



**Ecole Doctorale  
Organisation Industrielle et Systèmes de Production  
(O.I.S.P.)**

**Doctorat de Génie Industriel**  
Institut National Polytechnique De Grenoble

***Contribution aux méthodes de conception modulaire de  
produits et processus industriels***

***par Alberto JOSE FLORES***

***Résumé de Thèse***

**Laboratoire GILCO (Gestion Industrielle Logistique et Conception)**

**Ecole Doctorale « Organisation Industrielle et Systèmes de Production »**

Directeur : Daniel BRISSAUD

BP 47 – 38040 Grenoble Cedex 9

Mail : [ed-oisp@inpg.fr](mailto:ed-oisp@inpg.fr) Tel : 04 76 82 56 82

**Soutenance le 3 Novembre, 2005 à Grenoble – N°**



Alberto JOSE FLORES est né le 30 Mars 1972 à Saltillo (Mexique). Il est titulaire d'un Diplôme Ingénieur en Génie Industriel obtenu à l'« Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey » au Mexique en 1995. En 1999, il acquiert cinq ans d'expérience dans l'industrie privée, en tant que responsable d'approvisionnement de l'entreprise Maderas Exoticas S.A (Mexique) puis dans le domaine de la production, en tant que chef de production d'une petite entreprise au Mexique (J. H. Muebles S.A). En 2001, il obtient son Diplôme d'Etudes Approfondies en Génie Industriel à l'Ecole Nationale Supérieure de Génie Industriel (ENSGI). Boursier du gouvernement français à travers une allocation MENRT, il a préparé sa thèse doctorale au sein du Laboratoire GILCO (Gestion Industrielle, Logistique et COncception).

Thèse soutenue le 3 novembre, 2005

**Directeur de thèse :**

M. Michel TOLLENAERE, Maître de Conférences à l'INPGrenoble

**Jury :**

M. Serge TICHKIEWITH, Professeur au Lab. Sols, Solides, Structures (INPG), Président

M. Michel ALDANONDO, Professeur à l'ENSTIMAC – CR GI, Rapporteur

M. Bernard GRABOT, Professeur à LGP-ENIT, Rapporteur

M. Bruno AGARD, Professeur à l'École Polytechnique de Montréal (CANADA), Examineur

Le mémoire de thèse et les publications de **Alberto JOSE** sont disponibles auprès de :

Mme. Chantal Puech

Secrétariat GILCO

46, avenue Félix Viallet

38031 Grenoble Cedex

Tél. 04.76.57.43.20 – Télécopie 04.76.57.46.95 – courriel : [chantal.puech@gilco.inpg.fr](mailto:chantal.puech@gilco.inpg.fr)

# Contribution aux méthodes de conception modulaire de produits et processus industriels

Par Alberto JOSE FLORES

## Introduction

Les industriels peuvent dans certains cas, être confrontés à des problèmes pour répondre à une forte demande d'une grande diversité de produits. Tel est le cas de quelques entreprises notamment dans les domaines de la construction automobile, des télécommunications et des composants électroniques Mikkola (2003). Fournir une variété de produits en quantités importantes peut s'avérer complexe et coûteux puisque gérer une variété importante de produits peut occasionner une augmentation du nombre des composants différents ce qui implique une augmentation des coûts dans différentes activités du cycle de vie du produit.

Une stratégie prometteuse est donc de développer des produits avec des groupes ou modules de composants. La réutilisation et la combinaison de modules de composants, permettent de développer facilement différents produits. Cette stratégie permet aussi, entre autres aspects, de réduire la complexité de production, la diversité des stocks nécessaires ainsi que le délai d'obtention d'un produit fini, Star (1965).

Un module qui permette la différenciation retardée des produits dans la ligne de production est appelé « une plateforme » dans cette thèse. Ce travail porte donc sur la mise en place des méthodologies pour la résolution de problèmes liés à la construction de plateformes.

Pour expliquer le contenu de la thèse ce résumé est divisé en sections comme suit :

1. Positionnement du sujet
2. La problématique.
3. Première proposition ou stratégie.
4. Deuxième proposition.
5. Conclusions et perspectives

## Positionnement du sujet

Quelques secteurs, par exemple celui des automobiles, font face à une forte concurrence. Les entreprises qui en font partie doivent fournir une gamme plus variée de produits à un prix réduit. Un aspect important est donc la manière dont les produits sont conçus, puisque de la conception découle la façon de produire et d'assembler les produits. Une stratégie dans ce sens est connue comme « Mass Customization ».

Pine (1993) définit la « Mass Customization » comme une stratégie qui concerne la fabrication de différents produits avec l'utilisation de mêmes composants configurés ou assemblés de différentes manières. Ce concept est donc centré sur l'utilisation d'unités interchangeable qui sont dessinées, fabriquées ou produites de la même façon et qui permettent d'assembler un certain nombre de configurations de produits. Selon Pine (1993), la meilleure technique dans ce sens est d'utiliser des modules de composants. Ce concept a été mentionné pour la première fois dans la littérature d'ingénierie

par Star (1965). En synthèse, on peut dire qu'un module est un groupe de composants interchangeables. Galsworth et al. (1994).

Pine (1993) explique que les économies de gamme<sup>1</sup> sont obtenues en employant des modules à plusieurs reprises dans différents produits, et les économies d'échelle<sup>2</sup>, en utilisant des volumes plus importants de ces modules. La possibilité de personnaliser des quantités importantes de produits est possible grâce au choix pertinent des modules qui pourront être rapidement et correctement configurés en produits souhaités.

Différents avantages et limitations liés à l'utilisation de modules pour concevoir et fabriquer des produits sont abordés dans cette thèse. Parmi les principaux avantages on distingue : la réduction des coûts de conception et de production ainsi que la flexibilité d'obtention de produits.

Une analyse bibliographique est montrée dans cette étude, et un chapitre est consacré à quelques travaux orientés vers le choix optimal de modules.

Différentes implications et concepts liés à la conception modulaire sont aussi expliqués. Par exemple :

- la nécessité d'utiliser les composants nécessaires à la composition de modules
- entre autres aspects on peut trouver les caractéristiques d'interfaces. Les interfaces sont des spécifications physiques (par exemple, caractéristiques géométriques et dimensionnelles), et fonctionnelles (par exemple type de flux de matériel, d'énergie, de signal, ...) des composants. Les caractéristiques d'interface limitent le nombre de combinaisons modulaires.
- les types de configuration modulaire possibles. On peut trouver par exemple les configurations : « Component Sharing », « Component Swapping », « Cut-To-Fit », « Mix », « Bus », « Sectionnel », voir Figure 1.

Cette thèse se concentre sur le choix optimal de la configuration « bus modularity », pour développer différents produits, voir Figure 1. Dans cette configuration, différents composants (par exemple, les puces de mémoire d'un ordinateur) sont assemblés à un module de base, ou plateforme, (par exemple, la carte mère de l'ordinateur), permettant ainsi de créer autant de produits qu'il y a de composants possibles à ajouter. La Figure 2 montre un autre exemple, exposé dans les travaux de Sanchez (2000).

