
Conception et fabrication des familles de produits

Etat de l'art

Bruno Agard

École Polytechnique de Montréal
Département de Mathématiques et de Génie Industriel
C.P. 6079, succ. Centre-ville
Montréal (Québec) H3C 3A7 - Canada
bruno.agard@polymtl.ca

RÉSUMÉ. Dans un marché concurrentiel, les fabricants sont amenés à répondre à des besoins fonctionnels variés par des réponses individuelles, de manière à diversifier et élargir leur clientèle et se réserver des parts de marché. Les industriels sont confrontés à un dilemme : la diversité ou les économies d'échelle. Une solution est d'utiliser des familles de produits qui permettent un certain degré de standardisation, et laissent encore de la flexibilité aux produits pour pouvoir s'adapter à différents usages. Ces familles de produits se déclinent ensuite par une combinaison d'options et variantes choisies en partie par le client final de manière à créer un produit personnalisé selon les besoins et désirs de chacun. Dans ce contexte, cet article présente un état de l'art sur la conception et la fabrication des familles de produits.

ABSTRACT. In a concurrent market, industrials are lead to design and manufacture a wide diversity of products to satisfy diversified customers and markets. Manufacturers are confronted to a dilemma, which is diversity or economies of scale. A solution is in the use of product families that allow a particular standardization degree and still leave product flexibility to adapt to various uses. These product families can be customized according to the needs and preferences of each customer by a combination of options and alternatives. In this context, this paper presents a state-of-the-art about the design and manufacturing of product families.

MOTS-CLÉS : diversité produit, familles de produits, conception modulaire, différenciation retardée, état de l'art.

KEYWORDS: Product Diversity, Product Families, Modular Design, Product Delayed Differentiation, State-of-the-art.

1. Introduction

Dans un marché concurrentiel, les fabricants sont amenés à répondre à des besoins fonctionnels variés par des réponses individuelles, de manière à diversifier et élargir leur clientèle et se réserver des parts de marché. Il en est advenu un marché de plus en plus segmenté dans lequel les fabricants se doivent d'innover et d'adapter chaque produit aux besoins spécifiques de chaque client [TAR 98].

Les fabricants sont donc conduits à fournir une grande quantité de produits différents pour satisfaire un ensemble de besoins clients. Pour le fabricant, cette diversité commerciale doit être maîtrisée pour ne pas mener à une augmentation des coûts dans toutes les activités de l'entreprise [MAC 96], de la conception à la production [BEN 00], en passant par le service commercial et le soutien logistique. Nécessairement, la diversité commerciale ne peut être supportée durablement que si elle s'appuie sur une faible diversité technique, qui garantit des coûts de développement et de gestion acceptables [CHI 91].

Les industriels sont confrontés à un dilemme : la diversité ou les économies d'échelle [KEK 90]. Pour répondre aux besoins spécifiques de chaque utilisateur, il est possible soit de faire des produits sur-mesure, ce qui augmente les coûts et se répercute sur les prix de vente, soit au contraire, afin de diminuer les prix, il est possible de standardiser la production pour profiter des économies d'échelle (effets d'apprentissage, coûts fixes diminuant, etc.). En revanche l'accroissement de la standardisation augmente les coûts enveloppe, c'est-à-dire qu'il existera dans les produits finaux des fonctions non utilisées.

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

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

La philosophie actuelle étant de remplacer les anciens produits par de nouvelles versions, soit d'un produit amélioré, soit d'une nouvelle variété du produit, la différenciation des produits est d'une importance croissante en marketing. La compétition n'est plus seulement sur le prix mais aussi sur la variété et la vitesse de mise sur le marché. Les consommateurs demandent à la fois une haute qualité, des prix bas et des produits personnalisés, régulièrement actualisés par les progrès techniques.

Lors de la conception du produit, il s'avère donc nécessaire de modéliser les interactions entre la diversité commerciale et la diversité technique. La gestion de la diversité des produits est un point important qui se trouve à l'interface de plusieurs secteurs dans une même entreprise :

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

Dans un contexte de conception de produits, ce travail porte sur la conception et la fabrication d'une grande diversité de produits à moindre coût. La section suivante présentera un état de l'art concernant la conception des familles de produits en traitant des méthodologies de conception, les indicateurs liés à la variété, puis des gammes génériques d'assemblage et la technologie de groupes. La section 3 portera sur la fabrication des familles de produits en s'intéressant aux outils qui supportent la différenciation retardée : personnalisation par l'utilisateur, différenciation perceptuelle, différenciation au stade de la distribution, standardisation, conception modulaire et restructuration des processus. Enfin, la conclusion proposera des perspectives de recherche dans le domaine.

2. Conception des familles de produits

2.1. Méthodologies de conception

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

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

- crée un environnement stable où chaque composant peut être développé en parallèle avec des risques managés,
- permet de remplacer un composant par un autre composant ayant une interface identique, dans le but de satisfaire les besoins des consommateurs. Certains composants n'ont pas de variantes et sont alors communs pour la famille de produit, ces composants sont un facteur relativement stable dans la conception,

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

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

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

Pour Erens et Verhulst [ERE 97] comme pour Jiao et Tseng [JIA 99] la méthodologie proposée s'appuie sur le couplage entre les domaines fonctionnel et technique. Les auteurs considèrent aussi un domaine physique qui correspond à la réalisation physique des différents composants, mais la structure de famille de produits ne se base pas sur ce domaine.

Erens et Verhulst [ERE 97] représentent le couplage entre fonctions et modules techniques à l'aide du lien fonction/module technique (figure 1). Les différentes cardinalités de ce lien données dans le tableau 1 permettent de représenter l'ensemble des cas possibles.

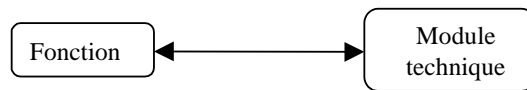


Figure 1. Lien fonction/module technique

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

Tableau 1. Cardinalités du lien fonction/module technique

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

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

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

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

La variété d'un produit dépend de la variété de ses composants. Une famille de produit est caractérisée par des relations 1 : 1 et N : 1 entre domaines, la diversité dans une famille de produit est plus petite dans les domaines technologiques et physiques (ce qui satisfait le fabricant) que dans le domaine fonctionnel (ce qui satisfait le client). Au contraire, les relations de type 1 : N et N : M disqualifient de famille de produits. Cependant, beaucoup de produits ne respectent pas strictement la définition de famille de produits, les variantes n'ont pas une interface identique dans les trois domaines.

