

CIGI 2011

Un modèle pour la conception conjointe d'une famille de produits et de sa chaîne logistique avec standardisation, externalisation et gammes alternatives

Bertrand Baud-Lavigne^{†‡}, Bruno Agard[‡] and Bernard Penz[†]

[†] Université de Grenoble / Grenoble INP / UJF Grenoble 1 / CNRS
G-SCOP UMR5272 Grenoble, F-38031, France

[‡] CIRRELT, Département de Mathématiques et Génie Industriel
École Polytechnique de Montréal
C.P. 6079, succ. Centre-Ville, Montréal (Québec), H3C 3A7, Canada

Résumé

Cet article présente l'avancée de nos travaux concernant les méthodes d'optimisation conjointe d'une famille de produits et de sa chaîne logistique. Le contexte économique globalisé oblige les entreprises de produits manufacturés à proposer une gamme de produits diversifiée tout en maîtrisant leurs coûts de production. Cet article présente une revue de la littérature se rapportant aux problématiques de conception produit et d'optimisation de la chaîne logistique, puis propose une formulation mathématique permettant de déterminer les nomenclatures de production ainsi que le réseau logistique optimal pour fabriquer une famille de produits.

Abstract

This paper deals with joint family product and supply chain design problems. The issues arising with globalized economy force industrial company to diversify their offers while controlling their production costs. We present the literature that deals with these issues, as product design and supply chain design; then a mathematical model is proposed to choose bill-of-materials and logistical network of a family product.

Mots-clés : Chaîne logistique, Famille de produits, Programmation linéaire en nombres entiers

Keywords : Supply chain design, Product family, Mixed Integer Linear Programming

1 INTRODUCTION

Cette étude se place dans le contexte de la globalisation des échanges et de la production dans les industries d'assemblage.

La globalisation des échanges a entraîné une forte concurrence entre les entreprises sur la plupart des marchés. Dès lors, les clients deviennent de plus en plus exigeants en termes de prix et de fonctionnalités. Il est alors indispensable pour les entreprises de fournir à chaque client le produit dont il a besoin et au meilleur prix. Ceci implique deux aspects : la personnalisation des produits et la réduction des coûts de production. Ces deux composantes paraissent paradoxales, car les économies d'échelle sont un des leviers de la réduction des coûts de production – les économies d'échelle correspondent à la réduction des coûts unitaires de production lorsque les volumes de production augmentent. Or, la personnalisation des produits induit la production d'une plus grande quantité de séries avec des volumes réduits. Un équilibre est à trouver entre la diversité de produits offerts et les coûts induits en production. La différenciation des produits peut se faire sur la qualité des produits (différenciation verticale) ou sur les fonction-

nalités (différenciation horizontale).

Si la demande s'est globalisée, il en est de même pour la production. Une entreprise répondant à une demande globale doit mettre en adéquation son réseau de production afin de satisfaire aux exigences de coût et de délai de ses clients. Lorsque l'entreprise fait face à une demande globalisée, la question est de savoir comment choisir les sites de production et comment répartir sa production dans ces sites. Une autre problématique est le recours à la délocalisation, c'est-à-dire à la production dans des zones géographiques à faible coût de main d'œuvre mais souvent éloignées des clients. Les stratégies de délocalisation ont été étudiées par [Ferdows, 1997] et [Hammami et al., 2008].

Les domaines où sont étudiés ces problèmes sont la conception de produits, permettant la diversification de l'offre, et la conception des chaînes logistiques. Le problème posé est la gestion de la diversité des produits en production. Les réponses à ce problème concernent des disciplines habituellement bien séparées : la conception produit, la production et la logistique. Les activités couvertes se situent en phase d'industrialisation de la famille de produits. Les choix de conception ne sont pas remis en cause et les questions se concentrent sur la meilleure façon d'industrialiser ces pro-

duits en considérant comme leviers les questions relatives à la chaîne logistique et au degré de commonnalité des produits. Les questions relatives au processus de fabrication ne sont pas abordées. La question de recherche est :

Comment concevoir la chaîne logistique d'une famille de produits à forte diversité en étant compétitif et attractif grâce à une bonne exploitation de ses avantages concurrentiels en production et en distribution dans un environnement déterministe ?

2 ETAT DE L'ART SUR LES LIENS ENTRE CONCEPTION D'UNE FAMILLE DE PRODUITS ET DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE

Cette revue de la littérature s'intéresse aux études sur les liens entre la conception de produits et la conception des chaînes logistiques avec des modèles mathématiques déterministes. Le besoin d'intégration entre les deux processus de conception est mis en évidence par [Riopel et al., 1998] :

“Le défi du 21^e siècle consiste à intégrer la logistique et le design des produits et procédés de façon à optimiser la production”

De notre point de vue, les approches pertinentes pour traiter le problème de la conception conjointe produit – chaîne logistique sont à la fois dans l'intégration des contraintes logistiques dans la conception des produits et à l'inverse dans la prise en compte des spécificités des produits dans la conception des réseaux logistiques. Les approches intégrées seront présentées en dernière partie.

2.1 Conception d'une famille de produits en considérant les contraintes de production

Le “Design for Logistics” (DFL) et le “Design for Supply Chain Management” (DFSCM) [Dowlatshahi, 1996] proposent un ensemble de méthodes et de règles pour prendre en compte les contraintes logistiques dans la conception des produits. Ces études ont mis en avant les bénéfices de concepts qualitatifs tels que la conception modulaire, la différenciation retardée et des règles comme la réduction du nombre de composants ou de références utilisés, et l'intégration des fournisseurs en amont des projets de conception, permettant une baisse des coûts liés au stockage et au transport des produits. [Dowlatshahi, 1999] propose une méthode mathématique pour prendre en compte ces contraintes logistiques. Les travaux de [Koike, 2005] montrent que les interactions entre la logistique et l'ingénierie ne permettent pas encore une bonne intégration.

