

CONCEPTION MODULAIRE DE PRODUITS A FORTE DIVERSITE.

Bruno Agard

GILCO, 46, av Félix Viallet, 38 000 Grenoble

Michel Tollenaere

GILCO, 46, av Félix Viallet, 38 000 Grenoble

Résumé :

Cet article pointe sur la conception de faisceaux électriques pour la customisation de masse avec différenciation retardée. Dans le but de fabriquer une large diversité de produits, deux algorithmes sont proposés qui utilisent tous les deux une représentation générique des faisceaux électriques avec options, variantes et versionnement dans le but de produire chaque faisceau électrique en un court délai. Un cas industriel est présenté dans un contexte donneur d'ordres / fournisseur, où le fournisseur doit répondre en un court délai et fournir un produit à diversité totale, le tout devant être livré dans l'ordre imposé par le donneur d'ordres. Dans ce cas particulier, deux algorithmes différents sont appliqués et comparés.

Mots clés : Faisceau électrique, Conception de familles de produits, Assemblage de produit.

1 Introduction

Les faisceaux électriques sont des ensembles de câbles utilisés pour connecter différents éléments dans un système électromécanique ou électronique. Les fonctions d'un faisceau électrique sont de fournir de l'énergie électrique et des signaux électroniques à différents périphériques. Un exemple de faisceau électrique dans le contexte automobile est fourni figure 1.

Un faisceau électrique est composé de différents types d'éléments :

- Un ensemble de câbles utilisés dans le but de transmettre de l'information et de l'énergie.
- Des connecteurs nécessaires pour relier le faisceau électrique aux autres éléments.
- Les épissures sont des soudures entre les câbles.
- Les dérivations sont des endroits du faisceau électrique où des câbles changent de direction.
- Des gaines sont quelquefois positionnées sur des zones du faisceau électrique où il est nécessaire de résister à certaines contraintes telles que vibrations, chocs, frottements, étanchéité, ...
- Des clips sont installés à différents endroits sur le faisceau électrique pour fixer le faisceau électrique sur le produit final.

Tout ces éléments sont ici pour répondre à un grand nombre de fonctions individuelles. Dans un faisceau électrique moyen dans le contexte automobile, la famille de faisceau peut être composée de 400 références de câbles, 120 connecteurs, 50 dérivations et 30 épissures, dans le but de réaliser approximativement 15 fonctions différentes avec un maximum de 9 versions pour quelques une de ces fonctions.

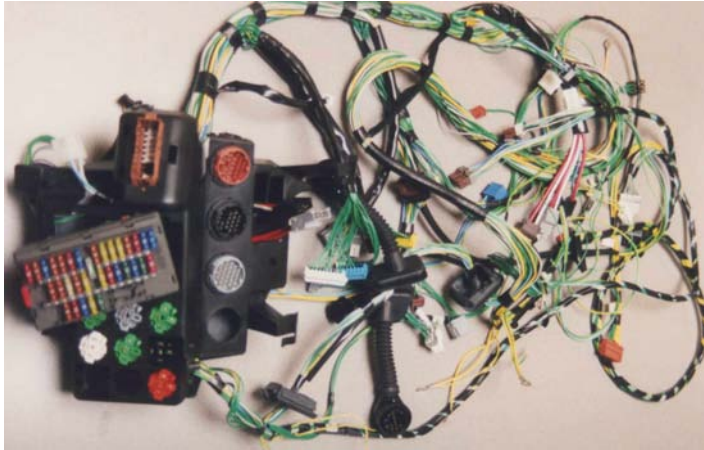


Figure 1: *Un faisceau électrique automobile.*

Un faisceau électrique est un composant relativement difficile à fabriquer avec des contraintes économiques. La difficulté provient de la diversité, de nombreux composants du produit final ont besoin d'être connectés au faisceau électrique afin de recevoir de l'énergie et/ou de l'information. Néanmoins certains composants peuvent être optionnels, nombreux ont différentes variantes, et de plus ces composants peuvent se décliner en différentes versions. En général

différentes variantes et différentes versions d'un composant n'ont pas les mêmes besoins vis à vis du faisceau électrique. A chaque fois que ces besoins changent (intensité du courant, type de connecteurs, nombre de câbles, ...) le faisceau électrique a besoin d'être adapté.

