

Influence de la nature de la demande sur la constitution d'un stock de produits semi-finis

Catherine da Cunha, Bruno Agard

Département de Mathématiques et de Génie Industriel, École Polytechnique de Montréal, C.P. 6079, succ. Centre-ville, Montréal (Québec), H3C3A7, Canada
[catherine.dacunha, bruno.agard]@polymtl.ca

RÉSUMÉ : Dans un contexte de customisation de masse, l'assemblage à la commande se révèle être une stratégie efficace permettant à la fois une multiplicité des produits offerts et un temps de mise à disposition des produits relativement faible. Cette stratégie s'appuie sur un stock de produits semi-finis qui sera utilisé après réception d'une commande client pour assembler les produits finis. La constitution du stock de produits semi-finis est un paramètre très influent sur le coût final et le temps de mise à disposition des produits finis. Cet article montre l'influence de la nature de la demande sur la constitution du stock de produits semi-finis, dans un contexte de livraison synchrone. L'influence de la répartition des demandes dans une famille de produits est étudiée. Différents types de demandes sont considérés, une demande de produits homogène (chacun des produits a une probabilité équivalente d'apparition), une demande de type Pareto (une plus forte demande dans certains modèles), et une demande de produits qui intègre des contraintes entre les composants (implications et incompatibilités).

MOTS-CLÉS : conception des produits, conception modulaire, constitution de stock, répartition de la demande

1. Introduction

Dans un contexte industriel concurrentiel, les clients deviennent de plus en plus exigeants. Pour satisfaire un client, il faut notamment proposer le produit qui répond exactement à ses besoins, au plus juste prix et cela en un temps de plus en plus faible (Lambey-Checchin, 2002). Ceci entraîne des contraintes supplémentaires pour les industriels qui doivent être à même de fournir des ensembles de produits différents (ou adaptables) afin de correspondre au plus près des besoins individuels de chaque client.

La diversité et la variabilité des demandes des clients obligent les entreprises à structurer leur offre autour de gammes de produits, que l'on appelle aussi familles de produits (Agard, 2004a). Ces familles de produit permettent un certain degré de standardisation tout en laissant encore de la flexibilité au produit pour s'adapter à des besoins différents. Une large diversité fonctionnelle supportée par une faible diversité technique permet de contrôler les coûts de production et gestion (Child *et al.*, 1991). Par une sélection d'options et variantes dans une famille de produits, le client (avec l'aide du commercial et/ou d'un configurateur de produit (Aldanondo *et al.*, 2000) définit le produit qui sera au plus proche de ses besoins, tout en respectant un certain nombre de contraintes.

Afin de livrer les produits dans un temps acceptable pour le client, le fabricant se doit d'anticiper sur les futures demandes pour commencer à préparer des éléments du produit final qu'il ne connaît pas encore. D'un côté pour diminuer le délai d'attente des clients, l'industriel peut être tenté de préparer en avance les produits qui seront ensuite vendus. La diversité des besoins est telle qu'il est impossible de considérer cette option qui impliquerait de stocker des quantités phénoménales de produits finis, certains ayant une probabilité de satisfaire aux besoins d'un client très faible (quasi nulle), on se trouverait alors à fabriquer et stocker des

produits finis qui ne seront jamais vendus. A l'autre extrême, il est possible de considérer le cas où le fabricant attend d'avoir une commande ferme pour lancer la fabrication du produit demandé par un client. Le produit fabriqué correspondra alors exactement aux besoins du client, mais en revanche cela suppose que le délai de fabrication du produit soit tolérable pour le client. Si le délai de production est important, celui-ci risque de ne pas être accepté par le client qui va alors se tourner vers la concurrence. Un intermédiaire doit être recherché entre la fabrication anticipée du produit final et la fabrication à la commande.

Une solution intermédiaire consiste alors à préparer par avance et stocker des sous-ensembles du produit final. Lors de la réception d'une commande client, il s'agira alors de prendre les éléments nécessaires fabriqués par anticipation et disponibles dans le stock afin de les assembler pour constituer le produit final demandé en différenciation retardée (Lee et Tang, 1997). Le délai de mise à disposition du produit visible pour le client final est alors le temps d'assemblage final à partir des éléments en stock. Cette stratégie est identifiée dans la littérature sous l'appellation « assemblage à la commande » (Starr, 1965).

