

## Conception d'assemblages pour la customisation de masse

### Design of assembly for mass customization

Bruno Agard \*, Michel Tollenaere

Laboratoire GILCO, 46, avenue Félix Viallet, 38031 Grenoble, France

Reçu le 15 novembre 2001; accepté le 7 décembre 2001

---

#### Résumé

L'article présenté ici porte sur la conception des composants et des assemblages pour la personnalisation de masse de produits en différenciation retardée. Afin de fabriquer des produits avec une large diversité commerciale, deux approches sont étudiées : la conception modulaire qui vise à multiplier les cas d'utilisation des composants dans les produits personnalisés, et la différenciation retardée qui vise à retarder au plus tard dans le processus de production le point qui différencie le produit ou le processus. Un cas industriel est présenté qui rend nécessaire la conception modulaire et la différenciation retardée : dans un contexte client/fournisseur, le fournisseur doit répondre en un court délai (juste à temps) et fournir une production diversifiée totale qui est livrée dans l'ordre souhaité par le client. © 2002 Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. All rights reserved.

#### Abstract

This paper focuses on the design of components and assemblies for mass customization with product delay differentiation (postponement). In order to manufacture products with a wide diversity, two approaches are proposed: modular design which aims at multiply components use cases in customized products, and postponement which aims to delay to the latest moment the point that differentiates the product or the process. An industrial case is presented which requires both modular design and postponement, in a contractor/supplier context, where the supplier must respond in a short delay time and provide a total diversified production which is deliver in the order wished by the contractor. © 2002 Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. All rights reserved.

*Mots-clés* : Conception modulaire ; Familles de produit ; Différenciation retardée ; Conception pour l'assemblage ; Faisceaux électriques

*Keywords* : Modular design; Product families; Postponement; Design for assembly; Electrical harnesses

---

#### 1. Introduction

Dans un marché concurrentiel, visant la satisfaction des clients, les fabricants sont amenés à répondre à des besoins fonctionnels variés par des réponses individuelles [1], de manière à mieux cibler 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 à chaque client.

Les fabricants sont donc conduits à fournir une grande quantité de produits tous différents pour satisfaire un en-

semble de besoins clients. Pour le fabricant, cette diversité commerciale doit être maîtrisée pour ne pas mener à une coûteuse diversification du process [2]. 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 [3]. 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.

Le travail présenté propose une méthodologie, appuyée sur un algorithme visant à retarder le point de différenciation d'un produit à forte diversité pour lequel on souhaite pouvoir fournir individuellement chaque option et variante en minimisant le coût de gestion des références, le tout

---

\* Correspondance et tirés à part.

Adresses e-mail : bruno.agard@gilco.inpg.fr (B. Agard),  
michel.tollenaere@gilco.inpg.fr (M. Tollenaere).

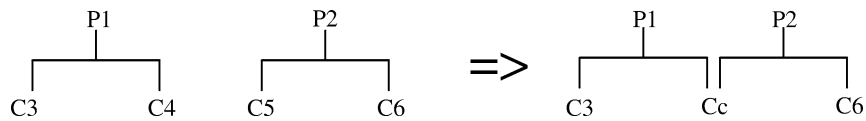


Fig. 1. Commonnalité de composants.

Fig. 1. Components commonality.

devant être assemblé sous contrainte d'un temps maximal fixé par avance.

Cet article est partagé en 3 parties. La partie 2 présente un état de l'art succinct sur la conception de produits à forte diversité. La partie 3 présente un problème particulier ainsi qu'une première proposition de résultats, la partie 4 permet de conclure et de proposer des perspectives.

## 2. Conception de produits à forte diversité

Pour satisfaire des besoins diversifiés, différentes solutions sont disponibles. Un extrême étant la standardisation, qui rend possible la satisfaction d'un ensemble de besoins avec un produit unique par exemple en électroménager ou en microinformatique où la personnalisation s'effectue par le logiciel. Un autre extrême consiste en la fabrication sur mesure visant à la satisfaction stricte de chaque besoin, cas des satellites par exemple.

La majorité des produits industriels se situe à un stade intermédiaire entre ces deux solutions et possède des éléments standards et des éléments spécifiques assemblés de manière plus ou moins spécifique.

