Beitz W., "Engineering Design, a Systematic Approach", London, Springer-Verlag. (1988).

Parnas D.L., Clements P.C., Weiss D.M., "The modular structure of complex systems", IEEE Transactions on Software Engineering, (1985), 11: 259-266.

Pedersen K., Allen J. K., Mistree F., "Numerical Taxonomy - A Systematic Approach to Identifying potential product platforms", International Conference on Engineering Design. ICED 01, GLASGOW, UK., Vol. 3 August 21-23, (2001), 8 p.

## Références bibliographiques

---

Pine B. Joseph II., "Mass customization: the new frontier in business competition". Boston MA: Harvard business School Press, (1993), 333p.

## R

Robertson D. and Ulrich K., "Platform Product Development", [en ligne] Pré-publication de "The Wharton School-University of Pennsylvania" doit paraître sur "Sloan Management Review", (1998), 32 p, Disponible sur : <http://aure.himolde.no/lo-kurs/lo904/Randall/Robertson%20and%20Ulrich%201999.pdf>. [réf du 12 Août 2005].

## S

Sanchez R., "Modular architecture in marketing process", *Journal of Marketing*, (1999), 63 (Special Issue): 92-111.

Sanchez R. and Mahoney J.X., "Modularity, flexibility, and knowledge management in product and organization design", *Strategic Management Journal*, (1996), 17, Winter Special Issue: 63-76.

Sanchez R., "Strategic flexibility in product competition", *Strategic Management Journal*, (1995), 16: 135- 159.

Sanchez R., "Reinventing strategic management: New theory and practice for competence-based competition", *European Management Journal*, (1997), 15(3), 303-317.

Sanchez R., "Strategic flexibility, firm organization, and managerial work in dynamic markets: A strategic options perspective," *Adv. Strat. Manage.*, (1993), vol. 9: 251–291.

Sanchez R., and Collins R.P., "Competing-and learning-in modular markets," *Long Range Planning*, (2001), Vol. 34 (6): 645-667.

Sanderson S. and Uzumeri M., "Managing product families: The case of the Sony Walkman". *Research Policy*, (1995), 24: 761-782.

Sanderson S., "Cost models for evaluating virtual design strategies in multicycle product families". *Journal of Engineering and Technology Management*, (1991), 8: 339-358.

Schilling M.A, et Steensma H. K., "The use of modular organizational forms: An industry-level analysis", *Academy of Management Journal*, (2001), 44 (6): 1149-1168.

Siddique Z. and Rosen D. W., "Product Platform Design: A Graph Grammar Approach," *Design Theory and Methodology*, ASME, DETC99/DTM-8762, Las Vegas, Nevada: September 12-15, (1999) : 211-222

Simon, H. A., "The Sciences of Artificial" (3th edition). Cambridge, MA, U.S.A. MIT Press, (1996).

Simpson T. W., Chen W., Allen J. K. and Mistree F., "Conceptual Design of a Family of Products Through the Use of the Robust Concept Exploration Method," 6th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. Bellevue, WA, September 4-6, (1996) Vol. 2: 1535-1545.

Simpson T. W., Maier J. R. A. and Mistree, F., "Product Platform Design: Method and Application," *Research in Engineering Design*, (2001), Vol. 13(1): 2-22.

Smith A., "An inquiry into the nature and causes of the wealth of nations". W. Strahan and T. Cadell, London, (1776).

Smith P.G. and Reinertsen D.G., "Developing products in half time", Van Nostrand Reinhold, (1991).

Star M. K., "Modular Production - A New Concept." *Harvard Business Review* (1965) November-December 43: 131-142.

StatSoft, "Base de donnes de concepts de statistique [livre en ligne] OK (USA) : Réseau StatSoft, [1984- ]. [réf. du 12 août 2005]. Format World Wide Web. Disponible sur : <http://www.statsoft.com/textbook/stexdes.html#mixturej>

Stone R.B., Kristin L. Wood and Richard H. Crawford, "A Heuristic Method to Identify Modules from a Functional Description of a Product". *ASME Design Engineering Technical Conferences*, Atlanta, GA: ASME, DETC98/DTM-5642, (1998), 11.

Swaminathan J. M. and Tayur S. R., "Managing Design of Assembly Sequences for Product Lines That Delay Product DSSierentiation". *IIE Transactions*, (1999), 31: 1015-1026



Swaminathan, J.M. and Tayur, S.R., "Managing broader product lines through delayed differentiation using vanilla boxes", *Management Science*, Dec. (1998), Vol. 44, no. 12, 41 p.

### T

Tarondeau J.C., "Stratégie Industrielle" Seconde édition, Collection Gestion Vuibert, (1998).

Taylor, F. W., "Principles of Scientific Management". New York: W.W. Norton & Co., (1967), 144 p.

Thomas L. D., "Commonality analysis using clustering methods", *Operations Research*, (1991), 39(4) : 677-680.

Thomke S.H. and Donald R., "Agile Product Development: Managing Development Flexibility in Uncertain Environments." *California Management Review*; (1998), 41(1): 8-30.

Thyssen J. and Hansen P. K.. (2001) "Impacts for modularization". International Conference on Engineering Design ICED 01, GLASGOW, U.K., August 21-23, (2001), 8 p.

Tollenaere M., "Conception de produits mécaniques méthodes, modèles et outils", Paris : Hermes, (1998), 575 p.

Tseng M. M. and Jianxin J., "Design for Mass Customization." *CIRP Annals* (1996), 45(1): 153-156.

Tushman M. L. and Anderson P., "Technology cycles, innovation streams, and ambidextrous organizations: organizational renewal through innovation streams and strategic change." New York, Oxford University Press. (in Michael L. Tushman and Philip Anderson (eds) *Managing Strategic Innovation and Change: A Collection of Readings*: 3-23). (1997).

### U

Ulrich K. T. and Eppinger S. D., « Product Design and Development », New York.: McGraw-Hill, Inc., 2nd Edition, (2000).

Ulrich K., "The role of product architecture in the manufacturing firm", *Research Policy*, (1995), 24: 419-440.

Ulrich K., and Tung, K., (1991). "Fundamentals of product modularity". In *Issues in Design/Manufacture Integration*. (1991) Vol., 39: 73-79.

Ulrich W. T., and Brandeau M.L., "Optimal Commonality in Component Design" *Operations Research* (2000), 48(1): 1-19.

Utterback J.M., "Mastering the Dynamics of innovation: How Companies Can Seize Opportunities in the face of Technological Change". Harvard Business School Press Boston, M.A, (1994), 253 p.

Uzumeri, M., and Sanderson S., "A Framework for Model and Product Family Competition," *Research Policy*, (1995), 24: 583-607.

