

## Conception de la chaîne d'approvisionnement pour garantir le délai d'exécution et la reconstitution des stocks: modèle et idées

Ramzi Hammami <sup>une</sup>\*, Yannick Frein <sup>b</sup> et Bouchaib Bahli <sup>une</sup>

<sup>une</sup> Département de la gestion de la chaîne d'approvisionnement, ESC Rennes School of Business, Rennes, France; <sup>b</sup> Laboratoire G-SCOP, Grenoble INP,

UJF, CNRS, Grenoble, France

( Reçu le 12 février 2016; accepté le 9 septembre 2016)

Les contraintes de délais conduisent-elles seulement à repenser et à ré-optimiser le positionnement des stocks tout au long de la chaîne d'approvisionnement ou peuvent-elles avoir un impact sur la conception de la chaîne d'approvisionnement elle-même? Pour répondre à une telle question, nous intégrons les contraintes de délais dans un modèle de conception de chaîne d'approvisionnement multi-échelons et mettons au défi la difficulté de combiner dans le même modèle les décisions à long terme (localisation des installations, sélection des fournisseurs) avec les décisions à mi-parcours (placement des stocks et réapprovisionnement, délai de livraison). Le modèle garantit le respect du délai cité associé à chaque commande client et la reconstitution des différents stocks (matières premières, produits intermédiaires et finaux) aux différentes étapes de la chaîne d'approvisionnement entre toute paire de commandes consécutives. Nous utilisons le modèle pour étudier l'impact du délai de livraison indiqué et de la fréquence des commandes des clients sur les décisions et les coûts de conception de la chaîne d'approvisionnement. Certains de nos résultats indiquent que les contraintes de délais peuvent conduire à rapprocher les sites de fabrication et de distribution de la zone de demande et à sélectionner des fournisseurs locaux malgré leur coût plus élevé.

**Mots clés:** conception de la chaîne d'approvisionnement; délai d'exécution cité; placement d'inventaire; programmation en nombres mixtes

### 1. Introduction

#### 1.1 Motivation à la recherche

La capacité d'une entreprise à proposer à ses clients des délais de livraison courts (LT) devient une arme compétitive sur le marché. Le délai indiqué (*QLT*) désigne l'intervalle de temps entre la passation d'une commande par le client et la date d'échéance de cette commande, qui peut être imposé par une partie (acheteur ou fournisseur) ou convenu par les deux parties. Le rôle du plus court *QLT* pour attirer plus de demande est souligné par de nombreux auteurs (voir par exemple Pekgün, Grif fi n et Keskinocak 2008). Néanmoins, les clients ne souhaitent pas seulement obtenir des *QLT* mais aussi dans la capacité du fournisseur à respecter *QLT*. En effet, quelle que soit la durée de *QLT*, une entreprise pourrait gérer et fi cacement sa planification de fabrication si le fournisseur respecte le calendrier de livraison car il lui suffit de commander les articles suffisamment à l'avance. Cependant, si le fournisseur n'est pas toujours en mesure de livrer des articles *QLT* cela peut affecter le client de plusieurs façons: rupture de stock, retards de fabrication, nécessité de disposer d'un stock de sécurité élevé, etc.

Ainsi, comme l'ont souligné de nombreux auteurs (Hsu et Lee 2009; Hammami et Frein 2014), la capacité d'une entreprise à respecter les *QLT* devient la clé du succès et de la survie de la concurrence. En d'autres termes, une entreprise doit s'assurer que le délai de livraison (*DLT*) de chaque commande, qui est communément définie comme le temps écoulé entre la passation de la commande par le client et la réception de cette commande, ne doit pas être plus long que le *QLT*. Si l'entreprise ne détient pas de stocks le long de la chaîne d'approvisionnement (SC),

*DLT* est égal au temps de cycle de production total (qui est le temps total nécessaire pour acheter des matières premières, fabriquer des produits et expédier des produits au client). Avec la mondialisation des activités de production, de nombreux SC ont été organisés en structures de réseau mondial avec plusieurs couches d'installations de fabrication et de distribution géographiquement dispersées et un réseau international de fournisseurs offshore. Cela conduit à une augmentation de la durée totale du cycle de production et, par conséquent, à une *DLT* si aucun stock n'est détenu le long du SC. Étant donné en outre que les clients exigent de plus en plus

*QLT*, les SC mondiaux sont tenus de détenir des niveaux de stocks considérables afin de raccourcir *DLT* et pour satisfaire la contrainte LT:

$DLT \leq QLT$ . Dans ce cas, il y a généralement une augmentation significative des coûts d'inventaire. Kaminsky et Kaya (2008) a déclaré que dans un CS complexe où les produits sont fabriqués dans de nombreuses installations différentes, les coûts de stock représentent une proportion importante du coût total du réseau. Cela soulève les questions de recherche et de gestion suivantes:

- Faire des contraintes LT ( $DLT \leq QLT$ ) ne conduisent qu'à repenser et à réoptimiser le positionnement des stocks le long du SC ou, plus fondamentalement, peuvent-ils avoir un impact sur la conception du SC lui-même?

\* Auteur correspondant. Email: [hammami.ramzi@gmail.com](mailto:hammami.ramzi@gmail.com), [ramzi.hammami@esc-rennes.com](mailto:ramzi.hammami@esc-rennes.com)

- Comment la contrainte LT peut-elle influencer sur les décisions SC stratégiques telles que l'emplacement des installations de production et de distribution et la sélection des fournisseurs?
- **En particulier, si la firme opte pour une stratégie de production nearshore (zone de production proche de la zone client) afin de favoriser une *DLT* ou opter pour une stratégie de production offshore (zone de production dans des pays lointains low cost) afin de privilégier un moindre coût?**
- En outre, l'entreprise devrait-elle sélectionner des fournisseurs locaux avec un approvisionnement à court terme mais des fournisseurs à coût élevé ou éloignés à faible coût avec un approvisionnement à long terme?

**Les questions ci-dessus sont pertinentes pour de nombreuses entreprises. Meixell et Gargeya ( 2005 ) a souligné que les situations mondiales compliquer les décisions du CS en raison des compromis de coûts dus à l'augmentation de la LT dans le SC. Barnes-Schuster, Bassok et Anupindi ( 2006 ) a même fait valoir qu'il devient de plus en plus courant que les entreprises se délocalisent plus près de leurs clients afin de réduire le LT. Afin d'étudier de telles questions importantes, nous devons intégrer la contrainte LT dans un modèle de conception SC. Les modèles de conception SC classiques qui ne prennent pas en compte les problèmes de LT ne peuvent pas répondre à ces questions.**

### 1.2 Objectif de recherche

Afin d'étudier l'impact de la LT sur la conception des SC et d'étudier les questions de gestion connexes, telles que celles soulevées ci-dessus, nous développons dans cet article un modèle de programmation à nombres mixtes pour la conception de SC à plusieurs échelons tout en intégrant les contraintes de LT et de réapprovisionnement des stocks. Le modèle **garantit le respect de la *QLT* associés à chaque commande client et à la reconstitution des différents stocks (matières premières, produits intermédiaires et finaux) aux différentes étapes de la SC entre toute paire de commandes consécutives.** Nous considérons un processus déterministe de demande discrète qui est proche de nombreuses situations du monde réel en B-to-B, comme nous l'expliquerons plus loin dans l'article, et assumons une politique de stock de base dans les différentes installations. La politique du stock de base est largement **utilisée en théorie et en pratique, comme l'ont souligné de nombreux auteurs (par ex. Simchi-Levi et Zhao 2005 ). Les décisions types comprennent la sélection des fournisseurs, l'emplacement des installations de production et de distribution et le placement et le dimensionnement des niveaux de stock aux différentes étapes de la SC (pour les produits achetés, intermédiaires et finaux).** Dans chaque établissement, nous ne considérons pas seulement le stock de produits de sortie mais également le stock des différents composants d'entrée.

### 1.3 Contributions à la recherche

Notre article contribue à la littérature en: (1) contestant la difficulté d'intégrer dans le même modèle les décisions stratégiques de conception de SC et les décisions tactiques associées aux délais et aux inventaires, (2) envisageant un SC multi-échelons complexe avec des fournisseurs externes, sites de fabrication avec possibilité de transfert de produits semi-finis entre ces sites, centre de distribution et client final, (3) modélisation profonde des conditions de LT et de réapprovisionnement des stocks, ce qui est inhabituel dans un cadre de SC aussi complexe où la configuration du SC n'est pas connue à l'avance et où plusieurs sites et produits sont impliqués et (4) mener des expériences sur une étude de cas réaliste pour valider l'approche de modélisation et tirer des perspectives managériales avec l'objectif de comprendre l'impact du LT et des contraintes d'inventaire sur les décisions de conception de SC.

### 1.4 Relation avec la littérature

Récemment, **Hammami et Frein ( 2013 ) a développé un modèle de conception SC à plusieurs échelons tout en imposant *DLT* d'une commande client représentative doit être inférieure ou égale à la *QLT* pour cette commande. Il s'agit de l'un des rares modèles de conception SC à prendre en compte les contraintes LT dans la littérature.** Bien qu'un tel travail ait de la valeur, les auteurs supposent grosso modo que si la contrainte LT est satisfaite pour l'ordre représentatif, elle l'est pour tous les ordres sur l'horizon de planification sans spécifier explicitement les conditions dans lesquelles cette hypothèse est valide. De plus, ils ont seulement considéré qu'un certain niveau de stock est disponible pour chaque produit dans chaque site sans spécifier et modéliser les hypothèses **relatives à la politique d'inventaire adoptée. De plus, afin de simplifier la modélisation de la contrainte LT, Hammami et Frein ( 2013 ) supposait que l'inventaire peut être réapprovisionné entre les différentes périodes (chaque période est associée à une commande client) sans intégrer les conditions de réapprovisionnement dans le modèle. Ces hypothèses ne sont pas toujours réalistes.**

Par exemple, dans des situations réelles, il n'est pas toujours possible de reconstituer les niveaux de stock aux différentes étapes de la SC entre deux commandes consécutives en raison de nombreux facteurs tels que la fréquence élevée des commandes, les niveaux de stock élevés à maintenir dans le SC et le long LT dans les étapes intermédiaires du SC. En effet, nous pouvons avoir une situation dans laquelle l'installation de distribution est proche de la zone client mais loin de l'installation de fabrication. **Dans ce cas, si suffisamment de stock est disponible dans le centre de distribution lorsque le client passe la première commande, le cabinet peut assurer une courte *DLT* pour cette commande, mais nécessitera une longue LT pour reconstituer le stock de l'installation de distribution. Ainsi, lorsque le client passe la deuxième commande, le niveau de stock dans l'installation de distribution peut être insuffisant, ce qui induit une longue *DLT*. Le modèle de Hammami et Frein**

(2013) ne tient pas compte de cette situation typique, car il suppose que l'installation de distribution disposera toujours d'un stock suffisant. Ainsi, la solution modèle pourrait ne pas être applicable dans certains cas pratiques.

Notre article revisite le modèle de Hammami et Frein en modélisant le LT associé à la reconstitution des stocks et leur corrélation avec *QLT*. De plus, nous intégrons les conditions dans lesquelles toutes les commandes peuvent être livrées à temps sur l'horizon de planification. Contrairement à Hammami et Frein (2013), nous modélisons également explicitement le processus de demande et la politique d'inventaire adoptée, comme expliqué précédemment. Notre cadre de modélisation prend en compte des variables et des contraintes de décision différentes de celles utilisées par Hammami et Frein (2013). Notre modèle est plus réaliste mais aussi plus complexe que le modèle de Hammami et Frein.