En ce sens, il est possible de distinguer deux stratégies de conception supportant la diversité des produits : la conception modulaire et la différenciation retardée.

### 2.1. Conception modulaire

La conception modulaire consiste à réaliser des éléments du produit avec des surcapacités fonctionnelles (capables de satisfaire un ensemble de besoins) tout en étant interchangeables : les modules. La flexibilité d'un module (le nombre de ses cas d'emploi) dépend de ses surcapacités fonctionnelles qui peuvent être un potentiel significatif d'économies. Une analyse des effets de la commonnalité (généralisation de l'utilisation d'un composant à plusieurs produits finis, Fig. 1) sur les stocks a été effectuée par Fouque [4] qui s'est intéressé à déterminer l'augmentation maximale  $Cc^*$  du coût de  $Cc$  qui est acceptable,  $Cc$  pouvant être une généralisation dans l'utilisation de  $C3$  ou de  $C4$  ou bien un nouveau composant.

Il a mis en évidence une série de situations favorables à cette augmentation : augmentation du niveau de service, agrégation des risques sur les ventes des produits P1 et P2, augmentation de l'incertitude sur les demandes de P1 et P2, coût relatif des composants proches... De plus, la commonnalité permet d'augmenter la qualité et l'utilisation des ressources (effets d'apprentissages, grandes séries). Huang

et Kusiak [5] se sont intéressés à la production diversifiée en minimisant les coûts du produit. Ils proposent une décomposition matricielle du produit qui permet de distinguer les éléments interchangeables, standardisés et indépendants. Quatre types de modules ont été définis : module de base, module auxiliaire, module adaptatif, non module. Il en découle la définition de trois types de modularité capables de décrire l'ensemble des situations industrielles dans les assemblages : échange de composants, partage de composants, interface. La modularité dépend alors de deux caractéristiques du produit, (1) la similitude entre les architectures fonctionnelles et physiques, (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 [6]. Des recherches ont été menées dans le but de fournir des méthodes de conception de familles de produits [7,8]. Jiao et Tseng [9] ont proposé une méthodologie pour développer une architecture de familles de produits pour la customisation de masse en s'appuyant sur trois points de vue (fonctionnel, technique, physique). Ils proposent une classification de la variété, particulièrement en terme de besoin pour la customisation de masse, dans le but de développer des stratégies de conception. La variété du produit est définie comme la diversité des produits que le système de fabrication peut fournir sur le marché. La variété fonctionnelle et la variété technique sont définies. La variété fonctionnelle affectant directement la satisfaction du consommateur devra être encouragée (stratégie de diversité fonctionnelle). En revanche, la variété technique qui s'adresse principalement à la fabrication doit être minimisée pour réduire les coûts. Chaque type de modularité est caractérisé par une mesure particulière de ses interactions.

### 2.2. Différenciation retardée

Pour Lee et Tang [10], la différenciation retardée consiste 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. Ils proposent de reconcevoir le produit et/ou le process de manière à ce que le point de différenciation soit retardé le plus possible. Parmi les impacts de la différenciation

Tableau 1  
Types de postponement  
Table 1  
Kinds of postponement

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Postponement d'étiquetage   | L'entreprise vend un même produit sous différentes marques. Les étiquettes indiquant la marque sont posées au moment où arrive la commande. |
| Postponement de packaging   | Le distributeur prend en charge le packaging adapté à chaque consommateur.  |
| Postponement d'assemblage   | L'assemblage du produit démarre au moment où la commande client arrive.   |
| Postponement de fabrication | La réalisation du produit commence au moment où l'ordre du client arrive, le temps de réalisation fluctue.                                  |

retardée, les auteurs notent : la possibilité de réduire les stocks, un possible équilibrage du système de fabrication, une utilisation maximale des process industriels pour les éléments standardisés, une réduction dans les délais qui rendent possible la production synchrone. La dernière étape consiste à assembler le produit final désiré en joignant ensemble les modules standardisés disponibles sur stock.

#### 2.2.1. Facteurs permettant d'influencer la différenciation retardée

Différents instruments apparaissent simultanément avec la différenciation retardée (*postponement*) : la standardisation, la conception modulaire et la réorganisation des processus. Les auteurs des différents articles [10–12], utilisent le terme de *postponement* si l'assemblage du produit n'est pas encore terminé quand l'ordre du client arrive. Dans ce cas, la gestion des en cours est moins dépendante de la variabilité de la demande [12]. Contrairement à Lee qui définit la différenciation retardée en fonction de l'outil qui le supporte, Zinn [12] donne sa propre classification résumée dans le Tableau 1.