### V

Veeramolmal P. and Gupta S. M., "A Combinatorial Cost-Benefit Analysis Methodology for Designing Modular Electronic Products for the Environment", *Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, Danvers, Massachusetts, USA, May 11-13, (1999): 268-273,

Venkat A., Rahul R., "Module-based Multiple Product Design" [en ligne] Sustainable Design Lab. Engineering Management Department University of Missouri, (2002), [réf. du 13 Août 2005], 6 p. Disponible sur : <http://citeseer.ist.psu.edu/cs>

Viriththamulla G., "Mathematical programming models and heuristics for standard modular design problems", thèse de doctorat de "University of Arizona", (1991).

Von Hippel, E., « Task Partitioning: An innovation process variable », *Research Policy*, (1990), 19 : 407-418.

### W

Wheelwright S. C. and Clark, K. B., "Leading Product Development", New York: Free Press, (1995), 176p.

## Références bibliographiques

---

Wikimedia Foundation, Inc. Système d'information [encyclopédie en ligne] Saint Petersburg, Florida, USA, Réseaux Wikimedia, [2003- ]. [réf. du 12 août 2005]. Format World Wide Web. Disponible sur : <http://www.wikipedia.org/>

Wilhelm B., "Platform and Modular Concept at Volkswagen - Their Effects on the Assembly Process". Berlin: Springer, (In Transforming Automobile Assembly), (1997), 146 p.

## Z

Zamirowski E. J. and Otto K. N. "Identifying Product Portfolio Architecture Modularity Using Function and Variety Heuristics," ASME Design Engineering Technical Conferences - Design Theory and Methodology, Paper No. DETC99/DTM-8760, Las Vegas, NV, USA, September 12-15, (1999).

Zamirowski E., "Product family Architecture Modularity Using Function and Variety Heuristics." thèse de doctorat de "Massachusetts Institut of Technology", (1995).

Zinn W., "Should we assemble products before an order is received ?", Business Horizons, March-April, (1990): 70-73.

# Annexes

## A. Analyse technique du fonctionnement du moteur électrique

### Puissance

La puissance (power) d'un moteur est la puissance qui entre moins la puissance qui est perdue :

$$P = P_{in} - P_{losses} \quad \text{Où} \quad P_{in} = VI \quad V = \text{Voltage}, I = \text{Courrant.} \quad [1]$$

La perte de puissance du moteur peut être due à différentes raisons : le chauffage des fils de cuivre (Prd-Cuivre), le contact entre les brosses et l'armature (Prd-Brosses), la friction mécanique du roulement à billes de l'armature (Prd-mécanique), le chauffage de la structure d'acier (Prd-thermique) et d'autres qui ne sont pas considérables.

Il existe seulement des expressions simples pour (PrdBrosses) et (PrdCuivre). Le reste des pertes peut être réduit au minimum sans problème en ajoutant un ventilateur ou avec une configuration mécanique spéciale.

Les équations sont :

$$PrdBrosses = I^2 * (R_a + R_s) \quad \text{et} \quad PrdCuivre = 2 * I$$

$$\text{Alors} \quad P_{losses} = PrdBrosses + PrdCuivre \quad [2]$$

La résistance du fil de l'armature  $R_a$  est en fonction de la géométrie du bobinage, la résistance du cuivre et du nombre de tours. Voir la Figure 4-52.

$$R_a = (\rho * (2 * L + 4 * (R_o - t - l_{gap})) * N_c) / A_{fil} \quad [3]$$

Où

$N_c$  = nombre de tours du câble dans l'armature.

$A_{fil}$  = superficie de coupe transversale du câble du bobinage

$L$  = longueur du paquet de tôles

$R_o$  = rayon du champ

$t$  = épaisseur du champ

$l_{gap}$  = espace vide entre le champ et l'armature.

La résistance du fil du champ  $R_s$  est :

$$R_s = (\rho * p_{champ} * (2 * L + 4 * (R_o - t)) * N_s) / A_{fil} \quad [4]$$

Où

$N_s$  = nombre de tours du câble dans le champ.

$p_{champ}$  = nombre de pôles du champ

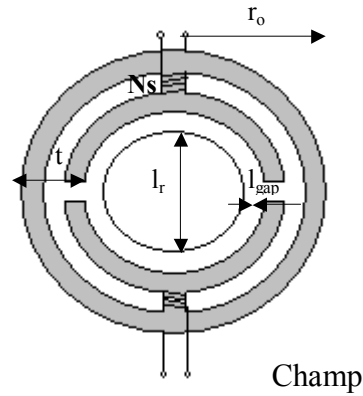


Figure 4-52. Géométrie du bobinage

### Efficacité

L'équation d'efficacité peut être dérivée de l'équation [1] :  $\eta = P/P_{in}$

### Masse

Pour estimer la masse du moteur on calcule la masse de l'armature comme cylindre de largeur « L » rayon  $l_r/2$ . Pour le champ on calcule la masse d'un cylindre de largeur « L » avec un rayon extérieur  $r_o$  et un rayon intérieur  $(r_o - t)$  et on calcule la masse du bobinage :

$$\text{Masse} = M_{\text{champ}} + M_{\text{armature}} + M_{\text{bobinage}} \quad [10]$$

Où

$$M_{\text{champ}} = 3.1416 * (R_o^2 - (R_o - t)^2) * L * \rho_{\text{Acier}} \quad [11]$$

$$M_{\text{armature}} = 3.1416 * (R_o^2 - (R_o - t - l_{\text{gap}})^2) * L * \rho_{\text{Acier}} \quad [12]$$

$$M_{\text{bobinage}} = ((2 * L + 4 * (R_o - t - l_{\text{gap}})) * N_c * A_{wa} + (2 * L + 4 * (R_o - t)) * 2 * N_s * A_{wf}) * \rho_{\text{cuivre}} \quad [13]$$

Avec ces valeurs, l'équation [10] peut être calculée.

### Couple

Le couple d'un moteur universel de courant direct est le produit de « K » coefficient du moteur, du flux magnétique de la bobine «  $\phi$  », et du courant « I » :

$$T = K\phi I \quad [14] \quad \text{Où}$$

$$K = N_c / 3.1416 \quad [15] \quad N_c = \text{tours du câble dans l'armature.}$$

$$\phi = \mathfrak{F} / \mathfrak{R} \quad [16] \quad \mathfrak{F} = \text{force magnétomotrice} \\ \mathfrak{R} = \text{Réductance du circuit.}$$

La force magnétomotrice est :

$$\mathfrak{F} = N_s * I \quad [17] \quad N_s = \text{tours du câble dans le champ.}$$

La réductance du moteur  $\mathfrak{R}$  est l'addition de la réductance du champ, de l'armature et 2 fois la réductance de l'espace vide :

$$\mathfrak{R} = \mathfrak{R}_s + \mathfrak{R}_r + 2\mathfrak{R}_a \quad [18]$$

La réluctance en général est calculée comme la longueur du matériel dévidé par la multiplication de : la perméabilité du matériel  $\mu$  et la superficie de la coupe transversale du matériel A.