Une des difficultés pour la mise en place de l'assemblage à la commande est le choix des éléments à fabriquer par anticipation. Le choix des sous-produits à fabriquer peut se révéler d'une extrême complexité. Ce choix influe directement sur le temps d'assemblage final et sur le coût de stockage.

Mettre en place une production modulaire peut être réalisé en découpant un produit en éléments semi indépendants (Huang et Kusiak, 1998), (Kusiak et Huang, 1996). Cela rend possible une conception et une production indépendantes des modules. Fujita (Fujita, 2002) optimise la composition des modules ainsi que leur assemblage au sein d'une architecture modulaire fixe. (Yigit *et al.*, 2002) résolvent un problème similaire en déterminant les sous-ensembles modulaires qui minimisent les coûts de reconfiguration. Briant (Briant, 2000) s'intéresse à la définition de modules standardisés permettant de satisfaire à moindre coût une demande personnalisée par un produit standard. Agard et Kusiak (Agard et Kusiak, 2004b) sélectionnent les sous-ensembles modulaires à l'aide des techniques de data mining.

Cet article s'intéresse à la définition de modules permettant la minimisation du coût total de production. Nous montrons en quoi la nature de la demande influe sur la composition du stock de sous-produits.

Le problème considéré provient d'un cas industriel réel présenté et modélisé dans la section 2. La section 3 présente les natures de demandes considérées pour modéliser la demande de produits finis. En section 4 sont présentés les résultats de constitution de stock de produit semi-finis pour les différents profils de demande, sous une contrainte de temps d'assemblage final.

2. Description du problème

L'article s'inspire d'un cas industriel représenté Figure 1 et modélisé Figure 2. Le contexte est le suivant : un fournisseur assemble un ensemble de produits différents (une famille de produits) à livrer en synchrone à son donneur d'ordres. Le fournisseur dispose pour cela d'un site de proximité (proche du site du donneur d'ordres) et de sites délocalisés.

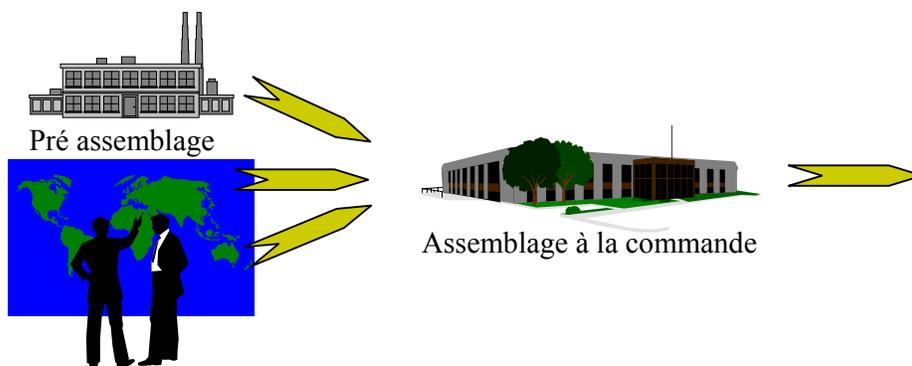


Figure 1. Contexte industriel.

Les contraintes du fournisseur interdisent de fournir des options ou composants non demandés.