Pour Erens et Verhulst [ERE 97], l'aspect stable est pris en compte par une augmentation du ratio performance/coût et l'aspect variable par une augmentation du ratio variété/coût. Pour Jiao et Tseng [JIA 99], la variété fonctionnelle plus rattachée à la satisfaction du consommateur, doit être encouragée dans le développement du produit, alors que la variété technique mêlée à la fabrication et aux coûts doit être réduite.

A travers un ensemble de travaux, l'Engineering Design Research Laboratory (K. Otto, J.P. Gonzalez-Zugasti, E. Zamirowski, J.S. Yu et J. Baker) a cherché à réaliser une structure de famille de produits à partir de l'analyse des besoins [GON 99, YU 98, ZAM 99a, ZAM 99b]. Ils déduisent de l'analyse des besoins des clients une liste d'exigences pour le produit à réaliser.

Afin de connaître les besoins des clients (ou d'un groupe de clients ciblé), il est demandé plusieurs fois dans le temps à ces clients cibles de définir les valeurs qu'ils souhaiteraient sur des caractéristiques particulières de produits donnés (cf. figure 2).

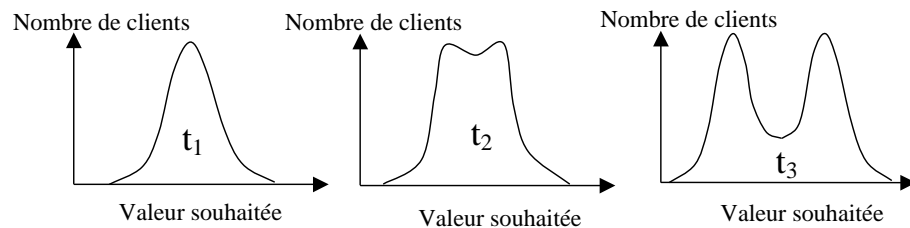


Figure 2. Analyse des besoins des clients pour un attribut donné

A partir de ces données, deux distributions sont constituées :

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

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

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

Zamirowski et Otto [ZAM 99a] ainsi que Dahmus *et al.* [DAH 01] proposent une méthodologie pour développer une structure de famille de produits qui s'appuie sur ces indices :

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

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

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

Gonzalez-Zugasti *et al.* [GON 98, GON 00] proposent une méthodologie pour concevoir une plate-forme de produits et les variantes qui en dérivent en prenant en considération à la fois les performances techniques individuelles souhaitées et le coût global de la famille de produit, une application à la conception d'une familles de satellites est présentée.

Il s'agit d'un problème d'optimisation où les avantages liés à la conception d'une plate-forme commune doivent équilibrer les contraintes de chaque variante individuelle et les contraintes de la famille de produits dans son ensemble. La méthodologie, schématisée figure 3, est basée sur un modèle de négociation qui se déroule en quatre étapes [GON 00] :

- 1) Les besoins et contraintes de chaque variante de produits (A, B et C) sont définis indépendamment les uns des autres. Ces contraintes contiennent entre autres les performances souhaitées, les coûts des modèles, etc.
- 2) A partir des besoins semblables, une plate-forme commune est définie qui essaye de satisfaire au mieux chaque variante,
- 3) Autour de la plate-forme définie, les équipes A, B et C conçoivent leurs variantes respectives,

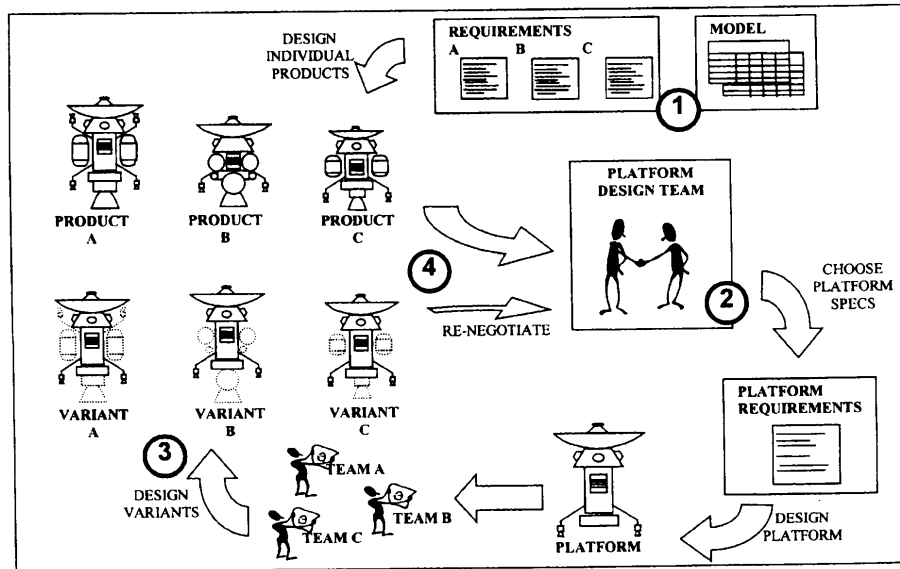


Figure 3. Méthodologie de négociation

4) Si la plate-forme n'est pas acceptable pour une des variantes, il y a renégociation de la plate-forme et rebouclage sur les variantes une nouvelle fois.

Martin et Ishii [MAR 99, MAR 00] proposent une méthodologie pour développer une architecture de famille de produits robuste dans le but de réduire les efforts de conception et de diminuer le temps de mise sur le marché des différentes variantes.

Leur méthodologie s'appuie sur deux indices qui mesurent l'effort de reconception nécessaire pour adapter un composant aux différentes variantes (GVI : *Generational Variety Index*) et le couplage entre les composants (CI : *Coupling Index*). Ces indices permettent de distinguer les raisons externes des modifications (GVI) et leur propagation dans le produit (CI), raisons internes à la conception.

A partir de là, comme dans les travaux précédents, les aspects stables et variables sont séparés en évaluant les deux indicateurs GVI et CI. CI est découpé en CI-R et CI-S selon qu'il subit (R : *Receiving*) ou cause (S : *Supplying*) la reconception. Les composants avec d'importants GVI, CI-R ou CI-S doivent être reconçus pour diminuer la note, tous les composants avec une note proche de zéro sont des éléments stables sur lesquels reposera la structure de la famille de produits. Nous ne présentons pas ici l'évaluation des notes GVI et CI des composants, le lecteur pourra se reporter à [MAR 99] ou [MAR 00] selon le niveau de détail souhaité.