## 2. Revue de la littérature

Les décisions LT ont été étudiées dans des modèles SC quantitatifs sous différentes perspectives. La plupart de ces modèles ne traitent pas du problème de conception SC mais supposent que la configuration SC est donnée à l'avance. Nous examinons d'abord ce type de recherche, puis passons à la catégorie des articles où le LT est intégré dans les modèles de conception SC.

### 2.1 LT en gestion des opérations et littérature SC

Dans ce domaine, un flux de recherche intéressant couvre les publications traitant du problème de cotation LT sous différents paramètres lorsque les clients sont sensibles à LT. Par exemple, Kapuscinski et Tayur (2007) a développé un modèle de cotation LT dans un cadre de fabrication sur commande où la demande ne peut être rejetée et *QLT* doit être respecté. Les demandes aléatoires arrivent dans un horizon fini à temps discret et doivent être satisfaites *QLT* tout en tenant compte de la capacité disponible. L'objectif était de minimiser le coût total attendu. Pekgün, Grif fi n et Keskinocak (2008) a modélisé le fonctionnement de l'entreprise comme un système de mise en file d'attente  $M/M/1$  et a considéré une LT linéaire et une demande dépendant du prix. Avec des contraintes adaptées, la

*QLT* et le prix a été déterminé.

La littérature sur la gestion des stocks a également accordé une attention suffisante au LT en raison de la forte corrélation entre la politique d'inventaire et les décisions du LT dans le CS. Par exemple, Graves et Willems (2008) a examiné le problème de savoir où, dans un CS, placer des stocks de sécurité stratégiques pour fournir un niveau élevé de service au client final à un coût minimal. Ils ont supposé que chaque étape du SC fonctionnait avec une politique de stock de base d'examen périodique, que la demande était limitée et qu'il y avait un temps de service garanti entre chaque étape et ses clients. Hammami et Frein (2014) a développé un modèle de placement d'inventaire dans le contexte de la SC multiniveaux générale avec une demande déterministe où *QLT* doit être respecté. Ils ont supposé une capacité de fabrication limitée et ont examiné les interactions des commandes de fabrication entre les périodes. Les problèmes de LT ont également fait l'objet de nombreux articles de recherche traitant de la planification tactique / opérationnelle de la

Spitter et al. 2005) et la gestion des achats / achats dans un SC à deux niveaux (par ex. Jha et Shanker 2009 ; Hammami et Frein 2012).

Certains articles se sont également concentrés sur l'étude de la variabilité du LT en SC. En effet, bien que l'incertitude de la demande soit le facteur le plus largement examiné dans la littérature quantitative SC, la gestion de l'incertitude résultant de la variabilité des LT est également cruciale, en particulier dans les SC mondiaux qui sont généralement caractérisés par de longues distances de transport, des risques de perturbation élevés et une fluctuation des capacités.

Par exemple, Dolgui et Ould Louly (2002) a étudié les valeurs optimales de la LT prévue pour la méthode MRP sous

incertitude à long terme dans le but de minimiser les coûts de carnet de commandes et de détention attendus. Les auteurs ont formulé un problème de SC à niveau unique, à éléments multiples et à périodes multiples tout en supposant une capacité d'approvisionnement infinie (LT ne dépend pas de la taille du lot) et une demande constante. Simchi-Levi et Zhao (2005) a étudié le problème de positionnement des stocks de sécurité dans un SC multi-produit mono-produit avec trois structures de réseau, où chaque étape contrôle son inventaire à l'aide d'une politique de stock de base en temps continu d'installation. Les temps de cycle de production et LT de transport étaient supposés stochastiques, séquentiels et déterminés de façon exogène.

Hnaïen, Delorme et Dolgui (2010) ont développé des algorithmes génétiques pour résoudre des modèles d'optimisation multi-objectifs pour le contrôle des stocks dans un assemblage SC à deux niveaux dans lequel le LT était supposé être une variable discrète aléatoire. L'objectif était de trouver les dates de sortie des composants au deuxième niveau du SC afin de minimiser les coûts de détention attendus des composants et de maximiser le niveau de service client pour le produit fini. Hammami et Frein (2012) a développé un modèle d'optimisation pour la sélection des fournisseurs dans lequel ils se sont concentrés sur les problèmes des fournisseurs à bas prix. Ils ont examiné les incertitudes de livraison LT des sites des fournisseurs aux sites des acheteurs et comment cela affecte le stock de sécurité dans les sites des acheteurs. Ould Louly et Dolgui

(2013) ont étudié le phasage MRP optimal correspondant à chaque périodicité de la politique Quantité d'ordre périodique tout en considérant que le LT réel présente des écarts aléatoires. Le modèle et les algorithmes proposés minimisent la somme des coûts d'installation et de détention tout en satisfaisant une contrainte sur le niveau de service.

Néanmoins, malgré ces articles intéressants, la recherche intégrant la variabilité de la LT est relativement clairsemée lorsque le SC est l'unité d'analyse (Humair et al. 2013 ; Heydari 2014 ; Bandaly, Satir et Shanker 2016). Bandaly, Satir et Shanker

(2016) a souligné que la recherche sur l'impact du LT sur les performances SC est clairement plus courante lorsque le LT est un paramètre déterministe. Dans leur examen de la planification de l'offre et des systèmes de contrôle des stocks dans l'incertitude LT, Ben Ammar et al. (2013) ont conclu que la plupart des modèles analytiques avec LT stochastique supposaient une structure simple du SC (un niveau) et une planification sur une période. Pour les processus plus complexes, avec SC multiniveaux et plus d'une période, l'approche analytique est remplacée par des méthodologies basées sur la simulation.

## 2.2 LT dans les modèles de conception SC

Rappelons que les travaux de recherche cités ci-dessus ne traitent pas du problème de conception SC. Dans le présent article, nous intégrons le LT dans un modèle de conception SC et nous contestons la difficulté de combiner dans le même modèle les décisions à long terme (emplacement des installations, sélection des fournisseurs) avec les décisions à court / moyen terme (placement et réapprovisionnement des stocks, DLT). À l'exception de quelques travaux, dont certains seront discutés ci-dessous, la littérature manque de documents de recherche qui intègrent les décisions LT dans les modèles de conception SC et étudient leurs impacts.

La plupart des modèles de conception SC qui intègrent LT se concentrent sur le SC sortant, essentiellement sur l'emplacement des installations de distribution. Par conséquent, ils ignorent l'interaction entre les différentes étapes et les produits dans un SC à plusieurs échelons. En particulier, ils ne tiennent pas compte des fournisseurs externes et des installations de fabrication dans les décisions de modèle. De plus, ils ne prennent pas en compte les articles achetés et les produits intermédiaires. Par exemple, Daskin, Coullard et Shen (2002) traitait de l'emplacement des centres de distribution tout en intégrant les coûts de fonctionnement des stocks et du stock de sécurité dans les centres de distribution dans la fonction objectif à minimiser. Le DLT du fournisseur au centre de distribution a été considéré comme un paramètre d'entrée donné (et non comme une variable) et a été utilisé pour calculer le stock de sécurité requis. Eskigun et al. (2005) a examiné l'emplacement des installations de distribution et le choix des modes de transport. La fonction objectif a minimisé le coût total, donné par la somme du coût de transport, du coût LT et des coûts fixes. Dans ce modèle, les LT ont été modélisés comme un coût à minimiser dans la fonction objectif en introduisant une valeur monétaire de LT. Sourirajan, Ozsen et Uzsoy (2007) a étudié le problème d'un SC à deux étages avec une unité de production qui réapprovisionne un seul produit chez les détaillants. La décision principale a été de localiser les centres de distribution dans le réseau de manière à minimiser la somme des coûts de localisation et d'inventaire (pipeline et stock de sécurité). Les auteurs ont examiné la reconstitution LT entre l'installation de production et les centres de distribution et ont exigé des centres de distribution qu'ils disposent d'un stock de sécurité suffisant pour maintenir un niveau de service prescrit.

Il n'y a que peu de documents qui ont intégré l'emplacement des installations de production dans un modèle de conception SC à plusieurs échelons avec considération LT. Certains de ces travaux ont inclus le LT dans la fonction objectif à minimiser et non comme une contrainte de service qui doit être satisfaite. Un modèle pionnier dans ce domaine a été fourni par Arntzen et al. (1995). Les auteurs ont développé un programme à nombres mixtes pour un problème global de conception SC dans le secteur de l'électronique. Les principales variables de décision étaient les quantités de production, d'inventaire et d'expédition. Le DLT a été mesuré comme le nombre de jours nécessaires à la fabrication et au transit sur chaque lien du SC. La fonction objectif a minimisé la somme de DLT multiplié par un certain facteur

$\alpha$  et le coût total multiplié par un facteur  $(1 - \alpha)$ . Les auteurs n'ont pas tenu compte des problèmes des fournisseurs dans les décisions types et dans la détermination du DLT. Vous et Grossmann (2008) a développé un modèle de conception SC pour l'industrie chimique en tenant compte de l'emplacement des sites de production et des centres de distribution, mais s'est concentré principalement sur les questions tactiques / opérationnelles (calendrier de production, planification opérationnelle). Le problème a été formulé comme un modèle d'optimisation à deux critères dont les objectifs sont de maximiser la valeur actuelle nette et de minimiser le DLT attendu. Le LT de livraison prévu a été calculé comme la somme de tous les LT de production et de transport engagés dans le chemin correspondant. Dans ce travail, les auteurs ont ignoré, par exemple, la sélection des fournisseurs et, par conséquent, le LT associé à l'approvisionnement en intrants. De plus, seuls les stocks de produits finaux dans les centres de distribution ont été pris en compte dans le modèle.

Les modèles de conception SC multi-échelons qui intègrent le LT en tant que contrainte de service sont rares dans la littérature. Funaki (2012) a combiné un modèle stratégique de placement de stock de sécurité avec des décisions de localisation des installations dans un SC de type assemblage en suivant le schéma de modèle de réseau de Graves et Willems (2005). Ce document considérait une demande basée sur une date d'échéance et imposait un niveau de service garanti. Le traitement et le transit LT ont été pris en compte dans le calcul du temps de service. Cependant, en plus des restrictions sur la structure SC, le modèle proposé ne traitait que d'un produit par installation et supposait que le LT de traitement dans les nœuds SC était indépendant de la quantité traitée.

## 3. Cadre de modélisation et hypothèses

Dans cette section, nous décrivons le cadre de modélisation et présentons les principales hypothèses.

### 3.1 Structure SC

Nous considérons un réseau SC multi-échelons avec différents ensembles de fournisseurs externes potentiels ( $S$ ), installations de fabrication potentielles ( $M$ ) et les installations de distribution potentielles ( $R$ ). Nous désignons par  $J$  l'ensemble de toutes les installations potentielles ( $J = M \cup R$ ). En ordre

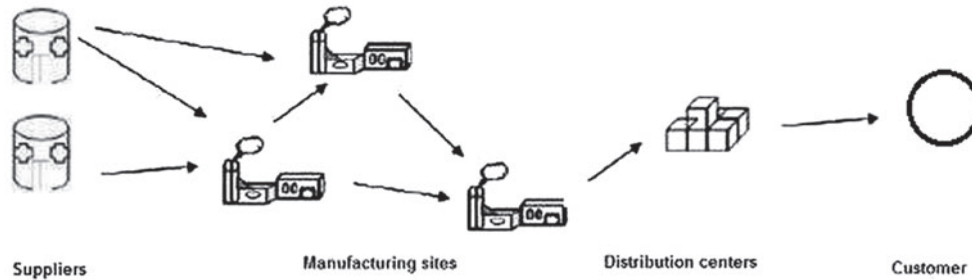


Figure 1. Structure SC multi-échelons.

pour simplifier la présentation du modèle, nous considérons un produit final unique livré à un seul client. Nous prenons en compte les différents produits intermédiaires et matières premières nécessaires à l'obtention du produit final. Notez que les «matières premières» se réfèrent aux produits achetés auprès de fournisseurs externes tandis que les «produits intermédiaires» se réfèrent aux produits fabriqués dans le SC. L'ensemble de tous les produits concernés (matières premières + produits intermédiaires + produit final) est désigné par  $P$ . On laisse  $p$  désigner le produit final ( $p \in P$ ).