Afin de réduire le nombre de composants et de sous-ensembles différents au sein d'une famille de produits, les concepteurs définissent des plates-formes produits. Ce sont des ensembles de parties du produit qui seront communes à toute ou partie de la famille. [Jiao et al., 2007] proposent un état de l'art sur la définition de ces plates-formes produits. [Simpson et al., 2006] présentent plusieurs méthodologies et algorithmes permettant de définir ces plates-formes produits. [Shafia et al., 2009] déterminent les plates-formes produits et analysent leurs impacts sur le temps de réponse de la chaîne logistique. [Salvador et al., 2002] étudient plu-

sieurs cas afin de caractériser l'influence des processus de fabrication sur la modularité des produits.

Le degré de différenciation physique des produits est mesurable par les indices de commonnalité. La commonnalité est un concept exprimant le fait que les produits au sein d'une famille partagent un certain nombre de parties ou de composants identiques. Un degré de commonnalité fort permet de réduire les coûts de conception et de production en augmentant entre autres les économies d'échelle. Ceci est indispensable lorsqu'une entreprise veut offrir une forte diversité de produit. Les effets négatifs d'une forte commonnalité sont que les produits peuvent ne pas être assez performants et différenciés du fait de ces contraintes. L'objectif est alors de rendre commune les parties à faible valeur ajoutée et de garder uniques celles contribuant à la différenciation fonctionnelle du produit. Plusieurs indices ont été proposés dans la littérature : [Wacker and Treleven, 1986] présentent les inconvénients de l'indice du degré de commonnalité et proposent trois autres indices prenant en compte le coût des composants et les quantités demandés, [Johnson and Kirchain, 2010] proposent une nouvelle métrique. [Ramdas and Randall, 2008] analysent l'impact de la commonnalité sur la fiabilité des produits.

La diversité est un aspect très coûteux en production, car elle empêche de profiter des économies d'échelle. [Briant and Naddef, 2004] ont traité le problème de la gestion de la diversité en définissant parmi la famille de produit les produits à fabriquer et ceux à standardiser, la standardisation d'une fonction engendrant un surcoût. Pour ce problème NP-complet, une méthode de résolution basée sur la relaxation lagrangienne est proposée. Les effets de la standardisation sur la demande sont mis en avant par [Desai et al., 2001], qui analysent les impacts de la réduction de la diversité à la fois sur les coûts et sur le marché.

Lorsque la demande pour chaque variante de la famille de produits est connue et qu'elle doit être satisfaite, la question posée est de savoir quels modules définir afin d'assembler de façon efficiente les différentes fonctionnalités des produits. L'efficience est en général mesurée par le temps d'assemblage du produit final et par les coûts de production et des stocks induits. [Agard et al., 2009] considèrent un nombre maximal de modules à utiliser et un algorithme génétique pour la résolution. [da Cunha et al., 2007] et [Agard and Penz, 2009] ne limitent que le temps d'assemblage final et optimisent le coût de gestion des modules par des algorithmes basés sur un recuit simulé. [Agard and Kusiak, 2004] exploitent les données industrielles par des méthodes de data-mining pour déterminer les modules pertinents à fabriquer.

[Chakravarty and Balakrishnan, 2001] proposent un modèle de choix des modules considérant les demandes endogènes, et analysent les différences lorsque le fournisseur des modules est un sous-traitant et lorsqu'il est intégré à l'entreprise.

2.2 Conception de la chaîne logistique en considérant les contraintes produits

Modélisation : l'intégration explicite des nomenclatures produits dans la conception de la chaîne logistique est

récente. La première étude à notre connaissance est celle de [Arntzen et al., 1995], qui présente un modèle multi-périodes et multi-produits en programmation linéaire mixte. Ce modèle est très complet, puisque les coûts considérés prennent en compte les coûts fixes et variables de production, de stockage, de distribution par plusieurs modes possibles et enfin les taxes. Le critère d'optimisation est la minimisation à la fois des coûts et des délais de réponses, les deux composantes étant mélangées simplement avec une pondération.

Des problèmes similaires ont été étudiés plus récemment. [Paquet et al., 2004] et [Cordeau et al., 2006] proposent des modélisations en programmation linéaire mixte pour concevoir une chaîne logistique multi-échelon et multi-produits en considérant les contraintes d'assemblages et des nomenclatures détaillées. Le premier intègre le choix des technologies à implanter sur chaque site, le second considère plusieurs modes de transport. Deux modèles multi-périodes sont recensés : [Thanh et al., 2008] proposent des expérimentations poussées en utilisant un générateur d'instance complet, [Paquet et al., 2008] intègrent différents types de travailleurs. Dans tous ces modèles, les flux des produits sont modélisés par des contraintes de flots.

Effets des produits sur la chaîne logistique : [Montreuil and Poulin, 2005] proposent une modélisation de la chaîne logistique adaptée à la personnalisation de masse. Un cas d'étude sur ce modèle est présenté par [Poulin et al., 2006]. [Salvador et al., 2004] analysent les conséquences du niveau de personnalisation des produits sur la chaîne logistique par des études empiriques. Ils montrent que le degré de personnalisation a un impact significatif sur la configuration de la chaîne logistique. Un autre modèle prenant en compte explicitement le degré de commonalité des produits et la différenciation retardée est proposé par [Schulze and Li, 2009b].