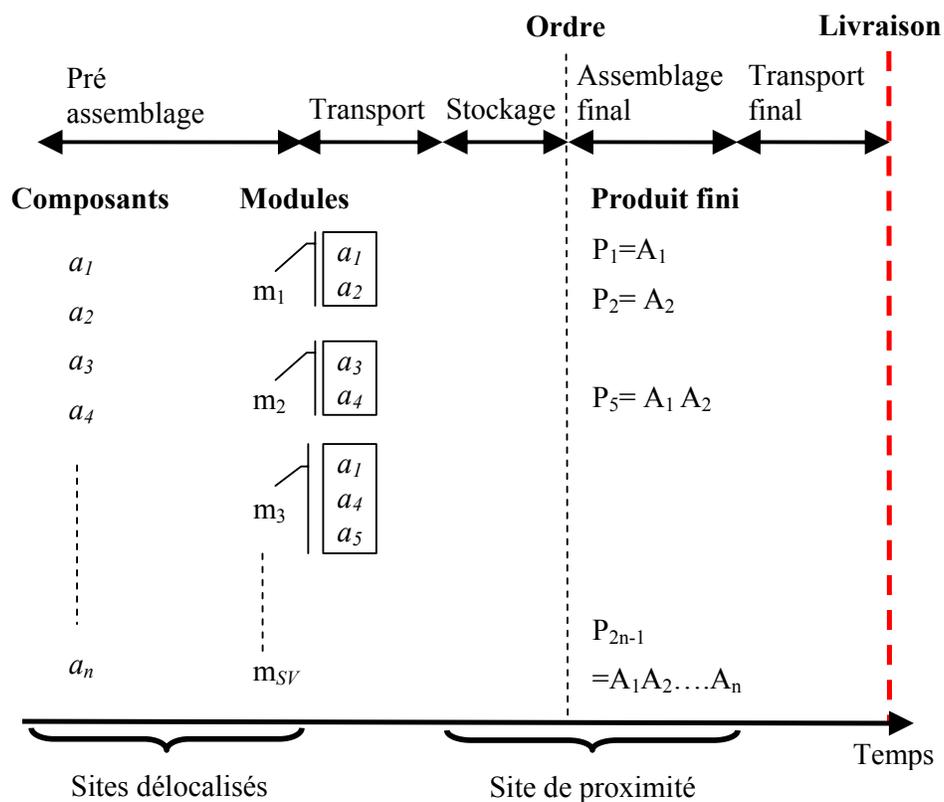


Figure 2. Répartition des opérations dans la chaîne logistique.

Considérons n composants a_i permettant de réaliser jusqu'à $2^n - 1$ produits finis différents.

L'étape de pré assemblage permet de réaliser SV modules $m_i, i \in [1, SV]$. On appelle $|m_i|$ le nombre de composant dans le module i . Soit C l'ensemble des modules : $C = \{m_1, \dots, m_{SV}\}$.

Notons $AT(C)$ le temps d'assemblage final moyen d'un produit à partir des modules de C .

Le modèle proposé s'exprime alors :

$$\text{Min Coût} \quad (1)$$

$$t.q. AT(C) < X \quad (2)$$

avec

$$\text{Coût} = \alpha \sum_{m_i \in C} (|m_i| - 1) + \beta \sum_{m_i \in C} (|m_i|) + \gamma SV + \delta AT(C) \quad (3)$$

avec

$$\alpha \sum_{m_i \in C} (|m_i| - 1) \quad (4)$$

Représente le coût de pré assemblage, celui-ci est considéré proportionnel au nombre d'étapes d'assemblages effectuées.

$$\beta \sum_{m_i \in C} |m_i| \quad (5)$$

Le coût de transport est proportionnel à la taille des modules transportés.

$$\gamma SV \quad (6)$$

Le coût de stockage est proportionnel au nombre de modules stockés.

$$\delta AT(C) \quad (7)$$

Permet d'évaluer le coût d'assemblage final moyen où $AT(C)$ représente le temps moyen d'assemblage final. $AT(C)$ est déterminé de la manière suivante :

$$AT(C) = \sum_i p(P_i) \times NA(P_i, C) \quad (8)$$

$p(P_i)$ représente la probabilité de demande du produit P_i et $NA(P_i, C)$ est le nombre d'opérations d'assemblage nécessaires pour réaliser le produit P_i à partir de la composition C .

Les modules à stocker sont sélectionnés grâce à une heuristique. Celle-ci est basée sur la fréquence d'utilisation (da Cunha, 2004). Ainsi, pour une taille de stock donnée SV , les modules stockés seront les SV modules ayant la fréquence d'utilisation la plus importantes. Cette heuristique est déterministe, son application à une demande spécifique résultera en une unique composition.

