
Méthodologie de conception des familles de produits

Bruno Agard — Michel Tollenaere

Laboratoire GILCO
46, avenue Félix-Viallet
38 031 Grenoble

{bruno.agard,michel.tollenaere}@gilco.inpg.fr

RÉSUMÉ. Dans un contexte de conception de produits, les industriels sont conduits à concevoir et réaliser une grande diversité de produits pour répondre à des besoins clients et des marchés différents. Deux questions couplées apparaissent immédiatement qui concernent d'une part la diversité qu'il est nécessaire de proposer, et d'autre part la manière de gérer et produire cette diversité dans des délais et des coûts acceptables. La contribution de cet article porte sur la proposition d'une méthodologie de conception de produits à forte diversité. Celle-ci s'appuie sur une séparation entre les différents types de diversité nécessaires à la description du cycle de mise sur le marché d'une famille de produits, et sur la déclinaison d'un type de diversité à l'autre en s'appuyant sur les outils disponibles dans la littérature. La proposition de démarche formalisée porte notamment sur l'analyse des besoins fonctionnels (avec une distinction entre les fonctions stables et les fonctions variables), la création d'une structure fonctionnelle, la création d'une structure technique et l'analyse de l'ensemble des process utilisables.

ABSTRACT. In a product design context, industrial are lead to design and manufacture a wide diversity of products in order to satisfy diversified customers and markets. Two questions appear immediately that concern for a first part the diversity that is adequate to put in the market, and for a second part the way to manage and manufacture it with acceptable lead time and cost. The contribution of this paper is a proposition of a methodology for the design of products with high diversity. The proposition is based on different kinds of diversity necessary for the life cycle design of product families, and on a passage through this different kinds of diversity with available tools from the literature. The methodology focuses in particular on the analysis of the functional requirements (with a distinction between stable and variable functions), on the creation of a functional structure, on the creation of a technical structure and on an analysis of the set of relevant available processes.

MOTS-CLÉS : méthodologie de conception, diversité produit, familles de produits, conception modulaire, différenciation retardée.

KEYWORDS: Design Method, Product Diversity, Product Families, Modular Design, Product Delayed Differentiation.

1. Introduction

Dans un marché concurrentiel où les capacités de production sont supérieures à la demande, les fabricants se doivent, soit de recentrer leur activité sur une fonction stratégique afin de diminuer leurs coûts et devenir plus compétitifs, soit de diversifier leur production pour embrasser un ensemble plus large de besoins et être ainsi au plus proche des désirs des clients [TAR 98].

Nous nous plaçons dans le cas où la seconde option a été choisie. Dans cette perspective, nous considérerons qu'il existe un ensemble de besoins différents à satisfaire.

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 dans le domaine du logiciel. Un autre extrême consiste en la fabrication sur mesure visant à la satisfaction stricte de chaque besoin, c'est le cas des barrages hydroélectriques 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 personnalisés assemblés de manière plus ou moins personnalisée. Les solutions intermédiaires peuvent utiliser la conception modulaire et/ou la différenciation retardée.

Le contexte dans lequel nous nous situons consiste en une production de masse de produits à forte diversité. Plus précisément, nous nous intéressons au cas où un produit est réalisé à partir de l'assemblage d'un grand nombre de composants. Parmi les composants à assembler une certaine quantité peut être facultative (les options), une autre obligatoire mais qui peut posséder différentes caractéristiques variables (les variantes).

En s'intéressant aux caractéristiques des produits à la sortie du système de production, assemblés à partir d'un ensemble (limité) de composants sélectionnés ou non et avec des paramètres variables, il apparaît qu'il est alors possible de réaliser une grande diversité de produits différents due à la combinatoire engendrée. A partir de n composants différents, on est capable théoriquement de produire $2^n - 1$ produits différents. Cette valeur théorique n'est en fait jamais atteinte car il existe de nombreuses contraintes de natures différentes entre les composants.

Cependant la diversité potentielle réalisable est immense en comparaison de la production effectivement réalisée (liée à la fois aux cadences de production et à la demande). Ainsi, bien que produit en masse, la production réelle ne représente qu'une faible consommation de chaque possibilité. On parle alors de production quasi unitaire.

Pour faire face à une diversité client qui augmente, les fabricants cherchent à standardiser leurs produits et process en interne. Ceci leur permet de rationaliser leur production et d'optimiser soit les produits, soit les processus, parfois les deux, et de profiter ainsi d'une meilleure productivité garante des coûts de production ([MAC 96], [BEN 00], [CHI 91]). Pour cela, ils cherchent à repousser le plus loin possible le point

à partir duquel chaque produit acquiert sa propre identité, ce qui est connu dans la littérature sous l'appellation « *différenciation retardée* » [LEE 97].

Cependant les outils et méthodes proposés dans la littérature et examinés plus en détail dans [AGA 03a] ne nous ont pas semblé remplir totalement ce pour quoi nous les attendions.

Il en va ainsi tout d'abord de l'existence de différents types de diversité qui apparaissent souvent mélangés et que nous mettons en relief dans la section 2.

En revanche, la littérature fournit de nombreux outils permettant le passage plus ou moins structuré d'un type de diversité à l'autre. Ces outils se présentent sous forme de méthodologies de conception du produit ou du process que nous rappelons en section 3.

Dans la section 4, nous proposons une méthodologie de conception produit/process pour les familles de produits qui prend en compte les trois types de diversité définis en section 2 et s'appuie très fortement sur la littérature quant aux outils utilisés.

2. Différents niveaux de diversité

Partant de l'idée de la classification de la diversité des produits selon différents niveaux proposée par Ciavaldini et Loubet dans [CIA 95], en se plaçant au niveau de la conception des produits et des process, nous avons été amenés à considérer les trois types de diversité suivants :

- la diversité fonctionnelle,
- la diversité technique,
- la diversité process.

La suite décrit ces différents types de diversité afin de voir quels en sont les paramètres et comment ils évoluent.

2.1. La diversité fonctionnelle

La diversité fonctionnelle provient de l'ensemble des besoins à satisfaire pour acquérir des parts de marché sur la concurrence. Elle est liée à la diversité commerciale offerte aux clients. La diversité fonctionnelle dépend des situations de vie, des usages, elle contient des interdépendances et des contraintes.