Méthodes de résolution : Parmi les méthodes de résolution exactes, la décomposition de Benders est efficace pour les problèmes mélangeant des variables entières et continues, si le problème peut se découper en deux problèmes distincts. Le principe est de définir deux problèmes : un problème maître et un problème esclave. Le problème maître est en général proche du problème originel, mais certaines contraintes ont été relaxées ou simplifiées. Après résolution, les variables pertinentes sont données au problème esclave qui est résolu à son tour. Si aucune solution n'est trouvée pour le problème esclave, c'est-à-dire que la solution du problème maître contraint trop le problème esclave, des coupes sont générées afin de supprimer cette solution du problème maître, qui est ensuite résolue. Ce processus est itératif. [Dogan and Goetschalckx, 1999] ont appliqué la décomposition de Benders à un modèle multi-périodes à trois échelons (fournisseurs, usines, entrepôts). Le problème maître est stratégique et considère la localisation des usines, leur taille ainsi que l'allocation des produits. Le problème esclave détermine les flux de produits entre les sites. La même décomposition est employée par [Paquet et al., 2004] et par [Cordeau et al., 2006]. D'autres auteurs ont utilisé les décompositions de Benders sur des problèmes similaires : [Cohen and Moon, 1991] sur un modèle considérant uniquement les problèmes d'allocations,

[Geoffrion and Graves, 1974], [Cordeau et al., 2008], [CakIr, 2009]. La décomposition de Dantzig-Wolfe a été utilisée par [Liang and Wilhelm, 2008] qui montrent comment améliorer la convergence de la résolution. [Cordeau et al., 2006] et [Chouman et al., 2009] ont eu de très bons résultats en ajoutant des inégalités valides pour améliorer la relaxation linéaire utilisée dans le branch-and-bound. Les modélisations étant souvent complexes et avec un très grand nombre de variables, l'utilisation d'heuristique peut avoir de très bons résultats en pratique. [Tang et al., 2004] décomposent le problème en deux sous-problèmes, le premier étant un problème de choix de production, le second s'occupant des questions de transport. Des heuristiques de résolution sont employées pour chaque sous-problème. [Manzini and Bindi, 2009] mélangent des méthodes de résolutions exactes, avec des heuristiques basées sur le regroupement et des stratégies de transport.

2.3 Conception concurrente produit – chaîne logistique

Les travaux considérant la conception simultanée du produit et de sa chaîne logistique sont très récents. [Appelqvist et al., 2004] justifient cela par le fait que le coût des produits est en général beaucoup plus élevé que les coûts de production et logistique. Ainsi il serait plus avantageux de donner la priorité à la conception du produit. Cependant, les coûts logistiques ont subi des variations importantes ces dernières années. La pertinence de la conception conjointe a été montrée par [Baud-Lavigne et al., 2010] en comparant les stratégies de conception séquentielle et simultanée.

Les approches existantes dans la littérature considèrent que les produits finaux sont à déterminer ou sont fixés. Lorsque la famille de produits n'est pas connue, l'objectif est de déterminer les fonctionnalités des produits qui vont être proposés en fonction des demandes des clients et des contraintes d'assemblages des produits, via des **nomenclatures génériques** (voir plus loin). Lorsque les produits finaux sont fixés, leur demande est connue et la problématique est de déterminer la façon d'assembler les produits afin d'offrir les fonctionnalités désirées au meilleur coût de production et de distribution. Deux représentations ont été étudiées : la **conception modulaire** et les **nomenclatures détaillées**.

Les nomenclatures génériques permettent de modéliser les contraintes d'assemblages entre les différentes fonctionnalités des produits. Elles sont utilisées lorsque les besoins du marché sont connus pour chaque fonctionnalité mais pas pour des produits finis précis. La problématique est de définir la chaîne logistique en même temps que la famille de produits, c'est-à-dire l'ensemble des produits finaux proposés ainsi que leur nomenclature qui maximisent le profit de l'entreprise. Ce problème a été modélisé en programmation linéaire mixte par [Lamothe et al., 2006] et [Zhang et al., 2008]. [Zhang et al., 2010] utilisent ce modèle pour analyser les relations entre l'entreprise et ses fournisseurs. [Lamothe et al., 2008] conduisent des expérimentations démontrant le rôle du coût du stockage dans des contextes de délocalisation.

Conception modulaire El Hadj Khalaf et al. représentent les produits par leurs fonctionnalités. Des fonctionnalités peuvent être regroupées dans des modules pour rentrer dans la composition des produits finaux, tous les assemblages étant autorisés. Dans le contexte de l'assemblage à la commande, les auteurs considèrent les cas où le temps d'assemblage final d'un produit doit être limité et où il n'est pas possible de fabriquer les produits finaux à l'avance. Leur objectif est alors de déterminer les modules à produire à l'avance afin de permettre l'assemblage final dans le temps imparti. Le choix des sites de production des modules choisis est intégré au modèle. [El Hadj Khalaf et al., 2010a] comparent une méthode de résolution en deux phases avec une approche intégrée. [El Hadj Khalaf et al., 2010b] analysent l'impact de l'autorisation de la redondance et de la standardisation.

Une autre approche est proposée par [Schulze and Li, 2009a] qui considèrent dans une chaîne logistique globale à la fois les questions de commonalité et de différenciation retardée. L'objectif est de définir les modules qui seront produits et stockés dans chaque usine. Cependant, les bénéfices que peuvent engendrer l'utilisation des modules ne sont pas très clairs.

Nomenclature détaillée [Gupta and Krishnan, 1999] ont présenté une formulation en programmation linéaire mixte pour intégrer les choix de standardisation des composants avec la sélection des fournisseurs. Des coûts fixes et variables sont considérés pour chaque composant. L'objectif est de déterminer le niveau de standardisation qui minimise les coûts, c'est-à-dire le meilleur équilibre entre économies d'échelle et coûts variables bas.