Une usine de fabrication  $j$  ( $j \in M$ ) transforme un ensemble de produits d'entrée (qui peuvent être des matières premières ou  $l$  et des produits intermédiaires) en un ensemble de produits de sortie (qui peuvent être d'autres produits intermédiaires ou uniquement le produit final). Ainsi, les produits d'entrée de  $j$  sont obtenus auprès de fournisseurs externes ou d'autres installations de fabrication et les produits de sortie sont livrés à d'autres installations de fabrication ou à des centres de distribution. De toute évidence, les installations de distribution ne gèrent que le produit final, qui est à la fois le produit d'entrée et le produit de sortie. Ensemble de produits d'entrée requis pour fabriquer un produit de sortie  $p$  est désigné par  $R(p)$ . Le scalaire

$p, p$  indique le nombre d'unités de l'élément d'entrée  $p'$  sont requis par sortie

unité de produit  $p$ .

Aucune restriction n'est imposée au nombre d'échelons dans le SC. Une installation en amont peut fournir à différentes installations en aval un produit donné. Cependant, nous supposons que chaque nœud en aval dans le SC doit avoir un nœud en amont unique pour chaque produit d'entrée donné. De toute évidence, une installation en aval peut avoir différentes installations en amont si elle a plusieurs produits d'entrée. En chiffres 1, nous illustrons la structure du réseau SC considéré.

Compte tenu de la structure SC décrite ci-dessus, le modèle est bien adapté à l'industrie automobile. En effet, les constructeurs automobiles disposent généralement de différents sites d'assemblage de composants et de modules (produits semi-finaux). Ces sites sont fournis par différentes couches de fournisseurs externes. Le site d'assemblage final reçoit les modules des autres sites de l'entreprise et achète également certaines pièces auprès de fournisseurs externes afin d'assembler la voiture. La voiture est enfin expédiée aux centres de distribution. Notre modèle pourrait également représenter les opérations de nombreuses entreprises du secteur de l'électronique telles que les opérations de Dell, qui achète des pièces auprès de fournisseurs et les assemble en interne avant de les expédier aux centres de distribution (ou directement aux clients).

### 3.2 Processus de demande

Considérez les cas commerciaux réels suivants qui motivent nos hypothèses liées au processus de demande. Un fabricant de faisceaux électriques fournit un constructeur automobile en France. Chaque vendredi, le constructeur automobile passe une commande ferme et fournit au fournisseur la taille réelle des commandes qui seront passées au cours des 4 prochaines semaines ainsi qu'une estimation de la demande sur 8 semaines. Ainsi, au début de chaque semaine  $t$ , le fournisseur connaît la demande de  $t, t+1, t+2$  et  $t+3$ , et peut prévoir la demande de périodes  $t+4, t+5, t+6$  et  $t+7$ . En outre, le contrat de fourniture (établi sur une base annuelle) prévoit que la taille d'une commande donnée ne peut être supérieure à un montant maximum. Cette taille de commande maximale est prise en compte par le fournisseur pour la planification de la production à long terme (après 8 semaines). Chaque commande passée par le constructeur automobile doit être livrée sous 1 semaine. Le constructeur automobile adopte une politique de flux tendu, aucun stock de faisceaux électriques n'est détenu sur le site du constructeur. Le défaut de livraison dans un délai d'une semaine est très coûteux pour le fournisseur (une pénalité élevée est appliquée en cas de retard). Par conséquent, le fournisseur considère qu'il doit respecter le LT de 1 semaine (les commandes en souffrance et les ventes perdues ne sont pas autorisées). Ce cas représente une situation courante dans l'industrie automobile.

Dans cet article, nous supposons que les commandes des clients sont passées à intervalles réguliers sur l'horizon de planification (par exemple une fois par semaine). On laisse  $L$  désigner l'intervalle de temps entre chaque paire d'ordres consécutifs. Si les commandes sont passées une fois par semaine,  $L = 1$  semaine. Nous divisons l'horizon de planification en différentes périodes de durée  $L$  comme une commande client est passée au début de chaque période. A chaque commande client est associée une taille de commande. On laisse  $r$  désigner la taille maximale possible d'une commande passée par le client. La demande totale sur l'horizon de planification est indiquée par  $RE$ . L'entreprise cite LT

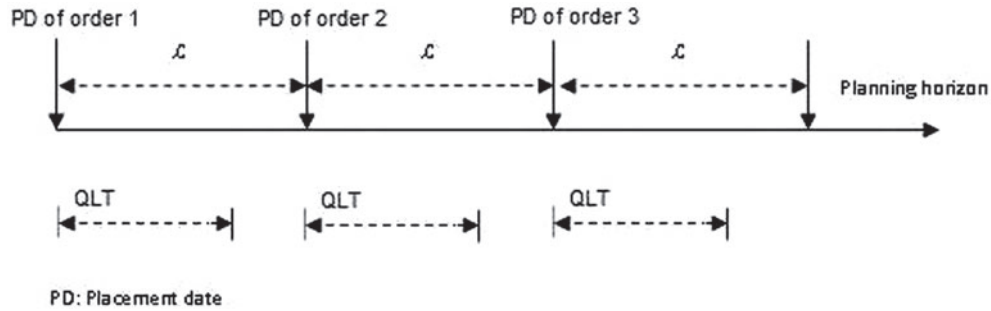


Figure 2. Illustration du processus de demande.

pour chaque commande. Nous supposons que les paramètres  $L$ ,  $\bar{r}$ , et  $\bar{r}$  sont connus au début de l'horizon de planification. C'est une habitude situation dans le contexte B to B et surtout dans les secteurs de l'électronique et de l'automobile que nous connaissons depuis de nombreuses années. En effet,  $L$ ,  $\bar{r}$ , et  $\bar{r}$  sont souvent fixés au cours du processus de négociation d'achat et intégrés dans les contrats d'approvisionnement. Remarque enfin, la demande totale sur l'horizon de planification sera utilisée pour la planification stratégique, tandis que les paramètres de demande associés à une période serviront à calculer la LT et les stocks. Le processus de demande est illustré dans la figure 2.

### 3.3 Politique d'inventaire

Nous considérons une politique de stock de base. Ainsi, le même niveau de stock d'un produit donné  $p$  ( $p \in P$ ) dans l'installation  $j$  ( $j \in J$ ) doit être disponible au début de chaque période (lorsque les commandes sont passées). Par conséquent, si nous tenons compte des conditions (1) et (2), ci-dessous, nous garantissons que toutes les commandes sur l'horizon de planification seront livrées à temps; autrement dit, nous garantissons que  $DLT \leq QLT$  pour chaque commande.

**Condition 1** Nous imposons que le  $DLT$  associé à une commande de taille maximale  $\bar{r}$  doit être inférieur ou égal à la  $QLT$ .

**Condition 2** Nous garantissons que le niveau de stock de base de chaque produit dans chaque établissement peut être réapprovisionné entre chaque paire de périodes consécutives, à savoir dans la période de temps  $L$ .

Les conditions ci-dessus seront incluses dans le modèle. Notons enfin que le niveau de stock de base pour chaque produit dans chaque installation n'est pas fixé à l'avance mais est déterminé par le modèle.

### 3.4 Délai de livraison

Comme nous venons de l'expliquer, nous devons déterminer  $DLT$  associé à un ordre de taille  $\bar{r}$ . Afin de calculer la  $DLT$ , nous prenons en compte les différentes LT d'approvisionnement, de fabrication et de transport à travers le SC. Nous utilisons la notation suivante:

- $t_{proc\ qs}$ : approvisionnement LT (transport compris) de toute quantité de produit  $q$  du fournisseur  $s$  à l'installation  $j$ ,
- $t_{trans\ pj}$ : transport LT de toute quantité de produit  $p$  de l'installation  $j$  à l'installation  $j'$ ,
- $t_{cust\ j}$ : transport LT de toute quantité de produit final depuis l'installation de distribution  $j$  au client final,
- $t_{honne\ p}$ : unité de fabrication LT de produit  $p$  dans l'installation  $j$ .

Notez que nous modélisons le LT de fabrication en fonction de la quantité traitée, ce qui est plus réaliste que l'hypothèse d'un LT de traitement fixe comme dans de nombreux modèles de placement de stock dans la littérature. Afin de calculer la  $DLT$ , nous devons faire quelques hypothèses sur la politique de contrôle du SC. Ces hypothèses sont généralement prises en compte dans les documents traitant du problème de placement des stocks comme, par exemple, dans Graves et Willems (2003).

- Les commandes d'achat sont passées au début de chaque période. Chaque installation (de fabrication ou de distribution) peut envoyer au plus une commande d'achat à son nœud amont dans une période donnée.
- Une installation doit attendre que la quantité totale d'un produit requise par les nœuds en aval soit disponible avant de commencer le processus de livraison. Dans le cas d'une installation fournissant plusieurs nœuds en aval, nous supposons que l'installation libère les exigences de toutes les installations en aval en même temps. Ensuite, les produits sont reçus dans chaque nœud aval en fonction du transport LT.
- Une installation de fabrication doit attendre que toutes les quantités requises d'articles d'entrée soient disponibles avant de commencer à fabriquer les produits de sortie.

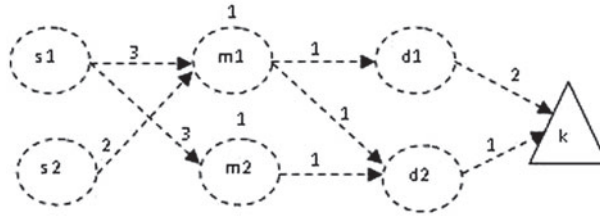


Figure 3. Illustration de la corrélation entre les décisions du modèle et le DLT.

### 3,5 Exemple illustratif: décisions de modèle et DLT

Afin d'expliquer l'impact des décisions du modèle *DLT*, nous considérons l'exemple de la figure 3. En effet, nous avons deux fournisseurs potentiels ( $s_1$  et  $s_2$ ), deux sites de fabrication potentiels ( $m_1$  et  $m_2$ ), deux installations de distribution potentielles ( $r_1$  et  $r_2$ ) et un client  $k$ . Nous considérons 1 produit final  $p$  qui est supposé être fabriqué à partir d'un article acheté  $q$  tel que

$qp = 1$ . Les LT d'achat et de transport sont indiqués au-dessus des différents arcs du réseau. Dans cet exemple illustratif, le LT de fabrication  $m_1$  et  $m_2$  est égal à 1 unité de temps pour 100 articles fabriqués. Nous prenons  $d = 100$ . Rappelons que  $r_2$  est la taille maximale de la commande.

Dans ce qui suit, nous discutons de différentes situations pour différentes valeurs de *QLT*.

- $QLT = 7$ . Dans ce cas, la durée totale du cycle de production est inférieure à *QLT* pour toute configuration possible du SC et de toute commande. Par conséquent, toutes les commandes peuvent être livrées à temps sans avoir de stock.
- $QLT = 6$ . Si, par exemple,  $s_1$ ,  $m_2$  et  $r_2$  sont sélectionnés alors nous n'avons pas besoin de détenir de stocks. Cependant, si le modèle sélectionne  $s_1$ ,  $m_1$  et  $r_1$ , le temps de cycle de production sera égal à 7. Dans ce cas, si nous ne faisons pas de stock, nous aurons  $DLT > QLT$ . Différentes solutions sont possibles. Par exemple, le modèle peut décider de garder en stock 100 unités de l'article d'entrée  $q$  dans  $m_1$ . Une fois  $p$  est reçu (dont le montant ne peut être supérieur à 100), nous pouvons fabriquer la quantité requise de  $p$  inférieur ou égal à 1 unité de temps  $m_1$  puisque les produits d'entrée sont disponibles. Ensuite, les produits sont expédiés au client via  $r_1$ , ce qui prend 3 unités de temps. Ainsi, le *DLT* peut être réduit à un maximum de 4, ce qui garantit que le SC peut répondre aux *QLT*.