- La standardisation, consiste à utiliser un composant ou un processus commun à un maximum de produits. Ceci permet 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 possibilités de chaque composant en lui ajoutant des fonctions pas toujours utilisées. Les profits d'un tel exercice dépendent de l'investissement nécessaire à la standardisation des composants et des profits résultants des économies d'échelles. Lee et Tang [10] ont développé un instrument mathématique permettant de trouver le meilleur compromis.
- La conception modulaire, consiste à partager un produit en sous éléments plus ou moins autonomes appelés modules. Il est alors possible de réaliser les différents modules séparément. La différenciation dans le produit fini s'effectue lors de l'assemblage final par le choix des modules et de leur position dans le produit final.

- La restructuration des processus. Il s'agit de modifier le processus de réalisation du produit pour retarder l'étape qui cause la différenciation, cela peut être réalisé en inversant l'ordre de réalisation des étapes, ou en subdivisant des étapes pour écarter celle qui différencie les produits.

### 3. Contexte de conception

Le cas d'étude est issu d'un exemple industriel. Les travaux présentés ici ont été validés sur cet exemple.

#### 3.1. Architecture industrielle

Nous considérons l'architecture industrielle dans laquelle un sous-traitant doit fournir un assemblage à son donneur d'ordre. L'assemblage en question, un faisceau électrique, entre dans la composition d'un produit technique complexe commercialisé par le donneur d'ordre. Le faisceau électrique sert à l'alimentation en énergie et en information d'un ensemble d'éléments du produit final. Le produit commercialisé par le donneur d'ordre est un produit avec de nombreuses options et variantes. Le client possède un large choix de fonctions, qu'il peut associer comme il le désire, aux contraintes fonctionnelles près. Chaque client ayant des besoins fonctionnels différents, cela se traduit par un nombre très important de références de produits finis tous différents potentiellement réalisables. Parmi les fonctions désirées par le client, la plupart ont des implications directes sur le faisceau électrique. Ceci se traduit donc aussi, pour les faisceaux électriques, par un grand nombre de références d'assemblages tous différents.

Le fournisseur se demande comment réaliser cet ensemble de faisceaux électriques en s'appuyant sur un nombre limité de références de modules garant de coûts de fabrication acceptables.

##### 3.1.1. Coté donneur d'ordre

Le produit final est à très forte valeur ajoutée, chaque produit final est différent, ce qui implique pour les faisceaux électriques qu'ils ne doivent pas tous satisfaire les mêmes besoins.

Le processus de fabrication du donneur d'ordre est de type synchrone, sa ligne de production est telle qu'un produit ne peut en doubler un autre et que l'arrêt d'un produit arrête toute la chaîne. Compte tenu de l'incertitude inhérente aux processus amonts, l'ordre des produits sur la chaîne d'assemblage n'est connu que quelques heures avant le besoin en faisceaux électriques.

Le donneur d'ordre attend de son fournisseur, le faisceau exact c'est à dire répondant au strict besoin, car chaque élément du faisceau (utilisé ou non) représente un coût pour lui (matériaux, temps de mise en place) qu'il estime injustifié, ainsi qu'une preuve de non-qualité. De plus afin

de minimiser ses stocks, au niveau logistique, il exige d'être livré synchrone.

### 3.1.2. Côté fournisseur

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

Le faisceau électrique intervient dans le fonctionnement d'un grand nombre de fonctions du produit final, notamment parmi les fonctions pour lesquelles il existe des options et variantes. Ainsi, la composition de chaque faisceau est très dépendante de chaque produit final pour le client. Compte tenu du grand nombre de produits finaux qu'il est possible d'obtenir par la combinatoire de l'ensemble des fonctions susceptibles d'être modifiées, il en est donc de même pour les faisceaux, qui sont quasiment tous différents bien qu'obtenus à partir de constituants relativement standardisés.