La détermination des nomenclatures utilisées en production peut se faire en explicitant les nomenclatures possibles. [ElMaraghy and Mahmoudi, 2009] définissent pour chaque produit plusieurs nomenclatures alternatives, une seule étant retenue dans la solution optimale. Cette approche nécessite une énumération complète de toutes les configurations de produits, mais facilite la formulation ainsi que la résolution. Le modèle proposé optimise simultanément le choix des nomenclatures et la chaîne logistique globale sur plusieurs périodes.

Le modèle le plus complet a été proposé par [Chen, 2010] qui prend en compte des nomenclatures détaillées, des possibilités de substitution et une chaîne logistique intégrée. Ces modèles considèrent deux acteurs indépendants, les fournisseurs d'un côté dans le rôle du suiveur et le producteur de l'autre dans le rôle du meneur. Cela conduit à un modèle de programmation linéaire mixte bi-niveaux. Un algorithme génétique est proposé ainsi qu'une méthode exacte.

3 PRÉSENTATION DÉTAILLÉE DU MODÈLE

Le modèle proposé ici traite simultanément les problèmes du choix des nomenclatures produits et de leur réseau logistique.

Les contraintes d'assemblage et les substitutions autorisées sont définies en conception détaillée et utilisées en pa-

ramètres d'entrée. L'optimisation de la nomenclature peut alors se faire en phase d'industrialisation. Un exemple de nomenclature pour deux produits est donné en Figure 1a.

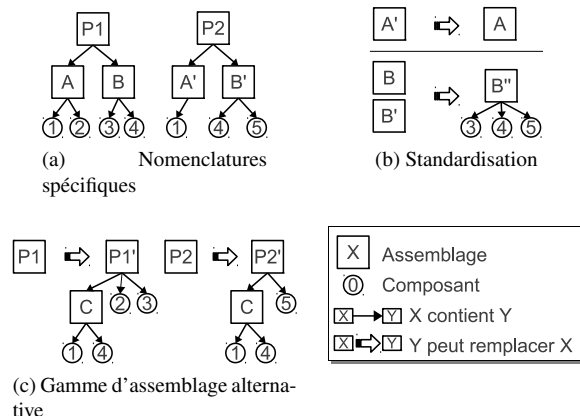


Figure 1: Illustration de nomenclatures et des possibilités de substitution.

Trois sortes de substitution au sein de la nomenclature sont considérées :

La standardisation (Figure 1b) est la possibilité de remplacer un composant ou un sous-ensemble par un autre soit avec plus de fonctions ou comprenant des composants de meilleure qualité afin de diminuer le nombre de pièces. En termes de coûts des produits, la standardisation n'est pas avantageuse. Mais la standardisation peut réduire le nombre de pièces qui doivent être gérées. Cette réduction permet d'économiser des coûts fixes. En outre, la demande pour chaque ensemble augmente et permet des économies d'échelle pour le transport et une meilleure utilisation des capacités de production [Fixson, 2007]. En outre, ces économies d'échelle peuvent faciliter la délocalisation ;

L'externalisation : un sous-ensemble peut être acheté directement à un sous-traitant au lieu d'être fabriqué. L'externalisation permet de réduire les coûts fixes de production mais augmente les coûts variables. Dans l'exemple de la Figure 1a, les sous-ensembles A ou B pourrait être achetés ;

La gamme alternative (Figure 1c) : de nouvelles façons d'assembler les produits sont énumérées. Cela peut permettre une mise en commun des sous-ensembles permettant de réduire la diversité en production. Les coûts de production sont a priori les mêmes.

La chaîne logistique considérée se veut générique et transposable au plus grand nombre d'applications. Elle prend en compte quatre échelons, illustrés par la Figure 2 :

Les fournisseurs potentiels sont caractérisés par l'ensemble des composants qu'ils peuvent fournir avec leur prix, leur quantité d'approvisionnement maximum, leurs coûts de transports vers chaque site et un coût fixe de contrat par fournisseur et par produit fourni ;

Les unités de production ont un coût d'ouverture, des coûts de production fixes et variables propres pour

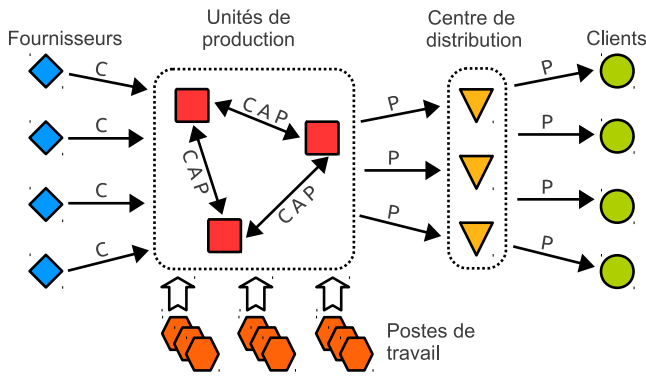


Figure 2: Représentation de la chaîne logistique.

chaque produit et des capacités limitées en espace et en temps de main d'œuvre ;

Les centres de distribution ont un coût d'ouverture, des coûts de traitement fixes et variables des produits et des capacités limitées. Des postes de travail peuvent être implantés sur chaque site ; pour chaque type de poste, plusieurs alternatives sont possibles ;

Les clients ont une demande pour un ou plusieurs produits dont la quantité est connue et que l'entreprise est tenue de satisfaire.