D'autres travaux se sont intéressés à la définition de structures de familles de produits. Citons Simpson *et al.* [SIM 00] qui réalisent une plate-forme de produits paramétrables pour en dériver l'ensemble de la famille de produits. Ils illustrent leur

application à la conception de moteurs électriques universels. Agard [AGA 02a] propose une méthodologie de conception des familles de produits basée sur l'analyse des besoins des consommateurs et qui prend en compte à la fois la conception et la fabrication pour l'évaluation et la sélection de la meilleure alternative. La méthodologie est illustrée pour la conception de faisceaux électriques automobiles dans [AGA 02b] et [AGA 02c]. Fujita [FUJ 02] optimise le contenu des modules et leur combinaison dans une architecture modulaire fixe. Yigit *et al.* [YIG 02] traitent ce même problème en déterminant les meilleurs sous-ensembles de modules par la minimisation d'une fonction objectif qui représente un équilibre entre les coûts de reconfiguration et la perte de qualité liée à la modularité.

2.2. Indicateurs des coûts indirects d'introduction de la variété

Le Manufacturing Modelling Laboratory [ISH 95, MAR 96, MAR 97] (Stanford University) a proposé un outil destiné aux managers de produits pour les aider à évaluer les coûts indirects d'introduction de la variété dans une ligne de produits. Leur modèle distingue :

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

Le modèle n'adresse pas les coûts directs (investissements matériels et humains, heures de conception nécessaires pour la mise au point de la nouvelle variante, achats de matériaux, certifications, tests, ajout d'un fournisseur, etc.) évaluables par des méthodes classiques telles que *Activity Based Costing* [LEW 93].

Le modèle initial [ISH 95] offre une première mesure qui s'appuie sur deux valeurs X et Y . X est un indicateur de l'importance pour le consommateur ($X \in [0, 1]$), Y est un indicateur des coûts indirects de la diversité ($Y \in [0, 1]$), il s'appuie sur la mesure de trois indices : la *commonalité*², le point de différenciation et les coûts de changement. Y se calcule de la manière suivante :

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

Avec :

- D_1 : représente le nombre de variantes.
- $D_1 \in [0, 1]$, D_1 diminue si le nombre de variantes augmente (figure 4),

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

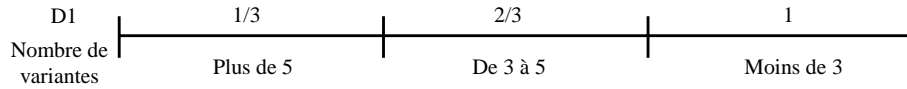


Figure 4. *Mesure de D1*

– D_2 : mesure l'étape de fabrication où apparaît la différenciation
 $D_2 \in [0, 1]$, plus la différenciation a lieu tôt plus D_2 est faible (figure 5),

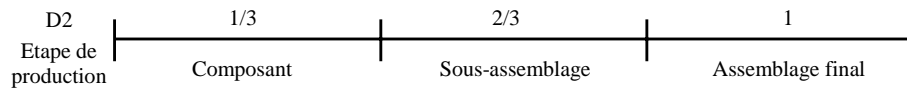


Figure 5. *Mesure de D2*

– D_3 : mesure l'effort nécessaire pour le changement de production entre variantes
 $D_3 \in [0, 1]$, D_3 diminue si le temps de changement augmente (figure 6).

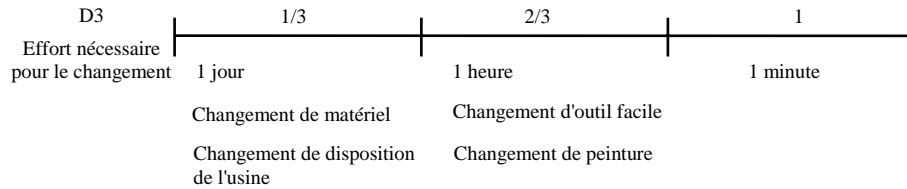


Figure 6. *Mesure de D3*

En plaçant les points représentant chaque produit (ou sous-produit) dans le graphique 7, ceci permet de discriminer quelles variétés sont effectivement pertinentes.

Ce modèle a ensuite été amélioré dans [MAR 96] par la définition de nouveaux indices CI , DI et SI et complété dans [MAR 97] :

– CI est un indicateur de commonalité (de même nature que D_1).
 $CI \in [0, 1]$, CI diminue si la standardisation augmente.

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

Avec :

- u : nombre de pièces uniques,
- P_j : nombre de pièces dans le modèle j ,
- v_n : nombre de produits finaux différents,

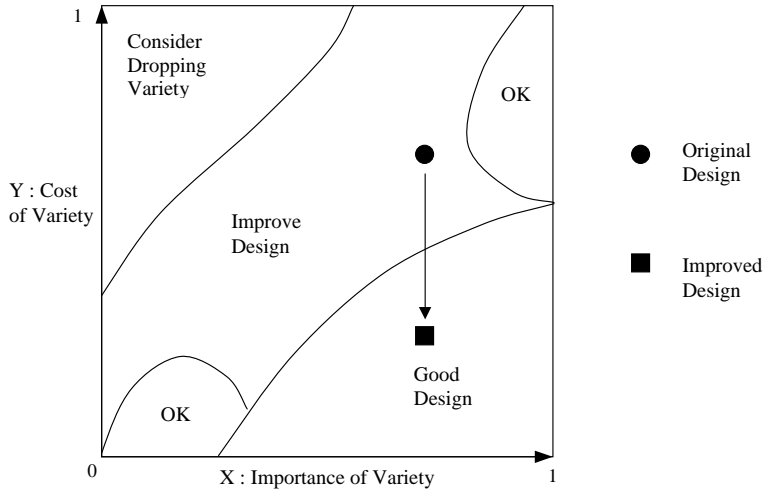


Figure 7. Diagramme coût-importance

– DI est un indicateur de différenciation retardée (de même nature que D_2).
 $DI \in [0, 1]$, plus DI est faible, plus la différenciation a lieu tard dans le processus.

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

Avec :

- n : nombre de process,
- v_i et v_n permettent de prendre en compte les coûts de stockage,
 - v_i : nombre de pièces différentes au process i ,
 - v_n : nombre de produits finaux différents,
- d_i et d_1 : prise en compte de la position de la différenciation dans le process,
 - d_i : temps moyen entre le process i et la sortie du produit final,
 - d_1 : temps moyen de traversée de l'ensemble du process,
- a_i : valeur ajoutée au process i .