La perméabilité du matériel est fonction de  $\mu_0$  fois la perméabilité de l'air. Pour le moteur universel les réluctances sont :

$$\mathfrak{R}_s = l_c / 2\mu_{\text{acier}} \cdot \mu_0 \cdot A_s \quad \mathfrak{R}_r = l_r / 2\mu_{\text{acier}} \cdot \mu_0 \cdot A_r \quad \mathfrak{R}_a = l_g / 2\mu_{\text{acier}} \cdot \mu_0 \cdot A_a \quad [19]$$

Où la distance que parcourt le flux magnétique dans le champ  $l_c$  est :

$$l_c = 3.1416 \cdot (2 \cdot r_o + t) / 2 \quad [20]$$

On suppose que le champ et l'armature sont en acier, la perméabilité magnétique de l'acier est:

$$\begin{array}{ll} \mu_{\text{acier}} = -0.22791 \cdot H^2 + 52.411 \cdot H + 3115.8 & H \leq 220 \\ \mu_{\text{acier}} = 11633.5 - 1486.33 \cdot \ln(H) & 220 < H \leq 1000 \\ \mu_{\text{acier}} = 1000 & H > 1000 \end{array}$$

Pour l'intensité magnétique « H » où:  $H = N_c \cdot I / l_c + l_r + 2 \cdot l_{\text{gap}}$

La perméabilité de l'air  $\mu_0 = 4 \cdot 3.1416 \cdot 10^{-7}$

Sources : Laboratoire LEG Grenoble et Simpson et al (2001), Si le lecteur n'est pas familier avec le fonctionnement du moteur électrique il peut se diriger vers Dieser, (1999).



### C. Valeurs des interfaces des versions de chaque type de composant

Décomposition du système		"p <sup>lème</sup> " Paramètre	Produit 1	Produit 2	Produit 3	Produit 4	Produit 5	Produit 6	Produit 7	Produit 8	Produit 9		
Composant final 1		1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5		
		2	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5		
		3	303,3	304,9	300,2	289,0	288,8	287,0	286,6	285,1	274,9		
		4	3405,7	4266,7	4992,9	4997,0	4966,4	4916,2	4902,7	4886,4	4769,9		
		5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
		6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9		
		7	122,2	124,1	126,5	152,6	173,5	194,9	214,8	235,9	266,8		
		8	2495130,0	2394700,0	2166060,0	1715360,0	1520230,0	1398910,0	1328400,0	1270000,0	1110630,0		
Composant 2	Composant 2	1	3047,0	2437,3	1989,9	1444,7	1161,1	968,8	839,1	732,4	576,4		
		2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
		3	238,7	241,9	249,9	314,5	320,5	327,9	336,1	344,4	346,0		
	Composant 3	Composant 3	4	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	
			1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
			2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
			3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
			4	7850,0	7850,0	7850,0	7850,0	7850,0	7850,0	7850,0	7850,0	7850,0	
			5	62170,0	56438,0	48820,6	33435,9	30489,5	29042,9	28319,4	27727,4	25182,8	
		Composant 4	Composant 4	6	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0
				7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
				8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
				9	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3
				10	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
				1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Composant 5	Composant 5	2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
		3	750,0	760,0	785,0	988,0	1007,0	1030,0	1056,0	1082,0	1087,0		
		4	6,9	6,7	6,9	8,6	9,0	9,4	9,6	9,9	10,4		
		5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
		6	8960,0	8960,0	8960,0	8960,0	8960,0	8960,0	8960,0	8960,0	8960,0		
		7	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3		
		1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
Composant 6	Composant 6	2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
		3	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1		
		4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
Composant 7	Composant 7	5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
		1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
Composant 8	Composant 8	2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
		3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
		4	323460,0	291287,0	281877,0	232691,0	206358,0	198108,0	195082,0	190247,0	169708,0		
		5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
		6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1		
		7	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1		
		8	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0		
		9	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3		
		10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
		Composant 9	Composant 9	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0			0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
3	76,0			89,0	95,0	74,0	73,0	72,0	71,0	70,0	69,0		
4	0,0			0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
5	281,2			332,0	352,5	284,2	293,5	301,7	309,6	317,1	325,0		
6	1,5			1,7	1,7	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2		
7	0,0			0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
8	8960,0			8960,0	8960,0	8960,0	8960,0	8960,0	8960,0	8960,0	8960,0		
9	0,0			0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1		
Composant 10	Composant 10	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
		2	281,2	332,0	352,5	284,2	293,5	301,7	309,6	317,1	325,0		
		3	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0		
Composant 11	Composant 11	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
		2	281,2	332,0	352,5	284,2	293,5	301,7	309,6	317,1	325,0		
Composant 12	Composant 12	3	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0		
		1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
		2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
Composant 13	Composant 13	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
		1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
		2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
Composant 14	Composant 14	3	3,7	3,7	3,7	3,8	4,0	4,2	4,4	4,5	4,7		
		1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
		2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
Composant 15	Composant 15	3	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0		
		4	115,0	115,0	115,0	115,0	115,0	115,0	115,0	115,0	115,0		
		1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
		2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
Composant 15	Composant 15	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
		4	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1		