Considérons un véhicule pour lequel il y a 6 versions de transmission, 7 versions de moteurs plus 5 versions d'ABS qui peuvent être installées ou non et 2 versions de contrôleur de vitesse qui peuvent être installées ou non. Pour ce véhicule particulier, nous devons être capable de produire $6*7*9*6*3=972$ combinaisons différentes de faisceau électrique !

En réalité le nombre de faisceau électrique à produire est inférieur car il existe des contraintes entre les différents composants. Par exemple on ne peut installer qu'une seule version de moteur sur chaque véhicule, il n'y a pas d'ABS sur les petits véhicules ... d'où l'existence de contraintes exclusives et inclusives telles que :

SI toit ouvrant ALORS PAS antenne de toit.

La difficulté vient aussi de la fabrication; le donneur d'ordres veut le faisceau électrique exact (qui ne contient pas de composants non nécessaires qu'il refuse de payer) et il veut être livré dans un ordre spécifique et en une courte période de temps.

L'assemblage d'un grand nombre de composants est nécessaire pour réaliser chaque faisceau électrique à livrer. La complexité d'un faisceau électrique est telle qu'il est impossible de le fabriquer en partant des composants élémentaires en moins de temps que ce dont dispose le sous-traitant.

Pour réaliser tous ces faisceaux électriques, le fournisseur doit prendre en compte à la fois la grande diversité et le court délai de livraison. Il décide alors de réaliser une certaine quantité de sous-assemblages modulaires qu'il assemblera spécifiquement pour chaque produit final pendant l'intervalle de temps à sa disposition.

Les pré-assemblages modulaires peuvent être assemblés n'importe où, loin de la ligne d'assemblage final du véhicule (où la main d'œuvre est moins chère) dans des sites délocalisés, alors que l'assemblage final sera effectué dans des usines proches. Le temps de fabrication le plus important pour la synchronisation sera alors l'assemblage final dans l'usine de proximité. La diversité sera supportée par la bonne sélection de modules pré-assemblés dans les sites distants; le temps de fabrication de ces modules n'entre alors pas dans le "temps d'assemblage final" qui nous intéresse dans cette étude. Le donneur d'ordres a une estimation de ses ventes moyennes; le sous-traitant connaît alors une estimation de ses besoins dans

chaque type de modules par période; ceci va lui permettre de dimensionner chaque stock sur chaque période.

Ceci résulte en un nombre significatif d'alternatives de produits afin de répondre à un besoin fonctionnel diversifié. Pour le producteur, cette diversité commerciale doit être contrôlée sous peine de conduire à une coûteuse diversification des processus. Nécessairement la diversité commerciale ne peut être assumée durablement que si elle s'appuie sur une faible diversité technique qui garantie des coûts de développement et de management acceptables (Child & al, 1991).

Dans un contexte de conception de produits, cette recherche pointe sur la description d'un problème de conception de produits à grande diversité, avec composants modulaires et différenciation retardée pour la fabrication de faisceaux électriques. Cet article se compose de la manière suivante : la partie 2 décrit le contexte de conception pour la diversité. La partie 3 décrit le problème de cette recherche et comment il peut être résolu. Finalement la partie 4 expose les résultats obtenus grâce aux algorithmes décrits en partie 3.

2 Conception pour la diversité.

Considérant le grand nombre de faisceaux électriques à réaliser, l'intérêt a été orienté vers la conception de produit dans un contexte de forte diversité.

Pour satisfaire des besoins diversifiés, quelques solutions existent allant de la conception standardisée, qui offre la possibilité de satisfaire un ensemble de besoins avec un unique produit, à la conception spécifique qui a pour but la satisfaction stricte de chaque besoin. La plupart des produits industriels sont à un niveau intermédiaire entre ces deux extrêmes. Il y a à la fois des éléments standards et des éléments spécifiques qui peuvent être assemblés de manière spécifique dans le produit final à livrer au consommateur.

