# Impact de la standardisation sur la conception intégrée d'une chaîne logistique dans un contexte d'internationalisation \*

B. BAUD-LAVIGNE, B. PENZ

B. AGARD

G-SCOP
Université de Grenoble / CNRS
46 avenue Félix-Viallet
38031 Grenoble Cedex 1, France
bertrand.baud-lavigne / bernard.penz@grenoble-inp.fr

Département de Mathématiques et Génie Industriel École Polytechnique de Montréal C.P. 6079, succ. Centre-Ville, Montréal (Québec), H3C 3A7, Canada bruno.agard@polymtl.ca

**RÉSUMÉ:** Dans un contexte commercial où les entreprises doivent diversifier leurs offres pour répondre aux demandes de clients toujours plus exigeants, la gestion de cette diversité est une problématique centrale: comment proposer une large variété de produits pour satisfaire les besoins des clients tout en maitrisant les coûts de production? Les réponses à cette question ont été étudiées dans plusieurs disciplines, notamment en conception produit, en production et en logistique. Notre étude se place à la frontière de la conception produit et de la chaîne logistique, en montrant que des liens entre ces deux domaines existent: les effets de la standardisation des composants sur la chaîne logistique sont mis en évidence dans un contexte d'internationalisation, afin de démontrer l'intérêt d'une optimisation conjointe produit – chaîne logistique.

**MOTS-CLÉS :** Conception intégrée de chaîne logistique, standardisation, internationalisation, programmation linéaire mixte

### 1 INTRODUCTION

# 1.1 La problématique

Dans un contexte commercial très concurrentiel où les entreprises doivent diversifier leurs offres pour répondre aux demandes de leurs clients, la gestion de cette diversité est une problématique centrale : comment proposer une large variété de produits pour satisfaire les besoins des clients tout en maitrisant les coûts de production, d'inventaire et de logistique? Les réponses à ce problème concernent des disciplines habituellement bien séparées : la conception de produit, la production et la logistique. Une majorité des approches traitent cette problématique de façon séquentielle, la première partie de cette revue de la littérature s'intéresse aux méthodes utilisées en conception de produit, puis en conception de chaîne logistique. L'interdisciplinarité apparait cependant comme un élément essentiel dans la gestion de la diversité, la deuxième partie aborde ces aspects croisés ainsi que les approches intégrées.

Concernant la conception produit, la personnalisation de masse [Pine, 1993] cherche à offrir une grande variété de produits finis en conservant les avantages de la produc-

tion de masse, c'est à dire des coûts bas de production, de stockage et de logistique. Une partie des concepts étudiés doit être intégrée dès la conception des produits, comme la conception modulaire [Kusiak and Huang, 1996] qui consiste à assembler le produit à partir de modules fonctionnels, l'extensibilité qui consiste à permettre des évolutions facilement et la communité [Fixson, 2007] qui cherche à réutiliser les composants ou sous-assemblages d'autres produits existant. En phase d'industrialisation, il est encore possible d'agir avec la différentiation retardée [Lee and Tang, 1997] [Su et al., 2005], en personnalisant le plus tard possible les produits dans le processus de fabrication. Enfin, en production, la diversité peut être gérée grâce aux gammes génériques d'assemblage [Stadzisz and Henrioud, 1998]. Ces évolutions ouvrent de nouvelles possibilités d'optimisation. Des auteurs se sont alors intéressés à optimiser les familles de produits pour répondre aux besoins clients précisément et au coût le plus bas [Briant and Naddef, 2004] [Agard and Penz, 2009] [Barajas and Agard, 2009].