3. Nature de demande

Ces demandes représentent des situations commerciales extrêmes, elles nous permettront de tester le comportement des heuristiques dans des environnements différents.

3.1. Demande homogène

Une demande homogène représente le cas où tous les produits ont une probabilité de demande équivalente.

Algorithme demande homogène

Entrées : nombre de produits

Sortie : vecteur de demande

$i = 0$, Total = 0

Tant que $i < \text{nombre de produits}$

 Choisir un produit P_i non encore choisi

 Faire un tirage dans $[0,1]$ suivant la loi Uniforme $\rightarrow d_i$

 Total \leftarrow Total + d_i

$i \leftarrow i + 1$

Fin tant que

Affecter à chaque produit P_i la demande $\frac{d_i}{\text{Total}}$.

Un exemple de demande homogène obtenu par cet algorithme pour un cas à trois composants est représenté sur la Figure 3.

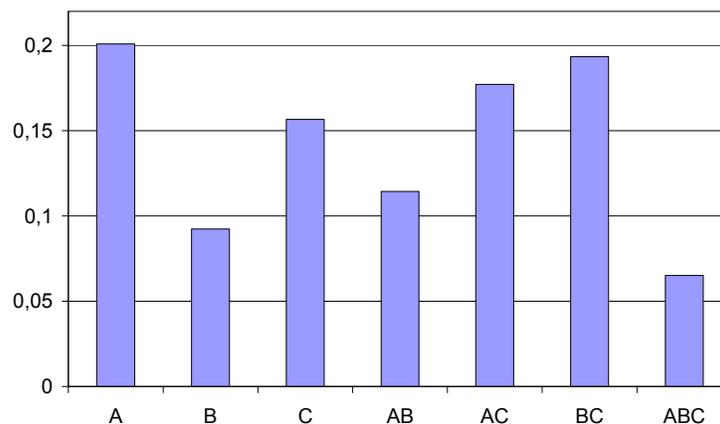


Figure 3. Exemple de demande homogène.

3.2. Demande Pareto

Une demande Pareto représente le cas où peu de produits représentent une partie importante de la demande alors que de nombreux autres produits ont une très faible probabilité d'être demandés.

Algorithme demande Pareto

Entrée : nombre de produits

Sortie : Vecteur de demande

$i = 0$, Total = 0

Tant que $i <$ nombre de produits

 Choisir un produit P_i non encore choisi

 Faire un tirage dans $[0,1 - \text{Total}]$ suivant la loi Uniforme $\rightarrow d_i$

 Total \leftarrow Total + d_i

$i \leftarrow i + 1$

Fin tant que

Affecter à chaque produit P_i la demande d_i

Un exemple de demande homogène généré pour trois composants est représenté sur la Figure 4. Cette répartition de la demande est celle qui est le plus souvent observée lorsque la diversité est importante. Remarquons que des offres promotionnelles fortes pourront faire évoluer la demande d'une situation "homogène" à une situation "Pareto".

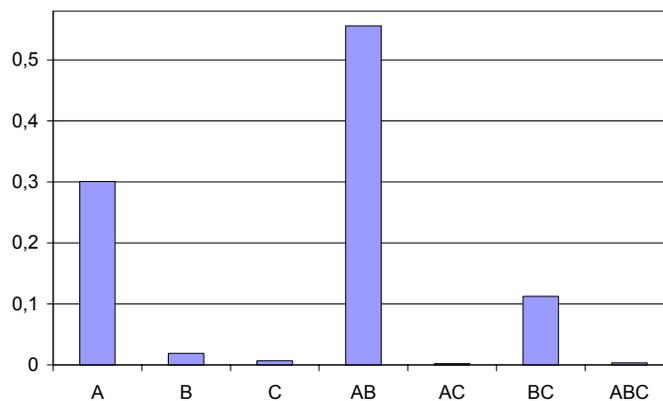


Figure 4. Exemple de demande Pareto.