## D. Coûts des versions de chaque type de composant

Décomposition du produit		Produit 1	Produit 2	Produit 3	Produit 4	Produit 5	Produit 6	Produit 7	Produit 8	Produit 9	Décomposition du coût				
Composant final 1		0,0400	0,0410	0,0420	0,0430	0,0440	0,0450	0,0460	0,0470	0,0480	Indicateur du coût du produit	Coût d'assemblage de sous composants			
	Composant 2	0,0200	0,0210	0,0220	0,0230	0,0240	0,0250	0,0260	0,0270	0,0280				Coût d'assemblage de sous composants	
	Composant 3	0,8837	0,8538	0,9171	1,0043	1,1637	1,3263	1,4522	1,5638	1,8724				Coût de sous composants	
	Composant 4	0,4855	0,4875	0,5128	0,6844	0,7535	0,8206	0,8866	0,9489	1,0291				Coût de sous composants	
	Composant 5	0,3738	0,3927	0,4239	0,5282	0,5608	0,5797	0,5903	0,5996	0,6405				Coût de sous composants	
	Composant 6	0,0400	0,0410	0,0420	0,0430	0,0440	0,0450	0,0460	0,0470	0,0480				Coût de sous composants	
	Composant 7	0,0200	0,0210	0,0220	0,0230	0,0240	0,0250	0,0260	0,0270	0,0280				Coût d'assemblage de sous composants	
	Composant 8	1,3181	1,3011	1,1124	0,8810	1,0668	1,1952	1,2832	1,3880	1,7078				Coût de sous composants	
	Composant 9	0,1584	0,1725	0,1890	0,1855	0,1931	0,2007	0,2067	0,2121	0,2281				Coût de sous composants	
	Composant 10	0,0800	0,0810	0,0820	0,0830	0,0840	0,0850	0,0860	0,0870	0,0880				Coût de sous composants	
	Composant 11	0,0600	0,0610	0,0620	0,0630	0,0640	0,0650	0,0660	0,0670	0,0680				Coût de sous composants	
	Composant 12	0,2150	0,2160	0,2170	0,2180	0,2190	0,2200	0,2210	0,2220	0,2230				Coût de sous composants	
	Composant 13	0,0100	0,0110	0,0120	0,0130	0,0140	0,0150	0,0160	0,0170	0,0180				Coût de sous composants	
	Composant 14	0,4100	0,4110	0,4120	0,4130	0,4140	0,4150	0,4160	0,4170	0,4180				Coût de sous composants	
	Composant 15	0,1278	0,1280	0,1275	0,1281	0,1347	0,1400	0,1440	0,1478	0,1573				Coût de sous composants	



## E. Algorithme en « Branch & Bound »

ENTREES :  $V_{j,p}^k, S_j^k, Cp, Z, \alpha, \delta, \eta, SP_j^s, Cp1_{j,p,f,t}, Cp2_{j,p,v,g}$

SORTIE :  $X_{v,j}^k, XOptimale, FoLocale[v]$  ;

Simplification

$(X_{v,j}^k, V_{j,p}^k, S_j^k, Cp, Z, \alpha, \delta, \eta, SP_j^s, Cp1_{j,p,f,t}, Cp2_{j,p,v,g}) \text{ -----} > (R)$

```
// Initialisation
FO=0 ; A=0 ; B=0 ; , , , , P=0 ;
Pour (v=1 à Z)
  Pour (k=1 à Z)
    FoLocale[v]=0 ;
    Pour (k=1 à Z)
       $X_{v,j}^k=0$  ;
    Fin Pour
  Fin Pour
Fin Pour
Pour (v=1 à Z)
  Pour (at=1 à Z)
    X[at][v][1]=1
    Si (Fonction Objectif (R)>FoLocale[v])
      X[at][v][1]=0
      at=at+1
    Répéter Pour ...
  Fin Si
  Pour (bt=0 à Z)
    X[bt][v][2]=1
    Si (FonctionObj(R)>FoLocale[v] or (Version (X[bt][v][2]) incompatible avec Version (X[at][v][1])))
      X[bt][v][2]=0
      bt=bt+1
    Répéter Pour ...
  Fin Si
  .....
  Pour (pt=0 à Z)
    X[pt][v][15]=1
    Si ((FonctionObj(R)>FoLocale[v]) ou (Version (X[pt][v][15]) est incompatible avec Versions (X[at][v][1]),
      X[bt][v][2], , , , X[ot][v][14] )
      X[pt][v][15]=0
      pt=pt+1
    Répéter Pour ...
  Fin Si
  Autrement
    FoLocale[v]=FonctionObj(R)
    XOptimale=X
  Fin Autrement
  X[pt][v][15]=0
Fin Pour
Si (pt=Z)
  pt=0;
Fin Si
  .....
  .....
  X[bt][v][2]=0
  Fin Pour
  Si (bt=Z)
    bt=0
  Fin Si
  X[at][v][1]=0
  Fin Pour
  Si (at=Z)
    at=0
  Fin Si
  FO=FO+FoLocale[v]
Fin Pour
```

## F. Algorithme en « Recuit Simulé »

ALGORITHME : *Recuit simulé*

ENTREES :  $V_{j,p}^k, S_j^k, Cp, Z, \alpha, \delta, \eta, SP_j^s, Cp1_{j,p,f,t}, Cp2_{j,p,v,g}$

SORTIE :  $X_{v,j}^k, SolTemp[v]$ .

Simplification

$(V_{j,p}^k, S_j^k, Cp, Z, \alpha, \delta, \eta, SP_j^s, Cp1_{j,p,f,t}, Cp2_{j,p,v,g}) \text{ -----} > (R)$

$X_{v,j}^k \text{ -----} > X$

Voisin 1 (X), Voisin 2 (X) ----- > Valeurs proches de la solution actuelle  $X_{v,j}^k$

Max = 40

Pour (v=1 à Z)

  Pour (refroidissement = 0 à Max)

    Pour (Type de composant = 0 à CP)

      Si (Fonction Objectif (Voisin 1 (X),R) <= Fonction Objectif (Voisin 2 (X),R))

        Si (Fonction Objectif (Voisin 1 (X),R) < SolTemp[v])

          SolTemp[v] = Fonction Objectif (Voisin 1 (X))

          X = Voisin 1 (X)

        Fin Si

      Autrement

        Probabilité d'acceptation =  $\exp(-(\text{Fonction Objectif (Voisin 1 (X),R)} - \text{SolTemp[v]})/(\text{Max-Refroidissement}))$

        Si (Random ( ) < Probabilité d'acceptation)

          SolTemp[v] = Fonction Objectif (Voisin 1 (X),R)

          X = Voisin 1 (X)

        Fin Si

      Fin Autrement

    Fin Si

  Autrement

    Si (Fonction Objectif (Voisin 2 (X),R) < SolTemp[v])

      SolTemp[v] = Fonction Objectif (Voisin 2 (X),R)

      X = Voisin 2 (X)

    Fin Si

  Autrement

    Probabilité d'acceptation =  $\exp(-(\text{Fonction Objectif (Voisin 2 (X),R)} - \text{SolTemp[v]})/(\text{Max-Refroidissement}))$

    Si (Random ( ) < Probabilité d'acceptation)

      SolTemp[v] = Fonction Objectif (Voisin 2 (X),R)

      X = Voisin 2 (X)

    Fin Si

  Fin Autrement

  Fin Autrement

    Type de composant = Type de composant + 1;

  Fin Pour

  Refroidissement = refroidissement + 1;

  Fin Pour

v = v + 1;

  Fin Pour

Fin Pour



## H. Algorithme en « Recuit Simulé »

ALGORITHME : *Recuit simulé*

ENTREES :  $Cp, Z, X_{v,j}^k, Q_B^A$

SORTIE :  $SP_j^s, \text{SolTemp}[v]$ .