La production et le stockage de plateformes à l'avance, et l'addition de composants plus tard dans la ligne de production permettent de différencier les produits plus tard dans la chaîne de production. Les principaux avantages de la différenciation retardée sont :

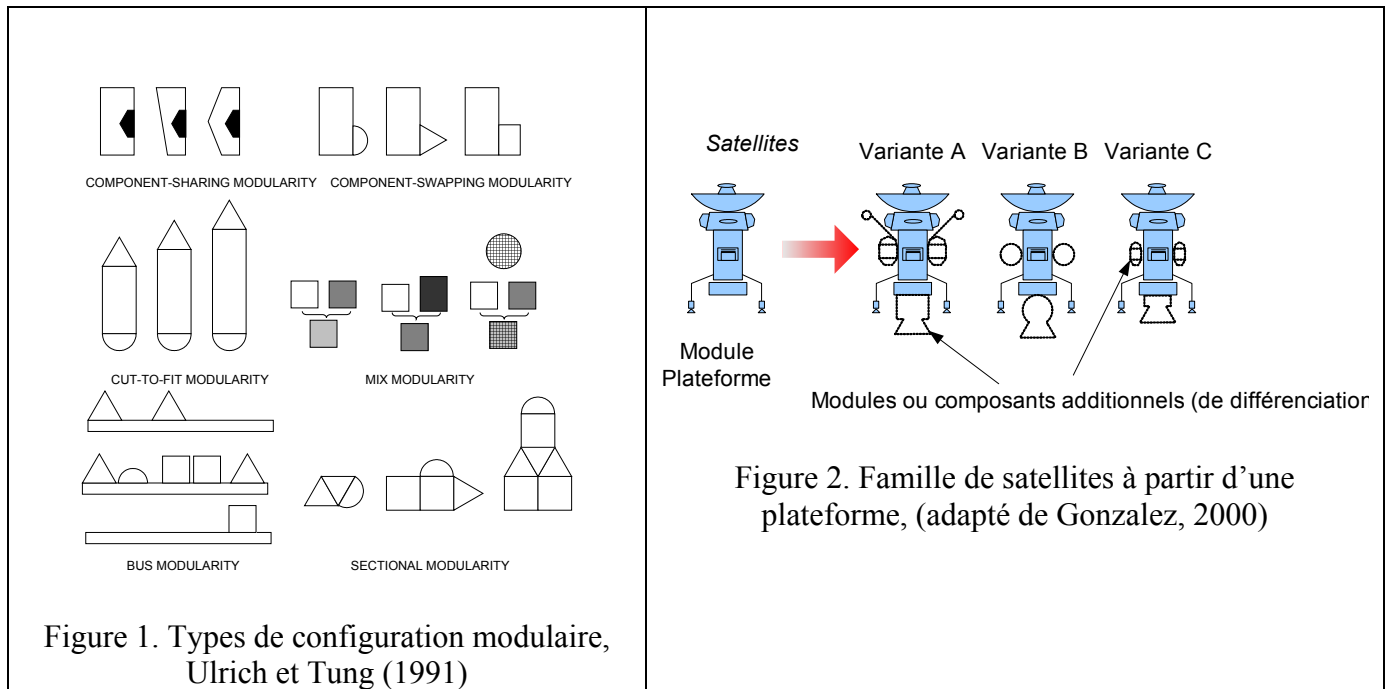
- l'« homogénéisation » des opérations de production, des composants, et des stocks, avant le point de différenciation<sup>3</sup> dans la ligne de production.
- la possibilité de réagir en un temps réduit à différents « niveaux » de demande
- réagir en un temps réduit à différents degrés de personnalisation des produits

---

<sup>1</sup> Une entreprise réalise des économies de gamme lorsqu'elle réduit ses coûts de production en élargissant sa gamme de produits et de services (production conjointe). Il faut pour cela qu'elle puisse utiliser des composants identiques, les mêmes installations et le même personnel pour produire plusieurs produits.

<sup>2</sup> Une entreprise réalise des économies d'échelle lorsqu'elle réduit ses coûts unitaires en produisant plus (c'est-à-dire lorsque les coûts moyens diminuent à mesure que la production augmente).

<sup>3</sup> Étape de production après laquelle les produits ont leur identité propre et différente.



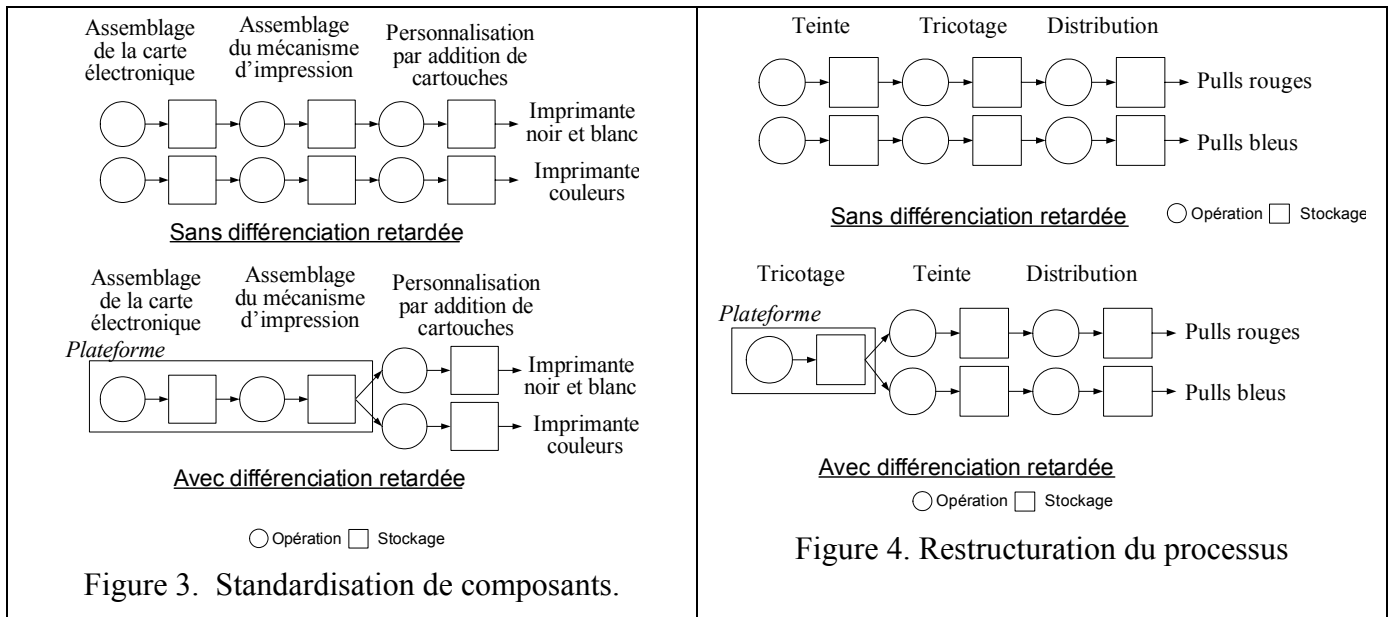
En relation avec cette technique Lee et Tang (1997), mentionnent deux stratégies intéressantes :

- La réutilisation de composants : la Figure 3 montre l'exemple utilisé pour expliquer cette stratégie. Le processus de production de deux types d'imprimantes (une multicolore une monochrome) se compose de trois étapes : l'assemblage initial (assemblage de la carte électronique), l'assemblage final (assemblage du mécanisme d'impression), puis l'étape de personnalisation (addition de cartouches). Dans chaque étape, différentes versions des composants sont ajoutées. Par exemple, différentes versions de la carte électronique sont ajoutées lors de la première étape et différentes versions du mécanisme d'impression lors de la deuxième étape. Utiliser les mêmes versions de ces deux composants permet de retarder la différenciation et utiliser une plateforme.
- Restructuration du processus : La Figure 4 montre l'exemple utilisé pour expliquer cette stratégie. Le processus de fabrication des pulls (de l'entreprise Benetton) se compose de trois étapes principales : teinte, tricotage et distribution. Lors de la première étape, les matières premières (fils blancs) sont teintés en différentes couleurs. Puis, les fils sont tricotés pour les transformer en pulls, ils sont alors distribués. La durée de l'opération de teinte est beaucoup plus courte que l'étape de tricotage. L'alternative d'inverser les deux premières étapes s'avère être une meilleure option. Avoir un stock de pulls blancs permet de différencier rapidement les couleurs de pulls en plongeant les pulls dans différents bains de couleurs pour satisfaire la demande. La réorganisation de la séquence permet donc de réduire le nombre des opérations de différenciation, les stocks personnalisés ainsi que le temps de réponse.

A partir de ces deux stratégies, on peut déduire que la différenciation retardée est déterminée par la conception des produits et/ou leur processus de production de sorte que le point de différenciation soit retardé aussi longtemps que possible. Dans ces deux différentes stratégies, l'objectif est d'utiliser un groupe de composants communs (une plateforme) dans les premières opérations de fabrication. Les problèmes qui se posent dans ce sens sont :

- Par rapport à la première stratégie : quelles versions de composants utilisées dans certains produits pourront être réutilisées dans des autres ?
- Par rapport à la deuxième stratégie : comment organiser la séquence de production ?

