

Conception d'assemblages pour la customisation de masse

Bruno Agard, Michel Tollenaere

Laboratoire GILCO-INPG

46, avenue Félix Viallet

38031 Grenoble

E-mail: [agard|tollenaere]@gilco.inpg.fr

Résumé

L'article présenté ici pointe 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 diversité commerciale large, 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.

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.

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 [12], 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 ensemble de besoins clients. Pour le fabricant, cette diversité commerciale doit être maîtrisée pour ne pas mener à une coûteuse diversification du process [9]. 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 [2]. 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 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, allant de 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, à 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 extrêmes 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 commonalité¹ sur les stocks a été effectuée par Fouque [3] qui s'est intéressé à déterminer l'augmentation maximale Cc^* du coût de Cc qui est acceptable (Cf Fig : 1)

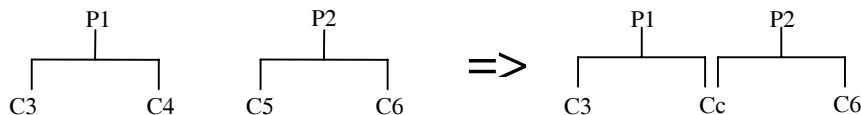


Figure 1 : Commonalité de composants.

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

Huang & 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. 4 types de modules ont été définis : module de base, module auxiliaire, module adaptatif, non module.

Il en découle la définition de 3 types de modularité capables de décrire l'ensemble des situations industrielles dans les assemblages : échange de composants, partage de composants, interface.

Ils en ont déduit que la modularité dépend de deux caractéristiques du produit, 1- la similitude entre les architectures fonctionnelles et physiques, 2- la minimisation des interactions entre les composants physiques.

¹ Commonalité : généralisation de l'utilisation d'un composant à plusieurs produits finis [3].

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 [7]. Des recherches ont été menées dans le but de fournir des méthodes de conception de familles de produits [10; 4].

Jiao & Tseng [6] 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 Différentiation retardée

Pour Lee et Tang [8], 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 retardée, ils notent : la possibilité de réduire les stocks, un possible équilibrage du système de fabrication, une utilisation maximale des processus 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 Différentes réponses possibles

Quatre concepts apparaissent simultanément avec la différenciation retardée : la standardisation, la conception modulaire, la réorganisation des processus, le *postponement*. Tandis que les 3 premiers concepts sont des instruments pour supporter la différenciation retardée, le *postponement* est un synonyme.

Les auteurs des différents articles [8; 11; 13], utilisent le terme de *postponement* comme un synonyme de la différenciation retardée. En d'autres termes, il s'agit 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 [13].

Contrairement à Lee qui définit la différenciation retardée en fonction de l'outil qui le supporte, Zinn [13] donne sa propre classification résumée dans le tableau 2

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.

Table 2 : types de *postponement*.

2.2.1.2 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 & Tang [8] ont développé un instrument mathématique permettant de trouver le meilleur compromis.

2.2.1.3 L'utilisation de modules indépendants

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.

2.2.1.4 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 Notre problème de conception

Le cas d'étude est issu d'un exemple industriel qui sera présenté lors du colloque. Les travaux présentés ici ont été validés sur cet exemple que nous ne pouvons développer pour des raisons de confidentialité. Notre présentation s'appuiera donc sur un exemple ludique : la fourniture d'un village gaulois diversifié en un temps limité.

3.1 Concept

Le village gaulois se compose d'un plateau de jeu sur lequel on dépose des personnages, des éléments de décoration et les bâtiments constitutifs du village. Il existe un certain nombre de personnages, d'éléments de décoration et de bâtiments que le client peut choisir d'incorporer ou non sur son plateau de jeu.

L'offre commerciale se présente de la manière suivante : le client entre dans le magasin, sélectionne l'ensemble des éléments qu'il souhaite pour son village gaulois, et repart au bout d'une demi-heure avec son village gaulois assemblé contenant uniquement les éléments qu'il a sélectionnés.