Lorsque le produit est conçu, une autre approche est de réduire les coûts logistiques par une conception intégrée de la chaîne logistique, qui consiste à prendre à la fois des décisions stratégiques et tactiques : le niveau stratégique comprend des décisions impactant le long terme de l'entreprise comme le choix de l'implantation des sites, leur capacité de production et leur technologie; le niveau tactique comprend des décisions de moyen terme comme

<sup>\*</sup>Ce travail a été réalisé en collaboration avec la société REYES Constructions, concepteur et intégrateur de solutions électriques et électromécaniques.

le choix des fournisseurs, l'allocation des produits aux sites de production et les flux de chaque produit et sous-ensemble dans le réseau [Cordeau et al., 2006]. Les décisions de court terme, de niveau opérationnel comme le remplissage des camions ou les tailles de lot ne sont pas considérées. Les paramètres pris en compte sont liés à la production (coût de structure, de main d'œuvre, capacité...), à la logistique et aux aléas induits par une dispersion des lieux de production. De nombreux travaux se sont portés sur cette thématique; les principaux ouvrages sont [Shapiro, 2001], qui présente des modélisations pour une grande variété de problématique liée à la chaîne logistique, [Melo et al., 2009] qui proposent la revue de la littérature la plus récente et complète à ce jour pour les modèles déterministes et [Peidro et al., 2009] qui présentent les modèles stochastiques existants.

La conception simultanée produit – chaine logistique ouvre de nouvelles perspectives dans les problématiques de fortes diversités de produits. Les problèmes les plus étudiés jusqu'à présent sont des approches croisées. La première approche consiste à intégrer des contraintes liées à la conception des produits dans la conception des chaînes logistiques, par la prise en compte des contraintes d'assemblage. Les modèles de chaîne logistique intégrée considérant les nomenclatures sont récents et restent peu étudiés. Plusieurs modèles mono-période, multi-produits et multi-échelons ont été proposés [Paquet et al., 2004], [Paquet et al., 2008], [Cordeau et al., 2006] et un modèle multi-périodes [Thanh et al., 2008].

La seconde approche croisée consiste à l'inverse à intégrer les contraintes logistiques dans la conception des produits, le "Design for Logistics" (DFL) [Dowlatshahi, 1996] et le "Design for Supply Chain Management" (DFSCM) [Lee and Billington, 1992]. Ces études ont mis en avant les bénéfices de concepts qualitatifs tels que la conception modulaire, la différentiation 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.

Les approches intégrées, qui impliquent des modèles complexes, sont très peu investiguées pour le moment. Les marges de manœuvre en conception de produit se limitent à faire un choix parmi plusieurs nomenclatures possibles et fixées auparavant en phase de conception. Deux approches sont répertoriées dans la littérature : la première considère des nomenclatures fixées, définies de façon générique, et cherche à définir les produits finaux pour répondre le mieux possible au marché [Lamothe et al., 2006] [Zhang et al., 2008]; la seconde considère que les produits finaux sont fixés, mais que les nomenclatures sont plus ou moins flexibles. Pour modéliser cela, [El Hadj Khalaf et al., 2009] utilise la notion de fonction et de conception modulaire, l'optimisation consistant à choisir les modules à produire, tandis que [ElMaraghy and Mahmoudi, 2009] définissent plusieurs scénarios de nomenclatures possibles, un seul étant retenu dans la solution optimale.

Notre étude se démarque de la littérature en traitant le problème spécifique de la standardisation d'une famille définie de produits finis et en analysant l'impact et les bénéfices de la standardisation des composants sur l'optimisation de la chaine logistique.

# 1.2 Description du problème

Un exemple de nomenclature prise en compte est donné dans la figure 1.

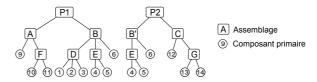


Figure 1 – Un exemple de nomenclature pour deux produits

Nous représentons les sous-ensembles issus d'une opération d'assemblage par des rectangles, et les composants primaires par des ronds. Dans cet exemple, deux produits finaux sont considérés : P1 et P2. Ces produits sont constitués de sous-ensembles, eux-mêmes constitués de sous-ensembles et de composants primaires. Le nombre de niveaux de sous-ensembles n'est pas limité.

Les paramètres nécessaires sont, pour chaque assemblage :

- le volume physique. Il permet de déterminer les coûts de transport entre chaque site,
- les temps moyen d'assemblage. Il permet de déterminer les coûts de production sur chaque site,
- les machines spécifiques qu'il utilise,
- ses coûts d'implantation sur chaque site.
- et pour chaque site:
- la capacité disponible,
- le taux horaire de la main d'œuvre,
- les coûts de transport entre chaque site,
- les coûts d'implantation des machines spécifiques.