La résolution de ces problèmes est l'objectif de cette thèse. A l'exception de ces travaux (Lee et Tang (1997), Martin et Ishii (1997)) presque aucun travail à notre connaissance ne se concentre sur la construction explicite d'une plateforme qui prenne en compte le fait de retarder le point de différenciation.



## La problématique

L'exemple utilisé, pour expliquer les problèmes de la construction de plateformes, est le développement d'une famille de tableaux de bords (utilisés dans quelques voitures), voir Figure 5.

La méthodologie graphique pour montrer la problématique précise de notre étude s'appelle PSG (Process Sequence Graph). La Figure 6 montre le diagramme PSG utilisé pour exposer le flux de production de l'exemple. Chaque type de composant correspond aux composants réels du Tableau 1.

Ce diagramme, Figure 6, a la même logique que la Figure 3 et la Figure 4. Les nœuds représentent l'assemblage des différentes versions de composants utilisées pour différencier un produit d'un autre. Le processus de production permet d'obtenir 18 produits finaux, et il est facile d'observer les différents points de différenciation.

Composant	Corps du combiné	Carte électronique	Indicateur de transmission automatique	Jauge à essence	Indicateur de température	tachymètre	Indicateur de vitesse	Témoins lumineux	Assise de vitre	Vitre	Assemblage finale
Type de composant :	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Tableau 1. Références

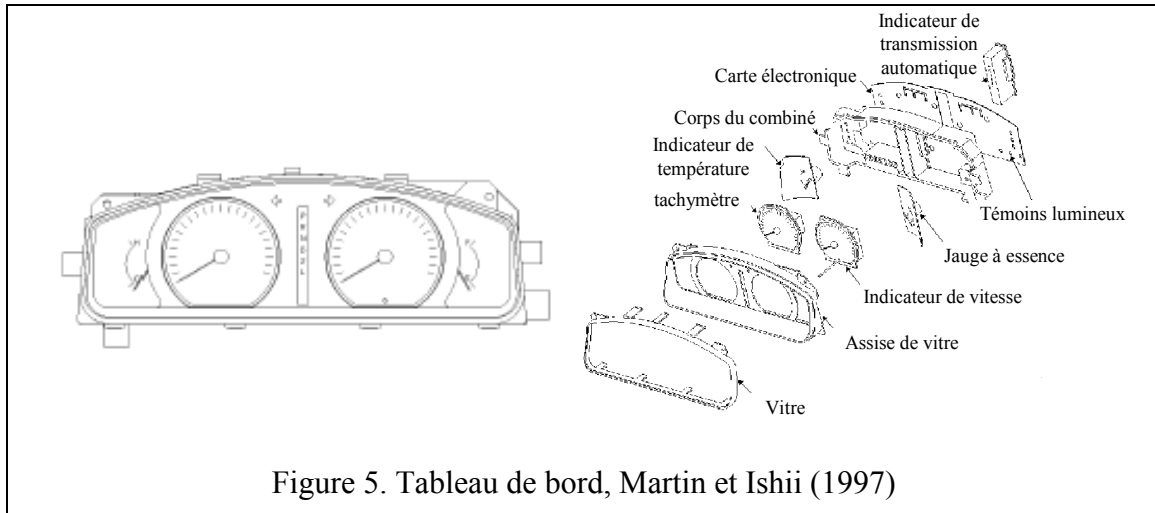


Figure 5. Tableau de bord, Martin et Ishii (1997)

La différenciation de tous les produits commence à la deuxième étape de production (l'insertion du composant type « 2 »). Les nombres sur la deuxième ligne supérieure dénotent le nombre de versions des composants. Le nombre de noeuds de la ligne inférieure montre le nombre d'opérations différentes (l'assemblage de versions différentes de composants). Le nombre total d'opérations différentes est une mesure appropriée des coûts et délais de production, puisque leur minimisation permet la construction de plateformes. Selon Martin et Ishii (1997), déterminer l'ordre du processus de production qui réduise le nombre de nœuds est un problème complexe. Une solution possible est de le réorganiser en ordre croissant par rapport au nombre de versions des composants utilisés dans chaque étape de production, voir Figure 7, c'est-à-dire, les composants types "1", "9" et "10" ont une seule version, ainsi ils peuvent être assemblés d'abord, les composants types « 3 » et « 4 » ont deux versions, c'est pourquoi ils doivent être assemblés après, et ainsi de suite. Ceci permet de réduire de 113 à 76 le nombre total d'opérations différentes. La réduction du nombre de nœuds (ou nombre total d'opérations différentes) permet d'augmenter le nombre de composants des plateformes. Martin et Ishii (1997), expliquent que cette méthode est efficace mais sous optimale.

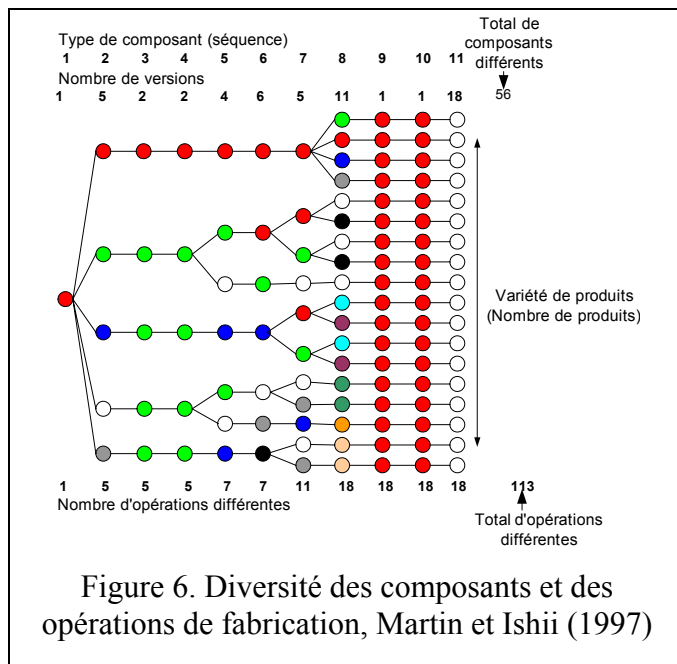


Figure 6. Diversité des composants et des opérations de fabrication, Martin et Ishii (1997)

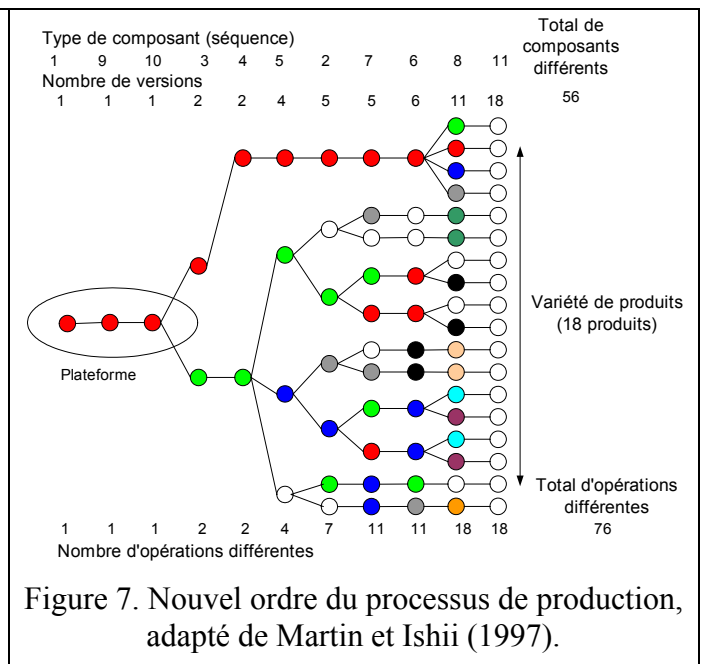


Figure 7. Nouvel ordre du processus de production, adapté de Martin et Ishii (1997).