Il est possible de distinguer deux politiques de conception de produits qui rendent possible la réalisation de différents produits en partant d'éléments standardisés. Ces politiques sont la conception modulaire et la différenciation retardée.

2.1 Conception modulaire

La flexibilité d'un produit est reliée au concept de conception modulaire et à l'utilisation d'éléments communs dans différents produits finis. La flexibilité d'un module (le nombre de ces cas d'emploi) dépend de ses surcapacités fonctionnelles et nécessite des interfaces standardisées.

Augmenter le nombre de cas d'emploi semble être un potentiel significatif d'économies. Fouque (Fouque, 1999) a réalisé une analyse qui montre les effets de la commonalité sur les coûts de stockage.

Huang et Kusiak (He & Kusiak, 1998) ont travaillé sur la conception modulaire dans le but de produire une large variété de produits à faible coût. Ils utilisent une représentation matricielle pour modéliser les interactions entre pièces et fonctions, une décomposition matricielle permet d'extraire les éléments interchangeables, standardisés et indépendants.

Par suite aux nombreuses implications de la conception modulaire dans toutes les activités de fabrication de produits, une grande quantité de travaux est venue apporter de la consistance à la conception de produits et de process. Il est possible de citer par exemple les travaux de He et Kusiak (He & Kusiak, 1997), qui proposent un algorithme de recherche taboo dans le but de concevoir un système d'assemblage pour produits modulaires qui équilibre la chaîne

d'assemblage. Dans le même genre, Huang et Kusiak (Huang & Kusiak, 1999) ont travaillé sur le développement de produits modulaires dans le but de minimiser les coûts de test du produit final. Il est possible de trouver de nombreux autres exemples d'application du concept de conception modulaire dans (Kusiak, 1999).

La conception modulaire permet de réaliser un grand nombre de produits différents en utilisant un nombre limité de composants modulaires. Des recherches ont aussi été menées afin de fournir des méthodologies de conception de familles de produits. Pour cela, il est possible de se référer aux travaux de Newcomb et al. (Newcomb et al., 1998) et Gonzalez et al. (Gonzalez & al., 1999).

Jiao et Tseng (Jiao & Tseng, 1999) ont fourni une méthodologie pour développer une architecture de famille de produits afin de rationaliser le développement de produits pour la customisation de masse à partir de 3 points de vue (fonctionnel / technique / physique).

2.2 Différentiation retardée

Pour Lee et Tang (Lee & Tang, 1997) la différenciation retardée consiste à retarder le point de différenciation du produit ou du processus (point à partir duquel chaque produit acquiert sa propre identité) dans le but de stocker 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 moment où chaque produit est différent et a besoin d'être identifié comme tel. Ils proposent de reconcevoir le produit et/ou le processus de manière à ce que le point de différenciation soit le plus retardé possible.

Les auteurs des différents articles (Lee & Tang, 1997; Swaminathan & Tayur, 1999; Zinn, 1990) emploient le terme de différenciation retardée lorsque l'assemblage du produit n'est pas terminé au moment où la commande du consommateur arrive (Zinn, 1990).

Les principales techniques pour supporter la différenciation retardée sont les suivantes :

La standardisation consiste à utiliser des composants ou processus communs dans un maximum de produits. Ceci permet de diminuer le nombre de références à gérer et d'augmenter les quantités de chaque composant, ce qui résulte en une réduction de la complexité du système de fabrication. Cependant, cela nécessite d'augmenter les possibilités de chaque composant en lui ajoutant des fonctions additionnelles qui ne seront pas toujours utilisées. Les profits d'un tel exercice dépendent de l'équilibrage entre les investissements nécessaires pour standardiser les composants et les profits qui résultent des économies d'échelles, de la réduction de la diversité, de la diminution des stocks, ... Lee et Tang (Lee & Tang, 1997) ont développé un outil mathématique qui permet de trouver le meilleur compromis.

La conception modulaire consiste à décomposer un produit en sous-éléments plus ou moins indépendants appelés modules. La différenciation du produit fini est effectuée à l'opération d'assemblage par le choix des modules et de leur disposition dans le produit final (voir paragraphe 2.1).