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

Le sous traitant évolue dans un contexte multi-sites mondial, avec des sites délocalisés et des sites à proximité de son donneur d'ordre. Il est assez facile pour le sous traitant d'approvisionner ces sites de proximité en produits semi-finis.

Le fournisseur se demande comment produire un produit à forte diversité à livrer dans les conditions qui lui sont imposées.

## 3.2. Le faisceau électrique

### 3.2.1. Description

Un faisceau électrique se compose d'un ensemble de fils et de connecteurs, reliés entre eux, et qui visent à l'alimentation en énergie et en information de certains composants du produit final. Sachant que pour le produit final, il existe un grand nombre d'options et variantes, que le client choisi ou non, il en est de même pour les fonctions à réaliser par les faisceaux électriques.

Un certain nombre de contraintes sont cependant à prendre en compte : il existe des options pour lesquelles un choix fixe les paramètres sur une autre fonction, il est donc possible de distinguer différentes natures de contraintes :

- Contrainte d'inclusion :

*SI pack électrique, ALORS vitres électriques ET fermeture centralisée*

- Contrainte d'exclusion :

*SI toit ouvrant ALORS PAS antenne de toit*

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

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

- Contrainte de cohérence :

*SI climatisation version 3 ALORS alimentation électrique version 3*

Les faisceaux électriques à livrer sont réalisés à partir de l'assemblage d'un grand nombre de composants. La complexité est telle qu'il est impossible de les produire dans le temps imparti en partant des composants élémentaires.

Le fabricant décide alors de produire un certain nombre de sous-assemblages modulaires que nous appellerons « modules » par la suite. Ainsi, il lui suffira ensuite d'assembler les bons modules dans l'intervalle de temps à sa disposition.

Les modules en question seront achetés à l'extérieur ou réalisés dans une autre unité du même groupe et gérés sur stock. Le donneur d'ordre a une estimation de ses ventes moyennes, le fournisseur connaît alors une estimation de ses besoins en chaque module, ce qui lui permet d'avoir des stocks de modules, le temps de réalisation des modules n'entre alors plus dans le temps d'assemblage final qui nous intéresse.

De plus, le produit final fourni au client est très évolutif, avec des impacts sensibles au niveau des faisceaux électriques. Une version de faisceaux a une espérance de vie de quelques mois.

Enfin chaque faisceau est un produit de haute technicité soumis à de fortes contraintes (température, étanchéité, vibrations... ). En bref, un faisceau électrique peut être décrit par trois principales caractéristiques : forte diversité, très évolutif et technique.

### 3.2.2. Le découpage en modules

Les différents modules sont réalisés à partir de l'assemblage d'un grand nombre de composants de base (fils, connecteurs, clips, gaines d'étanchéité... ).

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

Suivant les fonctions choisies par le client, il n'y a pas les mêmes besoins en composants. Cependant la combinatoire des options et variantes donne une combinaison de faisceaux électriques différents très importante.

Considérons un faisceau pour lequel le produit final propose :

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

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

Si, pour une raison quelconque (mise en place, étanchéité, positionnement, fonctionnement...), le choix est fait de réaliser un pré-assemblage concernant les fonctions  $F_1$ ,  $F_2$  et  $F_3$  qui peuvent — ou non — être sélectionnées par le client, compte tenu du fait que l'on veut pouvoir satisfaire l'ensemble des demandes possibles, et cela au juste nécessaire, sans satisfaire de fonctions non souhaitées par le client, si de plus, chacune des fonctions  $F_1$ ,  $F_2$  et  $F_3$  a un impact sur l'assemblage A, alors il faudra créer jusqu'à 7 ( $2^3 - 1$ ) références en assemblage, à savoir  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ,  $F_1F_2$ ,  $F_1F_3$ ,  $F_2F_3$  et  $F_1F_2F_3$  de manière à pouvoir assurer l'ensemble de la diversité commerciale souhaitée par le donneur d'ordre.

Cependant, compte tenu des contraintes fonctionnelles entre les différentes fonctions, le nombre de références de modules pourra être inférieur.

Or cette diversité de modules à posséder en stock à un coût pour le fabricant qui dépend directement du nombre de références à gérer, et qu'il faudra limiter au maximum. De plus, le produit fourni au client est très évolutif, effets de mode, renouvellement de la gamme... avec des impacts sensibles au niveau des modules. Le choix judicieux des modules à créer est donc un problème important, et trouver une solution réalisable n'est pas simple.