Afin de trouver la solution optimale, une méthode serait d'énumérer toutes les permutations possibles d'ordre de processus et de choisir la meilleure. Cependant, puisque le nombre de permutations est  $n!$ , ( $n =$

nombre d'étapes du processus), l'énumération et le calcul de toutes les possibilités avec les ressources actuelles de calcul serait lente. Pour cet exemple ce serait  $10!$  (plus de 3.6 millions de permutations). Alors les questions qui se posent sont : comment choisir l'ordre d'assemblage optimal ? Quelle méthode d'optimisation peut être appliquée ? Tels sont les problèmes d'ordonnement de la séquence d'assemblage.

Une autre solution possible pour réduire le nombre de nœuds est la réutilisation de versions de nœuds entre produits. Ceci fait référence à la stratégie de Lee et Tang (1997) mentionnée auparavant dans la Figure 3. Ceci permet de réduire le nombre total d'opérations différentes.

Cependant, la réduction des versions de nœuds peut impliquer une analyse complexe puisque l'on doit adapter les produits aux besoins des clients avec un maximum de versions de composants spéciaux pour respecter les caractéristiques des produits en même temps qu'on doit employer des versions communes pour utiliser des plateformes. Il faut donc savoir quels composants, utilisés dans certains produits, pourront être réutilisés dans d'autres ? Comment faire un tel choix afin d'utiliser des plateformes et de respecter, dans le même temps, les caractéristiques des produits ? Quelle méthode d'optimisation peut s'appliquer ? Tels sont les problèmes posés par le choix de versions des produits.

## Première démarche proposée

Cette première démarche se concentre sur la résolution de ce dernier problème. L'exemple utilisé, pour cette démarche est le diagramme PSG du flux de assemblage d'un ensemble de moteurs électriques. L'objectif est d'obtenir 9 moteurs avec la moindre quantité de versions possibles.

Le problème est formulé comme un problème mathématique d'optimisation. Les données utilisées sont :

- Le nombre de produits différents nécessaires et leurs spécifications.
- Le PSG initial, ainsi que le coût des versions utilisées.
- La compatibilité entre les versions de composants des produits. Pour cela on définit l'architecture (système des relations techniques entre les interfaces des composants afin d'évaluer la compatibilité de ces derniers).

## Résultats :

Le problème d'optimisation formulé implique l'évaluation d'un nombre important de combinaisons possibles de versions de composants pour chaque produit. Deux algorithmes d'optimisation ont été développés : un algorithme Recuit Simulé pour les problèmes à forte combinatoire (avec une quantité importante de versions de composants), et un algorithme en Branch & Bound pour les problèmes simples.

La fonction objectif, du problème d'optimisation, est focalisée sur trois critères :

- La réduction du coût de l'ensemble des produits : on a pris en compte la réduction ou l'augmentation du coût de chaque produit du fait de l'utilisation de différentes versions de composants. Ce critère est pris en compte avec un poids d'importance «  $\delta$  »
- La plus grande similitude avec les produits originaux par rapport à certaines spécifications. Ce critère est pris en compte avec un poids d'importance «  $\alpha$  »
- La réduction du nombre total d'opérations différents d'assemblage. Ce critère est pris en compte avec un poids d'importance «  $\eta$  »

La fonction objectif sujette à contraintes :

- La compatibilité ou cohérence entre les versions de composants de chaque produit.
- Eviter doublures de versions par rapport aux types de composants dans chaque produit

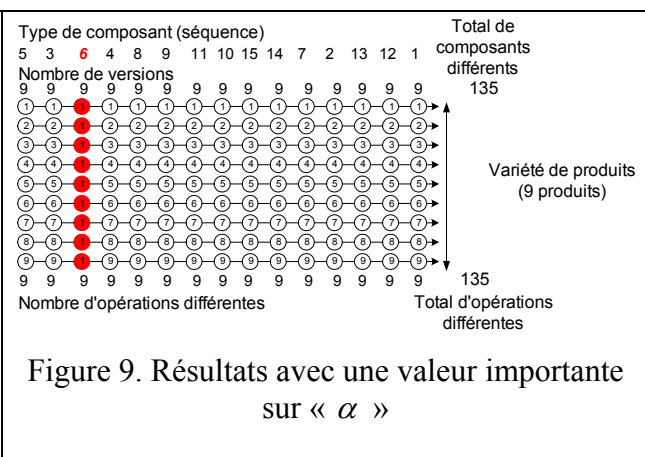
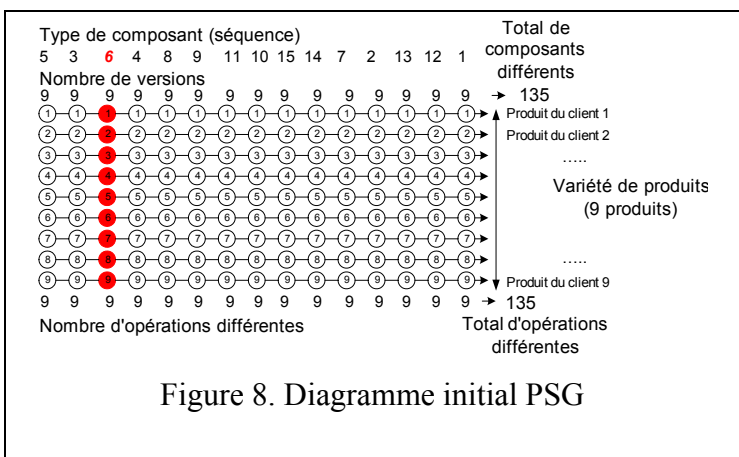


La variable de décision du problème (solution à trouver) est l'utilisation ou non, de la version utilisée dans un produit « y » par rapport à chaque type de composant, dans un produit « x ». Cette variable est binaire.

Les caractéristiques du problème laissent déduire que le problème d'optimisation est très difficile à résoudre si l'exemple à utiliser présente un nombre important de configurations de versions (valides) à évaluer. Cette thèse propose donc un algorithme (d'approximation) en « Recuit Simulé » pour optimiser de tels exemples. Dans le cas où l'exemple industriel présente un nombre faible de configurations (valides) à évaluer, le lecteur peut utiliser l'algorithme (exact) en « Branch & Bound » déjà développé.

*Résultats avec algorithme « Branch & Bound »:*

Le PSG initial, d'un ensemble de moteurs électriques, est montré dans la Figure 8. Chaque produit utilise initialement des versions différentes de chaque type de composant. Cet algorithme trouve le choix optimal rapidement si le nombre de solutions valides du problème est relativement faible. Pour faire les tests de cet algorithme le nombre de solutions valides a été évidemment réduit, de manière qu'un nombre faible de versions de composants soit compatible. On a défini le composant type «6» (en rouge) comme un composant compatible avec n'importe quelle autre version des autres composants. Avec une valeur importante de «  $\alpha$  », l'algorithme donne les résultats de la Figure 9. Avec une valeur importante de «  $\delta$  », l'algorithme donne les résultats de la Figure 10. Pour chercher l'explication de ces résultats on a étudié le comportement d'un type de composant d'un produit. On a utilisé le composant type « 4 » du produit « 8 » et on a fait une simulation pour chaque valeur discrète possible de «  $\alpha$  » et de «  $\delta$  », ce qui donne les résultats de la Figure 11. Evidemment, une valeur importante de «  $\alpha$  » implique de choisir la version utilisée à l'origine, c'est-à-dire la « version du produit 8 ». Une valeur importante de «  $\delta$  » implique de choisir la version la moins chère parmi les produits, c'est-à-dire la « version du produit 3 ». Un autre test avec un coût encore plus réduit de la même « version du produit 3 » est montré dans la Figure 12. On peut observer que la probabilité d'utiliser la « version du produit 3 » augmente. Ceci permet d'affirmer que lorsqu'un type de composant influence sur la différenciation des produits, et les économies de substitution justifient le changement d'une version de composant, il est plus pertinent de réutiliser la version d'un autre produit<sup>4</sup>. Dans le cas contraire on doit utiliser ou garder la version spéciale utilisée à l'origine, qui serait évidemment une version de différenciation.