La restructuration des processus concerne la restructuration des opérations du processus de fabrication d'un produit. Lee et Tang (Lee & Tang, 1997) présentent deux exemples, dans le premier, l'opération qui cause la différenciation est retardée à la fin du processus, c'est au moment de la distribution que s'effectue la différenciation par l'assemblage des éléments nécessaires. Le second cas traite de l'inversion dans l'ordre de réalisation de deux opérations.

3 Conception d'une famille de faisceaux électriques

Actuellement le fournisseur réalise des faisceaux électriques standards. Cela signifie qu'il conçoit un nombre limité de faisceaux électriques qui peuvent être assemblés sur la totalité des produits finis. Il doit alors produire un stock de chaque famille de faisceaux électriques, le délai de livraison n'est alors plus un problème, et la synchronisation est grandement simplifiée pour le fournisseur. D'un autre côté, la standardisation provoque un effet d'enveloppe (des fonctions ne sont pas utilisées) qui a un coût. L'intérêt d'une telle approche dépend de l'équilibre entre les surcoûts liés aux éléments non utilisés et les bénéfices provenant de la réduction de la diversité (Briant, 2000).

Cette approche était utilisée jusqu'à maintenant, mais afin de diminuer les coûts, le donneur d'ordre a demandé à son fournisseur de faire des efforts. Le donneur d'ordre a décidé de ne payer plus que les fonctions strictement nécessaires à chaque produit. Le fournisseur ne peut supporter seul les coûts des éléments non utilisés. Il se trouve donc face au problème suivant : quels modules doivent être produits en préassemblage ? sachant qu'il y a un temps limité pour réaliser l'assemblage final (temps inférieur au temps de réalisation de chaque faisceau électrique), et que le donneur d'ordre exige les composants exacts et cela pour un coût minimum.

Un des points clef de l'approche modulaire est le partage du produit en modules. L'efficacité de toute l'approche dépend de la bonne compilation de modules qui permet au produit d'être assemblé pendant le temps dont le fabricant dispose et qui couvre toute la diversité, et qui minimise le nombre coûteux de références.

Le but de ce travail est de déterminer ces modules.

Deux stratégies sont présentées. La première sera appelée "stratégie structurelle" et considérera la familles de faisceaux électriques selon sa description physique; la seconde est appelée "stratégie fonctionnelle" et considère les faisceaux électriques par les fonctions qu'ils doivent satisfaire.

3.1 Stratégie structurelle

L'ensemble des faisceaux électriques à produire est modélisé par un faisceau électrique générique avec options, variantes et versionnement plus un ensemble de règles qui décrivent les contraintes entre les composants.

Le faisceau électrique générique est décrit comme un ensemble de câbles. De ce point de vue, un module pré-assemblé, appelé module industriel (MI) sera alors un sous ensemble de câbles produits dans les sites délocalisés. Le faisceau électrique générique est modélisé par un arbre. Dans chaque branche sont décrits les fils passant à l'intérieur (voir figure 2).

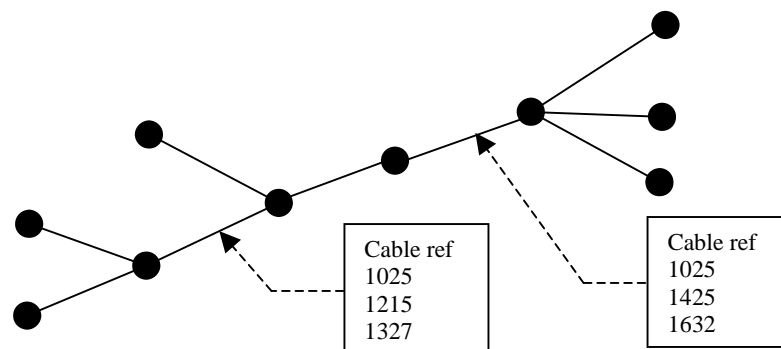


Figure 2: Description structurelle d'un faisceau électrique.

L'idée est de partager le faisceau électrique générique en deux sous faisceaux électriques génériques indépendants, l'un d'eux sera le MI produit dans les sites délocalisés, l'autre sera la spécialisation des MIs dans le but de créer un faisceau électrique spécifique pour le produit final spécifique (voir figure 3).