La prise en compte des possibilités de standardisation se fait en exprimant les équivalences entre les sous-ensembles. Dans l'exemple de la figure 1, le sous-ensemble B remplit les fonctions de B' car  $B' \subset B$ . B' peut donc être éventuellement substitué par B. Dans le cas où il n'y a pas de relation d'inclusion entre les sous-ensembles, il est également possible d'ajouter un nouvel élément venant remplacer ceux existants.

Le type de solution recherchée est présenté dans la figure 2. La solution proposée ici présente les décisions prises : le choix de la nomenclature et des lieux de production pour chaque sous-ensemble ; ici le choix a été fait de standardiser B. De ce fait, la demande pour B étant plus importante, il est avantageux de transférer la produc-

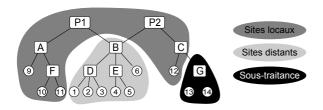


Figure 2 – Un type de solution

tion de B sur un site distant. G n'est pas beaucoup demandé, et sa production est à faible valeur ajoutée : la sous-traitance peut être alors optimale, notamment si les capacités de production sont limitées. Le reste de la production est conseillé sur les sites locaux.

Notre objectif est de déterminer simultanément et de façon optimale les choix de standardisation des produits et sousensembles, ainsi que l'allocation des opérations d'assemblage aux sites de production existants.

# 2 Le modèle étudié

Le modèle étudié est basé sur les travaux de Paquet et al. [Paquet et al., 2004]. Afin de mieux comprendre son fonctionnement et de faciliter son analyse, nous considérons un modèle simplifié. La nomenclature des produits est décrite comme dans la figure 2 sans restriction de taille ou de niveau : pour chaque assemblage, le temps de main d'œuvre nécessaire, le volume du sous-ensemble et les machines spécifiques sont donnés en paramètre. La chaîne logistique est restreinte aux unités de production. Sont donnés pour chaque unité : le taux horaire, les coûts d'implantation des produits et des machines spécifiques, et la demande des produits; et entre chaque unité: les coûts de transport. Enfin, les contraintes de capacité limitée ne sont pas considérées et les composants primaires ainsi que les fournisseurs ne sont pas pris en compte. Ce problème simplifié permet d'analyser plus spécifiquement les impacts de la standardisation des produits sur la conception de la chaîne logistique, ce qui, à notre connaissance, n'a jamais été fait sur ce genre de modèle.

#### 2.1 Notations

Le problème est modélisé en utilisant les notations suivantes :

### Ensembles:

- P: produits; indices:  $p, q \in P$ , - N: sites; indices:  $i, j \in N$ ,

- M : machines ; indice :  $m \in M$ .

#### Paramètres:

-  $G_{ij}$ : nomenclature des produits.  $G_{ij} = 1$  si  $P_i$  est composé de  $P_j$ .  $P_i$  est un produit fini si la colonne i est nulle, un composant primaire si la ligne i est nulle, un

sous-ensemble sinon,

 $-\ d_{pi}$  : quantité de p demandé sur le site i,

 $-t_p$ : temps de production de p,

 $-v_p$ : volume physique de p,

 $-h_{pm}$ : 1 si la fabrication de p nécessite la machine m, 0 sinon.

#### Coûts:

 $-C_i$ : coût horaire de la main d'œuvre sur le site i,

 $-Cf_{pi}$ : coût d'implantation de p sur i,

-  $Ct_{ij}$ : coût de transport volumique entre les sites i et j,

-  $Cm_{im}$ : coût d'implantation de m sur i.

#### Variables de décisions :

 $-X_{pi}$ : quantité de p fabriqués sur i,

 $-Y_{pi}$ : 1 si le site i produit p, 0 sinon,

 $-F_{pij}$ : flux de p de i vers j,

 $-Z_{im}$ : 1 si m est implantée sur i, 0 sinon.