Il s'agit du type de diversité le plus apparent pour le client, car c'est au niveau des fonctions qu'il choisira, le plus souvent, ce qu'il souhaite ou ne souhaite pas et avec quelles caractéristiques (figure 1).

S'agissant d'aspects commerciaux, les départements Produits, Marketing et Style y sont très impliqués afin de répondre aux goûts et aux besoins du client et même les

anticiper. La stratégie de l'entreprise y prend aussi une part importante car il s'agit de limiter et de cibler l'ensemble de l'offre répondant au mieux à l'attente des clients.

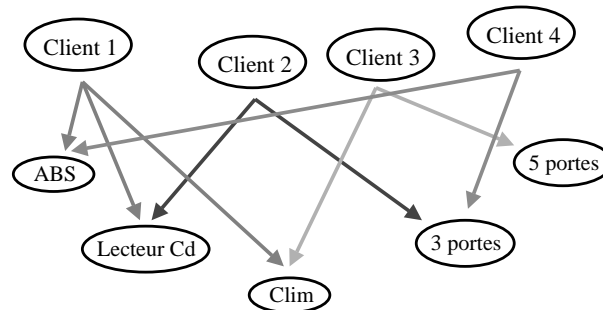


Figure 1. Diversité fonctionnelle

L'étendue de la diversité fonctionnelle provient à la fois de la disparité des besoins des clients, mais aussi de leur différence de perception d'un même besoin (niveau de qualité, prix, utilité...).

L'entreprise étant soumise à la concurrence et fournissant ses produits à des clients exigeants, on observe que la diversité fonctionnelle évolue dans le temps pour deux raisons principales :

- l'évolution des produits ou l'apparition de nouveaux produits sur le marché fait apparaître de nouveaux besoins (ex : le GPS utilisé initialement pour le repérage de position devient un outil d'orientation routière),
- l'évolution des perceptions des clients (le niveau de vie évolue, les effets de modes, la situation familiale évolue...) fait évoluer les critères de satisfaction des besoins.

Ciavaldini et Loubet [CIA 95] parlent alors de :

- *diversité congénitale* : elle représente la diversité mise en œuvre lors du lancement d'un nouveau modèle,
- *diversité thérapeutique* : elle apparaît en cours de vie du modèle afin d'adapter et de faire évoluer le produit par rapport à la concurrence, ou de s'ouvrir de nouvelles niches de marché.

La diversité fonctionnelle se décline en :

- familles : nombre et renouvellement,
- versions : silhouettes, motorisation, niveaux,
- variantes : combinatoire d'options.

2.2. La diversité technique

La diversité technique concerne les réalisations techniques capables de satisfaire la diversité fonctionnelle (figure 2). Il s'agit de la traduction sur le plan technique de la diversité fonctionnelle.

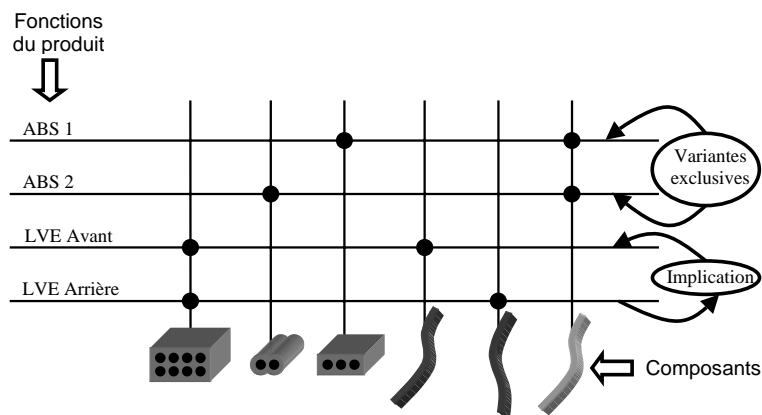


Figure 2. Diversité technique

L'origine est cette fois centrée sur les Etudes, le Style et les Achats. On cherchera à réutiliser au maximum les éléments déjà existants afin de réduire le nombre de références.

Il faut noter qu'une option apparemment anodine peut avoir des répercussions importantes sur le plan technique et nécessiter plus ou moins de pièces spécifiquement conçues. Par exemple, choisir l'option toit ouvrant provoque l'impossibilité de placer une antenne de toit à l'avant, il faudra donc soit placer une antenne de toit à l'arrière et passer d'autres fils de connection plus longs, soit fixer l'antenne sur l'aile du véhicule et encore une fois modifier les fils de connection. Ici ce n'est encore qu'un exemple ayant peu de répercussions, le changement de puissance du moteur peut quant à lui nécessiter un nouveau système de refroidissement, de nouveaux amortisseurs, de nouveaux pneus...

La diversité technique dépend des compétences de l'entreprise, ce que l'entreprise sait faire, des connaissances disponibles au moment de la conception, mais aussi du matériel à disposition, de la charge de travail et du réseau de sous-traitants qui entoure l'entreprise, des progrès de la science...

Tous ces paramètres évoluant indépendamment, la diversité technique évolue dans le temps :

- par l'évolution des technologies (de l'entreprise, des sous-traitants, de la concurrence),

- par l'amélioration des solutions existantes, l'entreprise apprend sur ses produits tout au long de son cycle de vie (retours d'expériences). Les solutions existantes peuvent être améliorées pour des raisons de coûts, de productivité, de qualité...
- par l'évolution des connaissances de l'entreprise sur son produit, sur ses processus, sur ses clients.

Tout ceci provoque donc des évolutions au niveau technique de la satisfaction des besoins fonctionnels, cette évolution au niveau technique provoque le versionnement.

2.3. La diversité process

La diversité process (ou diversité industrielle) concerne la manière dont seront réalisées les solutions techniques, elle se retrouve sur les lignes de fabrication (Méthodes, Usines, Achats). Il s'agit de l'ensemble des process capables de réaliser une solution technique dans un contexte industriel donné (figure 3).