Un critère important que l'on doit garder en vue est le temps de spécialisation; il sera appelé "temps d'assemblage final". Ce temps devra être inférieur au temps dont le fabricant dispose pour fournir chaque faisceau électrique spécifique.

Une fois le faisceau électrique spécifique partagé en différents modules, si le temps d'assemblage final est supérieur à la limite, le module de spécialisation sera partagé une autre fois en deux modules et ainsi de suite jusqu'à ce que le temps d'assemblage final soit inférieur à la limite.

En pratique le professionnel doit sélectionner la racine de l'arbre par le choix d'un noeud où le faisceau électrique générique ne sera pas partagé, en générale un noeud à l'intérieur d'une gaine.

Chaque noeud est évalué en temps d'assemblage final qu'il est possible de gagner et coût de création des MIs.

Le coût de création d'un MI est directement proportionnel au nombre de modules qui supporteront la diversité. Un MI est en réalité plusieurs sous modules. Si un MI est créé pour les câbles 1, 2 et 3, il faudra créer 7 modules moins les contraintes dans le but de produire chaque produit spécifique final.

Le Temps Gagné en Assemblage Final (DTFA) est le temps de production des MI car ils seront produits sur stock, et leur temps de fabrication n'entre donc pas dans le temps d'assemblage final. Ce TGAF est calculé de la manière suivante :

$$DTFA = \sum_{i=0}^{nb_of_branch} time_to_realize_branch(i) + \sum_{j=0}^{nb_of_node} time_to_realize_node(j) \quad (1)$$

$$time_to_realize_branch(i) = type_of_assembly(i) \times length_of_branch(i) \quad (2)$$

$$time_to_realize_node(j) = type_of_node(j) \quad (3)$$

Un critère est alors évalué à chaque noeud; ce critère prend en compte le DTFA, le coût de gestion des références de module et le coût de main d'œuvre; la meilleure alternative est sélectionnée. Le faisceau électrique générique est alors partagé en deux parties (voir figure 3) et certaines branches du module de spécialisation sont interdites pour un partage futur car des câbles avec une extrémité dans le MI ont l'autre extrémité dans la seconde partie.

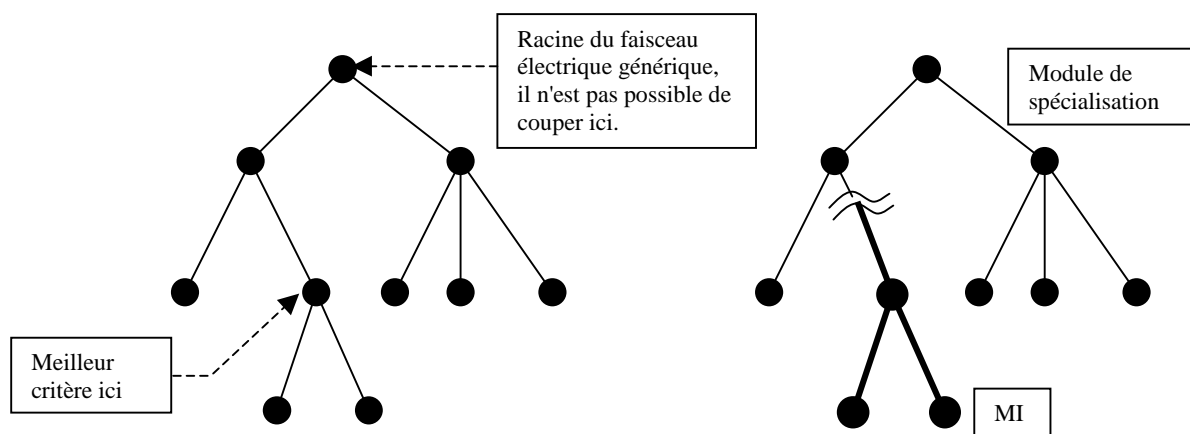


Figure 3: Partage d'un faisceau électrique générique

3.2 Stratégie fonctionnelle

Comme ci-dessus, l'ensemble des faisceaux électriques à fabriquer est modélisé par un faisceau électrique générique avec options, variantes et versionnement et un ensemble de règles qui décrivent les contraintes entre les fonctions. Le faisceau électrique générique est décrit comme un ensemble de fonctions.