Un certain nombre de contraintes sont à prendre en compte : le plateau de jeu ayant une surface limitée, on ne peut mettre dessus qu'un certain nombre de bâtiments. Il existe un minimum de bâtiments officiels imposés, un choix est cependant proposé dans chaque type de bâtiment officiel où il est possible de ne prendre qu'une seule variante.

En ce qui concerne les personnages de jeu, il faut au moins un personnage par bâtiments, un large choix de personnages différents est néanmoins disponible. En revanche tous les éléments de décoration sont optionnels.

Un tel concept commercial permet que chaque client reparte du magasin avec un village gaulois unique et personnalisé qui lui convienne.

3.1.1 Offre

Le coût de la boîte de jeu est directement liée aux éléments sélectionnés par le client. Les éléments du village gaulois sont réalisés à partir de composants de base à bas coût de revient.

Cependant, pour fournir la boîte dans le temps imparti, le commerçant n'a pas le temps de sélectionner chaque composant de base et de réaliser les collages nécessaires à la réalisation des personnages, bâtiments et éléments de décoration. Il va donc tenter de s'appuyer sur un nombre limité de préassemblages (que nous appellerons modules par la suite), préparés par avance par une main d'œuvre à bas coût de revient.

De plus, de manière à satisfaire sa clientèle, le commerçant se doit de répondre à ses clients dans l'ordre d'arrivée, et ne peut prendre connaissance d'une commande que lorsque la précédente est terminée (production synchrone avec l'ordre d'arrivée des clients).

Compte tenu du grand nombre de produits finaux qu'il est possible d'obtenir par la combinatoire de l'ensemble des éléments susceptibles d'être sélectionnés par le client, un choix judicieux des modules à préparer à l'avance s'impose.

Le concept de village gaulois se base sur un marché connu par les fabricants de jouets, ce qui permet au commerçant d'établir un plan prévisionnel de ses besoins en différents composants de base, et lui permet de dimensionner ses stocks.

3.1.2 Les modules à produire

Les différents modules (bâtiments, toitures, murs, ...) sont réalisés à partir de l'assemblage d'un grand nombre d'éléments (briques, tuiles, fenêtres, ...).

Si, pour une raison quelconque (mise en place, esthétique, positionnement, mode, ...), le choix est fait de réaliser un pré-assemblage concernant les éléments E_1 , E_2 et E_3 qui peuvent - ou non - être sélectionnés par le client, compte tenu du fait que l'on veut pouvoir satisfaire l'ensemble des demandes possibles, et cela au juste nécessaire, sans ajouter d'éléments non souhaités par le client, si de plus, chacun des éléments E_1 , E_2 et E_3 a un impact sur le même module A, alors il faudra créer jusqu'à 7 ($2^3 - 1$) références en assemblage pour le module A, à savoir E_1 , E_2 , E_3 , E_1-E_2 , E_1-E_3 , E_2-E_3 et $E_1-E_2-E_3$, de manière à pouvoir assurer l'ensemble de la diversité commerciale souhaitée.

Par exemple, le module A peut être une habitation constituée d'une maison (E_1), d'un jardin (E_2) et d'un vergé (E_3).

Cependant, compte tenu des contraintes entre les différents éléments du village gaulois, le nombre de références du module A pourra être inférieur, dans le cas par exemple où deux éléments sont exclusifs, par exemple : toit en bois OU (exclusif) toit en paille, ou des fonctions inclusives par exemple : SI poissonnerie ALORS [étal ET poissons ET personnage].

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. Une version de module donné a une espérance de vie d'environ trois mois.

3.2 Le problème de conception

Le problème qui intéresse le commerçant 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 d'assemblage du village), que le client désire un village unique et cela au coût minimum.

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

3.2.1 Standardisation

Il s'agit de concevoir un nombre limité de modules pouvant être assemblés sur la totalité des produits finis du village gaulois. 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, puisque des éléments ne sont pas nécessaires pour tous les clients, ce qui a un coût pour le commerçant. C'est à dire que pour satisfaire un ensemble de clients, le

commerçant peut approvisionner un module standard (la poissonnerie par exemple) qui contient l'ensemble des désirs des clients potentiels (un bâtiment, un étal, un poissonnier, une poissonnière et un chien). Cependant un tel module contient pour chaque client des éléments qu'il n'a pas nécessairement demandés (le chien qui garde la poissonnerie), et qui ont un coût pour le commerçant.