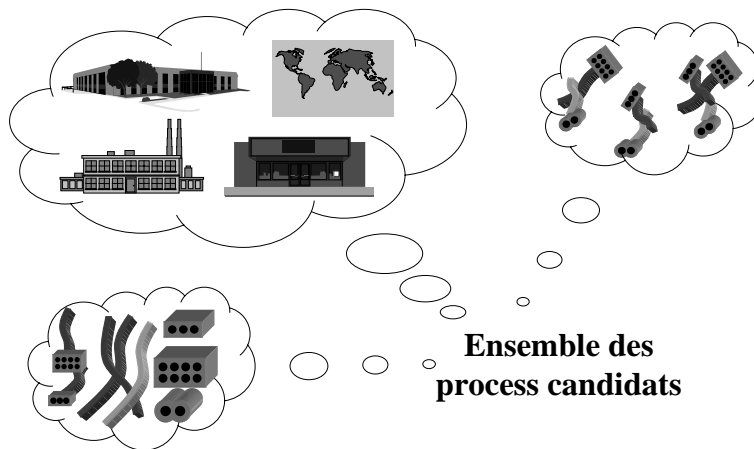


Figure 3. Diversité du process

La diversité process évolue :

- par l'introduction de nouvelles machines,
- par l'évolution du réseau de fournisseurs,
- par l'évolution des méthodes de gestion de production, gestion des stocks...

La diversité process provoque des problèmes de qualité, de gestion des stocks et d'organisation. Cette catégorie de diversité est très coûteuse, il va donc s'agir de la limiter au maximum pour limiter les surcoûts de production dus à l'introduction de la diversité.

2.4. Partage de la représentation

Partant de la diversité fonctionnelle (souhaitée en marketing) jusqu'à la diversité produite (et mise sur le marché), on observe donc trois niveaux de diversité qui co-existent et se partagent la représentation du produit et du process (figure 4).

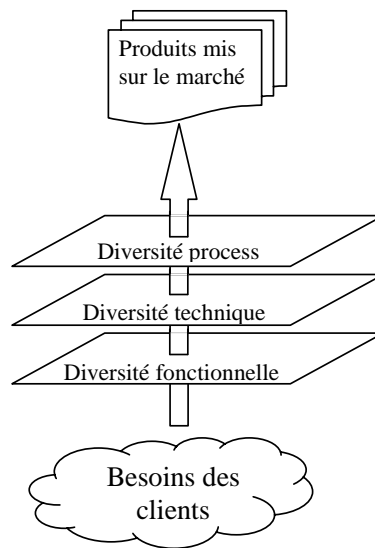


Figure 4. Partage de la représentation du produit

La diversité des besoins des clients doit subir différentes déclinaisons, différentes traductions pour être convertie en besoins satisfaits :

- comment s'effectue le passage d'un type de diversité à l'autre ?
- comment est outillé le passage d'un type de diversité à l'autre ?

En utilisant les dénominations de Martin et Ishii [MAR 96] l'intérêt portera sur les décisions tactiques (qui concernent les aspects non visibles par le client) afin d'aider dans le choix des produits et process communs entre différents produits.

L'acquisition des besoins et désirs des clients ne sera pas traité dans cet article. Dans le travail présenté ici, l'ensemble des fonctions à réaliser sera une donnée, de même que les quantités de ventes escomptées de chaque produit, sous-produit, fonction selon le cas.

De même, nous ne traitons pas les aspects de différenciation perceptuelle des produits [TAR 98] : offres de services, offres promotionnelles, politiques commerciales.

Nous nous ramenons donc au cas représenté figure 5.

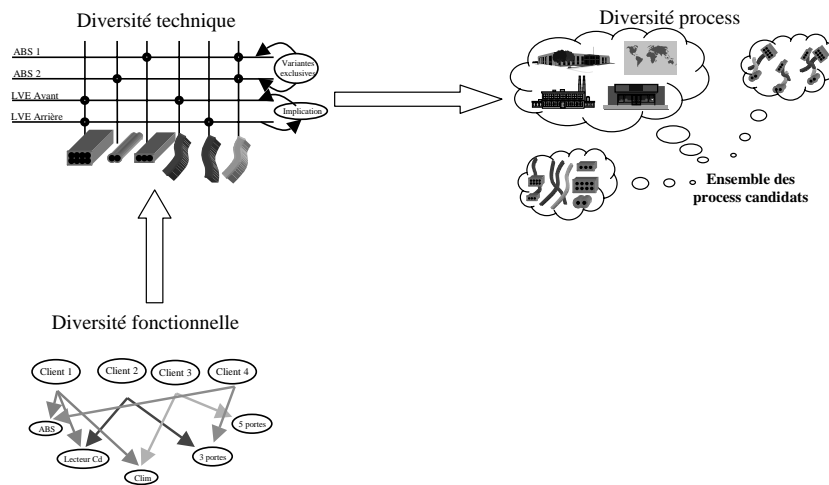


Figure 5. *Domaine d'étude*

3. Passage d'un type de diversité à l'autre

L'étude bibliographique présentée dans [AGA 03a] montre qu'il existe des liens entre la diversité fonctionnelle et la diversité technique de même qu'entre la diversité technique et la diversité process. Les outils proposés permettent le passage maîtrisé d'un type de diversité à l'autre (tableau 1).

Cependant la littérature ne dispose pas de processus global, ni au niveau des outils, ni au niveau de la démarche qui propose le passage d'un ensemble de besoins clients à satisfaire aux produits mis sur le marché. Nous nous trouvons donc dans un processus de conception qui dispose de deux démarches locales, l'une au niveau du produit (passage fonctionnel – technique), l'autre au niveau du process (passage technique – process) alors qu'il s'avère cependant nécessaire de lier les informations processus et produits sur tout le cycle de conception des produits pour garder la cohérence de l'ensemble et contrôler toute la chaîne globale de diversité, afin de produire à diversité donnée ou tout du moins maîtriser l'évolution de la diversité.

Notre contribution consiste à proposer une démarche méthodologique globale de conception des familles de produits. Cette démarche suit un cadre général de maîtrise de la diversité et se base sur un certain nombre d'outils et d'indicateurs pour la gestion de la diversité en s'appuyant très largement sur la littérature afin de maîtriser l'évolution de la diversité.