<sup>4</sup> Lorsque ceux-ci sont assemblés au début de la ligne de production, ces versions constituent une plateforme.

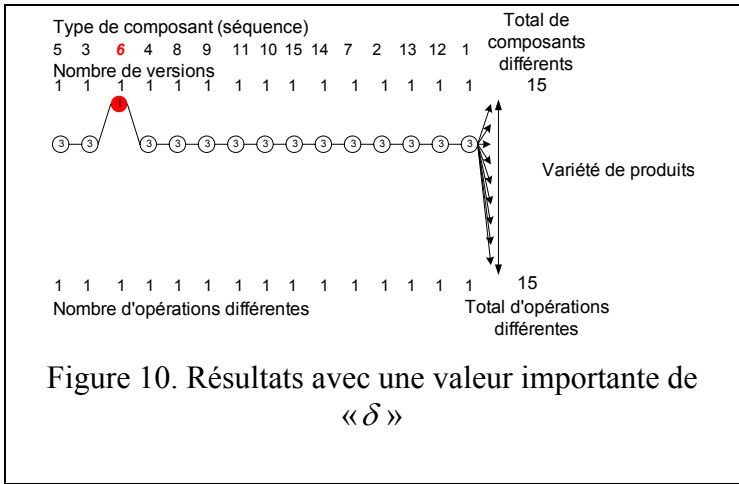


Figure 10. Résultats avec une valeur importante de «  $\delta$  »

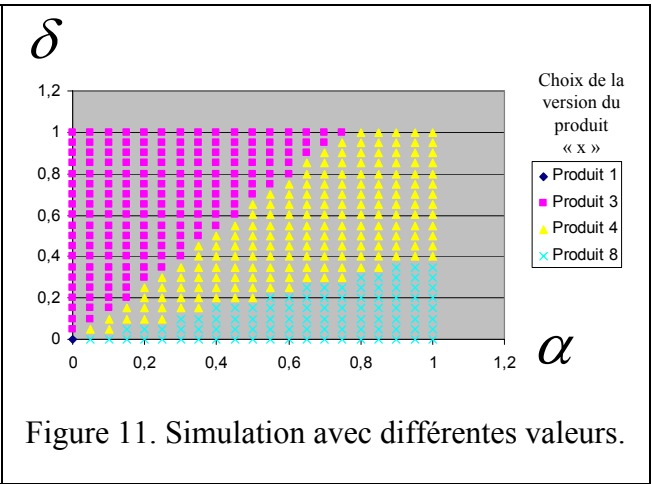


Figure 11. Simulation avec différentes valeurs.

Résultats d'algorithmme Recuit Simulé :

Une relaxation lagrangienne des contraintes a été effectuée sur la formulation mathématique dans cette méthode d'optimisation. Avec cet algorithmme, divers tests ont permis de vérifier différents points. Par exemple une augmentation du poids de «  $\delta$  » a pour conséquences : de minimiser le nombre d'opérations différentes, de minimiser le nombre de versions de composants (et le coût de la famille de produits), d'augmenter l'écart des spécifications entre tout couple produit P (produits originaux) et P' (produits ayant de nouvelles versions), c'est-à-dire de s'éloigner des spécifications des produits originaux, voir Figure 13.

Une augmentation du poids de «  $\alpha$  » a pour conséquences : d'augmenter le nombre total d'opérations différentes, d'augmenter le nombre de versions de composants (et le coût de la famille), de minimiser l'écart des spécifications entre tout couple P et P'. En conclusion, la réduction du nombre total d'opérations différentes, la réduction des coûts (et de versions de composants) ainsi que la possibilité d'employer des plateformes peut se faire au détriment de la satisfaction des clients.

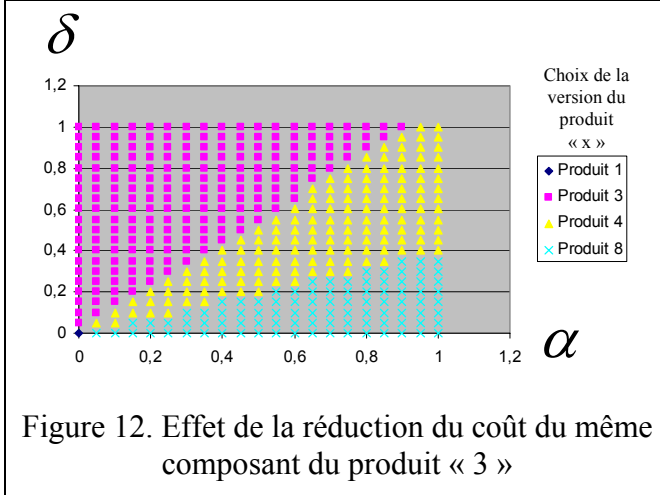


Figure 12. Effet de la réduction du coût du même composant du produit « 3 »

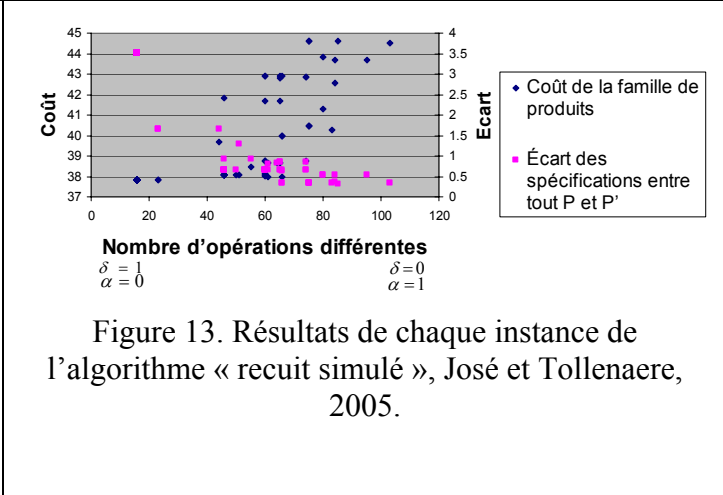


Figure 13. Résultats de chaque instance de l'algorithmme « recuit simulé », José et Tollenaere, 2005.

## Deuxième démarche proposée

Cette deuxième démarche se focalise sur la résolution du problème de la réorganisation de l'ordre d'assemblage. Pour tester cette méthode, nous avons choisi de montrer l'exemple de la fabrication de 18 tableaux de bord (Figure 5). Le flux de production de la Figure 6 en représente la fabrication.

Un problème d'optimisation a été formulé. Les données utilisées pour ce problème d'optimisation sont :

- Le diagramme PSG initial du problème à résoudre.