Les décisions à prendre concernant la chaîne logistique sont :

1. Quels sites / centres de distribution ouvrir ?
2. Quels fournisseurs sélectionner ?
3. Quels postes de travail implanter sur chaque site ?
4. Quelle quantité de chaque assemblage produire sur chaque site ?
5. Quelle quantité de chaque composant acheter à chaque fournisseur ?

Le problème est modélisé par des contraintes de flux de la même façon que [Paquet et al., 2004]. L'apport de cette proposition est d'inclure des possibilités de substitution à chaque niveau de la nomenclature (composant, sous-ensemble et produit fini). Le réseau logistique et la famille de produits sont optimisés simultanément.

Ensembles :

- \mathcal{P} : produits ; indices : $p, q \in \mathcal{P}$
- $\mathcal{R} \subset \mathcal{P}$: matières premières / composants
- $\mathcal{M} \subset \mathcal{P}$: produits manufacturés / sous-ensembles,
- $\mathcal{F} \subset \mathcal{P}$: produits finis.
- \mathcal{N} : nœuds du réseau ; indices : $i, j \in \mathcal{N}$
- $\mathcal{S} \subset \mathcal{N}$: fournisseurs,
- $\mathcal{U} \subset \mathcal{N}$: unités de production,
- $\mathcal{D} \subset \mathcal{N}$: centres de distribution,
- $\mathcal{C} \subset \mathcal{N}$: clients.
- \mathcal{T} : technologies ; indices : $t \in \mathcal{T}$
- \mathcal{O} : postes de travail ; indices : $o \in \mathcal{O}$

Paramètres :

- g^{pq} : quantité de q dans p . q peut être un composant ou un sous-ensemble. g représente la nomenclature, $p \in \mathcal{M} \cup \mathcal{F}$, $q \in \mathcal{R} \cup \mathcal{M}$,
- d_i^p : demande du client i pour le produit p , $p \in \mathcal{M}$, $i \in \mathcal{C}$,
- c^l : capacité du poste de travail l , $l \in \mathcal{L}$,

- l^{pt} : temps de traitement du produit p sur la technologie t , $p \in \mathcal{M} \cup \mathcal{F}$, $t \in \mathcal{T}$,
- $\mathcal{T}^p \subset \mathcal{T}$: technologies utilisées par le produit p , $p \in \mathcal{M} \cup \mathcal{F}$,
- $\mathcal{P}^p \subset \mathcal{P}$: produits pouvant substituer p , $p \in \mathcal{P}$.

Les variables de décision et leurs coûts induits sont présentés dans le tableau 1.

Le modèle mathématique est le suivant : la fonction objectif (1) minimise les coûts fixes et variables d'approvisionnement, de production et de transport.

$$\begin{aligned}
 Z = \min & \sum_{i \in \mathcal{N}} \sum_{p \in \mathcal{P}} (A_i^p \alpha_i^p + B_i^p \beta_i^p) \\
 & + \sum_{i \in \mathcal{N}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{q \in \mathcal{P}^p} S_i^{qp} \sigma_i^{qp} \\
 & + \sum_{i \in \mathcal{N}} \sum_{j \in \mathcal{N} \setminus \{i\}} \sum_{p \in \mathcal{P}} (F_{ij}^p \phi_{ij}^p + T_{ij}^p \tau_{ij}^p) \\
 & + \sum_{i \in \mathcal{N}} \sum_{j \in \mathcal{N} \setminus \{i\}} L_{ij} \lambda_{ij} \\
 & + \sum_{i \in \mathcal{N}} \sum_{o \in \mathcal{O}} O_i^o \omega_i^o \\
 & + \sum_{i \in \mathcal{N}} Z_i \zeta_i \tag{1}
 \end{aligned}$$

Les contraintes (2) à (6) sont les contraintes de fluxs. Les sources sont les achats de composants et le puits est la satisfaction des demandes clients. La contrainte (2) considère les flux de chaque sous-ensemble sur chaque unité de production.

$$\begin{aligned}
 A_i^p & + \sum_{j \in \mathcal{U} \setminus \{i\}} F_{ji}^p + \sum_{q \in \mathcal{P}^p} S_i^{qp} \\
 & = \sum_{j \in \mathcal{U} \setminus \{i\}} F_{ij}^p + \sum_{q \in \mathcal{M} \cup \mathcal{F}} g^{qp} A_i^q + \sum_{q/p \in \mathcal{P}^q} S_i^{pq} \\
 \forall i \in \mathcal{U}, \forall p \in \mathcal{M} \tag{2}
 \end{aligned}$$

La contrainte (3) décrit les flux de chaque composant sur chaque unité de production.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{j \in (\mathcal{S} \cup \mathcal{U}) \setminus \{i\}} F_{ji}^p + \sum_{q \in \mathcal{P}^p} S_i^{qp} \\
 & = \sum_{j \in \mathcal{U} \setminus \{i\}} F_{ij}^p + \sum_{q \in \mathcal{M} \cup \mathcal{F}} g^{qp} A_i^q + \sum_{q/p \in \mathcal{P}^q} S_i^{pq} \\
 \forall i \in \mathcal{U}, \forall p \in \mathcal{R} \tag{3}
 \end{aligned}$$

La contrainte (4) décrit les flux de chaque composant sur chaque fournisseur.

$$A_i^p = \sum_{j \in \mathcal{U}} F_{ij}^p \quad \forall i \in \mathcal{S}, \forall p \in \mathcal{R} \tag{4}$$

La contrainte (5) décrit les flux de chaque produit fini sur chaque unité de distribution.

$$\sum_{j \in \mathcal{U} \cup \mathcal{D} \setminus \{i\}} F_{ji}^p = \sum_{j \in \mathcal{D} \cup \mathcal{C} \setminus \{i\}} F_{ij}^p \quad \forall i \in \mathcal{D}, \forall p \in \mathcal{F} \tag{5}$$

Tableau 1: Variables de décision et leurs coûts induits.