Déclinaison	Outils
fonctionnelle technique	Personnalisation par l'utilisateur [TAR 98] Différenciation perceptuelle [TAR 98] Standardisation des composants [DUP 99], [FOU 99], [LEE 97], [THO 00] Conception modulaire des produits [HUA 98], [KUS 99], [KUS 96] Composants paramétrables Standardisation des produits [KOT 00], [BRI 00] Méthodologies de conception pour la diversité [DAH 01], [ERE 97], [GON 00b], [GUP 98], [JIA 99], [MAR 99], [SIM 00], [YU 98], [ZAM 99b]
technique process	Standardisation des process [LEE 97], [AGA 02b], [AGA 02c] Différenciation au stade de la distribution [BRU 87], [TWE 00] Reséquencement [LEE 96] Restructuration des processus [LEE 98] Technologies de groupe [HYE 84] Gammes génériques d'assemblage [GUP 98], [HE 97], [STA 97], [STA 98]

Tableau 1. Déclinaison d'un type de diversité à l'autre

4. Méthodologie de conception de familles de produits

Maîtriser la diversité est une option stratégique pour une entreprise afin d'améliorer sa compétitivité par une réduction de ses coûts de conception et de production. Ce ne peut être une action locale ou la démarche d'une personne isolée, il faut considérer la diversité dans sa globalité. La maîtrise de la diversité doit s'inscrire dans une démarche transversale qui vise un ensemble de paramètres.

La méthodologie proposée présente les étapes-clés afin de maîtriser la diversité, il ne s'agit en aucun cas d'un outil automatique ou d'une démarche automatique, il faudra spécifier dans chaque cas particulier en utilisant les variables et paramètres les mieux adaptés au cas d'étude considéré.

Cette méthodologie [AGA 02a] comporte 8 points à traiter (tableau 2), nous allons détailler ces différents points.

Une action « Maîtrise de la diversité » peut concerner un produit nouveau que l'on envisage de fabriquer ou bien s'attaquer à la production actuelle dans le but de rationaliser le fonctionnement de l'entreprise.

Méthodologie	
1.	Mise en place d'une action « Maîtrise de la diversité »
2.	Choix des indicateurs
3.	Analyse des besoins fonctionnels
4.	Création d'une structure fonctionnelle
5.	Création d'une structure technique
6.	Création des ensembles de process
7.	Recherche des solutions
8.	Choix d'une solution

Tableau 2. *Méthodologie de conception*

4.1. Mise en place d'une action « Maîtrise de la diversité »

La mise en place d'une action « Maîtrise de la diversité » doit montrer clairement que l'entreprise s'engage fortement dans la direction de la maîtrise de la diversité.

Pour cela, il est souhaitable de monter une équipe projet qui fasse appel à des intervenants des différents secteurs concernés, pour à la fois gérer les contraintes globales et montrer l'engagement transversal d'une telle action.

Cette équipe projet peut contenir entre autres :

- un chef de projet qui aura pour mission principale le suivi de l'action « Maîtrise de la diversité » et qui devra trancher en cas de conflit,
- un commercial ou tout autre personne qui prendra en charge de représenter les clients,
- un acheteur afin de prendre en compte les volumes et méthodes d'approvisionnements et s'intéresser ainsi aux économies d'échelle,
- un fabricant s'intéressera au plus près aux processus de réalisation des produits,
- un responsable de production sera en charge de vérifier la faisabilité du point de vue charge de travail (égalisation des charges des lignes d'assemblages par exemple),
- un concepteur représentera l'aspect technique de l'action.

La liste n'est bien sûr pas limitée à ces personnes et, selon le cas, tel ou tel spécialiste du produit, de l'entreprise ou du marché peut se joindre au projet. Des intervenants différents peuvent intervenir selon l'étape d'avancement de l'action « Maîtrise de la diversité ».

La première tâche de l'équipe « Maîtrise de la diversité » est de définir des objectifs et de les chiffrer (il faut donc que les objectifs soient mesurables). Les objectifs doivent être déterminés en fonction de la stratégie de l'entreprise, et validés par la hiérarchie qui s'engage ainsi dans la direction désirée.

Toute l'équipe « Maîtrise de la diversité » doit valider les objectifs définis en commun pour montrer l'aspect transversal de l'action et l'engagement des différents secteurs concernés.

4.2. Choix des indicateurs

Afin de mener à bien une action de ce type, il est nécessaire de pouvoir mesurer un certain nombre d'indicateurs (cf. tableau 3) qui permettent à la fois de mesurer l'état actuel (avant le démarrage de l'action « Maîtrise de la diversité ») et de suivre l'évolution de l'action.

Les indicateurs doivent être choisis en fonction de la stratégie de l'entreprise afin de refléter celle-ci au mieux. Il est généralement nécessaire d'utiliser différents indicateurs pour mener à bien une action « Maîtrise de la diversité », il faut alors s'assurer que ceux-ci soient complémentaires, justes et fidèles.

Il faut s'intéresser à des caractéristiques mesurables et les indicateurs doivent être représentatifs des caractéristiques choisies afin de les représenter. Parmi les indicateurs possibles, ceux présentés dans le tableau 3 sont envisageables.

Indicateur de	Exemple
Coût	Coût global de production Coût du produit Coût des modules Coût des fonctions Coût des stocks Coûts de gestion Coûts indirects induits : <i>CI, DI, SI</i> [MAR 96], [MAR 97]
Quantité	Nombre de modules par produit final Nombre de fonctions par composant ou par module Nombre de composants différents entre deux variantes d'une même famille Plage de fonctions couvertes par un module Niveau de commonalité de la famille de produits Niveau de commonalité des composants dans un sous-produit Nombre de références à gérer
Productivité	Temps d'assemblage final du produit Temps de changement de production d'un produit à l'autre
Autres	Maintenabilité Démontabilité Recyclabilité

Tableau 3. Indicateurs pour la « Maîtrise de la diversité »

La liste n'est bien sûr pas exhaustive, et il est nécessaire de trouver à chaque cas les indicateurs qui conviennent le mieux. Les indicateurs peuvent être pondérés de différentes manières : nombre de produits fabriqués, poids du module, intérêt pour le client, le coût... ou pondérés entre eux. Si le nombre d'indicateurs devient trop important, il faut créer un indicateur supplémentaire de niveau supérieur qui a pour but d'agréger les indicateurs de niveau inférieur.

Le choix des indicateurs étant fondamental dans la suite de l'approche, une négociation des indicateurs par les membres du projet est nécessaire car elle engage fortement la maîtrise de la diversité. Un indicateur peut par exemple contrarier une logique locale tout en étant bénéfique au niveau global pour l'entreprise, il est donc nécessaire de montrer aux participants les enjeux de chaque indicateur.

Les indicateurs doivent ensuite être chiffrés afin de fixer un but à atteindre. Ce chiffrage peut aussi bien être une valeur finale à atteindre, qu'une évolution à observer ou à maintenir (par exemple une diminution de 10 % dans le nombre de références à gérer par l'entreprise).