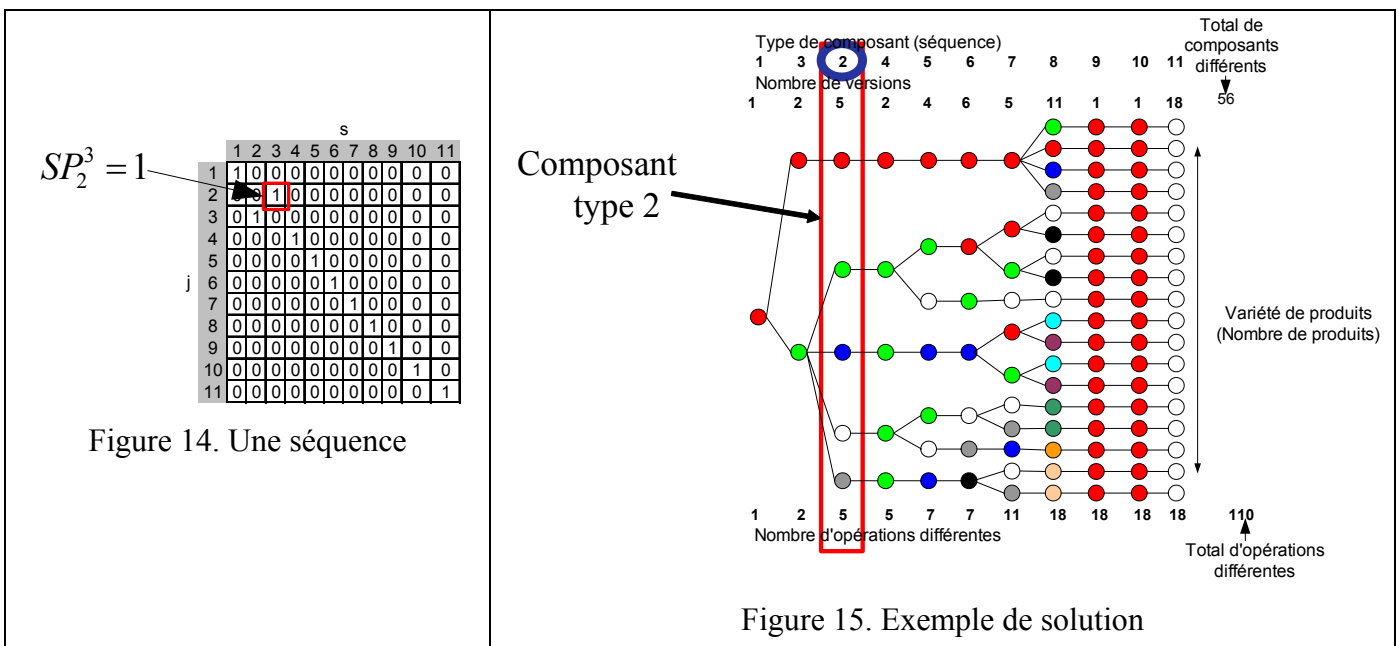
La formulation mathématique à une fonction objectif concentrée sur un seul critère : la réduction du nombre total d'opérations différentes, et qui est sujette à différentes contraintes, par exemple :

- Le respect de l'information : quels composants peuvent être assemblés avant d'autres.
- Une étape d'assemblage pour chaque type de composant.

L'objectif est de trouver l'ordre optimal de la séquence d'assemblage qui réduise le nombre total d'opérations différentes. La variable de décision du problème (solution à trouver) est une matrice binaire :

$$SP_j^s = \begin{cases} 1 & \text{Si le "j"}^{\text{ième}} \text{ type de composant est assemblé dans la "s"}^{\text{ième}} \text{ étape} \\ 0 & \text{Si non} \end{cases}$$

Voici un exemple : La Figure 14 montre une possible valeur de cette variable de décision (une possible séquence). L'intersection  $SP_2^3 = 1$  signifie que le composant type 2 est assemblé dans l'étape "3" et ainsi de suite. La Figure 15 montre comment le composant type 2 est assemblé dans l'étape "3". Deux algorithmes ont été développés pour résoudre la problématique d'optimisation. La formulation mathématique peut être résolue grâce à l'algorithme proposé « Branch & Bound » si le nombre de permutations valides est faible. Dans le cas contraire la thèse propose un algorithme génétique.



## Résultats :

### *Résultats de l'algorithme génétique :*

Une relaxation lagrangienne des contraintes a été effectuée sur la formulation mathématique pour appliquer cette méthode d'optimisation.

L'algorithme génétique utilise 5 opérateurs afin d'optimiser, génération après génération, la fonction objectif utilisée. Ces opérateurs sont : sélection, croisement, mutation, inversion, mutation cataclysmique (Eshelman, 1991).

L'algorithme considère une séquence ou matrice comme un chromosome. L'objectif est donc de raffiner un ensemble de chromosomes composés des valeurs suivantes :

$$\{SP_1^1, SP_1^2, \dots, SP_1^{CP}, SP_2^1, \dots, SP_2^{CP}, \dots, SP_{CP}^1, \dots, SP_{CP}^{CP}\}$$

Ce raffinement consiste à trouver un chromosome avec les valeurs optimales des gènes. Pour illustrer cette logique la Figure 16 montre comment l'opérateur « croisement » recherche une solution possible.

Une population de 15 séquences a été employée dans chaque génération. Les résultats de l'algorithme appliqué au problème d'optimisation depuis une simulation de plusieurs générations sont montrés dans la Figure 17 et Figure 18. Les résultats montrent comment il est possible de réduire de 113 à 75 le nombre total d'opérations différentes de production en 45 minutes de calcul. Un test a permis de vérifier que la meilleure solution possible est de 72 opérations, donc l'algorithme génétique s'approcherait de cette solution tout à fait rapidement.

En tant qu'opérateur de « sélection », la méthode « stockastic universal sampling method » (connue sous le nom de « roulette ») a été employée, et on a choisi « uniform crossover » comme méthode de croisement, du fait qu'elle donne les meilleurs résultats le plus rapidement. Le meilleur chromosome (ou meilleure séquence) que l'algorithme trouve se rapporte au chromosome quinze de la génération 1450 de la Figure 17. Cette séquence optimale permet au concepteur de choisir différentes plateformes pour différents produits, voir Figure 19. Par exemple la plateforme « C » permet de personnaliser en 2 opérations les produits {1, 2, 3, 4}. La plateforme A permet de personnaliser en 4 opérations les produits {5, 6, 7, 8, 9}. On peut observer la façon dont le choix optimal de la séquence permet de construire des plateformes.

Différents tests avec différents opérateurs ont permis de valider la pertinence de la méthode pour construire des plateformes.

### *Résultats avec l'algorithme Branch & Bound :*

Cet algorithme trouve la séquence optimale rapidement si le nombre de solutions valides du problème est relativement faible (autour de moins de 5000). Pour faire les tests de cet algorithme la thèse propose l'utilisation du même exemple antérieur. Le nombre de solutions valides a été évidemment réduit. Les résultats de la Figure 20, montrent comment il est possible de trouver la meilleure solution possible dans un problème de réorganisation de la séquence dans un temps réduit (25 minutes).

**Exemple Matrice 3\*3**

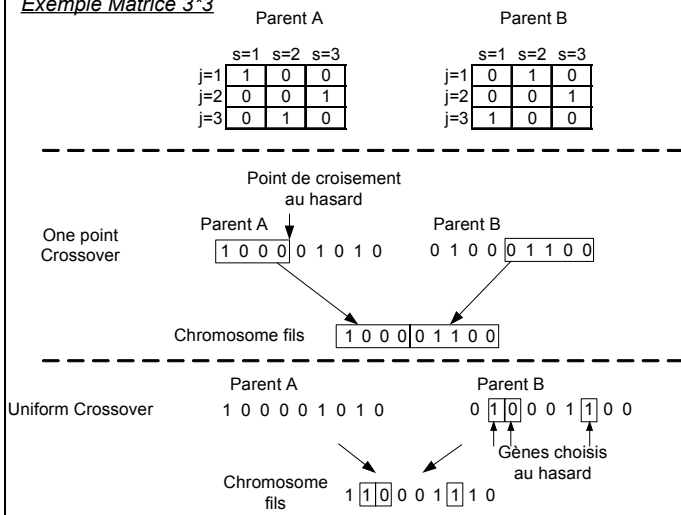


Figure 16. Deux types d'opérateurs de croisement

**Génération 1 : Meilleur nombre de noeuds 180**

Chromosome #1	Chromosome #2	Chromosome #15
0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0	1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 1 0	0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0

**Génération 1450 : Meilleur nombre de noeuds 75**

Chromosome #1	Chromosome #2	Chromosome #15
0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0	1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0	0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0
0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0
1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0
0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1	0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1

**Génération 2000 : Meilleur nombre de noeuds 75**

Chromosome #1	Chromosome #2	Chromosome #15
0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0	0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0
0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0	0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1