Dans cette stratégie un MI sera un sous ensemble de fonctions qui seront réalisées dans les sites délocalisés.

Toutes les fonctions sont extraites du faisceau électrique générique; pour chaque ensemble de fonctions qui apparaît dans une branche, une évaluation du temps d'assemblage final pouvant être économisé et du coût généré par la création des MIs sont calculés.

Alors avec le même critère que précédemment, une sélection de la meilleure alternative est opérée. Le faisceau électrique générique est séparé en deux modules, et si le temps d'assemblage final est supérieur à la limite, un autre partage est effectué sur le module de spécialisation.

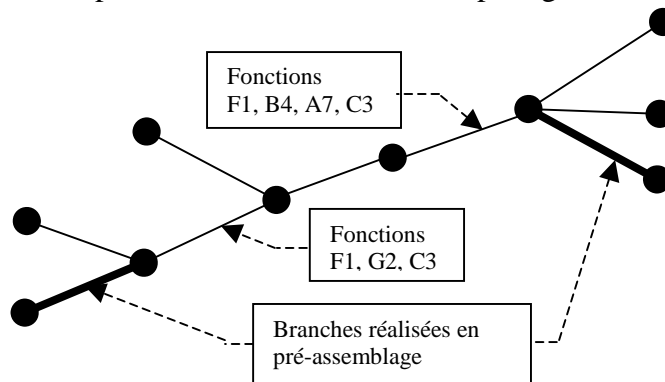


Figure 4: Fonctions dans un faisceau électrique.

Dans la stratégie fonctionnelle :

$$DTFA = \sum_{i=0}^{nb_of_branch} time_to_realize_branch(i) + \sum_{j=0}^{nb_of_node} time_to_realize_node(j) \quad (4)$$

$$time_to_realize_branch(i) = \begin{cases} \bullet type_of_assembly(i) \times length_of_branch(i) \\ \text{if all functions into branch (i) belong to the} \\ \text{module} \\ \bullet 0 \text{ otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$time_to_realize_node(j) = \begin{cases} \bullet type_of_node(j) \text{ if all branch from j belong} \\ \text{to the module} \\ \bullet 0 \text{ otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

3.3 Premiers résultats

Les deux algorithmes ont été appliqués sur un faisceau électrique représentatif. Pour la stratégie structurale, les résultats sont présentés figure 5. Les résultats obtenus avec le même faisceau électrique et la stratégie fonctionnelle sont présentés figure 6.

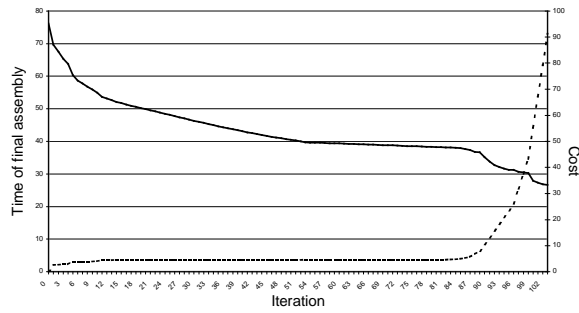


Figure 5: Evolution de la stratégie structurale.

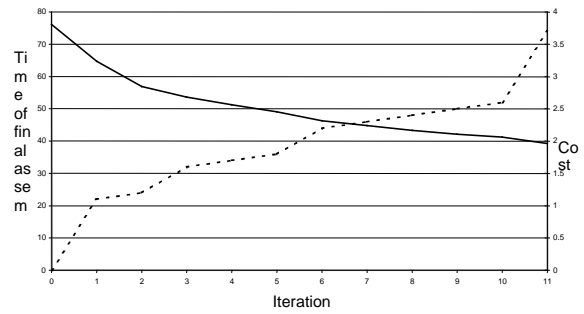


Figure 6: Evolution de la stratégie fonctionnelle.