# 2.2 Modèle mathématique

La formalisation de ce problème par le programme linéaire mixte suivant revient à minimiser les coûts de production et de transport en répondant à la demande :

$$Z = \min \sum_{i \in N} \sum_{p \in P} (X_{pi}C_i t_p + Y_{pi}Cf_{pi})$$

$$+ \sum_{i \in N} \sum_{j \in N \setminus i} \sum_{p \in P} (F_{pij}Ct_{ij}v_p)$$

$$+ \sum_{i \in N} \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} (Z_{im}Cm_{im})$$
(1)

s.t.

$$X_{pi} + \sum_{j \in N \setminus i} F_{pji} = \sum_{j \in N \setminus i} F_{pij} + \sum_{q \in P \setminus p} G_{qp} X_{qi} + d_{pi} \quad \forall i \in N, \forall p \in P$$

$$(2)$$

$$X_{pi} \le Y_{pi}D_p \quad \forall i \in N, \forall p \in P$$
 (3)

$$Y_{pi}h_{pm} \le Z_{im} \quad \forall i \in N, \forall p \in P, \forall m \in M$$
 (4)

$$X_{pi} \ge 0 \quad \forall i \in N, \forall p \in P$$
 (5)

$$Y_{pi} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, \forall p \in P \tag{6}$$

$$F_{pij} \ge 0 \quad \forall i \in N, \forall p \in P$$
 (7)

$$Z_{im} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, \forall j \in N \setminus i, \forall m \in M$$
 (8)

La contrainte (2) assure l'égalité entre les flux de produits entrant et les flux sortant dans chaque site et pour chaque produit. Les flux sont décrits dans la figure 3 : pour un produit p et un site i, les produits entrants sont la production de p sur i, et les flux de tous les autres sites vers i ; les produits sortants sont les flux de i vers tous les autres sites,

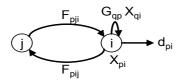


Figure 3 – Flux des produits p sur le site i

les produits entrant dans la nomenclature des produits fabriqués, et la réponse à la demande client.

La contrainte (3) exprime la relation entre  $X_{pi}$  et  $Y_{pi}$ .  $D_p$  est le besoin total de p, calculé à partir des demandes clients et de la nomenclature. La contrainte (4) exprime la relation entre  $Y_{pi}$  et  $Z_{im}$ : une machine spécifique est implantée sur le site i si i fabrique un ou plusieurs produits nécessitant cette machine.

# 3 Etude de cas industriel

# 3.1 Le problème industriel

Le partenaire industriel est une PME française dont l'activité est l'assemblage de produits électriques et électromécaniques. L'entreprise possède des sites de production en France, que nous appelons "locaux", et a récemment créé un site "distant", localisé dans un pays à faible coût de main d'œuvre, et dont les coûts de fonctionnement sont par conséquent plus bas. Ses clients directs sont pour la plupart situé proche des sites locaux. Les différents sites de production en France ayant des caractéristiques identiques, nous ne considérons dans cette étude qu'un seul site local et un site distant.

La problématique est de trouver, pour des produits donnés, les sites de production de chaque assemblage permettant de minimiser à la fois les coûts de production et les coûts engendrés pas la délocalisation (logistique, stockage plus important, risques). La figure 4 détaille les différents flux possibles :

- Composants primaires : du fournisseur aux sites locaux ou distants
- Sous-ensembles : entre les sites de l'entreprise
- Produits finis : des sites de l'entreprise vers le client
- Contenants : entre les sites de l'entreprise

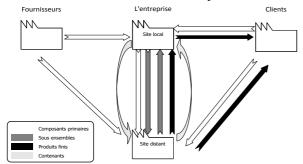


Figure 4 – Structure de la chaîne logistique de l'entreprise

Cette étude se porte sur une analyse faite lors d'une réponse à un appel d'offre. Les données utilisées sont pour partie fournies par le client ou chiffrées par l'entreprise. L'objectif est de déterminer le coût réel optimal de production du produit afin de déterminer le prix proposé par l'entreprise au client. Les résultats de cette analyse, c'est à dire la structure de la chaîne logistique optimale, sont ensuite utilisés de façon opérationnelle pour l'implantation des lignes de production.