#### 4. Le problème de conception

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

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

##### 4.1. Standardisation

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

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

Il faut alors trouver un équilibre entre les surcoûts liés aux éléments non utilisés et les bénéfices provenant de la réduction de la diversité [1]. Une approche de ce type est actuellement utilisée par le fournisseur [13].

##### 4.2. Conception modulaire

Une autre approche utilisée par le fournisseur consiste à créer des modules enveloppes, qu'il suffira par la suite d'assembler entre eux. Il s'agit d'appliquer la méthode précédente (standardisation) à un niveau local des modules. Chaque module est alors réalisé par l'assemblage d'un certain nombre de sous-modules standards appelés modules industriels (MI). Cela permet de diminuer l'effet enveloppe et les coûts associés à chaque module. D'un autre côté, il est nécessaire de prendre en compte le temps d'assemblage final des MI entre eux, et il reste un surcoût dû aux fonctions non utilisées. Ces modules seront réalisés dans des sites délocalisés du fournisseur, là où les coûts de main d'œuvre sont plus rentables, ce qui permet de plus de lisser la charge de fabrication.

Le but de cet article est de présenter un algorithme qui permet de trouver une décomposition de ce type, mais en créant uniquement des modules justes nécessaires. Il nous reste à répondre à deux questions :

- Comment découper le faisceau en sous-ensembles ?
- Quels sont les modules industriels à créer ?

Pour cela, deux types de découpage modulaire ont été mis en œuvre :

1. Un découpage structurel qui s'appuie sur la structure physique du faisceau, c'est à dire que l'on regarde au niveau de la réalisation du faisceau quels sont les fils pour lesquels il est possible de réaliser des modules.
2. Un découpage fonctionnel qui recherche parmi les fonctions du faisceau celles qui peuvent être préassemblées dans un module.

Dans les deux cas il faut alors comparer les différents temps gagnés en assemblage final aux surcoûts générés par le nombre de références supplémentaires.

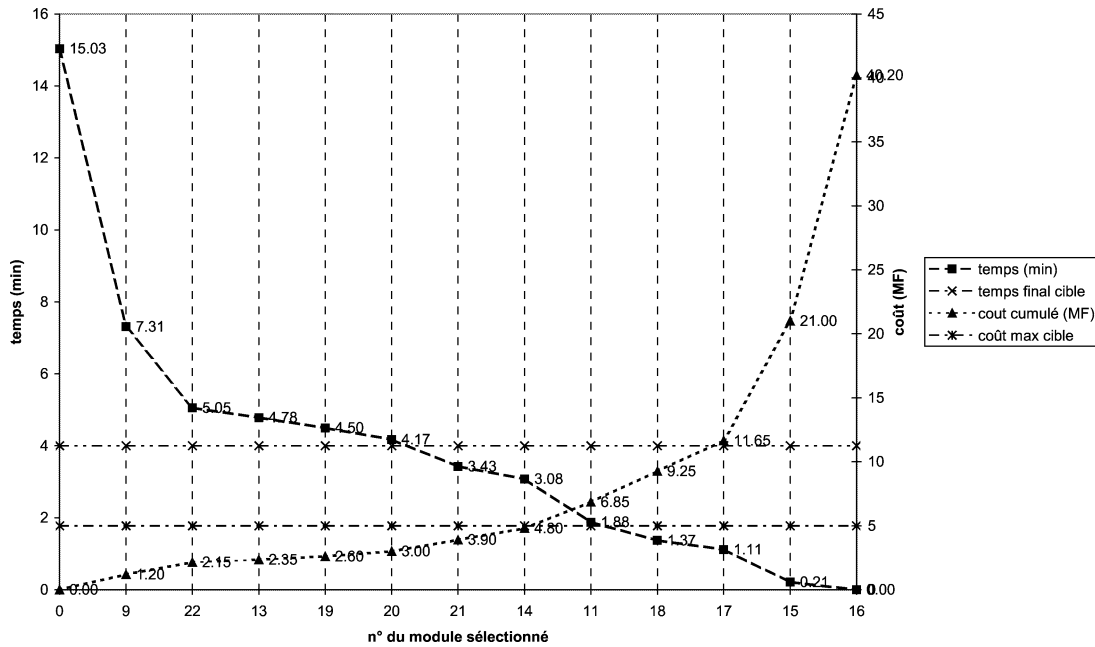


Fig. 2. Évolution des critères d'évaluation en fonction de la sélection des modules.