3.3. Demande avec contraintes

Une demande avec contraintes est une demande où il existe certaines règles à appliquer entre les composants des produits finis. Deux types de contraintes sont considérés, l'implication et l'incompatibilité. L'implication consiste à représenter des contraintes du type $A \Rightarrow B$, l'incompatibilité traduit les contraintes du type $A \Rightarrow \text{NON}(B)$. Ces contraintes peuvent provenir de différentes origines techniques et commerciales.

Tableau 1. Exemples de contraintes.

	Technique	Commerciale
Implication	jantes 16' => pneus 16'	vitres électriques arrière => vitres électriques avant
Incompatibilité	toit ouvrant => NON(antenne de toit)	intérieur cuir => NON(vitres manuelles)

L'algorithme utilisé pour générer une demande avec contraintes est décrit ci-dessous.

Algorithme avec contraintes

Entrées : n nombre de produits, $\#contraintes$ nombre de contraintes désiré

Sortie : vecteur de demande

$i = 0$, $total = 0$, $nbcontraintes_générees = 0$

Tant que $nbcontraintes_générees < \#contraintes$

Tirer aléatoirement 2 entiers dans $[1;n]$ \rightarrow j et k

Si les composants j et k sont déjà liés par une contrainte, recommencer

Faire un tirage dans $[0,1]$ suivant la loi Uniforme $\rightarrow d$

Si $d < 0,5$ // on considère une contrainte j implique k

Tant que $i < \text{nombre de produits}$

Si le produit i comporte le composant j mais pas le composant k alors $d_i = 0$

Sinon faire un tirage dans $[0,1]$ suivant la loi Uniforme $\rightarrow d_i$

$Total \leftarrow Total + d_i$