Il est ici important de noter que pour garantir que toutes les commandes sur l'horizon de planification peuvent être livrées à temps, un stock de 100 unités de  $q$  dans  $m_1$  doit être disponible chaque fois qu'une commande est passée (c'est-à-dire au début de chaque période). Dans notre approche proposée, le niveau de stock optimal est déterminé par le modèle, qui assure également la reconstitution des stocks entre toutes les deux périodes consécutives afin de satisfaire toutes les commandes des clients sur l'horizon de planification.

- $QLT = 1$ . Dans ce cas, nous devons conserver 100 unités de  $p$  en stock en  $r_2$  et livrer le client de  $r_2$ .

Il existe évidemment de nombreuses possibilités de localisation des installations et / ou de positionnement des stocks pour chaque valeur de *QLT*. La solution optimale est la solution qui minimise le coût total de SC sur l'horizon de planification tout en garantissant que  $DLT \leq QLT$  pour toutes les commandes.

## 4. Formulation du modèle

Nous passons maintenant à la formulation mathématique de notre problème. Les principales variables de décision stratégique sont les suivantes:

- $O_{i s t j}$ : vaut 1 si facilité  $j$  ( $j \in J$ ) est sélectionné, 0 sinon;
- $O_{i s u p s}$ : vaut 1 si fournisseur  $s$  est sélectionné, 0 sinon;
- $O_{i p r o c p s j}$ : est égal à 1 si le fournisseur  $s$  fournit l'installation  $j$  avec produit  $p$ , 0 sinon;
- $O_{i t r a n s p j' j}$ : = 1 si installation  $j'$  fournit l'installation  $j$  avec produit  $p$ , 0 sinon;
- $Q_{p j}^{h o m m e}$ : quantité totale de produit  $p$  fabriqué en usine  $j$  sur l'horizon de planification;
- $Q_{p s j}^{p r o c}$ : quantité totale de produit  $p$  acheté par établissement  $j$  du fournisseur  $s$  sur l'horizon de planification;
- $Q_{p j' j}^{t r a n s}$ : quantité totale de produit  $p$  livré par établissement  $j'$  à l'installation  $j$  sur l'horizon de planification;
- $Q_{c u s t}$ : quantité totale de produit final livré par installation de distribution  $j$  ( $j \in R$ ) au client sur l'horizon de planification;
- $H_{p j}$ : niveau de stock de base (quantité) de produit  $p$  dans l'installation  $j$  ( $j \in J$ ). Ceci est le niveau de stock de  $p$  dans  $j$  au début de chaque période. Il représente également le niveau moyen des stocks de  $p$  dans  $j$  sur l'horizon de planification. La fonction objective du modèle minimise le coût total sur l'horizon de planification, qui est donné par la somme du coût d'ouverture / d'exploitation de l'installation, du coût de sélection du fournisseur, du coût d'achat, du coût de fabrication, du transport

coût (entre les installations), le coût de livraison (vers le client) et le coût de conservation des stocks. Nous considérons les notations suivantes pour les différents facteurs de coût:

- $O_j$ : Coût fixe d'ouverture / d'exploitation  $j$ ;
- $F_s$ : coût fixe de sélection / gestion du fournisseur  $s$ ;
- $U_{pj}$ : coût de fabrication unitaire du produit  $p$  dans l'installation  $j$ ;
- $B_{psj}$ : coût d'achat unitaire du produit  $p$  par établissement  $j$  du fournisseur  $s$ ;
- $T_{pj}$ : coût de transport unitaire du produit  $p$  de l'installation  $j$  à l'installation  $j'$ ;
- $L_j$ : coût de livraison unitaire du produit final à partir du site  $j$  au client final;
- $je_{pj}$ : coût unitaire de possession du produit  $p$  dans l'installation  $j$  sur l'horizon de planification. Ainsi, la fonction

objective est donnée par ( 1 ).

$$\text{Min} \sum_{j \in J} O_j \text{Oui}_{site} + \sum_{s \in S} F_s \text{Oui}_{supp} + \sum_{s \in S} \sum_{j \in M} \sum_{p \in P} B_{psj} Q_{proc} + \sum_{j \in M} \sum_{p \in P} U_{pj} Q_{homme} + \sum_{j \in M} \sum_{j' \in J} T_{pj} Q_{trans} + \sum_{j \in R} L_j Q_{cust} + \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} je_{pj} H_{pj} \quad (1)$$

Dans la suite de cette section, nous introduisons les contraintes du modèle. Premièrement, nous nous concentrons sur les contraintes associées aux décisions stratégiques. Ensuite, nous formulons les contraintes de LT et de réapprovisionnement des stocks.

#### 4.1 Contraintes liées à la conception du SC

Nous imposons d'abord la satisfaction de la demande totale  $ré$  sur l'horizon de planification comme indiqué dans la contrainte ( 2 ).

$$\sum_{j \in R} Q_{cust} R_j \quad (2)$$

Contraintes ( 3 ) se réfèrent aux conditions de conservation des flux dans les installations de distribution. En effet, pour chaque installation de distribution, la quantité de produit final envoyée au client sur l'horizon de planification doit être égale à la quantité acquise auprès des usines de fabrication.

$$Q_{cust} = \sum_{j' \in M} Q_{trans} \quad j \in R. \quad (3)$$

Pour chaque usine de fabrication  $j$ , la quantité totale fabriquée de chaque produit fini  $p$  sur l'horizon de planification (c.-à-d.  $Q_{homme}$   $p_j$ ) doit être égal à la quantité de ce même produit livrée aux autres installations (c.-à-d.  $\sum_{j' \in J} Q_{trans}$ ). C'est donné par des contraintes ( 4 ). La quantité entrante d'un produit d'entrée  $p$  dans une usine de fabrication  $j$  sur l'horizon de planification est donnée par  $\sum_{p' \in P} Q_{homme}$   $p' j$ . Cette quantité doit être obtenue auprès des fournisseurs externes et / ou des autres fabricants installations telles qu'indiquées dans les contraintes ( 5 ).

$$\sum_{j' \in J} Q_{trans} = Q_{homme} \quad j \in M, p \in P. \quad (4)$$

$$\sum_{p' \in P} Q_{homme} = \sum_{s \in S} Q_{proc} + \sum_{j' \in M} Q_{trans} \quad j \in M, p \in P. \quad (5)$$

Comme expliqué dans la section sur le cadre de modélisation, nous imposons que chaque nœud en aval (y compris le client final) doit avoir un nœud en amont unique pour chaque produit d'entrée donné. Ceci est garanti par des contraintes ( 6 ) et ( 7 ).

$$\sum_{j \in R} \text{Oui}_{site} \leq 1. \quad (6)$$

$$\sum_{s \in S} \text{Oui}_{proc} + \sum_{j' \in M} \text{Oui}_{trans} \leq 1, \quad j \in J, p \in P. \quad (7)$$

Selon les contraintes ( 8 ), un fournisseur est sélectionné  $\text{Oui}_{supp}$   $s = 1$  si et seulement si elle fournit au moins une installation avec un produit. Notez que  $s$  se réfère à un nombre suffisamment grand.

$$\frac{1}{\sum_{j \in M} \sum_{p \in P} Q_{proc}} \sum_{s \in S} \text{Oui}_{supp} \leq \sum_{j \in M} \sum_{p \in P} Q_{proc} \quad s \in S. \quad (8)$$



Selon les contraintes ( 9 ), une usine de fabrication  $j$  est sélectionné (c.-à-d.  $Oui\ site_j = 1$ ) si et seulement si elle a des sorties qui sont poussé vers les autres installations. Dans les contraintes ( dix ), nous imposons qu'une installation de distribution  $j$  est sélectionné si et seulement s'il effectue des livraisons au client final.

$$\sum_{j' \in J} \sum_{p \in P} Q_{pj'}^{trans} \cdot Oui\ site_{j'} \leq \sum_{j' \in J} \sum_{p \in P} Q_{pj'}^{trans} \quad j \in M. \tag{9}$$

$$\sum_{j \leq Q\ cust_j} \frac{1}{Q\ cust_j} \leq Q\ cust_j \quad j \in R. \tag{dix}$$

Enfin, les variables  $Oui\ proc_{ps}$  et  $Oui\ trans_{pj}$  sont déterminés par des contraintes ( 11 ) et ( 12 ), respectivement.

$$\sum_{ps} Q_{ps}^{proc} \leq Q_{ps}^{proc} \quad j \in J, s \in S, p \in P. \tag{11}$$

$$\sum_{pj} Q_{pj}^{trans} \leq Q_{pj}^{trans} \quad j \in J, j' \in M, p \in P. \tag{12}$$

#### 4.2 Contraintes associées aux LT et au réapprovisionnement des stocks

Comme expliqué précédemment, afin de garantir que toutes les commandes des clients peuvent être livrées  $QLT$ , nous imposerons que le  $DLT$  associé à une commande de taille maximale  $ré$  doit être inférieur ou égal à  $QLT$ , et veillera à ce que le niveau de stock de base de chaque produit  $p$  dans chaque établissement  $j$  (c'est à dire  $H_{pj}$ ) peut être réapprovisionné entre chaque paire de périodes consécutives, en particulier, dans la période de temps  $L$ . Ainsi, nous devons d'abord déterminer les différentes exigences (pour tous les produits dans toutes les installations) générées par une commande client de taille  $ré$  quand, pour un produit donné  $p$  et installation  $j$ , il y a  $H_{pj}$  unités en stock. Nous introduisons les variables suivantes:

- $X_{pj}$ : besoin net de produit de sortie  $p$  déclenché dans une usine de fabrication  $j$  ( $j \in M$ ) par la demande en aval (cette quantité doit être fabriquée en  $j$ );
- $Z_{qj}$ : besoin net de produit d'entrée  $q$  déclenché dans l'installation  $j$  ( $j \in J$ ) par les besoins nets des produits de sortie de  $j$  (rappelons que pour  $j$  dans  $R$ , produit d'entrée = produit de sortie = produit final);
- $Z_{qj'}$ : quantité de produit d'entrée  $q$  classés par établissement  $j'$  de l'installation  $j'$  afin de répondre à l'ensemble des besoins  $q$  dans  $j$ ;
- $V_{qsj}$ : quantité de produit d'entrée  $q$  classés par établissement  $j$  d'un fournisseur externe  $s$  afin de répondre à l'ensemble des besoins  $q$  dans  $j$ .

Nous rappelons qu'une seule commande peut être passée par une installation en aval sur une installation en amont à chaque période, ce qui implique que cette installation  $j$  ne commandera pas seulement l'exigence nette  $Z_{pj}$

mais aussi la quantité de  $q$  qui sera utilisé pour fabriquer la sortie produit et la quantité nécessaire pour reconstituer le stock de  $q$  dans  $j$ . Notez également que, puisque nous avons supposé que chaque installation en aval n'avait qu'une seule installation en amont pour chaque produit donné, nous devons avoir  $Z_{qj'} \geq Z_{pj}$

par rapport à  $q$ .

Nous introduisons maintenant la notation utilisée pour désigner les différents composants LT le long du SC.