– SI indicateur de coût de changement (de même nature que D_3).
 $SI \in [0, 1]$, SI doit être le plus faible possible.

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

Avec :

- c_i : coût de changement au process i ,
- C_j : coût total du j^{eme} produit,

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

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

Les β_i sont à définir pour chaque cas particulier.

Ce dernier modèle a ensuite été complété par des indicateurs qualitatifs [MAR 97]. Ces indicateurs qualitatifs se présentent comme cela a déjà été vu figure 7 pour chacun des trois indices. Ceci a pour but de permettre une diminution sélective de chaque indice en proposant les comportements à adopter dans chaque cas.

2.3. *Gammes génériques d'assemblage*

Stadzisz et Henrioud [STA 97, STA 98] se sont intéressés à l'assemblage multi-produit, plus précisément au cas où une famille de produits doit être réalisée sur un même système d'assemblage dans le but d'intégrer les activités de conception des processus d'assemblage et de conception des familles de produits. Leur objectif était de prendre en compte la manière dont les produits seront assemblés au moment de la conception des familles de produits et des systèmes d'assemblage.

Un point fort de leur travail concerne la génération et la sélection des gammes génériques d'assemblage. Une gamme générique d'assemblage est définie comme une suite ordonnée d'opérations génériques décrivant un processus d'assemblage de l'ensemble des types de produits d'une famille donnée. L'obtention d'une gamme générique d'assemblage passe par plusieurs étapes :

1) La première étape est la modélisation des gammes génériques d'assemblage. Cette modélisation s'appuie sur un modèle de représentation qui utilise le formalisme des réseaux de Petri prédicat/événement. La modélisation se compose d'un modèle fonctionnel générique qui contient la description fonctionnelle (fonctions, paramètres, contraintes) et d'un modèle matériel générique.

2) A partir de la modélisation précédente, une méthode de génération permet de déterminer l'ensemble des gammes d'assemblage génériques admissibles pour une famille de produits donnée. Une gamme admissible correspond à une stratégie (un ensemble ordonné d'opérations) d'assemblage dont la réalisation est faisable d'un point de vue strictement technique. Ceci leur permet d'obtenir une représentation d'un processus générique d'assemblage qu'ils nomment réseau générique d'assemblage.

3) La dernière étape concerne l'évaluation des gammes d'assemblage génériques, qui permettra d'évaluer les différentes gammes génériques du réseau générique d'assemblage.

Le choix de la gamme définitive dépend de plusieurs facteurs :

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

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

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

avec :

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

2.4. Technologies de groupe

La technologie de groupe [HYE 84] est une méthode stratégique qui mène à la standardisation et à la simplification. Elle consiste à grouper des pièces, des produits, des opérations, des procédés aux différents stades de leur élaboration : conception, production, industrialisation, montage, afin de profiter avantageusement de leurs similitudes pour les industrialiser économiquement.

Les objectifs sont de réduire les coûts de création des nouvelles gammes, réduire le temps de chiffrage des devis, réduire les en-cours et archiver le savoir du personnel. Le principe est le suivant :

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

3. Outils pour la différenciation retardée

L'augmentation de la diversité des produits limite la capacité d'anticipation du producteur et engendre une demande de flexibilité qui nécessite des surcapacités de tous ordres. Si on admet que la diversité des produits au niveau du marché dépend des attentes des clients, celle-ci devient une donnée pour l'industriel, dans ce cas le domaine de contrôle de la diversité pour le producteur se situe au niveau des produits intermédiaires. Pour une diversité donnée des produits finis, il s'agit alors de concevoir ceux-ci de telle sorte que soit minimisée la variété des produits intermédiaires aux différents niveaux du processus de production (figure 8).

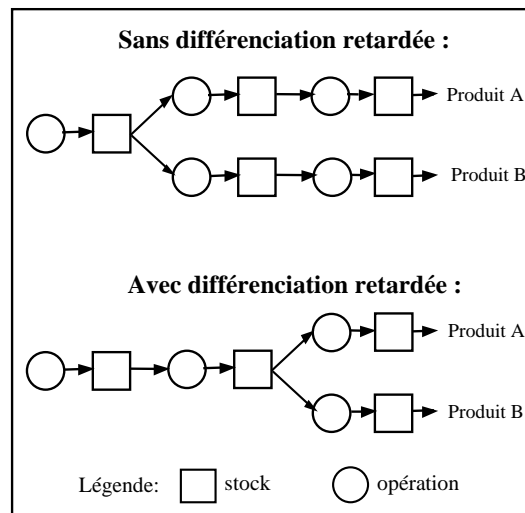


Figure 8. *Différenciation retardée*

D'après Tarondeau [TAR 98], la réduction de la variété des produits intermédiaires diminue le coût des stockages intermédiaires et des lancements. La localisation optimale des stocks intermédiaires, c'est-à-dire le niveau optimal d'anticipation, se déplace vers l'aval du processus de production réduisant ainsi l'importance du segment avec surcapacités. De plus, cela permet d'augmenter les volumes de production sur les processus amont et donc de réaliser des économies d'échelle, de diminuer les coûts fixes et de favoriser les effets d'apprentissage. Tarondeau conclut : « la réduction de variété des produits intermédiaires permet d'augmenter la productivité du système de production en limitant les surcapacités engendrées par les besoins de flexibilité. »

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

La différenciation retardée permet de réconcilier les objectifs de la politique produit en marketing, qui implique une forte diversité instantanée et dynamique des pro-

duits finis, et ceux des producteurs et distributeurs qui peuvent minimiser les exigences de flexibilité que cela impose en réduisant la variété des produits aux stades intermédiaires de la production et de la distribution.

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

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

De nombreux auteurs emploient le terme « postponement » comme un synonyme de la différenciation retardée [ZIN 90, LEE 97, SWA 99]. En d'autres termes, il s'agit de *postponement* dans le cas où l'assemblage d'un produit n'est pas terminé avant que la commande client arrive. De ce fait, la gestion des stocks est moins dépendante de la variabilité de la demande.

Contrairement à Lee [LEE 97] qui définit le type de la différenciation retardée selon l'outil qui sert à la réaliser, c'est-à-dire la standardisation, la conception modulaire et la restructuration du processus, Zinn [ZIN 90] donne sa propre classification. Elle est résumée dans le tableau 2.