	Domaine	Variables de décision	Coûts associés
Quantité de p fabriqué sur i	\mathbb{N}	A_i^p	α_i^p
Production de p sur i	$\{0, 1\}$	B_i^p	β_i^p
Quantité de p qui remplace q sur i	\mathbb{N}	S_i^{pq}	σ_i^{pq}
Flux de p entre i et j	\mathbb{N}	F_{ij}^p	ϕ_{ij}^p
Utilisation du flux de p entre i et j	$\{0, 1\}$	T_{ij}^p	τ_{ij}^p
Utilisation de l'axe entre i et j	$\{0, 1\}$	L_{ij}	λ_{ij}
Nombre de poste o sur i	\mathbb{N}	O_i^l	ω_i^l
Utilisation du nœud i	$\{0, 1\}$	Z_i	ζ_i

La contrainte (6) décrit les flux de chaque produit fini sur chaque unité de production.

$$A_i^p + \sum_{j \in \mathcal{U}} F_{ji}^p = \sum_{j \in \mathcal{D} \cup \mathcal{C} \setminus \{i\}} F_{ij}^p \quad \forall i \in \mathcal{U}, \forall p \in \mathcal{F} \quad (6)$$

La contrainte (7) assure que les demandes clients sont satisfaites.

$$\sum_{j \in \mathcal{D}} F_{ij}^p + \sum_{q \in \mathcal{P}^p} S_i^{qp} = \sum_{q \in \mathcal{P}^q} S_i^{pq} + d_i^p \quad \forall i \in \mathcal{C}, \forall p \in \mathcal{F} \quad (7)$$

La contrainte (8) assure que les coûts fixes sont payés quand un composant est acheté chez un fournisseur ou lorsqu'un assemblage est produit sur un site. Pour $p \in \mathcal{M} \cup \mathcal{F}$, A_{max}^p est la borne supérieure de $A_i^p \quad \forall i \in \mathcal{U}$.

$$A_i^p \leq B_i^p A_{max}^p \quad \forall i \in \mathcal{S} \cup \mathcal{U} \cup \mathcal{D}, \forall p \in \mathcal{P} \quad (8)$$

La contrainte (9) assure que les coûts fixes sont payés quand un nœud du réseau est utilisé.

$$B_i^p \leq Z_i \quad \forall i \in \mathcal{S} \cup \mathcal{U} \cup \mathcal{D}, \forall p \in \mathcal{P} \quad (9)$$

La contrainte (10) définit le nombre de postes de travail à implanter sur chaque site.

$$\sum_{p/u \in \mathcal{P}^p} l^{pt} A_i^p \leq \sum_{o \in \mathcal{O}^t} O_i^o c^o \quad \forall i \in \mathcal{U}, \forall t \in \mathcal{T} \quad (10)$$

La contrainte (11) assure que les coûts fixes sont payés quand un produit est transporté entre deux nœuds.

$$F_{ij}^p \leq T_{ij}^p A_{max}^p \quad \forall i \in \mathcal{N}, \forall j \in \mathcal{N} \setminus \{i\}, \forall p \in \mathcal{P} \quad (11)$$

La contrainte (12) assure que les coûts fixes sont payés quand un axe est utilisé.

$$T_{ij}^p \leq L_{ij} \quad \forall i \in \mathcal{N}, \forall j \in \mathcal{N} \setminus \{i\}, \forall p \in \mathcal{P} \quad (12)$$

La contrainte (13) force l'utilisation des parties substituées sur le site où la substitution a lieu.

$$\sum_{q \in \mathcal{P}^p} S_i^{qp} \leq \sum_{q \in \mathcal{M} \setminus \mathcal{P}} g^{qp} A_i^q + \sum_{j \in \mathcal{C}} F_{ij}^p \quad \forall i \in \mathcal{U}, \forall p \in \mathcal{P} \quad (13)$$

4 DISCUSSION ET PERSPECTIVES

La formulation proposée se différencie des travaux existants par la façon dont les possibilités de substitution sont exprimées. Les substitutions sont intégrées explicitement dans les contraintes de flot par des opérations virtuelles de transformation des composants et des assemblages, indépendamment des nomenclatures. La question du choix des nomenclatures en production est alors simplifiée par rapport aux travaux de [Chen, 2010] qui utilise comme variables de décision la substitution d'une partie par une autre dans une nomenclature définie. Cette modélisation facilite la résolution du problème : [Baud-Lavigne et al., 2011] montrent que l'ajout des possibilités de substitution ne complexifie pas la résolution. D'un point de vue industriel, ce modèle peut être implémenté rapidement car peu de paramètres concernant la substitution sont nécessaires. Les choix de nomenclatures n'étant pas contraints, la solution optimale peut imposer de fabriquer le même produit en suivant plusieurs nomenclatures différentes. Si cela permet d'explorer de nouvelles solutions intéressantes, les applications industrielles permettant de multiplier les nomenclatures en production ne sont pas fréquentes. De plus, les coûts de gestion et de traitement de ces nomenclatures sont difficilement évaluable. Les perspectives de ce modèle sont donc de rechercher une formulation linéaire permettant de contraindre le recours à une seule nomenclature par produit tout en gardant un modèle simple à résoudre.