Fig. 2. Evolution of the evaluation criterion in function of the selection of modules.

#### 4.3. Premiers résultats

Sur le cas industriel, l'algorithme suivant a été appliqué :

- (1) détermination de l'ensemble des pré-assemblages candidats,
- (2) pour chacun d'eux, calculer le coût induit ainsi que le temps gagné en assemblage final,
- (3) sélectionner le pré-assemblage qui a le meilleur ratio coût induit/temps gagné,
- (4) recommencer en (1) jusqu'à ce que le temps d'assemblage final soit inférieur à la limite fixée.

L'itération permet de produire récursivement les modules et sous-modules.

A partir d'un exemple représentatif, l'application de l'algorithme précédent a donné les résultats que l'on peut considérer sur la Fig. 2.

Cette figure représente en abscisse le numéro de module qui a été sélectionné (il contient la liste des éléments à assembler entre eux), en ordonnée les temps d'assemblages finaux obtenus ainsi que les coûts générés par la diversité des modules créés. Quatre courbes ont été représentées sur cette figure. Celle intitulée « temps (min) » représente le temps d'assemblage final restant à réaliser selon les spécifications du client. « Temps final » cible est la limite de temps d'attente acceptée par le client. « Coûts cumulés » montre les coûts subits par le fournisseur pour diminuer le temps d'as-

semblage final, enfin « Coût max cible » est l'investissement financier maximal envisagé par le fournisseur.

Parmi les faits à noter, il y a tout d'abord la baisse significative du temps d'assemblage obtenu qui part de la valeur maximale correspondant à l'assemblage réalisé au cas par cas, sans modules (le coût de gestion des références de modules est alors nul), pour aller jusqu'à un temps d'assemblage final nul, correspondant à l'achat de modules représentant l'ensemble des assemblages terminés (le coût de gestion des références de module est alors maximal puisque le fournisseur doit acheter l'ensemble des références d'assemblages réalisables).

De même, l'évolution du critère de sélection (Fig. 3) ramené dans la même unité budgétaire (le temps gagné est multiplié par la différence des taux horaires d'assemblage final et de réalisation des modules) montre que jusqu'à un certain moment la réalisation des pré-assemblages est très intéressante en ce que le temps gagné ne génère pas de surcoûts importants alors que le temps gagné en assemblage final continue d'évoluer.

Il y a même la possibilité de faire des bénéfices à acheter des modules (jusqu'à une certaine limite), étant donné la différence des coûts de main d'œuvre lors de l'assemblage final ou lors de la réalisation des modules pour stock.

Passé cette valeur, il apparaît que pour gagner un faible temps en assemblage final, il y a une forte augmentation des coûts générés, ce qui laisse penser en l'existence d'un ensemble de pré-assemblages optimal.