Le trait plein représente le temps d'assemblage final, la ligne pointillée représente le coût pour produire les nouveaux modules et l'axe des ordonnées le nombre d'itération pour chaque algorithme.

Il est possible d'observer dans les deux cas une diminution significative du temps d'assemblage final lié à une augmentation du coût des références à gérer. De plus le temps d'assemblage final peut être inférieur pour la stratégie structurale à celui de la stratégie fonctionnelle. Enfin pour la stratégie structurale le coût explose à la fin pour diminuer le temps.

Les courbes suivantes (figure 7 et figure 8) montrent combien il en coûte pour le fournisseur de produire un faisceau électrique en dessus d'une certaine limite de temps avec les deux stratégies. Grâce à ce type de représentation, le fournisseur peut facilement signer des contrats avec son donneur d'ordres pour vendre l'ensemble des faisceaux électriques. Ils peuvent ensemble discuter le tarif et le délai qu'ils projettent. De plus le donneur d'ordre peut modifier son processus pour augmenter le délai à disposition de son fournisseur, et ainsi diminuer ses tarifs d'achats.

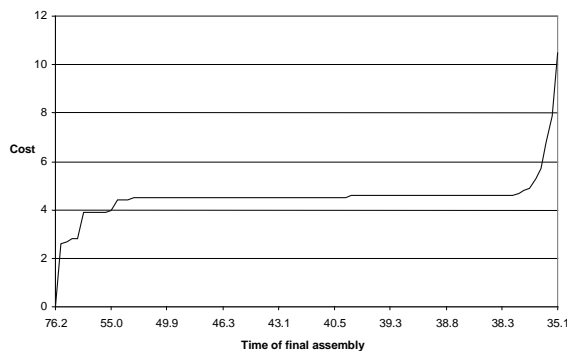


Figure 7: Coût et temps pour la stratégie structurale.

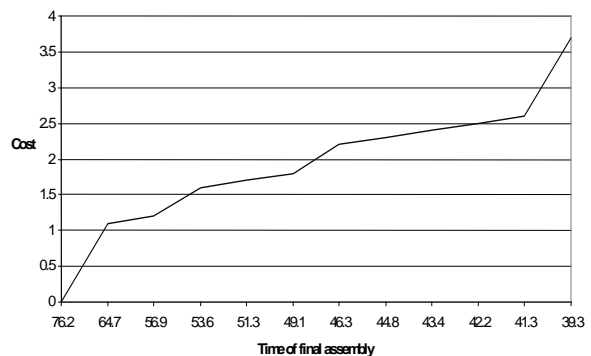


Figure 8: Coût et temps pour la stratégie fonctionnelle.

Dans la représentation suivante (figure 9), les deux résultats ont été placés à la même échelle, la partie qui explose dans la stratégie structurale a été supprimée. Le trait plein représente la stratégie structurale, la ligne pointillée la stratégie fonctionnelle. Il est possible de remarquer que pour les hautes limites de temps la stratégie fonctionnelle est toujours moins onéreuse que la stratégie structurale. Cependant dans le cas où le donneur d'ordres souhaite

diminuer le temps d'assemblage final en deçà de la limite obtenue en stratégie fonctionnelle, il devra alors adopter une stratégie structurelle.

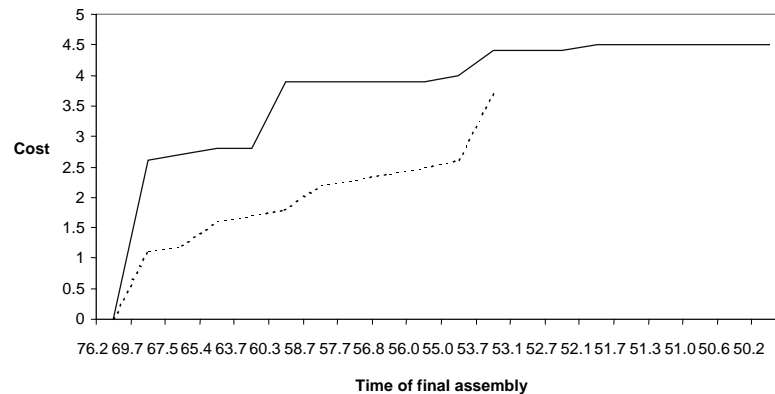


Figure 9: Comparaison des deux algorithmes avant l'explosion des coûts.