Différenciation d'étiquetage	L'entreprise vend un même produit sous différentes marques. Les étiquettes indiquant la marque ne sont mises que quand une commande arrive.
Différenciation de packaging	Le distributeur se charge du packaging adapté à chaque client [TWE 00].
Différenciation d'assemblage	L'assemblage du produit commence au moment où la commande client arrive.
Différenciation de fabrication	La réalisation du produit commence au moment où la commande client arrive, mais la gamme de fabrication n'est pas toujours identique.

Tableau 2. Classification de la différenciation retardée

L'industriel dispose de plusieurs stratégies possibles pour mettre en œuvre cette différenciation retardée : la personnalisation par l'utilisateur, la différenciation perceptuelle, la différenciation au stade de la distribution, la standardisation, la conception modulaire, et la restructuration des processus.

3.1. *La personnalisation par l'utilisateur*

L'utilisateur est créateur de la variété des produits par la diversité des usages qu'il en fait. De ce fait, il réduit les exigences de flexibilité pour le producteur qui ne peut prévoir tous les cas d'usage.

L'industriel peut aller jusqu'à favoriser cette activité créatrice des utilisateurs, en fabriquant des produits facilement adaptables par les utilisateurs.

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

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

Pour cela :

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

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

3.2. *La différenciation perceptuelle*

La différenciation des produits se situe au stade de la consommation des produits, la création de variété ne porte ni sur la production ni sur la distribution de ces produits. Elle porte sur la perception des individus.

Les moyens de différenciation appartiennent à la politique de communication de l'entreprise (publicité, promotion, politiques de distribution et de prix, les services associés).

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

Pour cela, il est tout de même nécessaire que le produit dispose d'une certaine flexibilité qui permettent la politique de différenciation des perceptions. Par exemple, la capacité des téléphones mobiles d'accéder à différents réseaux de communication où se fera la différenciation.

3.3. La différenciation au stade de la distribution

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

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

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

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

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

3.4. La standardisation

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

D'après Tarondeau [TAR 98], la standardisation consiste à utiliser un composant ou un processus commun à un ensemble de produits. L'objectif est de diminuer le nombre de références à gérer et d'augmenter les quantités de chaque composant avec les conséquences de réduction de la complexité dans le système de fabrication. Cependant, cela nécessite d'augmenter les fonctionnalités de chaque composant.

Les profits d'un tel exercice dépendent de l'investissement nécessaire à la standardisation des composants et des profits résultants des économies d'échelle. Lee et Tang [LEE 97] ont développé un instrument mathématique permettant de trouver le meilleur compromis.

De même, une analyse des effets de la commonalité sur les stocks a été effectuée par Fouque [FOU 99]. Il s'est intéressé à déterminer quelle augmentation maximale Cc^* du coût du composant Cc est acceptable, Cc pouvant être soit une généralisation dans l'utilisation du composant $C4$ ou $C5$ ou soit un nouveau composant (figure 9).

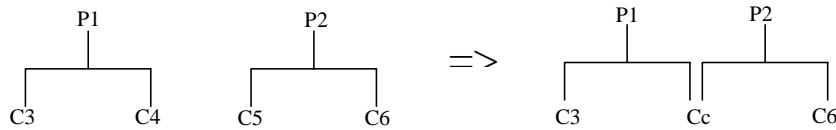


Figure 9. *Commonalité entre deux produits*

Fouque a mis en évidence une série de situations favorables à cette augmentation : le niveau de service des produit P1 et P2 augmente, la corrélation sur la demande de P1 et P2 diminue, l'incertitude sur la demande des produits augmente, la différence des variances de P1 et P2 diminue, les coûts des composants C4 et C5 sont proches l'un de l'autre et/ou la demande moyenne des produits P1 et P2 est faible.

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

Lee et Tang [LEE 97] illustrent cela par un exemple industriel représenté figure 10 où deux types de cartes électroniques pour imprimantes sont réunies en une seule.

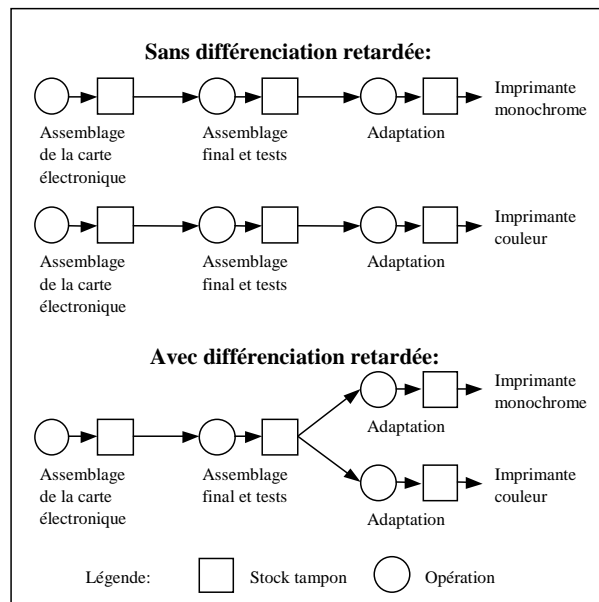


Figure 10. *La standardisation des composants*

Erol [ERO 99] propose une formulation mathématique pour la standardisation des composants de faible valeur qui se présente sous la forme d'un problème d'optimi-

sation non linéaire en nombre entiers. Ce problème est résolu dans Dupont *et al.* [DUP 99] par l'implantation d'un algorithme génétique et par une linéarisation de la fonction objectif. La standardisation a conduit à des gains considérables dans la productivité des entreprises et la diminution des stocks [DUP 98].

Kota *et al.* [KOT 00] proposent une mesure qui capture le niveau de commonalité dans une famille de produits, afin de juger de la capacité de la famille à partager des éléments et réduire le nombre total de pièces. A l'aide de cette mesure, les concepteurs peuvent comparer des alternatives de conception et garder celle qui offre la plus grande commonalité.

Thoteman et Brandeau [THO 00] présentent une approche pour déterminer le niveau optimal de commonalité des composants dans un sous-produit qui ne différencie pas les modèles du point de vue du client. En considérant un cas d'application sur les faisceaux électriques automobiles, ils ont montré qu'une conception optimale (d'un point de vue financier) peut être obtenue en recherchant la commonalité optimale des composants.