Pour résoudre le problème de façon exacte, l'utilisation de bons solveurs commerciaux tels que Cplex permet de résoudre des instances de taille raisonnable (de l'ordre de 10 sites et 20 produits). Au delà, des méthodes de résolution plus complexes doivent être mise en œuvre : ajout d'inégalités valides et recours aux décompositions de Benders en séparant les variables binaires des autres. D'autres approches utilisant la génération de colonnes sont envisagées, en considérant par exemple les substitutions possibles comme les colonnes à ajouter.

Concevoir simultanément le produit et la chaîne logistique trouve des applications très pertinentes dans les problématiques de développement durable. La composition des produits, la production ainsi que le transport sont trois postes qui ont un rôle important aux niveaux économiques et écologiques ; leur optimisation simultanée apparaît très pertinente dans ce cadre.

RÉFÉRENCES

- [Agard et al., 2009] Agard, B., da Cunha, C., and Cheung, B. (2009). Composition of module stock for final assembly using an enhanced genetic algorithm. *International Journal of Production Research*, 47(20) :5829–5842.
- [Agard and Kusiak, 2004] Agard, B. and Kusiak, A. (2004). Data mining for subassembly selection. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 126(3) :627–631.
- [Agard and Penz, 2009] Agard, B. and Penz, B. (2009). A simulated annealing method based on a clustering approach to determine bills of materials for a large product family. *International Journal of Production Economics*, 117(2) :389–401.
- [Appelqvist et al., 2004] Appelqvist, P., Lehtonen, J., and Kokkonen, J. (2004). Modelling in product and supply chain design : literature survey and case study. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 15(7) :675–686.
- [Arntzen et al., 1995] Arntzen, B. C., Brown, G. G., Harrison, T. P., and Trafton, L. L. (1995). Global supply chain management at digital equipment corporation. *Interfaces*, 25(1) :69–93.
- [Baud-Lavigne et al., 2010] Baud-Lavigne, B., Agard, B., and Penz, B. (2010). Mutual impacts of product standardization and supply chain design. *International Journal of Production Economics*, doi : 10.1016/j.ijpe.2010.09.024.
- [Baud-Lavigne et al., 2011] Baud-Lavigne, B., Agard, B., and Penz, B. (2011). A MILP model for joint product family and supply chain design. In *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management*, Metz, France.
- [Briant and Naddef, 2004] Briant, O. and Naddef, D. (2004). The optimal diversity management problem. *Operations Research*, 52(4) :515–526.
- [CakIr, 2009] CakIr, O. (2009). Benders decomposition applied to multi-commodity, multi-mode distribution planning. *Expert Systems with Applications*, 36(4) :8212–8217.
- [Chakravarty and Balakrishnan, 2001] Chakravarty, A. and Balakrishnan, N. (2001). Achieving product variety through optimal choice of module variations. *IIE Transactions*, 33(7) :587–598.
- [Chen, 2010] Chen, H. (2010). The impact of item substitutions on production-distribution networks for supply chains. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 46(6) :803–819.
- [Chouman et al., 2009] Chouman, M., Crainic, T. G., and Gendron, B. (2009). A Cutting-Plane algorithm for multicommodity capacitated Fixed-Charge network design. Technical report, CIRRELT, Montreal.
- [Cohen and Moon, 1991] Cohen, M. and Moon, S. (1991). An integrated plant loading model with economies of scale and scope. *European Journal of Operational Research*, 50(3) :266–279.
- [Cordeau et al., 2008] Cordeau, J., Laporte, G., and Pasin, F. (2008). An iterated local search heuristic for the logistics network design problem with single assignment. *International Journal of Production Economics*, 113(2) :626–640.
- [Cordeau et al., 2006] Cordeau, J., Pasin, F., and Solomon, M. (2006). An integrated model for logistics network design. *Annals of Operations Research*, 144(1) :59–82.
- [da Cunha et al., 2007] da Cunha, C., Agard, B., and Kusiak, A. (2007). Design for cost : Module-Based mass customization. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 4(3) :350–359.
- [Desai et al., 2001] Desai, P., Kekre, S., Radhakrishnan, S., and Srinivasan, K. (2001). Product differentiation and commonality in design : Balancing revenue and cost drivers. *Management Science*, 47(1) :37–51.
- [Dogan and Goetschalckx, 1999] Dogan, K. and Goetschalckx, M. (1999). A primal decomposition method for the integrated design of multi-period production-distribution systems. *IIE Transactions*, 31(11) :1027–1036.
- [Dowlatshahi, 1996] Dowlatshahi, S. (1996). The role of logistics in concurrent engineering. *International Journal of Production Economics*, 44(3) :189–199.
- [Dowlatshahi, 1999] Dowlatshahi, S. (1999). A modeling approach to logistics in concurrent engineering. *European Journal of Operational Research*, 115(1) :59–76.
- [El Hadj Khalaf et al., 2010a] El Hadj Khalaf, R., Agard, B., and Penz, B. (2010a). An experimental study for the selection of modules and facilities in a mass customization context. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 21(6) :703–716.
- [El Hadj Khalaf et al., 2010b] El Hadj Khalaf, R., Agard, B., and Penz, B. (2010b). Module selection and supply chain optimization for customized product families using redundancy and standardization. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 8(1) :118–129.
- [ElMaraghy and Mahmoudi, 2009] ElMaraghy, H. and Mahmoudi, N. (2009). Concurrent design of product modules structure and global supply chain configurations. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 22(6) :483–493.
- [Ferdows, 1997] Ferdows, K. (1997). Making the most of foreign factories. *Harvard Business Review*.
- [Fixson, 2007] Fixson, S. K. (2007). Modularity and commonality research : Past developments and future opportunities. *Concurrent Engineering*, 15(2) :85–111.
- [Geoffrion and Graves, 1974] Geoffrion, A. M. and Graves, G. W. (1974). Multicommodity distribution system design by benders decomposition. *Management Science*, 20(5) :822–844.
- [Gupta and Krishnan, 1999] Gupta, S. and Krishnan, V. (1999). Integrated component and supplier selection for a product family. *Production and Operations Management*, 8(2) :163–182.