4 Conclusions et perspectives

Pour des raisons commerciales, il n'apparaît pas souhaitable de réduire la diversité des produits perçus par les consommateurs dans un but de stratégie marketing. Cependant nous avons à prendre en compte le fait que l'explosion de la variété des produits a un coût et qu'il existe pour l'industriel une diversité interne optimale, qui minimise les coûts. Nous fournissons un outils d'aide à la décision qui aide les concepteurs dans leur choix concernant la conception des préassemblages qui permettent de couvrir la totalité de la diversité commerciale.

Deux algorithmes ont été présentés qui proposent un ensemble de préassemblages pour les faisceaux électriques. Les algorithmes utilisent une description physique ou fonctionnelle de la famille de faisceaux électriques et fournissent un ensemble de modules à produire dans le but de diminuer le temps d'assemblage final, sachant que l'on doit produire une diversité totale en un temps court et pour un coût minimum.

Les résultats permettent à la fois au sous-traitant et au donneur d'ordres de discuter leur relation; ils peuvent ajuster leur temps de synchronisation.

Références

- Briant, O. (2000). *Etude théorique et numérique du problème de la gestion de la diversité*, PhD thesis, Grenoble.
- Child, P. Diederichs, R. Sanders, F.-H. & Wisniowski, S. (1991). *The Management of Complexity*, Sloan Management Review, Fall, 1991, pp. 73-80.
- Fouque, T. (1999). *A la recherche des produits flexibles*, Revue Française de Gestion, mars-avril-mai, No. 123, pp. 80-87.
- Gonzalez-Zugasti, J. , Otto, K. & Baker, J. (1999). *Assessing value for product family design and selection*, Prossedings of the 25th Design Automation Conference. ASME Design Engineering Technical Coferences, Las Vegas, Nevada, September 12-15.
- He, D.W. & Kusiak, A.. (1997). "Design of assembly systems for modular products", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 13, No. 5, pp. 646-655.

- Huang, C.C. & Kusiak, A. (1998). *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.
- Huang, C.C. & Kusiak, A. (1999). *Synthesis of modular mechatronic products: a testability perspective*, IEEE/ASME Translation on Mechatronics, Vol. 4, No. 2, pp. 119-132.
- Jiao, J. & Tseng, M. (1999) *A methodology of developing product family architecture for mass customization*, Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 10, pp. 3-20.
- Kusiak, A. (1999). *Engineering Design : Products, Processes, and Systems*, Academic Press, San Diego, CA.
- Lee, H.L. & Tang C.S. (1997). *Modelling the costs and benefits of delayed product differentiation*, Management Science, 43(1), p. 40-53.
- Martin, M. & Kosuke I. (1997). *Design for Variety: Development of Complexity Indices and Design Charts*, Proceedings of 1997 ASME Design Engineering Technical Conferences, Sept.14-17, Sacramento, CA, pp1-9.
- Newcomb, J.P.J., Bras, B. & Rosen, D.W. (1998). *Implications of Modularity on Product Design for the Life Cycle*, Journal of Mechanical Design, 120, pp. 483-490.
- Swaminathan, J.M. & Tayur S. (1999). *Managing design of assembly sequences for product lines that delay product differentiation*, IIE Transactions, No 31, pp. 1015-1026.
- Zinn, W.(1990). *Should we assemble products before an order is receive?*, Business Horizons, March-April, pp. 70-73.

Bruno Agard

GILCO

46, av Félix Viallet

38 000 Grenoble

Tél. 04-76-57-43-20

Fax 04-76-57-46-95

E-mail: bruno.agard@gilco.inpg.fr

Michel Tollenaere

GILCO

46, av Félix Viallet

38 000 Grenoble

Tél. 04-76-57-43-20

Fax 04-76-57-46-95

E-mail: michel.tollenaere@gilco.inpg.fr