3.5. La conception modulaire

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

Ces éléments communs à plusieurs produits (que nous appellerons modules ou composants modulaires) sont donc destinés à des emplois multiples, ils doivent satisfaire un ensemble de besoins relatifs à chacun de leur cas d'emploi. Le but est d'utiliser un minimum de composants différents pour réaliser un maximum de produits différents (figure 11).

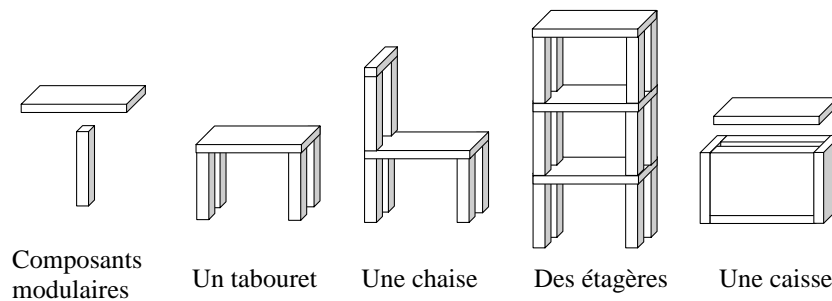


Figure 11. Emplois multiples de composants modulaires

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

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

On appelle « cas d'emploi » d'un module m l'ensemble des produits dans lesquels m entre comme élément de composition. La modularité mesure le nombre de cas d'emploi. On voit facilement qu'augmenter la modularité permet de réduire la variété des états d'un produit, et inversement une très forte combinaison de produits finis peut être obtenue avec un nombre assez faible de modules.

Kusiak et Huang [KUS 96, HUA 98] se sont intéressés à la conception modulaire dans le but de produire une large variété de produits à moindre coût. Pour cela une représentation matricielle du produit montre les relations entre les composants utilisés dans le produit en ligne et les fonctions réalisées par ce même produit en colonnes, ensuite une approche par décomposition matricielle (figure 12) permet d'extraire les éléments interchangeables, standardisés et indépendants en regroupant les interactions par modules.

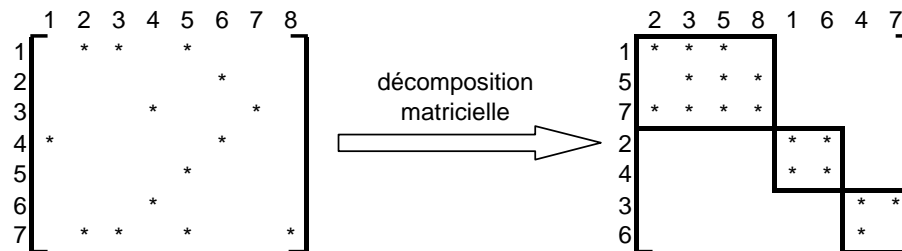


Figure 12. *Décomposition matricielle*

Quatre types de modules sont alors définis :

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

De même, trois types de modularité :

- échange de composants : se rencontre lorsque deux modules alternatifs de base ou plus peuvent être assemblés avec le même module en créant différentes variantes de produits appartenant à la même famille de produit,
- partage de composants : cas complémentaire du précédent, avec différents modules assemblés au même composant de base en créant différentes variantes de produits appartenant à différentes familles de produits,

– « *bus modularity* » : est utilisé quand un module avec au moins deux interfaces peut être partagé avec n'importe quel composant d'un ensemble de composants de base. L'interface du module accepte toute combinaison de composants de base.

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

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

En raison du grand nombre d'implications de la conception modulaire sur toutes les activités de fabrication du produit, une grande quantité de travaux sont venus apporter de la consistance dans la conception du produit et du *process*. Il est possible de citer par exemple les travaux de He et Kusiak [HE 97], qui proposent un algorithme de recherche Taboo dans le but de concevoir un système d'assemblage pour des produits modulaires de manière à équilibrer les lignes d'assemblage. De même, Huang et Kusiak [HUA 99] ont travaillé sur le développement de produits modulaires en s'intéressant à la minimisation des coûts de tests sur le produit final. Il est possible de trouver de nombreux autres exemples d'application des concepts de conception modulaire dans [KUS 99].

3.6. La restructuration des processus

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

Deux exemples sont présentés. Dans le premier (figure 13), l'étape qui entraîne la différenciation est retardée à la fin du processus, c'est au moment de la distribution que s'effectue la différenciation par le regroupement des éléments nécessaires.

Dans le second exemple (figure 14), il s'agit d'une inversion de deux opérations. Lee et Tang [LEE 98] ont examiné sous quelles conditions il est profitable de permuter deux opérations d'un même processus, leur modèle a été illustré sur le cas Benetton.

Benetton connu pour sa production de pull-overs en laine en couleur unie, à commencé dans les années quatre-vingt à les offrir dans une variété importante de couleurs. Très vite, il s'avéra que les préférences de couleurs de leur clientèle cible, les jeunes, changeaient trop vite et il devenait de plus en plus difficile de les deviner avant le début de la saison. Pour cela, il a été mis en place une solution bien adaptée qui consiste au lieu de faire tricoter les pull-overs à partir de la laine teintée de stocker des vêtements en couleur nature et de les teinter après que les commandes des distributeurs soient arrivées. Ce type de différenciation retardée associé à un système logistique sophistiqué a permis Benetton de connaître une croissance exceptionnelle dans les années quatre-vingt [BRU 87].

Alors que Lee et Tang traitent uniquement du problème de la restructuration de processus, Gupta et Krishnan [GUP 98] vont plus loin dans leur recherche. Dans leur