$i \leftarrow i + 1$

Fin tant que

Sinon // j et k sont incompatibles

Tant que $i < \text{nombre de produits}$

Si le produit i comporte le composant j et le composant k alors $d_i = 0$

Sinon faire un tirage dans $[0,1]$ suivant la loi Uniforme $\rightarrow d_i$

$Total \leftarrow Total + d_i$

$i \leftarrow i + 1$

Fin tant que

$nbcontraintes_générees \leftarrow nbcontraintes_générees + 1$

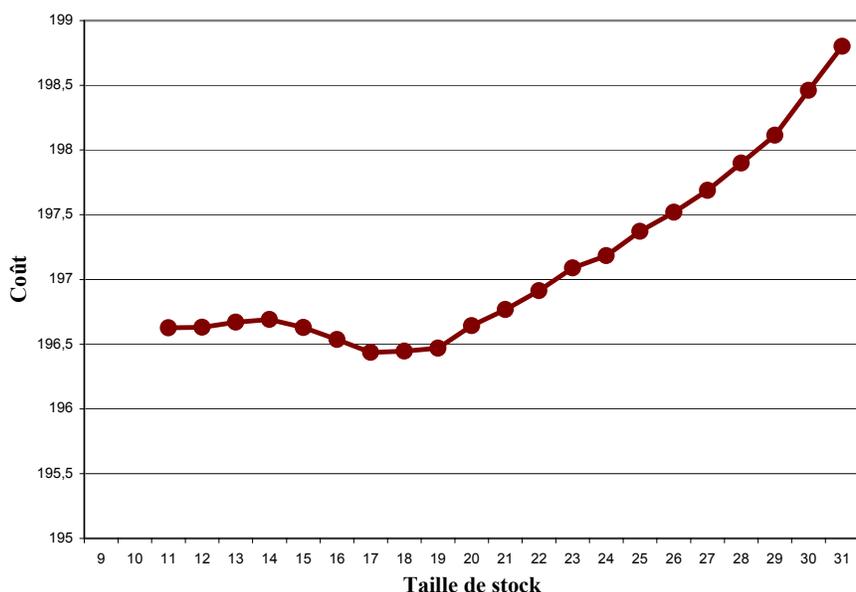
Fin tant que

Affecter à chaque produit P_i la demande d_i

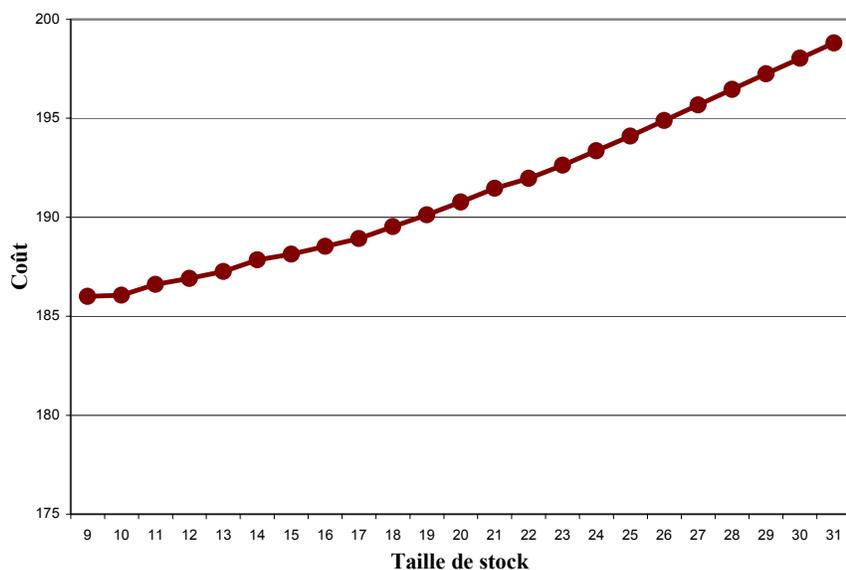
4. Résultats

L'heuristique basée sur la fréquence d'utilisation, est utilisée ici avec comme entrée des demandes de produits finis qui suivent les différentes natures de demandes décrites dans la section précédente. Les instances observées représentent des portefeuilles de produits constitués à partir de 5 composants de base. Les clients peuvent donc choisir parmi 31 produits différents au maximum. Nous présentons ici des résultats moyens obtenus en considérant un panel de 100 instances par type de demande.

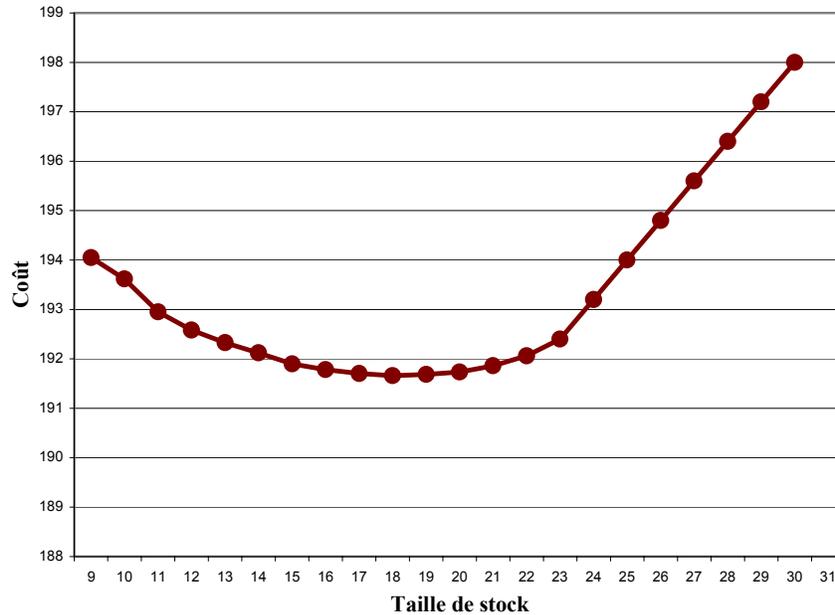
Les trois courbes (Figure 5) représentent le coût (9) (pour $\alpha = 2$, $\beta = 0.2$, $\gamma = 0.8$, $\delta = 20$) en fonction du nombre de modules stockés, pour chacune des distributions proposées, en respectant à chaque fois une contrainte de temps $X = 0.8$.



a – avec une distribution de la demande de type homogène.



b – avec une distribution de la demande de type Pareto.



c – pour une demande avec contraintes.