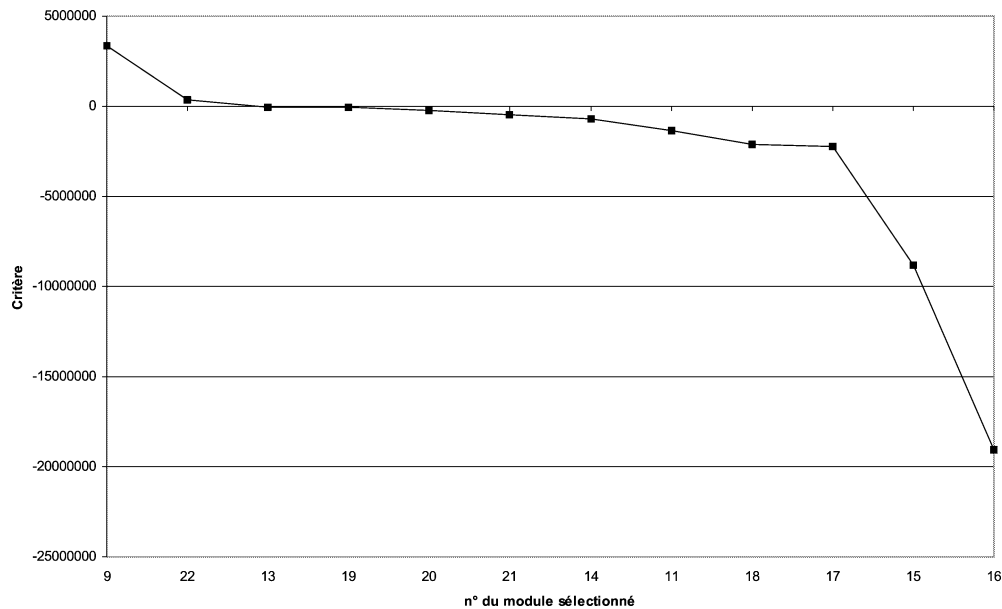


Fig. 3. Évolution du critère de sélection.

Fig. 3. Evolution of the selection criterion.

## 5. Conclusions et perspectives

Les premiers résultats (Figs. 2 et 3) montrent qu'il existe un fort potentiel d'amélioration possible en permettant une forte diminution du temps d'assemblage final par la création de modules de constituants réalisés à bas prix, et cela sans diminuer la diversité des produits finaux mis sur le marché.

La première évolution envisagée est un choix plus judicieux de l'ensemble des modules en recherchant un optimum global plutôt qu'une suite d'optimum locaux, une expérimentation de type Branch & Bound est actuellement à l'étude.

Suite à ces résultats, une tolérance sur l'effet enveloppe va être ajoutée pour tenter de diminuer le nombre de références créées par la différenciation totale. L'effet d'enveloppe pourra porter sur les pourcentages prévisionnels de vente et prendre en compte les coûts des composants considérés.

Prise en compte des paramètres économiques globaux :

- évaluer l'effet enveloppe,
- standardisation partielle.

Robustesse :

- La solution est-elle robuste envers les évolutions de fonctions ?
- La solution est-elle robuste par rapport à une évolution significative des pourcentages réels de vente ?

La validité des résultats est confrontée en permanence avec le cas industriel sur lequel s'appuie la problématique.

## Références

- [1] J.-C. Tarondeau, *Stratégie Industrielle*, Collection Gestion, Ed. Vuibert, 1998.
- [2] M. Martin, I. Kosuke, Design for variety : Development of complexity indices and design charts, in: *Proceedings of 1997 ASME Design Engineering Technical Conferences*, Sacramento, CA, September 14–17, 1997, pp. 1–9.
- [3] P. Child, R. Diederichs, F.-H. Sanders, S. Wisniewski, The management of complexity, *Sloan Management Review* (Fall 1991) 73–80.
- [4] T. Fouque, A la recherche des produits flexibles, *Revue Française de Gestion* 123 (mars-avril-mai 1999) 80–87.
- [5] C.C. Huang, A. Kusiak, Modularity in design of products and systems, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans* 28 (1) (1998) 66–77.
- [6] A. Kusiak, *Engineering Design : Products, Processes, and Systems*, Academic Press, San Diego, CA, 1999.
- [7] J.P.J. Newcomb, B. Bras, D.W. Rosen, Implications of modularity on product design for the life cycle, *Journal of Mechanical Design* 120 (1998) 483–490.
- [8] J. Gonzalez-Zugasti, K. Otto, J. Baker, Assessing value for product family design and selection, in: *Proceedings of the 25th Design Automation Conference*, ASME Design Engineering Technical Conferences, Las Vegas, NV, September 12–15, 1999.
- [9] J. Jiao, M. Tseng, A methodology of developing product family architecture for mass customization, *Journal of Intelligent Manufacturing* 10 (1999) 3–20.
- [10] H.L. Lee, C.S. Tang, Modelling the costs and benefits of delayed product differentiation, *Management Science* 43 (1) (1997) 40–53.
- [11] J.M. Swaminathan, S. Tayur, Managing design of assembly sequences for product lines that delay product differentiation, *IIE Trans.* 31 (1999) 1015–1026.
- [12] W. Zinn, Should we assemble products before an order is received, *Business Horizons* (March–April 1990) 70–73.
- [13] O. Briant, *Étude théorique et numérique du problème de la gestion de la diversité*, Thèse de doctorat, Grenoble, INPG, 2000.