- $\lambda$ : LT requis pour livrer la quantité  $ré$  du produit final au client final (rappelons  $\lambda$  est le plus long possible  $DLT$  car il correspond à la taille maximale de la commande);
- $\delta_{out\ pj}$ : LT requis pour fabriquer en usine  $j$  ( $j \in M$ ) l'exigence nette  $X_{pj}$  du produit de sortie  $p$ ;
- $\delta_{en\ qj}$ : LT requis pour faire l'exigence nette  $Z_{qj}$  du produit d'entrée  $q$  disponible dans l'établissement  $j$  ( $j \in J$ );
- $\phi_{en\ qj}$ : LT requis pour recevoir dans l'établissement  $j$  ( $j \in J$ ) la quantité totale commandée de produit d'entrée  $q$ . Rappelons que cette quantité est donnée par  $Z_{qj'}$  (resp,  $V_{qsj}$  si installation  $j'$  ( resp, fournisseur  $s$ ) est le nœud en amont de  $j$ ).

Notez que  $\phi_{en\ qj} \geq \delta_{en\ qj}$ . En effet, nous avons  $\phi_{en\ qj} > \delta_{en\ qj}$  si et seulement si  $Z_{qj} = 0$  et  $Z_{qj'} > 0$  (ou  $V_{qsj} > 0$ ), ce qui signifie, dans ce cas, cette installation  $j$  commande le produit  $q$  uniquement pour reconstituer les niveaux de stock. Autrement,  $\phi_{en\ qj} = \delta_{en\ qj}$ .

Avant d'aller de l'avant, nous donnons un exemple illustratif afin d'aider le lecteur à comprendre le rôle des variables ci-dessus et le calcul de LT. Nous considérons un cas simple de SC série avec 1 fournisseur  $s$ , 1 usine de fabrication  $m$ , 1 centre de distribution  $ré$  et 1 client  $k$  comme le montre la figure 4 . Il y a 2 produits:  $q$  ( matières premières) et  $p$  ( produit final). Nous supposons que

$\tau_{pm} = 1$ . Le temps de fabrication unitaire du produit  $p$  dans l'installation  $m$  est  $t_{homme}$   $\tau_{pm} = 0,01$  (par exemple en jours), le marché LT  $t_{pqs} = 3$ , les LT de transport  $t_{trans}$   $\tau_{pm}$  et  $t_{cust\ ré}$  sont respectivement égaux à 2 et 1. Nous considérons  $d = 100$ .

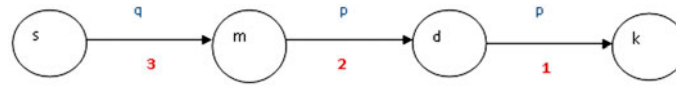


Figure 4. Cas illustratif.

Tableau 1. Illustration des variables LT et calcul.

$H_{qm}$	$H_{pm}$	$H_{pd}$	$Z^*_{pd}$	$\bar{z}_{pmd}$	$X^*_{après-midi}$	$Z^*_{qm}$	$\bar{V}_{qsm}$	$\delta_{après-midi}$	$\delta_{en pd}$	$\phi_{en pd}$	$\lambda$	$\delta_{en qm}$	$\phi_{en qm}$
0	0	0	100	100	100	100	100	4	6	6	7	3	3
100	0	0	100	100	100	0	100	1	3	3	4	0	3
0	100	0	100	100	0	0	100	0	2	2	3	0	3
0	0	100	0	100	100	100	100	4	0	6	1	3	3
60	40	0	100	100	60	0	100	0,6	2,6	2,6	3,6	0	3
20	40	0	100	100	60	40	100	3,6	5,6	5,6	6,6	3	3
80	20	50	50	100	80	0	100	0,8	2,8	2,8	3,8	0	3

Nous donnons dans le tableau 1 un scénario de niveaux des stocks de base ( $H_{qm}$ ,  $H_{après-midi}$  et  $H_{pd}$ ) qui sont supposés être détenus dans les différentes installations et nous en déduisons les valeurs de  $Z^*_{pd}$ ,  $Z^*_{pmd}$ ,  $X^*_{pm}$ ,  $Z^*$

et  $\phi_{dans qm}$ .

Par exemple, dans le cas de la dernière ligne,  $H_{pd} = 50$ , donnant  $Z^*_{pd} = r\bar{e} - H_{pd} = 50$ . Cependant,  $Z^*_{pmd} = 100$  depuis l'installation de distribution  $r\bar{e}$  commandera 100 unités de  $p$  de l'usine de fabrication  $m$  (50 unités pour répondre au besoin net et 50 unités pour reconstituer le niveau de stock). En établissement  $m$ ,  $H_{pm} = 20$ , donnant  $X^*_{pm} = Z^*_{pmd} - H_{pm} = 80$ . Notez que l'installation  $m$  ne fabriquera pas seulement le besoin net de 80 unités mais également 20 unités qui serviront à reconstituer le stock de produits  $p$ . L'exigence nette de produit d'entrée  $q$  dans l'installation  $m$ ,  $Z^*$

$Z^*_{qm} = 0$  depuis  $H_{qm} = 80$ . Cependant, la facilité  $m$  commandera 100 unités de  $q$  du fournisseur  $s$  ( $\bar{V}_{qsm} = 100$ ). En effet, 20 unités de  $q$  sera utilisé pour fabriquer 20 unités de produit de sortie  $p$  (afin de reconstituer le stock de  $p$  dans  $m$ ) et 80 unités serviront à reconstituer le stock de  $q$  dans  $m$ .

Concernant LT, à réception de la commande client  $r\bar{e}$ , installation de distribution  $r\bar{e}$  commandera 100 unités à l'usine de fabrication  $m$ . Afin de répondre à cette demande en aval,  $m$  fabriquera l'exigence nette  $X^*_{pm} = 80$  unités. Toute la quantité de produit d'entrée  $q$  nécessaire pour faire  $X^*_{après-midi}$  est disponible en  $m$  (rappeler que  $Z^*$

$Z^*_{qm} = 0$ ). Par conséquent,  $\delta_{en dehors pm} = t_{hom après-midi} \times X^*_{pm} = 0,8$  journée. Étant donné en outre que  $Z^*_{pd} > 0$  alors  $\delta_{dans pd} = \phi_{dans pd} + \delta_{en dehors pm} + t_{trans pd} = 2,8$  jours. le  $DLT$ ,  $\lambda = \delta_{dans pd} + t_{cust pd} = 3,8$  jours. Par conséquent, la commande du client peut être livrée sous 3,8 jours. L'exigence nette de produit d'entrée  $q$  dans  $m$  est  $Z^*_{qm} = 0$ ,

donnant  $\delta_{dans qm} = 0$ . Cependant, la facilité  $m$  va commander  $V_{qsm} = 100$  unités du fournisseur  $s$  afin de reconstituer les stocks. Par conséquent,  $\phi_{en qm} = t_{trans qm} = 3$  jours. Enfin, rappelons que nous devons garantir la reconstitution des stocks dans la durée de la période

$L$ . Par conséquent,  $\phi_{dans qm}$  et  $\phi_{dans pm}$  doivent chacun être plus petits que  $L$ .

Dans les exemples ci-dessus, nous avons calculé la LT pour une configuration donnée du SC et des niveaux de stock donnés. Il est important de souligner que la configuration SC et les niveaux de stock de base sont également décidés par notre modèle et non donnés à l'avance, ce qui complique la formulation mathématique.

#### 4.2.1 Exigences et flux de produits déclenchés par un ordre de taille $d$

Maintenant, nous formulons les contraintes qui serviront à définir les variables introduites ci-dessus, à savoir  $X^*_{pj}$ ,  $Z^*$

Ces variables représentent les besoins et les flux de produits qui sont déclenchés dans une période donnée par un ordre de taille client  $r\bar{e}$ .

Rappelons que le produit final est livré au client à partir d'une seule installation de distribution. Si installation de distribution  $j$  est sélectionné (c.-à-d.  $O_{ui site j} = 1$ ) et  $H_{pFj} < r\bar{e}$  puis l'exigence nette de produit final en  $j$  est  $Z^*_{pFj} = r\bar{e} - H_{pFj}$ . Autrement,

$Z^*_{pFj} = 0$ . Par conséquent,  $Z^*_{pFj}$  est défini par des contraintes (13).

$$Z^*_{pFj} = \max \{ dY_{site j} - H_{pFj}, 0 \} \quad j \in R. \tag{13}$$

Rappelons également que chaque installation en aval n'a qu'une seule installation en amont pour chaque produit d'entrée donné, mais cette installation en amont n'est pas connue à l'avance. Par conséquent, la quantité de  $p$  commandé par centre de distribution  $j$  de son nœud en amont est donné

par  $\sum_{j \in MZpj}$ . Comme expliqué précédemment, au début de chaque période, la facilité  $j$  a  $H_{pj}$  en stock et doit avoir ce même niveau de stock à la fin de la période. Par conséquent, la quantité commandée  $Z_{pj}$  est égale à  $dY_{site}$  tel qu'imposé par contraintes (14).

$$\sum_{j \in M} \bar{Z}_{pj} = dY_{site} \quad j \in R. \tag{14}$$

Le besoin brut en usine de fabrication  $j$  concernant le produit de sortie  $p$  est donné par  $\sum_{j \in JZpj} \bar{Z}_{pj}$ . Si  $\sum_{j \in JZpj} \bar{Z}_{pj} > H_{pj}$  alors l'exigence nette  $X_{pj} = \sum_{j \in JZpj} \bar{Z}_{pj} - H_{pj}$ . Autrement,  $X_{pj} = 0$ . Ceci est garanti par des contraintes (15). Remarque que le produit de sortie d'une installation de fabrication donnée n'est pas connu à l'avance mais est déterminé par le modèle. On peut vérifier que, si  $p$  n'est pas un produit de sortie de  $j$ , puis les contraintes (15) sera toujours valide.

$$X_{pj} = \max_{j \in J} \bar{Z}_{pj} - H_{pj}, 0 \quad j \in M, p \in P. \tag{15}$$

Rappelons que l'exigence nette  $Z_{qj}$  du produit d'entrée  $q$  dans une usine de fabrication  $j$  est déclenchée uniquement par les besoins nets des produits de sortie  $j$  et non par la reconstitution des stocks. L'exigence nette de produit de sortie  $p$  dans une usine de fabrication  $j$  est  $X_{pj}$ . Ainsi, les besoins bruts de produit d'entrée  $q$  dans  $j$  est  $\sum_{p \in P} q_p X_{pj}$  et si  $\sum_{p \in P} q_p X_{pj} > H_{qj}$ , puis

$$Z_{qj} = \sum_{p \in P} q_p X_{pj} - H_{qj}. \text{ Autrement, } Z_{qj} = 0. \text{ Par conséquent, nous incluons des contraintes (16) dans le modèle.} \tag{16}$$

Une installation de fabrication peut être fournie par un fournisseur externe ou par une autre installation. Par conséquent, la quantité de produit d'entrée  $q$  commandé par site de fabrication  $j$  est  $\sum_{s \in S} v_{qs} + \sum_{j \in MZqj}$ . Étant donné que le stock de  $q$  dans  $j$  doit être réapprovisionné entre deux périodes consécutives, on déduit cette facilité  $j$  commandera la quantité de  $q$  qui a été utilisé au cours de la période, ce qui équivaut à  $\sum_{p \in P} q_p \bar{Z}_{pj}$ . Par conséquent, nous incorporons des contraintes (17) dans le modèle.

$$\sum_{s \in S} v_{qs} + \sum_{j \in M} \bar{Z}_{qj} = \sum_{p \in P} q_p \bar{Z}_{pj} \quad j \in J. \tag{17}$$

Nous devons enfin inclure les contraintes logiques qui doivent être satisfaites par les variables de flux  $Z_{pj}$  et  $v_{qs}$  afin de garantir leur cohérence avec les décisions stratégiques  $Q_{trans}$  et  $Q_{proc}$ . En effet, nous ne pouvons pas, par exemple, flux de produit  $p$  de l'installation  $j'$  à  $j$  (c'est à dire  $Z_{pj} > 0$ ) si la quantité totale transférée de  $p$  est de  $j'$  à  $j$  sur l'horizon de planification  $Q_{trans}$  est  $Q_{trans}_{pj} = 0$ . Par conséquent, nous devons avoir  $Z_{pj} \leq Q_{trans}_{pj}$  imposée par les contraintes (18). De même, les contraintes (19) imposent cette  $v_{qs}$  doit être plus petit que cela  $Q_{proc}_{qs}$ .

$$\bar{Z}_{pj} \leq Q_{trans}_{pj} \quad p \in P, j' \in M, j \in J. \tag{18}$$

$$\bar{v}_{qs} \leq Q_{proc}_{qs} \quad q \in P, s \in S, j \in M. \tag{19}$$

4.2.2. LT et réapprovisionnement des stocks

Nous formulons d'abord des contraintes (20), (21) et (22) qui garantissent que  $QLT$  est respecté et que les niveaux de stock sont reconstitués. Ensuite, nous formulons les contraintes associées à la définition des variables LT  $\lambda$ ,  $\delta$  dans  $q_j$ ,  $\delta$  en  $q_j$  et  $\phi$  dans  $q_j$ , qui ont été introduits plus tôt.