# 3.2 Evaluation des coûts liés au transfert de la production

#### Coûts logistiques

Le transport des produits entre les sites locaux et distants se fait par camion. Le coût d'un envoi a une partie fixe de 45 (coût de douane) et une partie variable de 225 par mètre linéaire. En prenant comme hypothèse qu'un mètre linéaire peut contenir  $5m^3$  de produits, la figure 5 montre le coût par  $m^3$  d'un envoi en fonction du remplissage du camion.

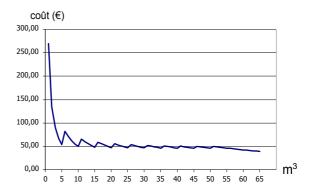


Figure 5 – Coût par  $m^3$  d'un transport entre les sites locaux et distant selon le volume

Une analyse des flux réels entre les sites de l'entreprise montre que le coût du transport peut être estimé par un coût linéaire en  $m^3$ , de  $60 \in_{/m^3}$ , prenant en compte les variabilités de remplissage des camions et d'ajustement des produits. Cette simplification est adaptée à l'horizon temporel des décisions prises (moyen et long terme); à un niveau opérationnel, la prise en compte du coût exact serait pertinente.

#### Coûts de stockage

L'utilisation de sites de production multiples pour la fabrication d'un produit induit l'apparition de nouveaux stocks. Pour un produit et un site donnés, des stocks supplémentaires sont dus aux produits en attente de livraison ainsi qu'aux produits en transit, en fonction de la durée et de la fréquence du transport comme le présente la figure 6. Des stocks de sécurité plus important sont

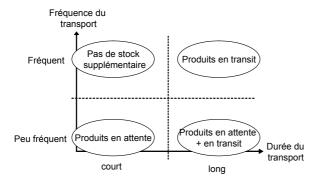


Figure 6 – Augmentation des stocks en fonction de la durée et de la fréquence des transports

également nécessaires pour pallier les aléas de transport.

Le modèle étudié étant statique, ces coûts supplémentaires peuvent être intégrés aux coûts de transport sans perte de généralité.

#### Coûts d'implantation

Nous considérons des coûts d'implantation plus important sur le site distant. En effet, si le coût des infrastructures et des équipements est *a priori* plus faible, il faut rajouter le coût des formations et des déplacements entre les sites, ainsi que l'acquisition de machines. Le modèle considéré permet de mutualiser les coûts d'implantation, chaque poste d'assemblage est en effet indépendant. Cependant,

# 3.3 Description du cas d'étude

Cette étude de cas représente une entreprise ayant un site de production 'local' et un site 'distant'. La nomenclature étudiée est celle de la figure 1, avec et sans standardisation du sous-ensemble *B*. Les paramètres utilisés sont présentés dans les tableaux 1 et 2.

	Site local	Site distant
Taux de la main d'œuvre	25€ <sub>/h</sub>	15€ <sub>/h</sub>
Achat machine 1	0€	10000€
Transport vers l'autre site	60€ <sub>/m³</sub>	60€ <sub>/m³</sub>

Tableau 1 – Cas d'étude : caractéristiques des sites de production

Cette structure représente deux produits composés d'un coffret assemblé A ou C et d'un sous ensemble B ou B'. Une machine m, spécifique et coûteuse — mais déjà disponible sur le site local — est nécessaire pour l'assemblage des sous-ensembles E, F et G. La demande pour les deux produits apparait sur le site local. Les coûts d'implantation sont plus fort sur le site distant.

#### 3.4 Résultats et analyse

Le modèle présenté en partie 2 a été implanté en Java en utilisant les librairies CPLEX Concert technology de la société ILOG. Les tests ont été réalisés à partir de l'étude de cas en faisant varier certains paramètres comme la demande, les taux horaires et les coûts de transport. Les coûts optimaux ainsi que la solution sont représentés dans les graphiques suivants.

#### 3.4.1 Variation de la demande

Les figures 7, 8 et 9 sont obtenues en faisant varier la demande pour les produits 1 et 2 entre 100 et 5000 par pas de 100. Ces graphiques superposent deux informations : le gain obtenu et les assemblages transférés sur le site distant pour chaque couple de demande.