Figure 5. Résultats ($\alpha = 2$, $\beta = 0.2$, $\gamma = 0.8$, $\delta = 20$).

Le comportement moyen suit différents patrons selon le type de la demande.

Tandis qu'une répartition de la demande de type Pareto génère des coûts croissants avec le nombre de références stockées. Une solution minimisant les coûts sera alors de stocker les $SV = M$ modules les plus fréquents (avec M , la taille de stock la plus petite garantissant la contrainte de temps).

Les types « homogène » et « contraintes » ont un comportement différent. Les coûts minimaux sont en effet obtenus pour une taille de stock comprise entre M et $2^n - 1$. Il s'agit alors de trouver le meilleur compromis entre le gain de temps apporté par le stockage d'une référence et les coûts occasionnés par cet ajout (pré-assemblage, transport et stockage). La taille de stock choisie sera alors celle permettant de minimiser le coût engendré.

5. Conclusion

L'article montre l'influence de la nature de la demande de produits finis sur la constitution d'un stock de produits semi-finis. Trois natures de répartition de la demande sont considérées : les demandes de type homogène, les demandes de type Pareto et les demandes avec contraintes (d'implication et d'incompatibilité) entre les composants. Pour les trois natures de demande, les constitutions de stocks sont déterminées de manière à respecter une même contrainte de temps d'assemblage final.

Il s'ensuit que pour respecter une même contrainte de temps, selon la nature de la demande, le nombre de modules de produits semi-finis varie. Selon le cas, il est intéressant de stocker des produits semi finis supplémentaires afin de diminuer les coûts totaux, car les modules supplémentaires permettent de diminuer le temps moyen d'assemblage final.

Ce travail pourra être enrichi en intégrant dans le modèle le dimensionnement des stocks dans le site de proximité, là où les contraintes sont les plus fortes. Une extension sera également dans l'évaluation des coûts de standardisation des modules stockés. Enfin il sera possible de considérer des coûts de production et de transport différents pour chacun des sites délocalisés.

6. Références bibliographiques

Agard B. (2004a) « Conception et fabrication des familles de produits : Etat de l'art », *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, Vol. 38, No. 1-2, pp. 59-84.

Agard B. et Kusiak A. (2004b) « Data Mining for subassembly selection », *ASME Transactions: Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 126, No. 3, pp. 627-631.

Aldanondo M., Rouge S. et Veron M. (2000) « Expert configurator for concurrent engineering: Caméléon software and model », *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 11, No. 2, pp. 127-134, Kluwer Academic Publishers.

Briant O., (2000) « Etude théorique et numérique du problème de la gestion de la diversité », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.

Child P., Diederichs R., Sanders F.-H. et Wisniewski S. (1991), « The management of complexity », *Sloan Management Review*, Fall, pp. 73-80.

da Cunha C., (2004) « Définition et gestion de produits semi-finis en vue d'une production de type assemblage à la commande », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.

Fujita K., (2002) « Product variety optimization under modular architecture », *Computer-Aided Design*, Vol. 34, No. 12, pp. 953-965.

Huang C, Kusiak A., (1998) « Modularity in design of products and systems », *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, Vol. 28, No. 1, pp. 66-77.

Kusiak A., Huang C., (1996), « Development of modular products », *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A*, Vol. 19, No. 4, pp. 523-538.

Lambey-Checchin C. (2002) « Le Sacrifice Perçu: Le Cas D'acheteurs de Voiture Neuve », *2^{ème} congrès International Des Tendances Du Marketing En Europe*.

Lee H.L. et Tang C.S. (1997) « Modeling the costs and benefits of delayed product differentiation », *Management Science*, Vol. 43, No. 1, pp. 40-53.

Starr M., (1965) « Modular production – a new concept », *Harvard business review*, pp.131-142, nov.-dec.

Yigit A.S., Galip-Ulsoy A.G. and Allahverdi A. (2002), « Optimizing modular product design for reconfigurable manufacturing », *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 13, pp. 309-316.