Contrainte (20) impose que le LT requis pour livrer la quantité  $ré$  produit final pour le client doit être inférieur ou égal à  $QLT$ ,

. Comme expliqué précédemment, cela garantit que toutes les commandes peuvent être livrées à temps.

$$\lambda \leq . \tag{20}$$

Les conditions de réapprovisionnement des stocks garantissent que le niveau de stock de base de chaque produit dans chaque établissement peut être réapprovisionné avant la fin de chaque période. Il faut distinguer les cas des installations de distribution et de fabrication. En effet, seul le produit final est géré par des installations de distribution et, par conséquent, nous ajoutons uniquement des contraintes (21) au modèle.

$$\phi \text{ en } p f j \leq L j \in R. \tag{21}$$

Pour les installations de fabrication, nous devons considérer la reconstitution des stocks pour les produits d'entrée et de sortie. Ceci est garanti par des contraintes (22) où  $t_{homme}$  est le temps de fabrication unitaire du produit  $p$  dans l'installation  $j$ , et  $UNE_{pj}$  est un nouveau binaire variable définie sur 1 si et seulement si  $p$  est un produit de sortie de  $j$  (c'est à dire  $UNE_{pj} = 1$  ssi  $Q_{homme} > 0$ ).

$$\phi_{en} q_j \leq L - t_{homme} p_j (X_{*pj} + H_{pj} UNE_{pj}) \quad j \in M, p \in P, q \in R (p). \tag{22}$$

En effet,

- Si  $q$  est un produit d'entrée de l'installation  $j$  puis:
  - si  $p$  n'est pas un produit de sortie de  $j$  (c'est à dire  $X_{*pj} + H_{pj} UNE_{pj} = 0$ ) puis contraintes (22) devenir  $\phi_{dans} q_j \leq L$ , impliquant que les produits d'entrée de  $j$  doivent être reçus des installations en amont avant la fin de la période.
  - si  $p$  est un produit de sortie de  $j$  (c'est à dire  $UNE_{pj} = 1$ ) puis les contraintes (22) imposer que la quantité d'articles  $q$  commandé doit être disponible avant  $L - t_{homme} p_j (X_{*pj} + H_{pj})$  afin de pouvoir fabriquer la quantité  $(X_{*pj} + H_{pj})$  de sortie produit  $p$  avant la fin de la période. Rappelons que la quantité  $(X_{*pj} + H_{pj})$  doit être fabriqué en  $j$  afin de répondre à la demande en aval et de reconstituer le stock de  $p$ .
- Si  $q$  n'est pas un produit d'entrée de l'installation  $j$  (dans ce cas, nous avons  $\phi_{dans} q_j = 0$  comme nous l'imposons plus tard dans les contraintes (25)) puis:
  - si  $p$  n'est pas un produit de sortie de  $j$  puis les contraintes (22) deviennent triviaux.
  - si  $p$  est un produit de sortie de  $j$  puis les contraintes (22) induire  $t_{homme} p_j (X_{*pj} + H_{pj} UNE_{pj}) \leq L$ , ce qui signifie que le LT requis pour fabriquer le besoin net  $X_{*pj}$  et pour reconstituer le niveau de stock de base  $H_{pj}$  du produit de sortie  $p$  dans  $j$  doit être plus petit que  $L$ .

Passons maintenant à la modélisation des contraintes relatives à la définition des variables LT  $\lambda$ ,  $\phi$  dans

$$q_j \text{ en } \phi_{dans} \delta \text{ dans } q_j.$$

4.2.2.1 *Calculs de  $\lambda$* . Si installation de distribution  $j$  fournit au client un produit final (c.-à-d. *Oui site*  $j = 1$ ), puis le *DLT* de  $j$  au client concernant la commande *ré* est égal à  $\delta_{dans}$  où  $t_{cust}$  est le produit final de transport LT de l'installation  $j$  au client. L'installation de distribution sélectionnée n'est pas connue à l'avance. Par conséquent,  $\lambda$  est déterminé par des contraintes (23).

$$\lambda = \sum_{j \in R} (\delta_{en} p_{Fj} + t_{cust} \text{ Oui site } j). \tag{23}$$

4.2.2.2 *Calculs de  $\phi_{dans}$*   $p_{Fj}$  pour les installations de distribution. Si usine de fabrication  $j'$  fournit une installation de distribution  $j$  avec final produit  $p_F$  (c'est à dire *Oui trans*  $p_{Fj'} = 1$ ), puis le LT requis pour recevoir l'ordre de  $p_F$  dans l'installation  $j$  est  $\delta_{en} \text{ dehors}$   $p_{Fj'} + t_{trans} p_{Fj'}$ . L'amont installation de distribution  $j$  n'est pas connu à l'avance. Par conséquent, nous calculons  $\phi_{dans}$   $p_{Fj}$  comme indiqué dans les contraintes (24). Remarque ici ça  $\phi_{dans}$   $p_{Fj} = \phi_{dans} q_j$  quand  $q = p_F$  (c'est-à-dire pour le produit final).

$$\phi_{en} p_{Fj} = \sum_{j' \in M} (\delta_{sur} p_{Fj'} + t_{trans} p_{Fj'} \text{ Oui trans } p_F \text{ } j \in R). \tag{24}$$

4.2.2.3 *Calculs de  $\phi_{dans}$*   $q_j$  pour les installations de fabrication. Une usine de fabrication peut recevoir un produit un fournisseur externe ou une autre installation de fabrication. Le LT requis pour recevoir dans l'usine de fabrication  $j$  la commande du produit  $q$  du fournisseur  $s$  est  $t_{proc}$  (rappeler que  $t_{proc} q_s j$  est l'approvisionnement LT du produit  $q$  du fournisseur  $s$  à l'installation  $j$  et  $q_s j$  *Oui proc*  $q_s j$  est une variable binaire qui est égale à 1 si et seulement si le fournisseur  $s$  fournit  $j$  avec  $q$ ). Si  $q$  est fourni à  $j$  de l'usine de fabrication  $j'$  alors le LT requis est ( $\delta_{out} q_j + t_{trans} q_j j'$  *Oui trans*  $q_j j'$ ). Par conséquent, le LT  $\phi_{dans} q_j$  est calculé en fonction des contraintes (25).

$$\phi_{en} q_j = \max \{ t_{proc} q_s j \text{ Oui proc } q_s j, \delta_{out} q_j + t_{trans} q_j j' \text{ Oui trans } q_j j', s \in S, j' \in M \} \quad j \in M, q \in P. \tag{25}$$

4.2.2.4 *Calculs de  $\delta_{dans}$*   $q_j$  pour les installations de fabrication et de distribution. Si l'exigence nette  $z^*$   $q_j$  du produit d'entrée  $q$  dans établissement  $j$  est différent de zéro, alors le LT  $\delta_{dans} q_j$  requis pour recevoir cette exigence nette est égal au LT requis pour recevoir la quantité totale commandée (à savoir,  $\delta_{dans} q_j = \phi_{dans} z^*$ ). En effet, on a supposé qu'une seule commande était passée par un établissement donné par produit et par période. Autrement,  $\delta_{dans} q_j = 0$ . Par conséquent, le LT  $\delta_{dans} q_j$  est obtenu par des contraintes (26) où  $une$   $q_j$  est une variable binaire c'est égal à 1 iff  $q_j > 0$ .

$$\delta_{en} q_j = \phi_{dans} q_j \text{ Une } q_j \quad j \in J, q \in P. \tag{26}$$

Tableau 2. Solution pour  $d = 1000$  et  $L = 4$ .

	Homme. des sites	Distr. des sites	Fournisseurs
0,2	Afrique du Nord	Europe de l'ouest	S2, S4, S6, S7, S9
0,6	Europe de l'Est	Europe de l'Est	S2, S4, S6, S7, S9
1	Europe de l'Est	Europe de l'Est	S2, S4, S6, S7, S9
1,4	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S4, S6, S7, S9
1,8	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S4, S6, S7, S9
2,2	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S4, S6, S7, S9
2,6	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S4, S6, S7, S9
3	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S4, S6, S7, S9
3,4	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S4, S6, S7, S9
3,8	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S4, S6, S7, S9
4,2	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S4, S6, S7, S9
4,6	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S4, S6, S7, S9
5	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S4, S6, S7, S9

4.2.2.5 *Calculs de  $\bar{\delta}$  en dehors*  $p_j$  des installations de fabrication. Pour obtenir l'exigence nette  $X \cdot p_j$  du produit de sortie  $p$  inmanufactur- }  
 installation  $j$ , nous devons d'abord remplir les exigences nettes de tous les produits d'entrée, ce qui nécessite le  $LT_{max} \{ \bar{\delta} \text{ en } q_j b \cdot p_j, q \in R ( p )$   
 où  $b \cdot p_j$  est une variable binaire qui est égale à 1 ssi  $X \cdot p_j > 0$ . Ensuite, nous devons fabriquer l'exigence nette  $X \cdot p_j$ , qui nécessite  $LT$  *t homme*

$p_j X \cdot p_j$ . Par conséquent,  $\bar{\delta}$  est donné par des contraintes ( 27 ).

$$\bar{\delta}_{out} p_j = t_{homme} p_j + \max \{ \bar{\delta} \text{ en } q_j b \cdot p_j, q \in R ( p ) \} \quad j \in M, p \in P. \quad (27)$$

Enfin, nous ajoutons les contraintes sur les domaines de variables.

$$O_{ui} s_{i,j}, O_{ui} s_{up} s, O_{ui} p_{oc} p_s, O_{ui} t_{r}ans_{p_j}, U_{i}le \cdot p_j, b \cdot p_j, U_{NE} p_j \in \{ 0, 1 \} \text{ pour toutes les informations pertinentes } j, j', s, p \quad (28)$$

$$Q_{h}omme_{p_j}, Q_{p}roq_s j, Q_{t}rans_{p_j}, Q_{c}ust_j, H_{p_j}, Z_{p_j}, X \cdot p_j, Z \cdot p_j, \forall p_s, \bar{\delta} \text{ en } d_{e}hors_{p_j}, \bar{\delta} \text{ dan} p_j, \phi \text{ dan} p_j \in IR + \text{ pour toutes les personnes concernées } j, j', s, p \quad (29)$$

5. Expériences et perspectives

Nos expériences visent à comprendre l'impact des contraintes LT sur les décisions de conception SC et le coût total. Nous résolvons le modèle avec le logiciel d'optimisation commerciale Cplex. Afin de mener des expériences, nous utilisons l'étude de cas réaliste fournie dans Hammami et Frein ( 2013 ) tout en incluant certains ajustements. Cette étude de cas traite d'un problème de conception SC rencontré par un fabricant de faisceaux électriques (industrie automobile). Le produit final est le harnais de cockpit automobile composé de différents fils électriques, de composants électroniques et de composants en plastique. Au niveau agrégé, 11 produits achetés et 7 produits intermédiaires sont considérés. Ainsi, le nombre total de produits est de 19 (produit final inclus). Il existe quatre sites de fabrication potentiels: le site d'origine en Europe de l'Ouest et trois sites à bas prix, qui sont respectivement situés en Europe de l'Est, en Afrique du Nord et en Asie. Nous considérons également un site de distribution potentiel dans chacun de ces pays, ce qui donne un total de quatre installations de distribution potentielles. Le client est situé en Europe de l'Ouest. L'ensemble des fournisseurs potentiels peut être divisé en fournisseurs d'Europe occidentale, fournisseurs d'Afrique du Nord et fournisseurs asiatiques. Le nombre total de fournisseurs est

10. La demande totale sur l'horizon de planification est de 10 000 unités. Les différents coûts et paramètres sont donnés en annexe 1 .