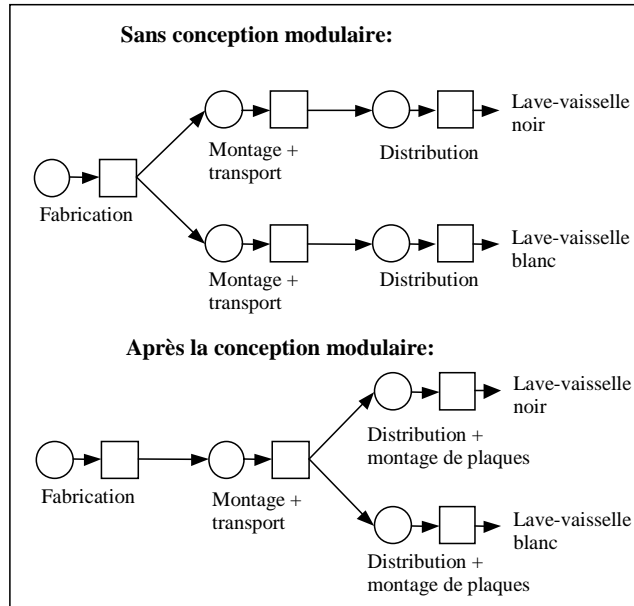


Figure 13. Restructuration d'un processus - Différer une partie d'une étape

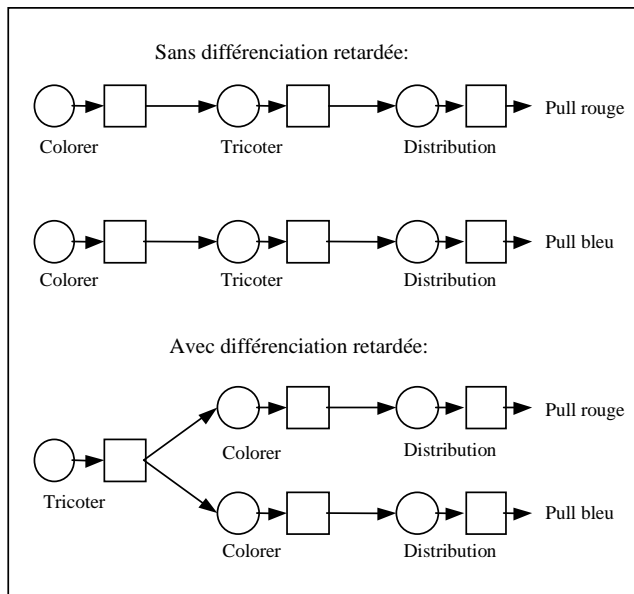


Figure 14. Restructuration d'un processus - Inversion de deux opérations

modèle, ils cherchent non seulement la meilleure séquence d'étapes d'assemblage, mais ils ont aussi développé un algorithme pour trouver les produits génériques (sous-ensembles) optimaux.

Par une série de travaux, qui porte sur un cas d'application de la différenciation retardée sur une ligne d'assemblage d'ordinateurs chez IBM, Swaminathan et Tayur [SWA 98, SWA 99] fournissent un outil mathématique contenant deux sous-modèles : le « *Assembly Sequence Design Model* » qui permet de trouver l'enchaînement des étapes d'assemblages à un coût minimal et le « *Vanilla Configuration Model* » qui cherche le meilleur ensemble de « *Vanilla Boxes*³ » pour une certaine gamme de produits.

He *et al.* [HE 98] proposent une implémentation de la différenciation retardée qui a pour but d'aider au choix des alternatives de conception en ayant comme contrainte d'améliorer les performances du système de fabrication. Les performances considérées sont le nombre de pièces différentes dans la chaîne d'assemblage et le temps de cycle. Minimiser le nombre de pièces différentes permet de minimiser les coûts indirects (coûts des stocks, temps de conception, mise au points, contrôles qualité), et minimiser le temps de cycle permet de maximiser la production.

4. Conclusion

L'étude de l'existant dans le domaine a permis de dégager les différentes propositions faites en matière de conception et de fabrication des familles de produits. Cette étude a fait ressortir un certain nombre d'outils, soit au niveau du produit, soit au niveau du process, pour aider à la conception des familles de produits et à la fabrication de ces familles de produits.

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

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

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

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

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

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

Cependant un certain nombre de questions reste en suspend – aussi bien sur la conception des familles de produits – comment répondre par une offre produit, quel nombre et quelle diversité produit est la mieux adapté, comment et quand ajouter ou supprimer des options ou des variantes – que sur leur fabrication – comment produire, quel processus de fabrication est le mieux adapté, quels sites de fabrication, quelle logistique, quels sont les liens entre la structure du produit et le processus de fabrication.

5. Bibliographie

- [AGA 02a] AGARD B., Contribution à une méthodologie de conception de produits à forte diversité, Thèse de Doctorat, INPG, 2002.
- [AGA 02b] AGARD B., TOLLENAERE M., « Conception d'assemblages pour la customisation de masse. », *Mécanique et Industrie*, vol. 3, 2002, p. 113-119.
- [AGA 02c] AGARD B., TOLLENAERE M., « Design of Wire Harnesses for Mass Customization. », *4th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering - IDMME 2002*, 2002, Clermont-Ferrand, France.
- [BEN 00] BEN-AISSA H., « La complexité au montage véhicule : de la production à la conception », *Revue Française de Gestion Industrielle*, vol. 19, n° 3, 2000, p. 77-94.
- [BRU 87] BRUCE L., « The bright new worlds of BENETTON », *International Management*, November, 1987, p. 24-35.
- [CHI 91] CHILD P., DIEDERICHS R., SANDERS F.-H., WISNIOWSKI S., « The Management of Complexity », *Sloan Management Review*, 1991, p. 73-80.
- [DAH 01] DAHMUS J., GONZALEZ-ZUGASTI J., OTTO K., « Modular Product Architecture », *Design Studies*, vol. 22, 2001, p. 409-424.
- [DUP 98] DUPONT L., *La Gestion Industrielle : Concepts et Outils*, Hermès, Paris, 1998.
- [DUP 99] DUPONT L., EROL M., CORMIER G., TURKKAN N., « La standardisation des composants : modèles et algorithmes », *3e Congrès International de Génie Industriel*, 1999, p. 671-680.
- [ERE 97] ERENS F., VERHULST K., « Architectures for product families », *Computers in Industry*, vol. 33, 1997, p. 165-178.
- [ERO 99] EROL M., Prise en compte de la flexibilité dans la planification dynamique, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1999.