Selon l'état d'avancement de l'action « Maîtrise de la diversité » différents indicateurs peuvent être utilisés afin de faire ressortir des points particuliers à chaque étape.

Les différents intervenants peuvent avoir leurs propres indicateurs qui serviront à fournir à l'équipe « Maîtrise de la diversité » un autre indicateur qui agrégera ces mesures particulières.

4.3. Analyse des besoins fonctionnels

Le but est d'analyser la diversité fonctionnelle que l'on souhaite fournir afin de l'exprimer sous forme de fonctions valuées (but à atteindre, intervalle de tolérance).

La diversité provient tout d'abord des besoins hétérogènes des clients, mais aussi de paramètres internes à l'entreprise. Par exemple, la stratégie de l'entreprise peut chercher à fabriquer des produits à forte diversité en suivant une logique commerciale cherchant à satisfaire au mieux chaque client, ou bien afin de boucher les niches de marché qui seraient ouvertes à la concurrence.

L'analyse des besoins des clients doit permettre de répondre à la question : quelle diversité fonctionnelle proposer ?

La diversité fonctionnelle s'appuie donc à la fois sur la stratégie de l'entreprise et sur l'analyse des besoins.

Une étude de la demande permet :

- de construire un client moyen, qui sera la cible à satisfaire,
- de définir plusieurs groupes de clients. Il pourra être judicieux de proposer plusieurs groupes de produits ciblés par groupe de client,

- de sélectionner un ensemble ou sous-ensemble de clients à satisfaire en priorité (ex : faire un produit haut de gamme pour une certaine catégorie de clients),
- de chiffrer les corrélations de demande des clients (analyse de paniers).

Il existe différents moyens d'acquérir les données. Afin d'identifier le besoin, il s'agit par exemple d'évaluer la manière dont chaque fonction doit être satisfaite en évaluant par des mesures statistiques :

- la valeur moyenne souhaitée : $m = \frac{\sum_{i=0}^n X_i}{n}$ d'une caractéristique X pour l'ensemble des clients,

- l'écart type de cette valeur moyenne souhaitée $\sigma = \sqrt{\frac{(\sum_{i=0}^n X_i - m)^2}{n-1}}$.

Les statistiques peuvent ainsi fournir les taux de monte de chaque option (figure 6), information utilisée afin de dimensionner les pièces, aider au choix des matières et des processus, dimensionner le processus (cadences de production nécessaires, équilibrage des lignes d'assemblage, niveaux des stocks).

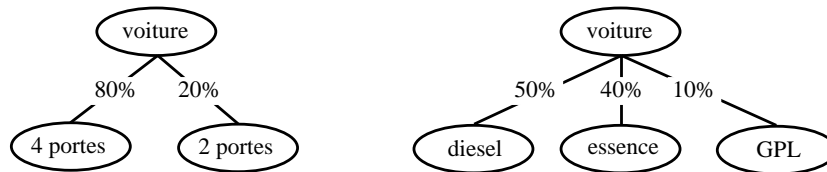


Figure 6. Taux de monte

Un autre type d'information précieux peut être obtenu à partir de l'analyse des besoins des clients, il s'agit des corrélations entre les fonctions sur la demande des produits.

Les corrélations entre les fonctions peuvent dans certains cas être une information indispensable. Supposons un modèle de voiture pour lequel la combinaison des options « 2 portes » et « moteur diesel » implique une boîte de vitesse particulière. Savoir uniquement les taux de monte de chaque option prise individuellement n'aidera pas à dimensionner le stock de ladite boîte de vitesse. L'information qui est indispensable dans ce cas est de savoir combien il y aura de voitures diesels 2 portes. Il faudra donc s'intéresser aux corrélations entre les fonctions (figure 7).

De même, savoir que certaines options sont fortement corrélées (positivement) peut suggérer de fournir ces options dans le même module si possible.

Pour extraire ce type d'information, dans les problèmes à grande diversité où le nombre de variables est très important, les techniques statistiques ne sont plus adaptées. Il convient alors de se retourner vers un autre type d'outils, à savoir le *Data Mining*. Les utilisations du *Data Mining* pour acquérir des données ne seront pas présentées ici, le lecteur pourra se référer à [BER 97], [FAY 96], [KUS 00], [WES 98], ainsi que [ARI 02] dans un contexte automobile.

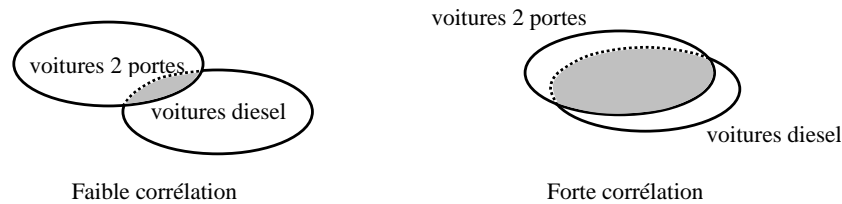


Figure 7. *Corrélation*

L'analyse des besoins fonctionnels peut ainsi fournir :

- 1) une description des fonctions à satisfaire avec une grandeur tolérancée de la cible à atteindre,
- 2) une estimation chiffrée du taux de monte, pourcentage de vente...
- 3) une estimation chiffrée des corrélations d'apparition des fonctions ensembles,
- 4) des ensembles de clients à satisfaire spécifiquement,
- 5) les prix de vente escomptés,
- 6) des estimations quantitatives prévisionnelles de ventes,
- 7) un ensemble de contraintes fonctionnelles (commerciales)...

4.4. Création d'une structure fonctionnelle

Suite à l'analyse des besoins des clients, il va s'agir de créer une structure fonctionnelle commune à la famille de produits.

L'étude de la littérature a montré qu'il est préférable de dissocier les aspects stables et les aspects variables. Les aspects stables sont développés pour augmenter le ratio performance/coût en intégrant au maximum les fonctions, ce qui permet aussi de rationaliser les moyens de production. Les aspects variables sont conçus en suivant un ratio variété/coût optimal. Les composants n'ayant pas de variantes sont un facteur stable dans la conception.