5.1 Effet des contraintes LT sur les décisions SC

Pour différentes valeurs de durée de période  $L$  et la taille maximale de la commande  $ré$ , nous faisons varier les valeurs de  $QLT$ , et examinez le modèle solution optimale dans chaque cas. Afin d'obtenir des résultats comparables, les variations des valeurs de  $ré$  et  $L$  sont proportionnelles. Par exemple, si nous avons  $d = 1000$  pour  $L = 4$  alors nous devons avoir  $\bar{d} = 2000$  pour  $L = 8$ . Notez également que  $\bar{L}$  représente le fréquence de commande des clients comme on peut le voir sur la figure 2 . Nous rapportons, respectivement, dans les tableaux 2 - 5 la configuration SC optimale pour des valeurs croissantes de  $\bar{L}$  sous le suivant scénario:  $\bar{d} = 1, 000$  et  $L = 4$ ,  $\bar{d} = 1500$  et  $L = 6$ ,  $\bar{d} = 2000$  et  $L = 8$ , et  $\bar{d} = 3000$  et  $L = 12$ . L'unité de temps est 1 semaine.

L'analyse des tableaux 2 - 5 fournit des informations intéressantes.

Tableau 3. Solution pour  $d = 1500$  et  $L = 6$ .

	Homme. des sites	Distr. des sites	Fournisseurs
0,2	Afrique du Nord	Europe de l'ouest	S2, S5, S6, S7, S9, S10
0,6	Europe de l'Est	Europe de l'Est	S3, S5, S6, S7, S9, S10
1	Afrique du Nord, Asie	Afrique du Nord	S2, S4, S6, S7, S9, S10
1,4	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S5, S6, S7, S9, S10
1,8	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S5, S6, S7, S9, S10
2,2	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S5, S6, S7, S9, S10
2,6	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S5, S6, S7, S9, S10
3	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S5, S6, S7, S9, S10
3,4	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S5, S6, S7, S9, S10
3,8	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S5, S6, S7, S9, S10
4,2	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S5, S6, S7, S9, S10
4,6	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S5, S6, S7, S9, S10
5	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S5, S6, S7, S9, S10

Tableau 4. Solution pour  $d = 2000$  et  $L = 8$ .

	Homme. des sites	Distrib. des sites	Fournisseurs
0,2	Asie	Europe de l'ouest	S2, S5, S6, S7, S9, S10
0,6	Europe de l'Est	Europe de l'Est	S3, S5, S6, S7, S9, S10
1	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S4, S6, S7, S9, S10
1,4	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S5, S6, S7, S9, S10
1,8	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S5, S6, S7, S9, S10
2,2	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S5, S6, S7, S9, S10
2,6	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S5, S6, S7, S9, S10
3	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S5, S6, S7, S9, S10
3,4	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S5, S6, S7, S9, S10
3,8	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S5, S6, S7, S9, S10
4,2	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S5, S6, S7, S9, S10
4,6	Asie	Asie	S2, S5, S6, S7, S9, S10
5	Asie	Asie	S2, S5, S6, S7, S9, S10

Tableau 5. Solution pour  $d = 3\ 000$  et  $L = 12$ .

	Homme. des sites	Distrib. des sites	Fournisseurs
0,2	Eur. Ouest, Eur Est.	Europe de l'ouest	S3, S5, S6, S8, S10
0,6	Europe de l'Est	Europe de l'Est	S3, S5, S6, S8, S10
1	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S5, S6, S7, S10
1,4	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S5, S6, S7, S10
1,8	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S5, S6, S7, S10
2,2	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S5, S6, S7, S10
2,6	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S5, S6, S7, S10
3	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S5, S6, S7, S10
3,4	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S5, S6, S7, S10
3,8	Afrique du Nord	Afrique du Nord	S2, S5, S6, S7, S10
4,2	Asie	Asie	S3, S5, S6, S8, S10
4,6	Asie	Asie	S3, S5, S6, S8, S10
5	Asie	Asie	S3, S5, S6, S8, S10

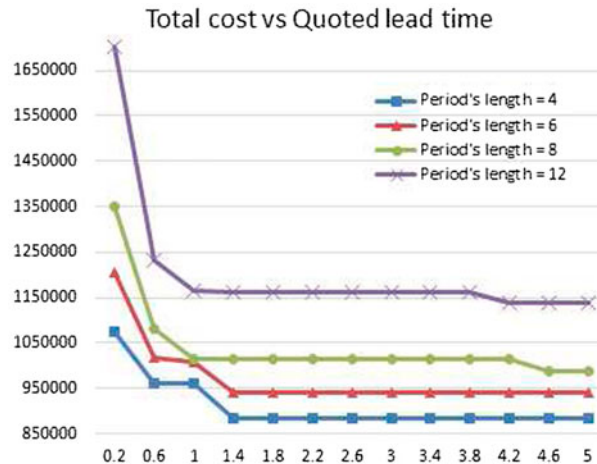


Figure 5. Coût total en fonction de QLT .

- Afin de montrer la pertinence d'inclure le LT dans les modèles de conception SC, nous avons d'abord résolu une version simplifiée de notre modèle dans laquelle nous avons supprimé les contraintes associées au LT et au réapprovisionnement des stocks (à savoir, nous n'avons conservé que les contraintes ( 2 ) - ( 12 ) qui traitent de la configuration classique du SC). Dans ce cas, la solution optimale obtenue a été d'ouvrir les usines de fabrication et de distribution asiatiques et de sélectionner les fournisseurs S3, S5, S6, S8 et S10 (la plupart d'entre eux sont des fournisseurs asiatiques comme on peut le vérifier dans le tableau A1 en annexe 1 ). La comparaison de cette solution aux solutions obtenues avec notre modèle de base (solutions fournies dans les tableaux 2 - 5 ) montre que les contraintes LT ont un impact profond sur la configuration SC. Sous contraintes LT, la sélection des sites de fabrication et de distribution asiatiques et des fournisseurs S3, S5, S6, S8 et S10 n'est optimale qu'en cas de  $L = 12$  et  $\geq 4.2$  (comme nous pouvons l'observer dans le tableau 5 ). Dans toutes les autres situations, différentes configurations SC sont choisies.
- Les décisions optimales de conception de SC (essentiellement, l'emplacement des installations et la sélection des fournisseurs) ne sont pas seulement sensibles à la QLT mais aussi à la fréquence des commandes clients. Par exemple, nous pouvons voir que pour le même  $me = 0.2$ , le modèle sélectionne différentes installations de fabrication pour  $L = 6$ ,  $L = 8$  et  $L = 12$ . Aussi, pour le même  $me = 4.6$ , le modèle sélectionne les mêmes installations mais des fournisseurs différents pour  $L = 6$  et  $L = 8$ .
- Dans de nombreuses situations, bien que la conception d'un SC dispersé avec certains sites à faible coût soit réalisable, le QLT conduit toujours à un SC plus local. Par exemple, dans le cas d'une table 2 avec  $L = 4$  et  $me = 1$ , le modèle sélectionne les installations de fabrication et de distribution d'Europe de l'Est au lieu de choisir d'autres alternatives réalisables telles que la fabrication et la distribution à partir de l'Afrique du Nord ou la fabrication en Asie et la distribution à partir de l'Europe. Dans ce cas, le coût de reconstitution des stocks est beaucoup moins important avec les sites d'Europe de l'Est, ce qui explique pourquoi le modèle prescrit cette décision.
- Pour toutes les valeurs de  $me$  allant de 0,2 à 5, il est possible de sélectionner le site de fabrication asiatique à bas prix et d'utiliser une installation de distribution appropriée afin de respecter les QLT. On voit par exemple que le modèle prescrit cette solution en cas de  $L = 8$  et  $me = 0,2$  (tableau 4 ). Cependant, le site de fabrication asiatique est rarement sélectionné malgré son coût le plus bas. Cela est dû à de nombreuses raisons telles que, fondamentalement, le coût élevé de réapprovisionnement des stocks occasionné par la sélection du site asiatique. En effet, lorsque le site asiatique est sélectionné, de nombreux articles sont fabriqués en stock afin de pouvoir répondre aux contraintes de réapprovisionnement des stocks. On peut noter que le modèle privilégie l'usine de fabrication asiatique lorsque la fréquence des commandes est suffisamment faible (ie  $L$  grand, Tables 4 et 5 ), car cela donne plus de temps pour le réapprovisionnement des stocks et, par conséquent, permet de réduire le coût des stocks.
- On peut également observer que lorsque QLT se resserre, l'installation de distribution choisie se rapproche de la zone de demande. Ce résultat attendu a été observé dans toutes nos expériences.

### 5.2 Effet des contraintes LT sur le coût total

Nous représentons dans la figure 5 la variation du coût total en fonction de  $me$  est ajusté en fonction de la valeur de  $L$  comme expliqué précédemment).

pour différentes valeurs de  $L$  (rappelons que la valeur de  $me$

est ajusté en fonction de la valeur de  $L$  comme expliqué précédemment).  
Figure d'observation 5 , on en déduit:

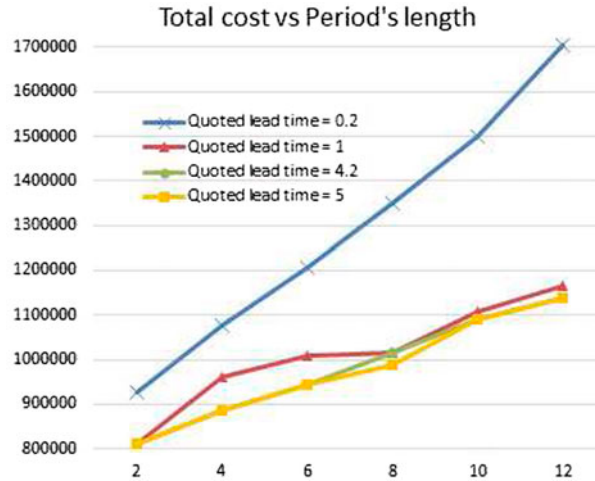


Figure 6. Coût total en fonction de  $L$ .