Simplification

$(CP, X_{v,j}^k, Q_B^A) \text{ ----- } > (R)$

$SP_j^s \text{ ----- } > SP$

Voisin 1 (SP), Voisin 2(SP) ----- > Valeurs proches de la solution actuelle  $SP_j^s$

Max = 35000

Pour (refroidissement = 0 à Max)

Pour (s=0 à CP)

Si ( Fonction Objectif (Voisin 1 (SP),R) <= Fonction Objectif (Voisin 2 (SP),R)

Si (Fonction Objectif (Voisin 1 (SP),R) < SolTemp[s]

SolTemp[s] = Fonction Objectif (Voisin 1 (SP),R)

SP = Voisin 1 (SP)

Fin Si

Autrement

Probabilité d'acceptation =  $\exp(-(\text{Fonction Objectif (Voisin 1 (SP),R) - SolTemp[s]) / (\text{Max-refroidissement}))$

Si (Random ( ) < Probabilité d'acceptation)

SolTemp[s] = Fonction Objectif (Voisin 1 (SP),R)

SP = Voisin 1 (SP)

Fin Si

Fin Autrement

Fin Si

Autrement

Si (Fonction Objectif (Voisin 2 (SP),R) < SolTemp[s]

SolTemp[s] = Fonction Objectif (Voisin 2 (SP),R)

SP = Voisin 2 (SP)

Fin Si

Autrement

Probabilité d'acceptation =  $\exp(-(\text{Fonction Objectif (Voisin 2 (SP),R) - SolTemp[s]) / (\text{Max-refroidissement}))$

Si (Random ( ) < Probabilité d'acceptation)

{ SolTemp[s] = Fonction Objectif (Voisin 2 (SP),R)

SP = Voisin 2 (SP)

Fin Si

Fin Autrement

Fin Autrement

j = j + 1;

Fin Pour

refroidissement = refroidissement + 1;

Fin Pour

# I. Algorithme génétique

ALGORITHME : *Algorithme Génétique*

ENTREES :  $Cp, Z, X_{v,j}^k, Q_B^A$

SORTIE :  $SP_j^s$

Simplification

$(CP, Z, X_{v,j}^k, Q_B^A) \text{ ----- } > (R)$

$SP_j^s \text{ ----- } > SP$

Meilleure Performance=0

Génération à évaluer=2000

No. d'individus dans chaque génération = CP

// Probabilités :

« B »=0.8

« C »=0.1

« D »=0.1

Tant Que (Non (Génération à évaluer))

Génération={SP(1), SP(2), ..., SP(15)}

Pour i=0 à CP

Si (Meilleure Performance>Performance (SP(i),R))

Meilleure Performance= Performance(SP(i),R)

Fin Si

Fin Pour

cPop=0

Tant Que (cPop<No. d'individus dans chaque génération)

// Opérateur Sélection

Fils 1= Roulette (Génération,R)

// La fonction « Roulette (Génération) » est égale au choix d'un individu SP (x) selon une probabilité « A » parmi la génération. Probabilité « A » est en fonction de la Performance (SP(x)).

Fils 2 = Roulette (Génération, R)

// Opérateur Crossover uniforme

Nouveau Fils= Crossover (Fils1, Fils2, R)

// Par rapport à un taux de probabilité « B », on échange les gènes entre le fils1 et le fils 2

//Opérateur Mutation

Mutation (Nouveau Fils, R)

// Par rapport à un taux de probabilité « C » on choisi un gène au hasard et on change sa valeur au hasard

//Opérateur Inversion

Inversion (Nouveau Fils, R)

// Par rapport à un taux de probabilité « D », on change la place entre deux gènes dans le « Nouveau Fils ».

Pour i=0 à CP

FilsTemporaireSP(i)=Nouveau Fils

Fin Pour

cPop= cPop+1

Fin Tant Que

// Operateur Mutation cataclysmique

Si (FilsTemporaire SP(1)=SP(1))

Pour i=0 à CP

Mutation Cataclysmique (FilsTemporaire SP(i), R)

// Avec une probabilité « D », changer au hasard les valeurs de tous les gènes de chaque individu de la génération

Fin Pour

Fin Si

Pour i=0 à (No. d'individus dans chaque génération)

SP(i)=FilsTemporaire SP(i)

Fin Pour

Génération à évaluer= Génération à évaluer + 1

Fin Tant Que

## J. Algorithme en « Branch & Bound »

ALGORITHME : *Algorithme Branch&Bound*

ENTREES :  $CP, Z, X_{v,j}^k, Q_B^A$

SORTIE :  $SP_j^s, \text{OptimaleSP}$

Simplification

$(SP_j^s, CP, Z, X_{v,j}^k, Q_B^A) \text{ -----} > (R)$

// Initialisation

```
Pour (f=0 à CP)
  Pour (t=0 à CP)
    SP[t][f]=0;
  Fin Pour
Fin Pour
```

Pour (at=0 à CP)

```
SP[1][at]=1;
W1=1;
Pour (f=0 à CP)
  Si (f=at) {at=at+1, Répéter Pour... } Fin Si
  W1=W1*Q[f][at]*Q[f][at];
Fin Pour...
Si (W1=0) {SP[1][at]=0, at=at+1, Répéter Pour... } Fin Si
Si (Performance(R)>=FoLocale) {SP[1][at]=0, at=at+1, Répéter Pour...} Fin Si
Pour (bt=0 à CP)
  SP[2][bt]=1
  Si (at==bt){SP[2][bt]=0; bt=bt+1, Répéter Pour...} Fin Si
  W1=1
  Pour (f=0 à CP)
    Si (f ≠ at) {f=f+1, Répéter Pour...}
    W1=W1*Q[bt][f]*Q[bt][f];
  Fin Pour
  Pour (f=0 à CP)
    Si (f=at or f=bt) {f=f+1, Répéter Pour...}
    W1=W1*Q[f][bt]*Q[f][bt];
  Fin Pour
Si (W1=0) {SP[2][bt]=0, bt=bt+1, Répéter Pour...} Fin Si
Si (Performance(R)>=FoLocale) {SP[2][bt]=0, bt=bt+1, Répéter Pour...} Fin Si
....
....
```