Dans la figure 7, le coût de la production en local est comparé au coût optimal en utilisant le site distant. Pour une demande de  $(P_1, P_2) = (500, 100)$ , la solution optimale est de tout produire sur le site local; le gain est par conséquent nul. Si la demande de  $P_1$  augmente à 700, il est alors avantageux de transférer sur le site distant les assemblages  $P_1$ , A et B, puis D lorsque  $P_1 > 1000$ , et B', E, F et G lorsque  $P_1 > 1300$ . Le gain obtenu est alors entre 2,5 et 3%. Dans cet exemple, la demande pour  $P_2$ est restée constante, mais les modules B' et G, uniquement contenus dans  $P_2$ , sont tout de même transférés lorsqu'un certain niveau de  $P_1$  est atteint. Pour B', cela est dû au fait que le module E, compris dans les deux produits, doit être produit sur le site distant. Pour G, le transfert est avantageux à partir du moment où la machine spécifique est achetée sur le site distant.

Dans la figure 8, le coût de la production en local est comparé au coût optimal pour la nomenclature standardisée en utilisant le site distant. Les gains de la production distante sont exprimés en pourcentage par rapport à une production locale. L'optimisation de la chaîne logistique permet des gains par rapport à la production en local de la même façon que dans la figure 7. La standardisation de  $P_2$  provoque à la fois des gains et des pertes selon la demande pour  $P_2$ : lorsqu'elle est faible, il est préférable de mutualiser les investissements pour les deux produits, mais lorsque la demande est forte, le surcoût de production de  $P_2$  induit des pertes. Par rapport à une optimisation simple de la chaîne logistique, la standardisation permet un transfert plus rapide des modules sur le site distant. Par exemple, lorsque la demande est de  $(P_1, P_2) = (200, 3100)$ , aucun module n'est transféré dans la figure 7, alors que dans la figure 8 quatre modules sont concernés : B et D, qui sont mutualisés dans les 2 produits; E et G, dont les volumes demandés ne changent pas, mais qui profitent du transfert des autres modules.

Dans la figure 9, le coût optimal sans standardisation est comparé au coût optimal pour la nomenclature standar-

	Sous-ensembles									
	$P_1$	$P_2$	A	В	B'	С	D	Е	F	G
Demande sur le site local	1000	1000	0	0	0	0	0	0	0	0
Volume (en $m^3$ )	0.50	0.50	0.50	0.05	0.04	0.40	0.005	0.02	0.03	0.03
Temps MO (en h)	3.00	2.00	0.50	0.40	0.20	0.50	0.20	0.20	0.30	0.30
Utilise la machine commune	non	non	non	non	non	non	non	oui	oui	oui
Coût fixe local (en €)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Coût fixe distant (en €)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000

Tableau 2 – Cas d'étude : caractéristiques des produits

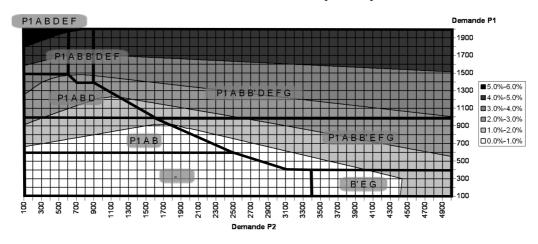


Figure 7 – Assemblages transférés et gains obtenus après optimisation de la chaîne logistique : nomenclature spécifique

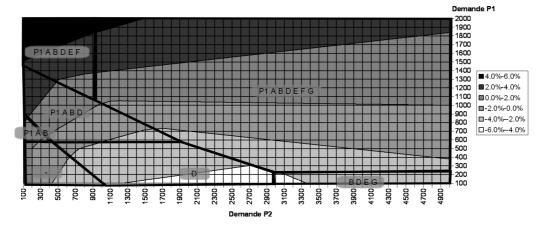


Figure 8 – Assemblages transférés et gains obtenus après optimisation de la chaîne logistique : nomenclature standardisée