Figure 17. Résultats de l'algorithme génétique

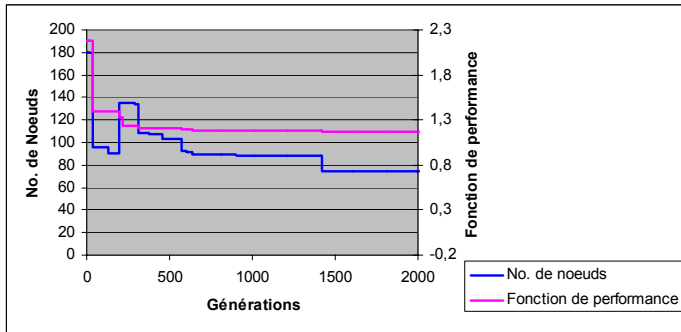


Figure 18. Résultats de l'algorithme génétique

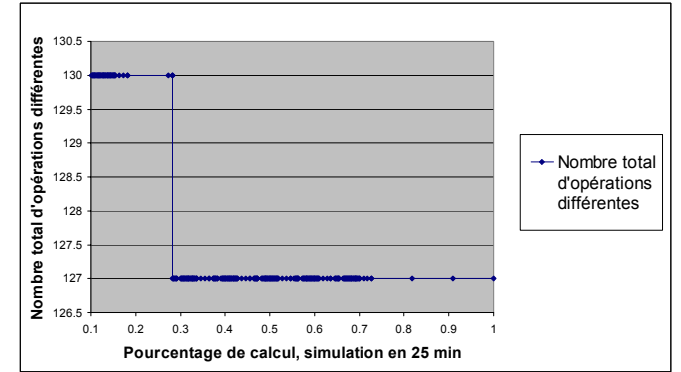


Figure 20. Résultats algorithme Branch & Bound

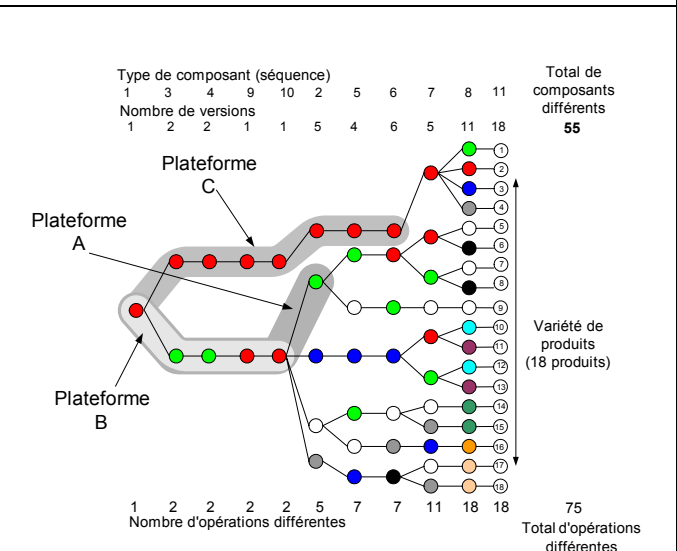


Figure 19. Choix de plateformes.

## Conclusions

Le travail présenté dans cette thèse a montré la mise en place de deux techniques pour la construction de plateformes : une technique de re-conception de produits et celle de re-conception du processus.

Différents tests sur la première méthode (re-conception de produits) ont permis d'affirmer que lorsqu'un type de composant a une influence sur la différenciation des produits mais que les économies de substitution justifient le changement d'une version de composant, il est plus pertinent de réutiliser la version d'un autre produit (celle la moins chère). Dans le cas contraire on doit utiliser la version spéciale utilisée à l'origine sur le produit. D'autres tests ont permis d'éclaircir d'autres aspects, par exemple : le coût de la famille, le nombre de versions de composants et le nombre total d'opérations différentes sont corrélés positivement, cependant ceux-ci sont corrélés négativement avec la satisfaction des clients. Par exemple, la diminution de versions, aspect qui permet l'utilisation de plateformes, est en conflit avec la satisfaction du client. On peut donc affirmer que le choix pertinent de versions à réutiliser parmi les produits est un aspect important par rapport à la satisfaction des clients.

Différents tests par rapport à la deuxième méthode ont montré comment la réorganisation optimale de la séquence permet le choix optimal de plateformes. Le nombre d'opérations pour différencier un produit par rapport à un autre se voit réduite. La réactivité pour répondre à une demande forte d'une diversité définie de produits est améliorée, cet aspect est l'objectif du principe de « Mass Customisation ». Le nombre de stocks spécialisés afin de répondre à la demande se voit également réduit puisque les opérations avant les points de différenciation sont similaires.

## Perspectives

Les travaux présentés peuvent donner lieu à plusieurs suites : par exemple d'autres méthodes d'optimisation peuvent donner meilleurs résultats.

Une autre étude peut se concentrer sur l'intégration des deux méthodes. Une analyse de chaque méthode montre que les résultats d'une méthode sont les données nécessaires à l'autre. Un test d'intégration des deux méthodes est montré dans la thèse et présente, a priori, d'intéressants résultats.

Une autre étude peut viser notamment à évaluer d'autres critères du cycle de vie du produit en modifiant les problèmes d'optimisation formulés. Par exemple l'assignation de « coût de stockage » ou « temps de set-up » à chaque opération pourront donner lieu à d'autres conclusions. Une autre variable est l'assignation du temps du processus à chaque opération d'assemblage, cet aspect permettrait de prendre en compte la réduction réelle du processus de production comme critère d'optimisation dans les deux méthodes. Une autre étude, peut prendre en compte la demande de chaque produit, cette variable peut jouer un rôle important sur les résultats des méthodes présentées. D'autres axes de recherche s'ouvrent donc à partir de cette thèse.

## ***Principales références bibliographiques***

- Elgård P. and Miller T.D., "Defining Modules, Modularity and Modularization", Design for Integration in Manufacturing. Proceedings of the 13th IPS Research Seminar, Aalborg University, Denmark, (1998), 19 p.
- Erixon G., "Modular Function Deployment - A method for product modularization". Thèse de doctorat du The Royal Institute of Technology, Dept. Of Manufacturing Systems, Stockholm, Suede, (1998).
- Mikkola J., "Modularization in New Product Development: Implications for Product Architectures, Supply Chain Management, and Industry Structures", " thèse de doctorat du « School of Technologies of Managing, Copenhagen Business School", Denmark, (2003).
- Meyer M. H., Lehnerd A.P., "The Power of Product Platforms, Building Value and Cost Leadership," New York, N.Y. The free press. (1997), 267 p.
- Gonzalez Z.J.P., "Models for Platform-Based Product Family Design", Thèse de doctorat du "Massachusetts Institute of Technology", (2000).
- Martin, M., and Ishii, K., "Design for Variety: Development of Complexity Indices and Design Charts" Proceedings of the ASME, DETC97 / DFM-4359, (1997), 9p.
- Pine B. Joseph II., "Mass customization: the new frontier in business competition". Boston MA: Harvard business School Press, (1993), 333p.
- Kusiak A., "Engineering Design: Products, Processes, and Systems". First edition, San Diego, CA: Academic Press. (1999), 427p.

## ***Résumé en Espagnol***

### ***Contribución a los métodos de Concepción modular de productos y procesos Industriales***

#### ***Resumen:***

Resumen: Este trabajo de tesis se refiere a la instauración de una estrategia para el desarrollo de un conjunto de productos, teniendo estos, una fuerte demanda. El trabajo de investigación propone el desarrollo de módulos de componentes para la construcción óptima de productos en la producción y la concepción. Cuando se tiene necesidad de obtener una variedad definida de productos en un plazo corto y con un costo reducido, la reutilización de módulos permite la configuración y la obtención de productos rápidamente, así como la reducción de los costos de concepción y producción. La utilización de módulos comunes (llamados plataformas en esta tesis) permite también la diferenciación de los productos más tarde en la línea de producción. En situaciones de enorme diversidad de componentes que hacen posibles millones de combinaciones de componentes, la pregunta inmediata es: ¿Cómo elegir los componentes de las plataformas? Además, la elección de las plataformas debe ser en coherencia con el orden de la secuencia de montaje. Para solucionar este problema, una estrategia es reorganizar la secuencia de producción. Otro problema es entonces, ¿Cómo reorganizar la secuencia de producción? El objetivo de este estudio es proponer herramientas de ayuda para la toma de decisiones permitiendo así definir la solución a estos problemas. Para eso propusimos: Un planteamiento para la elección de las versiones de componentes de las plataformas, un planteamiento para la elección de la secuencia de producción para la elección de plataformas. Propusimos en este sentido algoritmos que permiten optimizar tales elecciones. En síntesis, propusimos métodos que permitían construir plataformas y determinar soluciones a las cuestiones planteadas. Las pruebas y análisis permitieron concluir diferentes puntos y comprobar los resultados de las estrategias propuestas.