Pour cela, des indicateurs tels que ceux présentés par l'Engineering Design Research Laboratory (K. Otto, J.P. Gonzalez-Zugasti, E. Zamirowski, J.S. Yu et J. Baker [GON 00a], [GON 99], [YU 98], [ZAM 99a], [ZAM 99b]) sont bien adaptés. Ces indicateurs ($\sigma_a(i)$ et $\sigma_t(i)$) proviennent de l'analyse des 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 8).

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 .

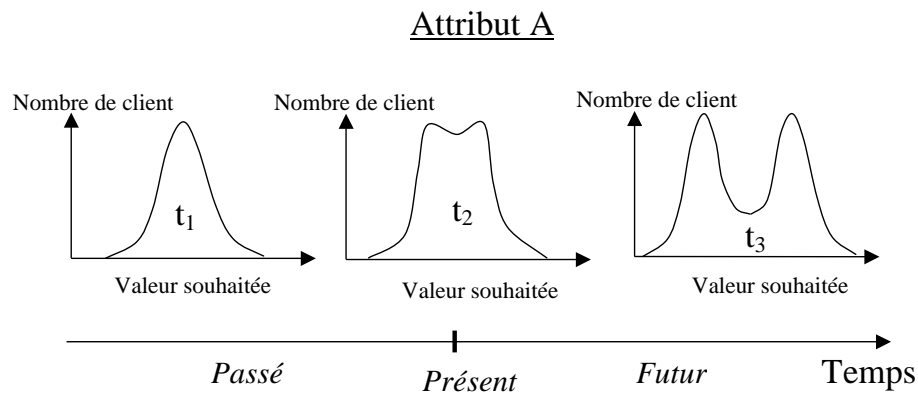


Figure 8. Analyse des besoins des clients

La démarche présentée sur la figure 9 a pour but la création de la structure fonctionnelle et s'appuie sur ces indicateurs. La première question permet de distinguer les fonctions stables et les fonctions variables, la seconde question regroupe les fonctions dont la variabilité peut être assurée par une conception robuste à faible coût d'enveloppe avec les fonctions stables.

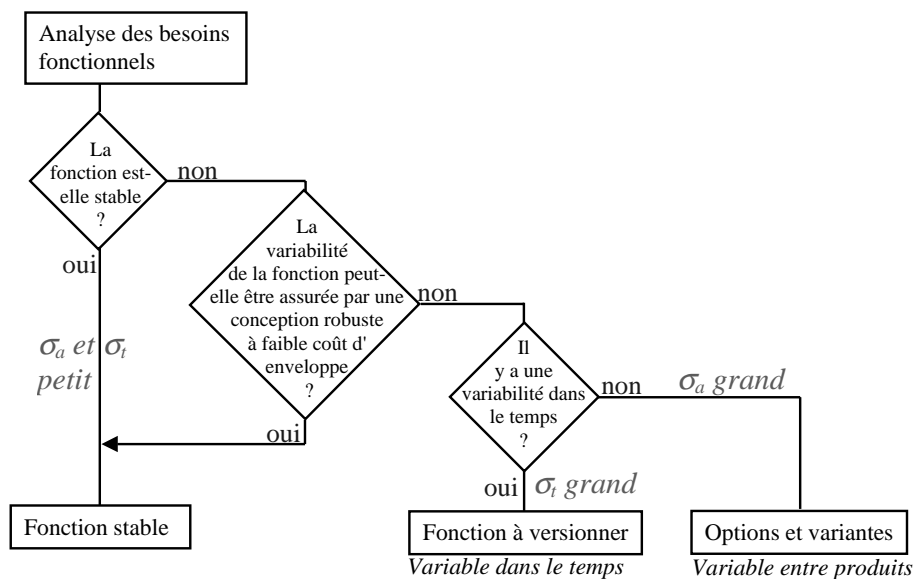


Figure 9. Création d'une structure fonctionnelle

L'ensemble des fonctions stables servent de base robuste et forment la structure fonctionnelle stable. Les fonctions variables représentent les options, variantes et versions qui viennent se greffer sur la structure fonctionnelle afin d'enrichir la gamme proposée.

Enfin, la dernière question de cette étape distingue les différents types de variation (variation entre produits et variation dans le temps) afin de les considérer différemment au moment de la conception. Isoler les fonctions qui évoluent dans le temps permet de versionner spécifiquement les fonctions considérées.

4.5. Création d'une structure technique

Dans cette étape, la diversité *fonctionnelle* est donnée, on s'interroge sur la diversité *technique*, il va falloir répondre à la question : comment fabriquer une grande diversité (fonctionnelle) de produits à moindre coût ?

Différentes stratégies de réponses sont possibles qui dépendent du contexte dans lequel évolue l'entreprise. Ainsi l'offre proposée peut être :

- spécifique : dans le cas d'un produit unique non reproductible (barrage électrique, station orbitale MIR, porte-avion...),
- standardisée avec un produit unique notamment sur les marchés émergents ou à faible concurrence, standardisée avec plusieurs produits types si les coûts enveloppes sont faibles (électroménager),
- diversifiée : principalement sur les marchés matures soumis à la concurrence. Pour cela, il est possible de se baser sur une plate-forme commune à tous les produits à laquelle on ajoute un ensemble d'options et variantes, ou bien sur différentes plates-formes standardisées par gamme de produit.

Un choix stratégique s'impose sur la manière dont sera présentée la solution technique en réponse à la diversité fonctionnelle. Ce choix doit être argumenté par une évaluation aussi complète que possible des différentes solutions envisageables en prenant en compte les questions suivantes :

- combien coûte / rapporte de faire telle ou telle option / variante ?
- combien coûte / rapporte de NE PAS faire telle ou telle option / variante ?

L'option standardisée étant équivalente à l'option spécifique avec des fonctions élargies, il s'agit dans tous les cas de conception monoproduit que nous ne développons pas ici.

Nous nous situons maintenant dans l'option où il a été choisi de réaliser une offre diversifiée qui s'appuie sur une plate-forme commune à laquelle s'ajoutent des options et variantes. La création de la structure technique proposée s'appuie sur la figure 10.