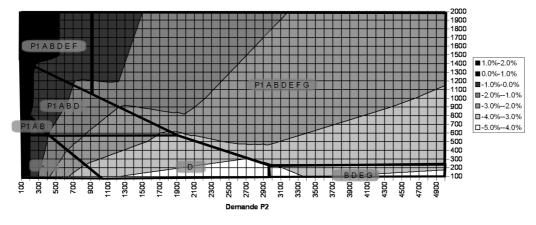


Figure 9 – Gains et pertes de la standardisation entre deux solutions optimisée

disée. Les gains sont exprimés en pourcentage par rapport à une production locale. Si dans cet exemple, standardiser le sous-ensemble B n'est la plupart du temps pas un bon choix – seulement lorsque le volume de  $P_2$  est peu important – il est intéressant de remarquer que le comportement du modèle est complexe. En effet, en standardisant B, il est avantageux de transférer des sous-ensembles lorsque la demande est basse.

#### 3.4.2 Variation des coûts

La figure 10 présente les solutions lorsque le coût du transport varie entre 0 et  $100 \leqslant_{/m^3}$ , par pas de 1. Lorsque le coût du transport est très bas — inférieur à  $30 \leqslant_{/m^3}$  — le choix du lieu de production ne dépend que des coûts de production sur chaque site : il est possible de produire des sous-ensembles sur le site local pour les envoyer sur le site distant et inversement. Passé le seuil des  $30 \leqslant_{/m^3}$ , il est préférable de transférer l'intégralité de la production sur le site délocalisé, jusqu'à un certain niveau du coût de transport, environ  $50 \leqslant_{/m^3}$ . A partir de là,  $P_2$  devient trop couteux à transporter et doit être produit en local, ainsi que tous ces sous-ensembles ; il n'y a alors plus assez de volume pour amortir la machine spécifique, et les assemblages E et F doivent également suivre sur le site de proximité.

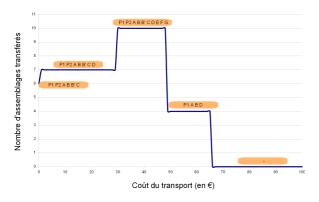


Figure 10 – Nombre d'assemblages transférés sur le site distant en fonction du coût du transport

La figure 11 présente les solutions lorsque le taux horaire sur le site distant varie entre 0 et  $25 \in_{/h}$ , par pas de  $1 \in_{/h}$ . Un phénomène similaire à la figure 10 est observé : les changements se font simultanément : le nombre d'assemblages transférés passe brutalement de 10 à 4, puis à 0, à cause des effets liés du partage des machines et des liens de nomenclatures.

La figure 12 présente les solutions lorsque les coûts d'implantation de chaque assemblage sur le site distant varient entre 0 et  $5000 \in_{/h}$ , par pas de 200; les coûts d'implantation sur le site local restent fixes. Lorsque ce coût est négligeable, inférieur à  $800 \in_{/module}$ , toutes les opérations sont transférées car les coûts d'implantation sont plus faibles qu'en local, et le transport ne concerne

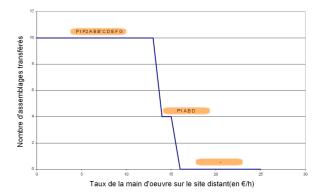


Figure 11 – Nombre d'assemblages transférés sur le site distant en fonction du taux de la main d'œuvre sur le site distant

alors que les produits finis. Lorsque ce coût augmente, les modules dont le transport est onéreux par rapport au temps d'assemblage nécessaire sont produits en local, comme  $P_2$ , puis les produits nécessitant la machine spécifique, puis D, et enfin  $P_1$ , A et B.

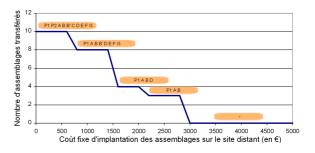


Figure 12 – Nombre d'assemblages transférés sur le site distant en fonction du coût d'implantation des assemblages sur le site distant

# 4 Conclusion

Le but de cet article était de justifier la pertinence de coupler les choix de standardisation à l'optimisation de la chaîne logistique en montrant que les deux décisions sont interdépendantes. Cette étude montre d'une part les possibilités d'analyse de ce type de problème et met en évidence d'autre part la complexité et la pertinence de l'optimisation simultanée de la chaîne logistique et de la conception des produits. Nous nous sommes efforcé de nous approcher des caractéristiques propres à notre partenaire industriel, de part les coûts de production et de transport, la structure des produits et l'utilisation de machines spécifiques.