Pour (kt=0 à CP)

```
SP[11][kt]=1
Si (at=kt or bt=kt or ct=kt or dt=kt or et=kt or ft=kt or gt=kt or ht=kt or it=kt or jt=kt)
  {SP[11][kt]=0, kt=kt+1, Répéter Pour...}
Fin Si
W1=1
Pour (f=0 à CP)
  Si (f ≠ at or f ≠ bt or f ≠ ct or f ≠ dt or f ≠ et or f ≠ ft or f ≠ gt or f ≠ ht or f ≠ it or f ≠ jt)
    {f=f+1, Répéter Pour...}
  Fin Si
  W1=W1*Q[kt][f]*Q[kt][f]
Fin Pour..
Pour (f=0 à CP)
  Si (f=at or f=bt or f=ct or f=dt or f=et or f=ft or f=gt or f=ht or f=it or f=jt or f=kt)
    {f=f+1, Répéter Pour...}
  Fin Si
  W1*=Q[f][kt]*Q[f][kt];
Fin Pour..
Si (W1=0)
  {SP[11][kt]=0, kt=kt+1, Répéter Pour...}
Fin Si
Si (Performance(R)>=FoLocale)
  SP[11][ot]=0, kt=kt+1, Répéter Pour...
Fin Si
Autrement
  FoLocale=Performance(R)
  OptimaleSP=SP
Fin d'Autrement
SP[11][ot]=0 ;
```

Fin Pour  
Si (ot=CP)  
ot=0  
Fin Si

.....  
.....  
SP[2][bt]=0  
Fin Pour  
Si (bt=CP)  
bt=0  
Fin Si  
SP[A][at]=0  
Fin Pour  
Si (at=CP)  
at=0  
Fin Si

### K. Méthode alternative D.O.E

Le concept « Design Of Experiments » (DOE) est mentionné dans la littérature (Statsoft, 1984) comme un outil statistique pour l'analyse qualitative des variables d'un système. Un des objectifs de ce concept est de trouver l'ensemble des facteurs responsables du comportement d'un système. Pour illustrer ce raisonnement, voici un exemple :

Exemple : lorsque l'on obtient une résistance particulière dans la conception d'une pièce de métal à partir de l'alliage de plusieurs métaux ou composants chimiques, on s'intéresse aux facteurs qui ont permis une telle résistance (par exemple à la quantité d'un composant chimique ou métallique). Pour le concepteur, il est important de savoir quoi changer afin de produire une résistance souhaitée sur la pièce de métal pour chaque client. Dit d'une autre manière, le concepteur voudrait identifier les facteurs qui affectent la résistance du produit final afin de différencier un produit d'un autre.

La première décision avant de concevoir un analyse statistique DOE est de répondre à la question : "Quel est l'objectif, ou le but, de l'étude DOE ?

Dans le contexte de cette thèse, le but de l'étude DOE est d'examiner les facteurs (interfaces de composants) qui sont, et ne sont pas, critiques à la différenciation des produits par rapport aux besoins techniques. C'est-à-dire que l'objectif est d'identifier les composants communs et les composants de différenciation

Cette analyse statistique est proposée si le lecteur :

- ne dispose pas des données nécessaires par rapport aux coûts des versions de composants,
- dispose de l'analyse technique formalisée par l'ensemble des contraintes entre les interfaces, (exemple annexe A)

Il y a plusieurs méthodes statistiques pour analyser la sensibilité d'un facteur sur un système dans DOE (voir par exemple les méthodes d'analyse de la variance du comportement d'un système par rapport à la variance des valeurs de différents facteurs). Une de ces méthodes est la méthode ANOVA et le « F-Test ». En termes plus généraux, le but du « F-Test » est de permettre au concepteur d'évaluer sur le système (dans cette thèse : les besoins techniques du produit, voir glossaire) les conséquences de changer les valeurs d'un facteur particulier, indépendamment de la valeur aléatoire du reste de facteurs dans le système. L'analyse statistique est faite à partir d'un ensemble d'échantillons ou observations. Pour plus d'information sur cette méthode statistique le lecteur peut se diriger vers Statsoft, 2003. Pour comprendre la méthode exposée dans cette partie il est indispensable d'avoir des notions basiques de la méthode ANOVA.

L'algorithme suivant évalue le « F-Test » et permet de trouver les facteurs de différenciation, c'est à dire les composants de différenciation pour la famille de moteurs électriques :

#### *Notations*

ct : Total des interfaces indépendantes analysés sur le système

dt : Total des observations

kt : Total des instances

$W_t$  : Poids du Besoin Technique (voir glossaire) « t »



$UL_p$  : Valeur supérieure de l'interface indépendant « p »

$BL_p$  : Valeur inférieure de l'interface indépendant « p »

ALGORITHME : **DOE**

INPUT : Interfaces indépendants d'un ensemble de composants, ct, dt, kt,  $w_t, UL_p, BL_p$

SORTIE :  $\bar{F}_o^v \forall v$

Pour (v=1 à ct)

  Pour (x=1 à kt)

    Pour (h=1 à dt)

      Pour (y=1 à ct)

        Si (y=v)

$$a_{x,y,v,h} = \left( \frac{UL_v - BL_v}{kt} \right) * X + BL_v$$

        Fin Si

        Autrement

$$a_{x,y,v,h} = (\text{Valeur Random entre } (UL_v, BL_v)) + BL_v$$

        Fin Autrement

      y=y+1

    Fin Pour

  h=h+1

$y_{x,v,h,1}$  = évaluation de la valeur du interface du produit « couple » selon le vecteur de valeurs de l'interfaces  $(a_{x,1,v,h}, a_{x,2,v,h}, \dots, a_{x,ct,v,h})$

$y_{x,v,h,2}$  = évaluation de la valeur de l'interface du produit « efficacité » selon le vecteur de valeurs de l'interface  $(a_{x,1,v,h}, a_{x,2,v,h}, \dots, a_{x,ct,v,h})$

$y_{x,v,h,3}$  = évaluation de la valeur de l'interface du produit « masse » selon le vecteur de valeurs des interfaces  $(a_{x,1,v,h}, a_{x,2,v,h}, \dots, a_{x,ct,v,h})$

  Fin Pour

  x=x+1

  Fin Pour

  v=v+1

Fin Pour

Calcul de :

$$\bar{Y}_{x,t}^v = \frac{\sum_{h=1}^{dt} y_{x,v,h,t}}{dt - 1} \quad \forall v, x, t$$

$$\bar{Y}_t^v = \frac{\sum_{x=1}^{kt} \bar{Y}_{x,t}^v}{kt - 1} \quad \forall v, t$$

$$SS_{RR_t}^v = \sum_{x=1}^{dt} \left( (dt - 1) * \left( \bar{Y}_{x,t}^v - \bar{Y}_t^v \right)^2 \right) \quad \forall v, t$$

$$SS_{ERR_t^v} = \sum_{x=1}^{kt} \sum_{h=1}^{dt} \left( y_{x,v,h,t} - \bar{Y}_{x,t}^v \right)^2 \quad \forall v, t$$

$$MS_{ERR_t^v} = \frac{SS_{ERR_t^v}}{(kt-1)*(dt-1)-(kt-1)} \quad \forall v, t$$

$$MS_{TRT_t^v} = \frac{SS_{TRT_t^v}}{(kt-1)} \quad \forall v, t$$

$$F_{o_t^v} = \frac{MS_{TRT_t^v}}{MS_{ERR_t^v}} \quad \forall v, t$$

$$\bar{F}_o^v = W_1 * F_{o_1^v} + W_2 * F_{o_2^v} + W_3 * F_{o_3^v} \quad \forall v$$