Comme pour la structure fonctionnelle, la structure technique doit séparer les aspects stables des aspects variables. Les aspects stables sont autant que possible inté-

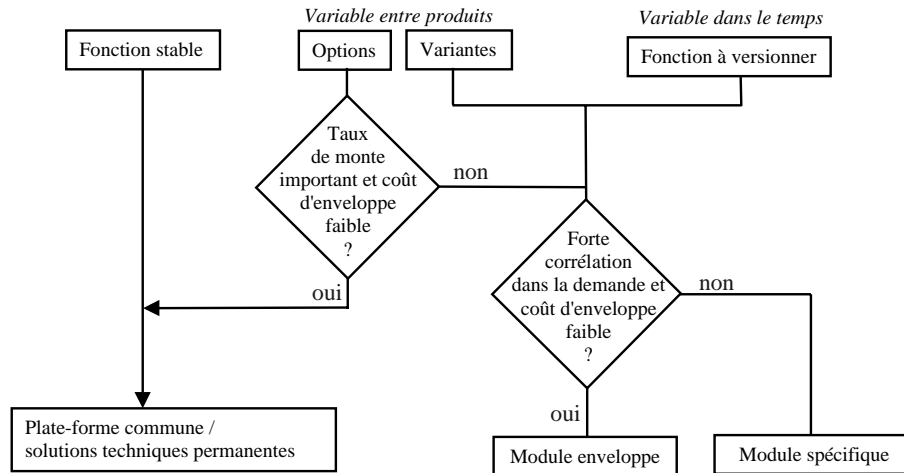


Figure 10. Création d'une structure technique

grés dans la plate-forme commune. Une négociation sur les éléments variables permet d'inclure certains de ces éléments dans la plate-forme commune (cf. Gonzalez-Zugasti *et al.* [GON 98, GON 00b]).

Les éléments variables sont conçus autour de modules en proposant des interfaces standards pour faciliter l'échange des modules et en découplant au maximum modules et fonctions pour éviter les fonctions partagées entre plusieurs modules ce qui propage les modifications en cas d'évolution de la fonction. En revanche, si un module peut assurer différentes fonctions, la différenciation des produits peut être retardée en utilisant ce même module pour plusieurs usages.

L'intégration des différentes fonctions dans un même module est d'autant plus intéressante que la corrélation entre les fonctions est importante. La mesure des interactions entre les fonctions peut être déterminée à l'aide des outils de *Data Mining* ([BER 97], [FAY 96], [KUS 00], [WES 98]).

Enfin, les taux de monte des différentes fonctions peuvent justifier le fait que certaines options soient montées en standard sur la plate-forme commune à l'aide d'une simple évaluation économique.

4.6. Création des ensembles de process

Cette étape consiste à définir les process candidats pour l'industrialisation des familles de produits.

Il s'agit de définir l'ensemble des choix possibles en prenant en compte les contraintes liées au contexte de production. Contraintes physiques, contraintes techniques,

parc machine à disposition, réseau de fournisseurs, mode d'approvisionnement (kanban, synchrone...), disposition physique des sites et des machines, compétences de l'entreprise, politique de développement sont autant de contraintes qui limitent l'étendue des possibilités.

Différents modes de gestion sont à considérer selon les productions. Pour les éléments communs, une production continue ou pour stock est envisageable. Pour les options et variantes, les coûts et quantités à produire des différents éléments aideront à la sélection de production par îlots, de process standards ou d'utilisation de process flexibles.

Les données sur les quantités produites sont ici indispensables pour dimensionner les processus et évaluer les coûts et délais nécessaires. Le taux de monte des fonctions peut aider dans le choix du process.

4.7. Recherche des solutions

L'ensemble des possibilités de conception et de production étant définies, il s'agit d'évaluer les différentes alternatives à l'aide de l'ensemble des indicateurs (tableau 3). Selon les valeurs des différents indicateurs, il va s'agir très souvent de reconcevoir le produit et/ou le process pour prendre en compte l'évolution favorable d'un certain nombre d'indicateurs.

La figure 11 présente un algorithme de recherche de solutions valides pour la réalisation de la famille de produits.

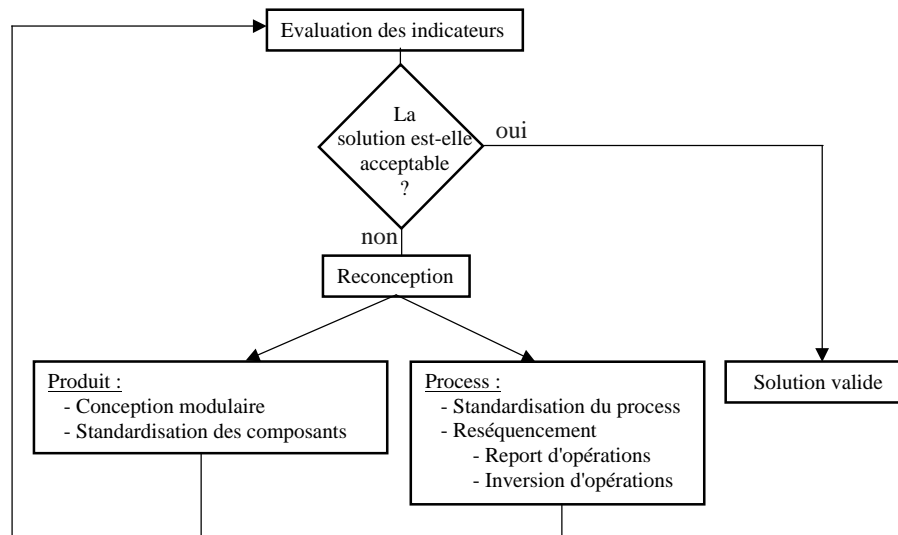


Figure 11. Recherche des solutions

Le processus présenté est itératif. Il s'agit d'améliorer les propositions existantes de manière à satisfaire au mieux l'ensemble des contraintes présentes. Une réunion de l'équipe « Maîtrise de la diversité » est nécessaire pour poser des priorités quant à l'évolution à suivre. Il est parfois nécessaire d'aller à l'encontre des logiques locales et des indicateurs locaux pour prendre en compte la globalité des différents secteurs concernés.

Les outils à disposition pour la reconception du produit et du processus sont :

- 1) au niveau du produit : la composition modulaire, la standardisation des composants, la commonalité ;
- 2) au niveau du process : la standardisation du process, le reséquencement (report d'opération, inversion d'opérations).

La décomposition modulaire veille à décomposer les conceptions intégrées de manière à désolidariser les flux liés à l'utilisation de chaque fonction.

La standardisation veille au contraire à partager le process sur une plus grande quantité de produits afin de lisser la charge et d'agréger les risques et incertitudes sur la demande des différentes fonctions du module.