- [FOU 99] FOUQUE T., « A la recherche des produits flexibles », *Revue Française de Gestion*, mars-avril-mai, 1999, p. 80-87.
- [FUJ 02] FUJITA K., « Product variety optimization under modular architecture », *Computer-Aided Design*, vol. 34, 2002, p. 953-965.
- [GON 98] GONZALEZ-ZUGASTI J., OTTO K., BAKER J., « A method for architecting product platforms with an application to interplanetary mission design », *Proceedings of 1998 DETC*, 1998, ASME Design Automation Conference, Atlanta, GA, September 13-16.
- [GON 99] GONZALEZ-ZUGASTI J., OTTO K., BAKER J., « Assessing value for product family design and selection », *Proceedings of the 25th Design Automation Conference*, 1999, ASME Design Engineering Technical Conferences, Las Vegas, Nevada, September 12-15.
- [GON 00] GONZALEZ-ZUGASTI J., OTTO K., BAKER J., « A Method for Architecting Products Platforms », *Research in Engineering Design*, vol. 12, 2000, p. 61-72.
- [GUP 98] GUPTA S., KRISHNAN V., « Product family-based assembly sequence design methodology », *IIE Transactions*, vol. 30, 1998, p. 933-945.
- [HE 97] HE D., KUSIAK A., « Design of assembly systems for modular products », *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 13, n° 5, 1997, p. 646-655.
- [HE 98] HE D., KUSIAK A., TSENG T., « Delayed product differentiation : a design and manufacturing perspective », *Computer-Aided Design*, vol. 30, n° 2, 1998, p. 105-113.
- [HUA 98] HUANG C., KUSIAK A., « Modularity in design of products and systems », *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans*, vol. 28, n° 1, 1998, p. 66-77.
- [HUA 99] HUANG C., KUSIAK A., « Synthesis of modular mechatronic products : a testability perspective », *IEEE/ASME Translation on Mechatronics*, vol. 4, n° 2, 1999, p. 119-132.
- [HYE 84] HYER N., WEMMERLÖV U., « Group technology and productivity », *Harvard Business Review*, July-August, 1984, p. 140-149.
- [ISH 95] ISHII K., JUENGEL C., EUBANKS C., « Design for Product Variety : Key to Product Line Structuring », *Proceedings of 1995 ASME Design Theory and Methodology*, September, Boston, MA, 1995.
- [JIA 99] JIAO J., TSENG M., « A methodology of developing product family architecture for mass customization », *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 10, 1999, p. 3-20.
- [KEK 90] KEKRE S., SRINIVASAN K., « Broader product line : a necessity to achieve success ? », *Management Science*, vol. 36, n° 10, 1990, p. 1216-1231.
- [KOT 00] KOTA S., SETHURAMAN K., MILLER R., « A metric for Evaluating Design Commonality in Product Families », *Journal of Mechanical Design*, vol. 122, 2000, p. 403-410.
- [KUS 96] KUSIAK A., HUANG C., « Development of modular products », *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technologie, Part A*, vol. 19, n° 4, 1996, p. 523-538.
- [KUS 99] KUSIAK A., *Engineering Design : Products, Processes, and Systems*, Academic Press, San Diego, CA, 1999.
- [LEE 97] LEE H., TANG C., « Modelling the costs and benefits of delayed product differentiation », *Management Science*, vol. 43, n° 1, 1997, p. 40-53.
- [LEE 98] LEE H., TANG C., « Variability Reduction Through Operations Reversals », *Management Science*, vol. 44, n° 2, 1998, p. 162-171.

- [LEW 93] LEWIS R., *Activity-based costing for marketing and manufacturing*, Westport, Conn., 1993.
- [MAC 96] MACDUFFIE J.-P., SETHURAMAN K., FISHER M.-L., « Product variety and manufacturing performance : Evidence from the international automotive assembly plant study », *Management Science*, vol. 42, n° 3, 1996, p. 350-369, March.
- [MAR 96] MARTIN M., ISHII K., « Design for Variety : A Methodology For Understanding The Costs Of Product Proliferation », *Proceedings of 1996 ASME Design Engineering Technical Conferences, August 18-22, Irvine, California*, , 1996.
- [MAR 97] MARTIN M., ISHII K., « Design for Variety : Development of Complexity Indices and Design Charts », *Proceedings of 1997 ASME Design Engineering Technical Conferences, Sept. 14-17, Sacramento, CA*, , 1997.
- [MAR 99] MARTIN M., *Design for Variety : A methodology for developing Product Platform Architectures*, Thèse de Doctorat, Stanford University, 1999.
- [MAR 00] MARTIN M., ISHII K., « Design for variety : A Methodology for Developing Product Platform Architectures », *Proceedings of DETC2000, 2000 ASME Design Engineering Technical Conferences*, Sept. 10-13, Baltimore, MD, 2000.
- [SIM 00] SIMPSON T., MAIER J.-R., MISTREE F., « Product platform design : method and application », *Res Eng Design*, vol. 13, 2000, p. 2-22.
- [STA 97] STADZISZ P., *Contribution à une Méthodologie de Conception Intégrée des Familles de Produits pour l'assemblage*, Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté, 1997.
- [STA 98] STADZISZ P., HENRIOUD J., « An integrated approach for the design of multi-product assembly systems », *Computers in Industry*, vol. 36, 1998, p. 21-29.
- [SWA 98] SWAMINATHAN J., TAYUR S., « Managing broader product lines through delayed differentiation using vanilla boxes », *Management Science*, vol. 44, n° 12, 1998, p. 161-172.
- [SWA 99] SWAMINATHAN J., TAYUR S., « Managing design of assembly sequences for product lines that delay product differentiation », *IIE Transactions*, vol. 31, 1999, p. 1015-1026.
- [TAR 98] TARONDEAU J.-C., *Stratégie Industrielle : Seconde édition.*, Collection Gestion, Vuibert, 1998.
- [THO 00] THONEMANN U., BRANDEAU M., « Optimal commonality in component design », *Operations Research*, vol. 48, n° 1, 2000, p. 1-19.
- [TWE 00] TWEDE D., CLARKE R., TAIT J., « Packaging Postponement : A Global Packaging Strategy », *Packaging technology and science*, vol. 13, 2000, p. 105-115.
- [YIG 02] YIGIT A., GALIP-ULSOY A., ALLAHVERDI A., « Optimizing modular product design for reconfigurable manufacturing », *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 13, 2002, p. 309-316.
- [YU 98] YU J., GONZALEZ-ZUGASTI J., OTTO K., « Product architecture definition based upon customer demands », *Proceedings of 1998 DETC ASME Design Theory and Methodology Conference*, Atlanta, GA, 1998.
- [ZAM 99a] ZAMIROWSKI E., OTTO K., « Identifying product portfolio architecture modularity using function and variety heuristics », *Proceedings of the 11th International Conference on Design Theory and Methodology*, 1999, ASME Design Engineering Technical Conferences, Las Vegas, Nevada, September 12-15.

[ZAM 99b] ZAMIROWSKI E., OTTO K., « Product portfolio architecture definition and selection », *International Conference on Engineering Design*, 1999, ICED 99 Munich, August 24-26.

[ZIN 90] ZINN W., « Should we assemble products before an order is received ? », *Business Horizons*, March-April, 1990, p. 70-73.

Reçu le : 15 janvier 2002

Accepté après révisions le : 11 février 2004