Résultats :

Comme données d'entrée on a utilisé un nombre limité d'interfaces à étudier, ceux-ci sont :

No. d'Interface	Interface	Code	élément du vecteur	Description
1	Par.2 Composant 14	Currrnt	$a_{x,1,v,h}$	Courant électrique
2	Par. 2 Composant 4	Awf	$a_{x,2,v,h}$	Superficie transversale
3	Par. 2 Composant 9	Awa	$a_{x,3,v,h}$	Superficie transversale
4	Par. 3 Composant 4	Ns	$a_{x,4,v,h}$	Nombre de tours (largeur)
5	Par. 3 Composant 9	Nc	$a_{x,5,v,h}$	Nombre de tours (largeur)
6	Par. 2 Composant 3	RDiam	$a_{x,6,v,h}$	Diamètre
7	Par. 3 Composant 8	Thick	$a_{x,7,v,h}$	Epaisseur
8	Par. 3 Composant 3	Lenght	$a_{x,8,v,h}$	Longueur

On a fait une analyse de 100 et une autre de 200 observations par instance, on a évalué 10 instances dans chaque interface. Pour calculer  $y_{x,v,h,1}$ ,  $y_{x,v,h,2}$ , et  $y_{x,v,h,3}$ , on a considéré l'analyse technique de l'annexe A (codé en C++), par rapport au vecteur « h » =  $(a_{x,1,v,h}, a_{x,2,v,h}, \dots, a_{x,ct,v,h})$ . On a utilisé le même poids d'importance  $W_i$  par rapport à chaque besoin technique (c'est à dire 0.33 pour chacun).

Les rangs de chaque interface sont :

No. d'Interface	Valeur supérieure de l'interface « UL »	Valeur inférieure de l'interface « BL »	Unités
1	6	0.1	Ampères
2	1	0.01	mm <sup>2</sup>
3	1	0.01	mm <sup>2</sup>
4	1500	0.01	Tours
5	500	1	Tours
6	10	1	cm
7	10	0.5	mm
8	5	0.5	cm

La expression de  $MS_{TRT_i^v}$  permet de calculer la variance « résiduelle » ou d'erreur de chaque besoin technique « t » d'un produit. C'est à dire la variance du système à cause de la variabilité d'un groupe de facteurs (interfaces du système). La variabilité du groupe de facteurs est faite de manière stochastique (ou Randon).

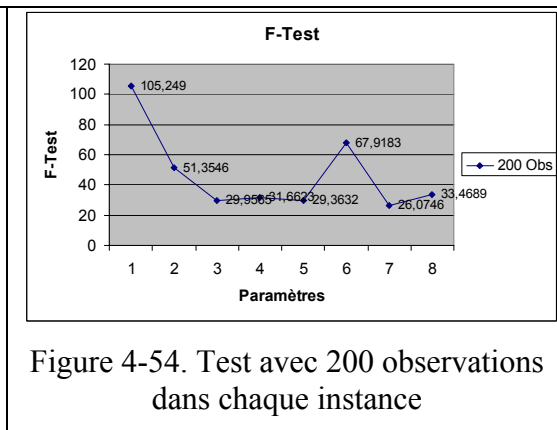
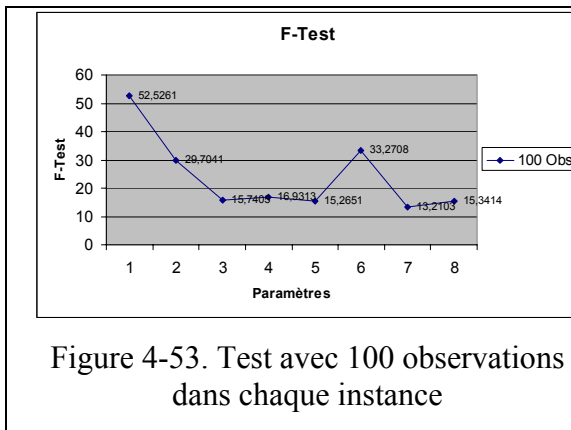
L'expression de  $MS_{TRT_i^v}$  permet d'estimer (en termes compréhensibles) la variance d'un besoin technique « t » par rapport au changement d'une instance (valeur d'une interface).

Pour définir l'hypothèse  $H_0$  du « F-Test », on a considéré  $\mu_i^v$  comme la moyenne pondérée de tous les besoins techniques « t » pour la population des observations par rapport à une instance « i » dans chaque interface « v » que l'on voudrait analyser. Selon la théorie statistique derrière le « F-Test » si l'hypothèse  $H_0 = \mu_1^v = \mu_2^v = \dots = \mu_x^v$  est fausse<sup>36</sup> alors  $\bar{F}_o^v$  doit être supérieur à « 1 ». Si  $H_0$ : c'est vrai, alors le choix d'une instance « i » n'affecte pas de manière importante la valeur des besoins techniques du produit de façon générale. Ce qui signifie que les valeurs de l'interface « v » n'ont aucune influence sur les caractéristiques du produit. Dans un tel cas  $\bar{F}_o^v$  serait autour de 1.

On peut déduire que le test  $\bar{F}_o^v$  ne permet pas seulement de prouver l'hypothèse «  $H_0$  », mais aussi de déduire si la variation des besoins techniques d'un produit est plutôt liée à la variation de valeur d'une interface « v » ou plus à la variation stochastique du reste des variables (random error). Donc plus  $\bar{F}_o^v$  d'une interface « v » sera grand, plus ce sera important pour la différenciation des produits.

L'analyse « F-test » donne les résultats suivants :

<sup>36</sup> L'hypothèse «  $H_0$  » essaye de prouver que les valeurs des besoins techniques d'un produit sont les mêmes si on change les instances « s » (valeurs) d'un paramètre « v »



Evidement tous les interfaces (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7,8) ont une influence sur les besoins techniques du produit. Mais les composants avec les interfaces 1, 2, 6 sont les moins adéquats dans une plateforme de différenciation retardée en raison de leur importance pour différencier les produits. Les composants avec les interfaces 3, 4, 5, 7, 8 sont les plus adéquats comme composants communs en raison de leur moindre influence sur la différenciation des caractéristiques des produits, de ce fait, ils sont plus adéquats dans une plateforme de différenciation retardée. Cette analyse a étudié les huit interfaces indépendantes du système, ce type d'étude peut s'étendre à l'analyse des interfaces de tout le système.