Le reséquencement couplé à la décomposition modulaire permet de repousser le point de différenciation pour faciliter la gestion des stocks, simplifier les flux et décaler les stocks de sécurité vers l'aval.

A chaque itération, le calcul de l'évolution des valeurs des indicateurs permet de vérifier que la conception évolue dans le bon sens et montre les progrès réalisés dans une démarche d'amélioration continue. De plus, le chiffrage des progrès est une bonne source de motivation pour l'équipe « Maîtrise de la diversité ».

4.8. Choix d'une solution

L'ensemble des solutions valides dans le contexte considéré a été défini. L'équipe « Maîtrise de la diversité » doit évaluer et comparer ses propositions par rapport aux indicateurs définis stratégiquement. Il reste ensuite pour l'équipe à sélectionner une solution parmi celles-ci.

Toutes les solutions ont des évaluations différentes pour chacun des indicateurs, il convient de choisir la solution qui offre le meilleur compromis, il s'agit ici encore d'un choix stratégique qui va prendre en compte l'ensemble des indicateurs définis en amont. Une négociation entre les différents intervenants de l'équipe est encore nécessaire, car la décision transversale aura des impacts divers plus ou moins bénéfiques localement.

5. Conclusion

L'article présenté ici a proposé une méthodologie de conception de produits à forte diversité. Cette méthodologie s'appuie sur une séparation en 3 niveaux de la diversité. Les diversités fonctionnelle, technique et process sont définies. Les outils et méthodologies de la littérature qui portent sur les familles de produits sont structurés vis-à-vis de ces 3 niveaux de diversité.

La méthodologie proposée s'appuie sur une vision globale de la diversité. Elle vise à la maîtrise d'indicateurs quantitatifs. Pour cela, une analyse des besoins fonctionnels sert à distinguer les éléments fixes et les éléments variables, de manière à les développer indépendamment dans la structure technique. Un processus de recherche de solution permet de reconcevoir le produit et/ou le process dans un but d'amélioration de la solution.

Cet article permet ainsi de réconcilier les exigences du marketing, qui souhaite une grande diversité produit, avec celle du producteur, qui doit concevoir et fabriquer cette diversité produit.

Cette méthodologie, développée en partenariat industriel, a été appliquée avec succès pour la reconception de faisceaux électriques automobiles [AGA 02a], [AGA 03b].

De nombreuses perspectives restent néanmoins ouvertes qui concernent la logistique adaptée à la production d'une famille de produits.

6. 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. », *Proceedings of 4th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering - IDMME 2002*, 2002, Clermont-Ferrand, France.
- [AGA 03a] AGARD B., « Conception des familles de produits : Etat de l'art », *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 2003, To be Published.
- [AGA 03b] AGARD B., TOLLENAERE M., « Méthodologie de conception des familles de produits : Application aux faisceaux électriques. », *Proceedings of 8eme Colloque national sur la conception mécanique intégrée - PRIMECA'03*, 2003, La Plagne, France.
- [ARI 02] ARIBAS H., Application de techniques de data mining à la caractérisation des demandes de produits finis dans un contexte de grande diversité, Mémoire de DEA, Ecole Nationale Supérieure de Génie Industriel, 2002.
- [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.
- [BER 97] BERRY M.-J., LINOFF G., *Data Mining : Techniques appliquées au marketing, à la vente et aux services clients*, Informatiques, InterEdition, 1997.

- [BRI 00] BRIANT O., Etude théorique et numérique du problème de la gestion de la diversité., Thèse de Doctorat, INPG, 2000.
- [BRU 87] BRUCE L., « The bright new worlds of BENETTON », *International Management*, vol. 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.
- [CIA 95] CIALVALDINI B., LOUBET J.-L., « La diversité dans l'industrie automobile française : Hésitations et enjeux. Regards croisés de l'historien et du gestionnaire. », *Gérer et comprendre*, vol. 41, 1995, p. 4-19.
- [DAH 01] DAHMUS J., GONZALEZ-ZUGASTI J., OTTO K., « Modular Product Architecture », *Design Studies*, vol. 22, 2001, p. 409-424.
- [DUP 99] DUPONT L., EROL M., CORMIER G., TURKKAN N., « La standardisation des composants : modèles et algorithmes », *3ème 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.
- [FAY 96] FAYYAD U., PIATETSKY-SHAPIRO G., SMYTH P., UTHURUSAMY R., *Advances in knowledge discovery and data mining*, AAAI Press / The MIT Press, 1996.
- [FOU 99] FOUQUE T., « A la recherche des produits flexibles », *Revue Française de Gestion*, vol. mars-avril-mai, n° 123, 1999, p. 80-87.
- [GON 98] GONZALEZ-ZUGASTI J., OTTO K., BAKER J., « A method for architecting product platforms with an application to interplanetary mission design », *Proceedings of DETC'98 ASME Design Automation Conference, Atlanta, GA, September 13-16, 1998*.
- [GON 99] GONZALEZ-ZUGASTI J., OTTO K., BAKER J., « Assessing value for product family design and selection », *Proceedings of DETC'99 ASME Design Automation Conference, Las Vegas, Nevada, September 12-15, 1999*.
- [GON 00a] GONZALEZ-ZUGASTI J., OTTO K., « Modular Platform-Based Product Family Design », *Proceedings of DETC'00 ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Baltimore, Maryland, September 10-13, 2000*.
- [GON 00b] 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.
- [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.
- [HYE 84] HYER N., WEMMERLÖV U., « Group technology and productivity », *Harvard Business Review*, vol. July-August, 1984, p. 140-149.
- [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.

- [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.
- [KUS 00] KUSIAK A., *Computational Intelligence in Design and Manufacturing*, Wiley-Interscience, New York, NY, 2000.
- [LEE 96] LEE H., « Effective inventory and service management through product and process redesign », *Operations Research*, vol. 44, n° 1, 1996, p. 151-159.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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 ans science*, vol. 13, 2000, p. 105-115.
- [WES 98] WESTPHAL C., BLAXTON T., *Data Mining Solutions*, John Wiley & Sons, New York, NY, 1998.
- [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 : ASME Design Engineering Technical Conferences, Las Vegas, Nevada, September 12-15, 1999.*

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

Reçu le : 3 décembre 2002

Accepté le : 10 avril 2003