#### ***Palabras clave:***

Modularidad, plataformas, diferenciación retrasada, familia de productos, optimización.

## ***Liste de publications de l'auteur***

### **Publications dans des revues et des ouvrages :**

- José A., Tollenaere M. "Modular and Platform methods for product family design: Literature analysis." *Journal of Intelligent Manufacturing* Volume 16, Number 3, 2005.

### **Communications dans des Conférences :**

- José A., Tollenaere M. "Using modules and platforms for product family development : design and organizational implications". IDMMME Conference proceedings, 2004 Bath, UK.
- José A. Tollenaere M. "Optimisation of platforms for product family development", IMACS conference proceedings 2005 17th World Congress Paris France.
- A. JoseFlores, M. Tollenaere "Platform design for product family development" 6ème Congrès International de Génie Industriel, Besançon, France, 2005.

### **Posters :**

- José A. « Contribution aux méthodes de Conception modulaire de produits et processus Industriels ». 15e édition des Rencontres Régionales de la Recherche (oct 2004) Lyon, France.



## ***Ecole doctorale Organisation Industrielle et Systèmes de Production***

L'Ecole doctorale est une école thématique du site grenoblois. Elle a vocation à coopérer avec toutes les composantes universitaires traitant de l'organisation industrielle, pôle d'excellence du site grenoblois. Elle entend donc encourager les échanges interdisciplinaires, notamment par les co-directions de mémoire ou de thèse.

L'Ecole doctorale Organisation Industrielle et Systèmes de Production fédère trois filières : Génie industriel - filière interdisciplinaire pour ingénieurs visant la maîtrise globale des systèmes de production et de la performance industrielle -, Sociologie industrielle, analysant les changements en cours dans les organisations de travail -, et Economie industrielle, formant aux nouvelles théories de l'économie industrielle et à l'économie du management. Ces filières s'appuient sur un potentiel de huit laboratoires dont sept Unités Mixtes de Recherche rattachées au CNRS et à l'INRA : GILCO, CRISTO, GAEL, 3S, LAG, LEPII, LSR et CERAG.

L'ED OISP organise une journée annuelle de présentation des thèses en cours avec la participation active des directeurs de thèse et de laboratoire. Elle s'efforce de contribuer à la diffusion des travaux des doctorants à l'extérieur tant auprès des communautés scientifiques que des milieux professionnels. Elle œuvre à l'insertion professionnelle des docteurs dans les carrières publiques de l'enseignement supérieur et de la recherche et celles du monde économique. Elle propose chaque année aux doctorants et aux enseignants et chercheurs des séminaires pluri-disciplinaires. Elle facilite l'internationalisation de la formation des doctorants.

## ***La formation doctorale en Génie Industriel de Grenoble***

La formation doctorale en Génie Industriel de Grenoble s'articule autour de trois thèmes : la conception de produits, la conception et la gestion des systèmes de production, l'innovation industrielle, et développe une approche interdisciplinaire des questions techniques, économiques et humaines posées par les entreprises dans la maîtrise de leur production.

La formation s'appuie sur le Master Recherche en Génie Industriel et conduit ainsi à une meilleure prise en compte des problèmes de l'industrie, notamment manufacturière, sur la base de la formation d'origine des étudiants issus des filières EEA, Mécanique, Recherche Opérationnelle et, sous certaines conditions, des Sciences Humaines et Sociales.

## ***Le Laboratoire Gestion Industrielle, Logistique et Conception***

Le laboratoire GILCO (Gestion Industrielle, Logistique et CONception) est un laboratoire de l'INPG (Equipe d'Accueil du ministère).

GILCO a été créé par un regroupement des enseignants-chercheurs de l'Ecole Nationale Supérieure de Génie Industriel (ENSGI) dans le champ des Sciences Pour Ingénieur (SPI). L'activité scientifique du laboratoire se situe en gestion des flux physiques (application à la logistique) et Gestion des flux informationnels (application à la conception).

GILCO est l'un des dix laboratoires participant à l'Institut de la production et des organisations industrielles.

## ***L'Institut de la Production et des Organisations Industrielles***

L'Institut de la Production et des Organisations Industrielles (IPI) est une structure inter-établissement INPG et Université Pierre Mendès France, pluriformation du Ministère de l'Education Nationale, de la Recherche et de la Technologie. Créé en 1986, l'IPI se donne pour objectif de promouvoir, développer et soutenir des recherches interdisciplinaires dans le domaine de la Productique et du Génie Industriel à Grenoble.

Ses domaines de recherche s'organisent autour de trois thèmes majeurs pour la performance industrielle : la conception intégrée de produits, la conception et la gestion des systèmes de production, l'innovation. Chaque thème est organisé en projets associant deux ou trois disciplines différentes.

## ***Contribution aux méthodes de Conception modulaire de produits et processus Industriels***

**Résumé :** Ce travail de thèse porte sur la mise en place d'une stratégie pour le développement d'une diversité de produits. Il propose le développement de modules de composants pour la construction optimale de produits au niveau de la production et de la conception. Lorsque l'on a besoin d'obtenir une variété définie de produits dans un délai court et avec un coût réduit, la réutilisation de modules permet la configuration et l'obtention de produits rapidement, ainsi que la réduction des coûts de conception et production. L'utilisation de modules communs (appelés plateformes dans cette thèse) permet aussi la différenciation retardée des produits dans la ligne de production. Dans des situations de très grande diversité qui rendent possibles des millions de combinaisons de composants, comment choisir les composants des plateformes ? En outre, le choix des plateformes doit être en cohérence avec l'ordre de la séquence d'assemblage, afin de faciliter la différenciation retardée. Pour résoudre ce problème, une stratégie est de réorganiser la séquence de production. Un autre problème est alors, comment réorganiser l'ordre de production ? Le but de cette étude est de proposer des outils d'aide à la décision permettant de déterminer la solution à ces problèmes. Pour cela nous avons proposé : Une démarche pour le choix des composants des plateformes qui correspond aux composants nécessaires des produits, une démarche pour le choix de la séquence de production ainsi que pour le choix des plateformes, ainsi que des algorithmes permettant d'optimiser de tels choix.

Nous avons ainsi proposé des méthodes permettant de construire des plateformes et de déterminer des solutions aux questions soulevées. Les tests ont permis de conclure sur la performance des stratégies proposées.

**Mots-clés :** Modularité, plateformes, différenciation retardée, famille de produits, optimisation.

### ***Contribution to modular methods of product and process design***

**Abstract:** The object of this work is the set up of strategies aiming at developing a variety of products. It proposes the development of modules of components for the optimal construction of products according to the advantages reached in the fields of production and design. When we need to obtain a certain variety of production in a very short time and with limited costs, the fact of using several times a module allows to configure and to obtain products quite fast, as well as the reduction of several costs such as those linked to the design and the production management. The use of common modules (called platform in this work) also allows delayed differentiation of the products on the production line. In situations of high diversity, which enable millions of combinations of components, how should we choose the platform components? Moreover, that choice needs to fit in the order of the production sequence to enable delayed differentiation. To solve that problem, one strategy is to reorganize the production sequence. Then, another problem we will have to face would be the reorganization of that sequence. The purpose of this study is to propose tools for the decision making allowing to solve these problems: a proposition for the choice of platform components corresponding to the necessary components of the products, a proposition for the choice of the production sequence as well as for the choice of the platforms, and algorithms allowing to optimize such choices.

Thus, we proposed methods allowing to build platforms and to solve the inherent problems. We also conducted some tests to draw conclusions.

**Keywords:** Modularity, platforms, product families, postponement, optimisation.