## L. Classification de la bibliographie

Référence	Focalisé sur la différenciation retardée	Classification systématique			Par activité du cycle de vie du produit			Type d'outil				
		Éléments seulement	Relations seulement	Éléments et relations	Conception	Un approche production	Utilisation	Méthodes (pas a pas)	Mathématique (outil)	Algorithme	Méthodes de représentation	Outils d'évaluation de la modularité
Aqard 2002	M (par design)				M					M		
Bonquillemi et Henseler 2001								M			M	
Burbidge 1982		M (Accum)				M				M		
Carrie 1973		M (Accum)				M				M		
Chakrabarti 2001		A, M (Restruct)			A, M				M			A
Chambolle 1999								A			A	
Dahmus and al. 2000		M (Restruct)			M			M, A			A	
David et al. 1998	M (par design)	M (Simpl)			M	M				M		
Dobrescu et Reich 2001		P (Accum)			P					P		
Erens et Verhulst 1997		M, A (Accum)			M, A			M, A				
Erixon 1998		M (Accum)			M			M			M	
Evans 1963		M (Accum)			M				M			
Fellini et Papalambros 2000		P (Accum)			P			P			P	
Fujita et al. 1999		M (Simpl)			M					M		
Fujita 2002		M (Restruct)			M			M		M		
Gard 1997	C					C			C			
Gonzalez 2000				P (Accum)	P			P		P		
Gonzalez-Zugastv and Otto 2000				P (Accum)	P			P		P		
Hadi-Hamou 2002		A (Restruct)			M, A			M, A	M, A		M, A	
Hata and Kimura 2001				M (Restruct)	M				M			M
Huang and Kusiak 1998		M (Accum)			M			M		M	M	
Huang and Kusiak 1999		M (Simpl)			M					M		
Jianxin and Tseno 1999		M (Simpl)			M			M		M	M	
Joines et Culberth 1996		M (Accum)			M	M				M		M
Kidd 1998		P (Simpl)				P		P				
King 1980		M (Accum)				M		M		M		
Krishnan et al. 2001		P (Restruct)			P					P		
Kumar and Chandraskharan 1990											M	M
Kusiak 1987		M (Accum)			M	M			M			
Kusiak 1999				M, A	M, A			M, A		M, A	M, A	
Kusiak and Larson 1995		A (Restruct)						A			M, A	
Kusiak et al. 1995				M (Restruct)		M				M	M	M
Lee and Tang 1997	C				C	C			C			
Martin 2002				P (Restruct)	P			P		P		
Martin and Ishii 1997	C				C	C			C			
Messac et al. 2000			P		P			P				P
Meyer and Lenherd 1997					P			P				P
Mikkola 1999b			M		M				M			M
Mikkola 2003		M (Accum)							M			M
Navak et al. 2000			P		P					P		
Nelson et al. 1999			P		P					P		
Otto et Gonzalez 2000		M (Simpl)			M					M		
Otto 2001		M (Restruct)			M			M				
Otto and al. 2001		P (Restruct)			P			M			M	
Pedersen et al. 2001		P (Accum)			P					P	P	
Robertson and Ulrich 1998		P (Restruct)			P			P				
Siddique et Rosen 1999		M, A (Accum)			M, A			M, A			M, A	
Simpson et al. 2001			P		P			P		P		
Swaminathan and al. 1998		P (Simpl)			P	P				P		
Swaminathan and al. 1999	P	P (Simpl)			P	P				P		
Thomas 1991		M (Accum)			M					M		
Venkat and Rahul 2002		M (Simpl)			M					M		
Virithamulla 1991		M (Accum)			M				M		M	
Zamrowski 1995		M (Accum)			M			M				

A	Orienté à l'architecture
P	Orienté aux plateformes
M	Orienté aux modules
C	Orienté aux composants

## **Contribution aux méthodes de Conception modulaire de produits et processus Industriels**

Ce travail de thèse porte sur la mise en place d'une stratégie pour le développement d'une diversité de produits. Il propose le développement de modules de composants pour la construction optimale de produits au niveau de la production et de la conception. Lorsque l'on a besoin d'obtenir une variété définie de produits dans un délai court et avec un coût réduit, la réutilisation de modules permet la configuration et l'obtention de produits rapidement, ainsi que la réduction des coûts de conception et production. L'utilisation de modules communs (appelés plateformes dans cette thèse) permet aussi la différenciation retardée des produits dans la ligne de production. Dans des situations de très grande diversité qui rendent possibles des millions de combinaisons de composants, comment choisir les composants des plateformes ? En outre, le choix des plateformes doit être en cohérence avec l'ordre de la séquence d'assemblage, afin de faciliter la différenciation retardée. Pour résoudre ce problème, une stratégie est de réorganiser la séquence de production. Un autre problème est alors, comment réorganiser l'ordre de production ? Le but de cette étude est de proposer des outils d'aide à la décision permettant de déterminer la solution à ces problèmes. Pour cela nous avons proposé :

- Une démarche pour le choix des composants des plateformes qui correspond aux composants nécessaires des produits
- Une démarche pour le choix de la séquence de production ainsi que pour le choix des plateformes.
- Des algorithmes permettant d'optimiser de tels choix

Nous avons ainsi proposé des méthodes permettant de construire des plateformes et de déterminer des solutions aux questions soulevées. Les tests ont permis de conclure sur le performance des stratégies proposées.

Mots clés : Modularité, plateformes, différenciation retardée, famille de produits, optimisation.

## **Contribution to modular methods of product and process design**

The object of this work is the set up of strategies aiming at developing a variety of products. It proposes the development of modules of components for the optimal construction of products according to the advantages reached in the fields of production and design. When we need to obtain a certain variety of production in a very short time and with limited costs, the fact of using several times a module allows to configure and to obtain products quite fast, as well as the reduction of several costs such as those linked to the design and the production management. The use of common modules (called platform in this work) also allows delayed differentiation of the products on the production line. In situations of high diversity, which enable millions of combinations of components, how should we choose the platform components? Moreover, that choice needs to fit in the order of the production sequence to enable delayed differentiation. To solve that problem, one strategy is to reorganize the production sequence. Then, another problem we will have to face would be the reorganization of that sequence. The purpose of this study is to propose tools for the decision making allowing to solve these problems:

- A proposition for the choice of platform components corresponding to the necessary components of the products.
- A proposition for the choice of the production sequence as well as for the choice of the platforms.
- Algorithms allowing to optimize such choices.

Thus, we proposed methods allowing to build platforms and to solve the inherent problems. We also conducted some tests to draw conclusions.

Key words: Modularity, platforms, product families, postponement, optimisation.