En revanche un module donné est moins coûteux si le commerçant 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].

3.2.2 Conception modulaire

Une autre approche utilisable par le commerçant consiste à créer des sous-modules enveloppe, 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. 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 sous-modules entres eux, et il reste un surcoût dû aux fonctions non utilisées.

Par exemple un module peut être la poissonnerie, et les sous-modules associés le bâtiment, l'étal, le poissonnier, la poissonnière et le chien. De même récursivement, le bâtiment peut être le module, et les sous-modules associés les façades de murs, les portes et fenêtres, et même les briques qui constituent les murs.

Le but de cet article est de présenter un algorithme qui permet de trouver une décomposition de ce type.

3.3.3 Premiers résultats

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

1. Détermination de l'ensemble des modules candidats,
2. Pour chacun d'eux, calculer le coût induit ainsi que le temps gagné en assemblage final,
3. Sélectionner le module 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 figure 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'assemblage 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 final possible d'obtenir. Celui-ci 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 l'on doit acheter l'ensemble des références d'assemblages réalisables).

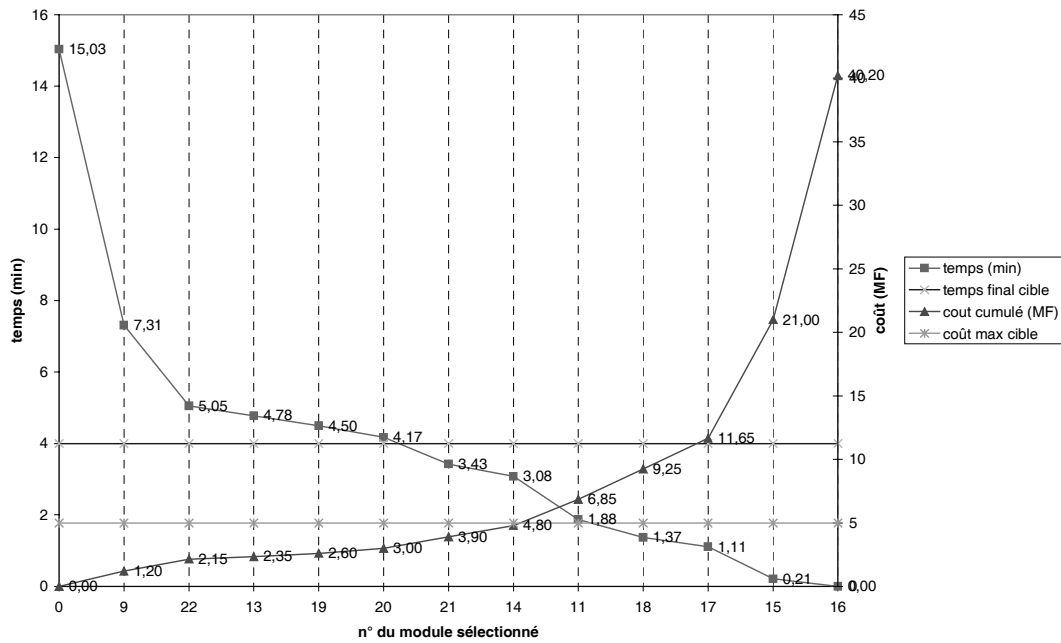


Figure 2 : Evolution des critères d'évaluation en fonction de la sélection des modules.

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.