- [Hammami et al., 2008] Hammami, R., Frein, Y., and Hadj-Alouane, A. (2008). Supply chain design in the delocalization context : Relevant features and new modeling tendencies. International Journal of Production Economics, 113(2) :641–656.
- [Jiao et al., 2007] Jiao, J., Simpson, T., and Siddique, Z. (2007). Product family design and platform-based product development : a state-of-the-art review. Journal of Intelligent Manufacturing, 18(1) :5–29.
- [Johnson and Kirchain, 2010] Johnson, M. and Kirchain, R. (2010). Developing and assessing commonality metrics for product families : A Process-Based Cost-Modeling approach. IEEE Transactions on Engineering Management, 57(4) :634–648.
- [Koike, 2005] Koike, T. (2005). Les interfaces pour l'intégration de la logistique dans les projets de conception. une contribution basée sur le cas du projet d'un tracteur à chenille. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, France.
- [Lamothe et al., 2008] Lamothe, J., Bonnafé, A., Gorgas, M., Dupont, L., and Aldanondo, M. (2008). Expérimentation d'un modèle de conception d'une famille de produits et de sa chaîne logistique. In Proceedings of 7ème Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation-MOSIM, Paris, France.
- [Lamothe et al., 2006] Lamothe, J., Hadj-Hamou, K., and Aldanondo, M. (2006). An optimization model for selecting a product family and designing its supply chain. European Journal of Operational Research, 169(3) :1030–1047.
- [Liang and Wilhelm, 2008] Liang, D. and Wilhelm, W. (2008). Decomposition schemes and acceleration techniques in application to production-assembly-distribution system design. Computers & Operations Research, 35(12) :4010–4026.
- [Manzini and Bindi, 2009] Manzini, R. and Bindi, F. (2009). Strategic design and operational management optimization of a multi stage physical distribution system. Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review, 45(6) :915–936.
- [Montreuil and Poulin, 2005] Montreuil, B. and Poulin, M. (2005). Demand and supply network design scope for personalized manufacturing. Production Planning & Control, 16(5) :454 – 469.
- [Paquet et al., 2004] Paquet, M., Martel, A., and Desaulniers, G. (2004). Including technology selection decisions in manufacturing network design models. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 17(2) :117–125.
- [Paquet et al., 2008] Paquet, M., Martel, A., and Montreuil, B. (2008). A manufacturing network design model based on processor and worker capabilities. International Journal of Production Research, 46(7) :2009–2030.
- [Poulin et al., 2006] Poulin, M., Montreuil, B., and Martel, A. (2006). Implications of personalization offers on demand and supply network design : A case from the golf club industry. European Journal of Operational Research, 169(3) :996–1009.
- [Ramdas and Randall, 2008] Ramdas, K. and Randall, T. (2008). Does component sharing help or hurt reliability ? an empirical study in the automotive industry. Management Science, 54(5) :922–938.
- [Riopel et al., 1998] Riopel, D., Langevin, A., and Campbell, J. F. (1998). Integrating logistics in concurrent product and process design. Cahiers du GERAD.
- [Salvador et al., 2002] Salvador, F., Forza, C., and Rungtusanatham, M. (2002). Modularity, product variety, production volume, and component sourcing : theorizing beyond generic prescriptions. Journal of Operations Management, 20(5) :549–575.
- [Salvador et al., 2004] Salvador, F., Rungtusanatham, M., and Forza, C. (2004). Supply-chain configurations for mass customization. Production Planning & Control, 15(4) :381 – 397.
- [Schulze and Li, 2009a] Schulze, L. and Li, L. (2009a). Location-Allocation model for logistics networks with implementing commonality and postponement strategies. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, 2 :1615–1620.
- [Schulze and Li, 2009b] Schulze, L. and Li, L. (2009b). A logistics network model for postponement supply chain. International Journal of Applied Mathematics, 39(2).
- [Shafia et al., 2009] Shafia, M. A., Ariyanehzad, M. G., Fathollah, M., and Taham, F. (2009). Supply chains based on common platforms : Analysis of time savings gained by commonality. Journal of Applied Sciences, 9(1) :27–37.
- [Simpson et al., 2006] Simpson, T. W., Siddique, Z., and Jiao, J. (2006). Product platform and product family design : methods and applications. Springer, New York.
- [Tang et al., 2004] Tang, J., Yung, K., and Ip, A. (2004). Heuristics-based integrated decisions for logistics network systems. Journal of Manufacturing Systems, 23(1) :1–13.
- [Thanh et al., 2008] Thanh, P. N., Bostel, N., and Peton, O. (2008). A dynamic model for facility location in the design of complex supply chains. International Journal of Production Economics, 113(2) :678–693.
- [Wacker and Treleven, 1986] Wacker, J. and Treleven, M. (1986). Component part standardization : An analysis of commonality sources and indices. Journal of Operations Management, 6(2) :219–244.
- [Zhang et al., 2010] Zhang, X., Huang, G., Humphreys, P., and Botta-Genoulaz, V. (2010). Simultaneous configuration of platform products and manufacturing supply chains : comparative investigation into impacts of different supply chain coordination schemes. Production Planning & Control, 21(6) :609.
- [Zhang et al., 2008] Zhang, X., Huang, G. Q., and Rungtusanatham, M. J. (2008). Simultaneous configuration of platform products and manufacturing supply chains. International Journal of Production Research, 46(21) :6137–6162.