Les exemples traités illustrent la complexité du problème. Les solutions se révèlent assez instable, très sensibles à des paramètres qui sont en partie exogènes à l'entreprise, comme la demande ou le coût du transport. Face à cela, la standardisation permet d'aller plus loin dans la conception de la chaîne logistique en transférant des parties de la production notamment lorsque les demandes sont faibles.

Le modèle étudié dans cet article permet l'optimisation de la chaîne logistique seule. Nous avons analysé un cas d'étude avec et sans standardisation en résolvant le modèle de façon indépendante. Si les modules pouvant être standardisés sont beaucoup plus nombreux, il n'est plus possible d'utiliser la même méthodologie du fait de l'explosion combinatoire des possibilités. Les développements futurs vont s'axer principalement sur l'étude de modèles intégrant l'optimisation simultanée de la conception produit - chaîne logistique et le développement de méthodes de résolution.

#### REFERENCES

- [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.
- [Barajas and Agard, 2009] Barajas, M. and Agard, B. (2009). Fuzzy product configuration based on market segmentation to form a family of products. In 42nd CIRP Conference on Manufacturing Systems, Grenoble, France.
- [Briant and Naddef, 2004] Briant, O. and Naddef, D. (2004). The optimal diversity management problem. *Operations Research*, 52(4):515–526.
- [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.
- [Dowlatshahi, 1996] Dowlatshahi, S. (1996). The role of logistics in concurrent engineering. *International Journal of Production Economics*, 44(3):189–199.
- [El Hadj Khalaf et al., 2009] El Hadj Khalaf, R., Agard, B., and Penz, B. (2009). An experimental study for the selection of modules and facilities in a mass customization context. *Journal of Intelligent Manufacturing*, doi: 10.1007/s10845-009-0247-0.
- [ElMaraghy and Mahmoudi, 2009] ElMaraghy, H. A. 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.
- [Fixson, 2007] Fixson, S. K. (2007). Modularity and commonality research: Past developments and future opportunities. *Concurrent Engineering*, 15(2):85–111.
- [Kusiak and Huang, 1996] Kusiak, A. and Huang, C. (1996). Development of modular products. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A*, 19(4):523–538.

- [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.
- [Lee and Billington, 1992] Lee, H. L. and Billington, C. (1992). Managing supply chain inventory: pitfalls and opportunities. *Sloan management review*, 33(3):65–73.
- [Lee and Tang, 1997] Lee, H. L. and Tang, C. S. (1997). Modelling the costs and benefits of delayed product differentiation. *Management Science*, 43(1):40–53.
- [Melo et al., 2009] Melo, M., Nickel, S., and Saldanhada-Gama, F. (2009). Facility location and supply chain management a review. *European Journal of Operational Research*, 196(2):401–412.
- [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.
- [Peidro et al., 2009] Peidro, D., Mula, J., Poler, R., and Lario, F. (2009). Quantitative models for supply chain planning under uncertainty: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43(3):400–420.
- [Pine, 1993] Pine, B. J. (1993). *Mass customization: The new frontier in business competition*. Harvard business school press.
- [Shapiro, 2001] Shapiro, J. F. (2001). *Modeling the sup-ply chain*. Duxbury Resource Center.
- [Stadzisz and Henrioud, 1998] Stadzisz, P. C. and Henrioud, J. M. (1998). An integrated approach for the design of multi-product assembly systems. *Computers in Industry*, 36(1-2):21–29.
- [Su et al., 2005] Su, J. C., Chang, Y., and Ferguson, M. (2005). Evaluation of postponement structures to accommodate mass customization. *Journal of Operations Management*, 23(3-4):305–318.
- [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.
- [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.