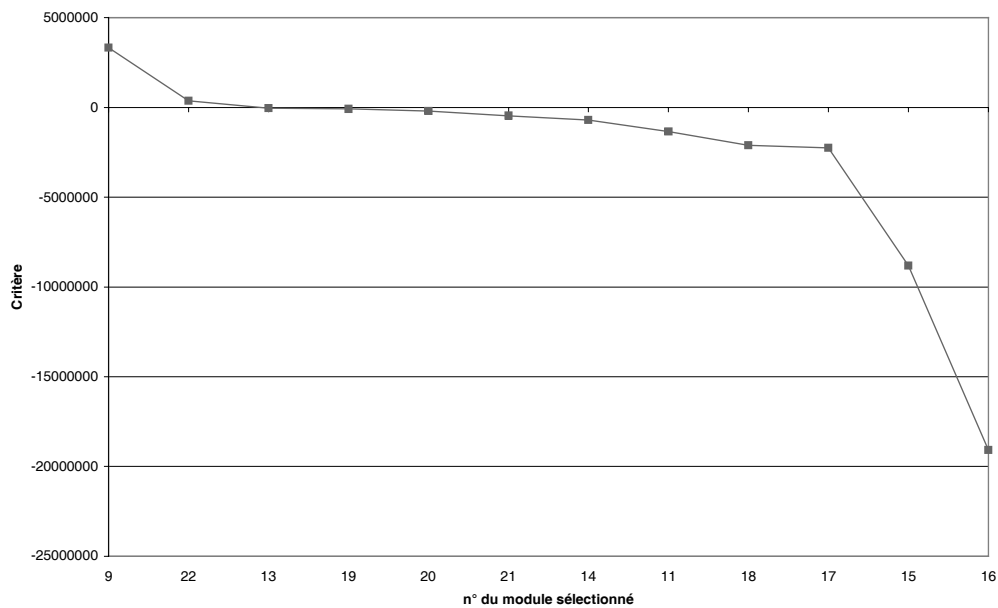


Figure 3 : Evolution du critère de sélection.

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.

4 Conclusions et perspectives

Les premiers résultats (Fig 2 et Fig 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 & Band 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.

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

Références

- [1] **Briant O.** — *Etude théorique et numérique du problème de la gestion de la diversité*, Thèse de Doctorat, Grenoble, INPG (2000).
- [2] **Child P., Diederichs R., Sanders F.-H. and Wisniowski S.** — The Management of Complexity, *Sloan Management Review*, Fall, pp. 73-80, (1991).
- [3] **Fouque T.** — A la recherche des produits flexibles, *Revue Française de Gestion*, mars-avril-mai, No. 123, pp. 80-87, (1999).
- [4] **Gonzalez-Zugasti J., Otto K. and Baker J.** — Assessing value for product family design and selection. *Proceedings of the 25th Design Automation Conference. ASME Design Engineering Technical Conferences*, Las Vegas, Nevada, September 12-15, (1999).
- [5] **Huang C.C. and Kusiak A.** — Modularity in design of products and systems, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Part A : Systems and Humans, Vol. 28, No. 1, pp. 66-77, (1998).
- [6] **Jiao J. and Tseng M.** — A methodology of developing product family architecture for mass customization, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 10, pp. 3-20, (1999).
- [7] **Kusiak A.** — *Engineering Design : Products, Processes, and Systems*. Academic Press, San Diego, CA, (1999).
- [8] **Lee H.L. and Tang C.S.** — Modelling the costs and benefits of delayed product differentiation. *Management Science*, 43(1), p. 40-53, (1997).
- [9] **Martin M. and Kosuke I.** — Design for Variety : Development of Complexity Indices and Design Charts. *Proceedings of 1997 ASME Design Engineering Technical Conferences*, Sept. 14-17, Sacramento, CA, pp.1-9, (1997).
- [10] **Newcomb JP.J., Bras B. and Rosen D. W.** — Implications of Modularity on Product Design for the Life Cycle. *Journal of Mechanical Design*, 120, p. 483-490, (1998).
- [11] **Swaminathan J.M. and Tayur S.** — Managing design of assembly sequences for product lines that delay product differentiation , in : *IIE Transactions*, 31, p. 1015-1026, (1999).
- [12] **Tarondeau J.-C.** — *Stratégie Industrielle, Collection Gestion*, Ed. Vuibert (1998).
- [13] **Zinn W** — Should we assemble products before an order is received. *Business Horizons*, March-April, p. 70-73, (1990).