- Quand le  $QLT$  est très serré (c.-à-d. petite), une augmentation peut conduire à une diminution significative du coût total. Ce peut être observé, par exemple, lorsque  $QLT$  passe de 0,2 à 0,6. Ainsi, dans ce cas, les entreprises peuvent obtenir une réduction des coûts en citant un  $LT$  légèrement plus long, qui est moins susceptible d'avoir un impact sur le comportement des clients et peut générer un profit plus élevé.
- Dans certains cas, il n'est pas nécessaire d'augmenter  $QLT$  au-delà d'un certain niveau car cela ne génère aucune économie de coûts. Par exemple, en cas de  $L = 4$  et  $L = 6$ , le coût total ne diminue pas si  $QLT$  est augmenté au-dessus de 1,4. Ce résultat est contraire à ce qui a été trouvé par Hammami et Frein (2013). En effet, les auteurs ont montré que le coût total continue toujours de diminuer pour des valeurs croissantes de  $QLT$ . Cependant, dans notre modèle, les contraintes réalistes liées à la reconstitution des stocks peuvent anéantir l'impact de  $QLT$  en diminuant le coût total.
- Le coût total SC est sensible non seulement à la  $QLT$  mais aussi pour commander la fréquence. Il est possible d'obtenir un coût moindre avec une durée  $QLT$  en choisissant une fréquence de commande appropriée. Par exemple, dans nos expériences, il est moins coûteux de citer  $QLT = 0,6$  avec  $L = 4$  que de citer  $QLT = 1$  avec  $L = 6$  ou  $QLT = 5$  avec  $L = 8$ . L'entreprise devrait trouver la combinaison optimale de  $QLT$  et la fréquence de commande qui donne le coût le plus bas. Notre modèle peut aider à identifier le compromis optimal.

La prise en compte des conditions de réapprovisionnement des stocks dans notre modèle soulève la pertinence d'étudier l'impact de la fréquence des commandes clients. Rappelons que  $L$  représente la durée de la période entre deux commandes consécutives, ce qui implique que  $f = 1/L$

$f$  est la fréquence des commandes clients. Pour différentes valeurs de  $L$ , nous rapportons dans la figure 6 la variation du coût optimal en tant que fonction de  $L$ .

L'analyse de la figure 6 conduit aux informations suivantes:

- Contrairement à nos attentes, les expériences ont montré que, pour la même  $QLT$ , une diminution de la fréquence des commandes (c'est-à-dire une  $L$ ) conduit à une augmentation des coûts. Ce résultat surprenant indique qu'il peut être préférable pour l'entreprise que le client passe des commandes plus fréquentes pour des quantités plus petites que des commandes moins fréquentes pour des quantités plus importantes.
- Lorsque la fréquence des commandes clients est très élevée (ici,  $L = 2$ ), le  $QLT$  est moins susceptible d'avoir un impact sur le coût total SC. En effet, sauf le cas de  $QLT = 0,2$ , dont le coût est relativement élevé en raison de la nécessité de sélectionner le site ouest-européen, on constate qu'il n'y a pas de différence de coût pour les autres valeurs de  $QLT$ . En effet, le modèle ne peut pas capitaliser totalement sur plus  $QLT$ , car il est contraint de reconstituer les différents stocks dans un court laps de temps. Cela explique pourquoi nous avons obtenu le même coût total en cas de  $QLT = 1, 4.2$  et  $5$ .
- Pour les commandes basse fréquence (ici,  $L = 12$ ), la différence de coût total entre les cas de  $QLT = 1, 4.2$ , et  $5$  n'est pas aussi élevée que prévu, ce qui implique que l'impact de  $QLT$  n'est pas significatif. En effet, lorsque le délai entre commandes consécutives est relativement long, le SC nécessiterait moins de stock intermédiaire quelle que soit la valeur de  $QLT$ .

## 6. Conclusion

Nous avons développé un modèle de conception SC multi-échelons qui garantit le respect du  $QLT$  associé à chaque commande client tout en modélisant explicitement la reconstitution des différents stocks de matières premières, produits intermédiaires et finaux entre



commandes consécutives dans les différentes étapes du CS. Les principales décisions du modèle sont: l'emplacement des installations de fabrication et de distribution, la sélection des fournisseurs et le positionnement des stocks des produits achetés, intermédiaires et finaux.

Nous avons utilisé le modèle pour étudier l'impact du QLT et de la fréquence des commandes clients sur les décisions et les coûts de conception SC. Sur la base d'une étude de cas réaliste, nous avons montré expérimentalement que les LT influent sur la configuration optimale du SC, en particulier en ce qui concerne les décisions stratégiques de l'emplacement des installations et de la sélection des fournisseurs. Nous avons discuté de la façon dont les LT peuvent poser de nouveaux compromis entre des installations éloignées et peu coûteuses et des installations locales coûteuses. Par exemple, nous avons montré que dans de nombreuses situations, les contraintes LT ont conduit à rapprocher les sites de fabrication et de distribution de la zone de demande et à sélectionner des fournisseurs locaux malgré leur coût plus élevé. En effet, le surcoût induit par la sélection d'une telle configuration SC locale est compensé par le gain obtenu grâce à la réduction du coût des stocks, car beaucoup moins d'inventaire est nécessaire pour satisfaire le QLT et reconstituer les différents stocks lorsque le SC n'est pas géographiquement dispersé. Nous avons également expliqué comment nos résultats peuvent être utilisés par les décideurs pour proposer le meilleur LT à leurs clients et négocier la fréquence des commandes.

Notre travail peut être étendu de plusieurs façons. Par exemple, il serait intéressant de considérer d'autres politiques d'inventaire telles que la politique des points de réapprovisionnement et de comparer le comportement du modèle avec différentes stratégies d'inventaire. Les SC mondiaux sont généralement soumis à différents types d'incertitudes, notamment en termes de demande et de LT. La demande et / ou les fluctuations de LT peuvent entraîner des encombrements et avoir un impact sur la planification de la production. Pour cette raison, nous avons calculé les LT sur la base de la taille maximale possible des commandes clients, ce qui peut être considéré comme un moyen d'atténuer ce type de risque dans le SC. Néanmoins, il est important d'étudier la variabilité de la demande et du LT et de comprendre leurs impacts sur les décisions du modèle.

#### Déclaration de divulgation

Aucun conflit d'intérêt potentiel n'a été signalé par les auteurs.

#### Références

- Arntzen, B., G. Brown, T. Harrison et L. Trafton. 1995. «Global SupplyChainManagement chez Digital Equipment Corporation». *Interfaces* 21 (1): 69–93.
- Bandaly, D., A. Satir et L. Shanker. 2016. «Impact of Lead Time Variability in Supply Chain Risk Management». *Journal international d'économie de la production* 180: 88-100.
- Barnes-Schuster, D., Y. Bassok et R. Anupindi. 2006. «Optimiser le délai de livraison / le placement des stocks en deux étapes Système de production / distribution. " *Revue européenne de recherche opérationnelle* 174: 1664-1684.
- Ben Ammar, O., A. Dolgui, F. Hnaïen et MA Louly. 2013. «Planification de l'approvisionnement et contrôle des stocks en cas d'incertitude de délai: A La revue." 7e conférence de l'IFAC sur la modélisation, la gestion et le contrôle de la fabrication, Saint-Pétersbourg, Russie, 19-21 juin 2013. Daskin, MS, C. Coullard et ZJM Shen. 2002. «Un modèle de localisation d'inventaire: formulation, algorithme de solution et calcul Résultats." *Annales de la recherche opérationnelle* 110: 83-106.
- Dolgui, A., EtM.A. Ould Louly. 2002. «AModel for Supply Planning under LeadTime Uncertainty». *Journal international de production Économie* 78: 145-152.
- Eskigun, E., R. Uzsoy, PV Preckel, G. Beaujon, S. Krishnan et JD Tew. 2005. «Conception de réseau de chaîne d'approvisionnement sortante avec mode Sélection, délais de livraison et centres de distribution de véhicules équipés. » *Revue européenne de recherche opérationnelle* 165: 182-206. Funaki, K., 2012. «Placement de sécurité stratégique dans la conception de la chaîne d'approvisionnement avec une demande basée sur la date d'échéance.» *Journal international de production Économie* 135 (1): 4-13.
- Graves, SC et SP Willems. 2003. «Conception de la chaîne d'approvisionnement: placement des stocks de sécurité et configuration de la chaîne d'approvisionnement». *Manuels en OR & MS* 11: 95-132.
- Graves, SC et SP Willems. 2008. «Placement stratégique des stocks dans les chaînes d'approvisionnement: demande non stationnaire». *Fabrication et Gestion des opérations de service* 10 (2): 278-287.
- Hammami, R. et Y. Frein. 2012. «Un modèle international de sélection des fournisseurs avec des décisions de gestion des stocks et des transports». *Journal des services flexibles et de la fabrication* 24 (1): 4-27.
- Hammami, R. et Y. Frein. 2013. «Un modèle d'optimisation pour la conception de chaînes d'approvisionnement multi-échelons mondiales sous délai Contraintes." *Journal international de recherche en production* 51 (9): 2760-2775.
- Hammami, R. et Y. Frein. 2014. «Modèle de placement de stocks multi-échelons capacitif sous contraintes de délai». *Production et gestion des opérations* 23 (3): 446–462.
- Heydari, J. 2014. «LeadTimeVariationControl usingReliable Shipment Equipment: An Incentive Scheme for SupplyChainCoordination». *Recherche sur les transports, partie E: revue de la logistique et des transports* 63: 44-58.
- Hnaïen, F., X. Delorme et A. Dolgui. 2010. «Optimisation multi-objectif pour le contrôle des stocks dans les systèmes d'assemblage à deux niveaux sous Incertitude des délais. » *Ordinateurs et recherche opérationnelle* 37 (11): 1835–1843. Hsu, S.-L., et CC Lee. 2009. «Décisions de réapprovisionnement et de délai de livraison dans les chaînes de fabricants-détaillants». *Recherche sur les transports Partie E* 45: 398–408.
- Humair, S., JD Ruark, B. Tomlin et SP Willems. 2013. «Intégration des délais stochastiques dans le modèle de service garanti Optimisation des stocks de sécurité. " *Interfaces* 43 (5): 421-434.

- Jha, JK et K. Shanker. 2009. «Un modèle de production-inventaire à fournisseur unique et à acheteur unique avec un délai et un service contrôlables  
 Contrainte de niveau pour les éléments en décomposition. " *Journal international de recherche en production* 47 (24): 6875–6898. Kaminsky, P. et O. Kaya. 2008. «Positionnement des stocks, planification et devis dans les chaînes d'approvisionnement». *Journal international d'économie de la production* 114: 276-293.
- Kapuscinski, R. et S. Tayur. 2007. «Réglage fiable de la date d'échéance dans un système MTO capacitif avec deux classes de clients». *Les opérations Recherche* 55 (1): 56–74.
- Meixell, MJ et VB Gargeya. 2005. «Global Supply Chain Design: ALiterature Review and Critique». *Volet Recherche sur les transports E* 41: 531-550.
- Ould Louly, MA et A. Dolgui. 2013. «Paramètres MRP optimaux pour un inventaire d'un seul article avec un délai de réapprovisionnement aléatoire». *POQ Policy and Service Level Constraint, International Journal of Production Economics* 143: 35–40. Pekgün, P., PM Griffin et P. Keskinocak. 2008. «Coordination du marketing et de la production pour les décisions en matière de prix et de délais.» *IIE Transactions* 40 (1): 12-30.
- Simchi-Levi, D. et Y. Zhao. 2005. «Positionnement du stock de sécurité dans les chaînes d'approvisionnement avec des délais stochastiques». *Fabrication et service Gestion des opérations* 7 (4): 295-318.
- Sourirajan, K., L. Ozsen et R. Uzsoy. 2007. «Un seul produit NetworkDesignModel avec des considérations de délai et de stock de sécurité.» *Transactions IIE* 39 (5): 411-424.
- Spitter, JM, Hurkens, CAJ, de Kok, AG, Lenstra, JK, Negenman, EG 2005. «Modèles de programmation linéaire avec avance planifiée  
 temps pour la planification des opérations de la chaîne d'approvisionnement. " *Revue européenne de recherche opérationnelle* 163: 706–720. Vous, F. et EY Grossmann. 2008. «Conception de chaînes d'approvisionnement réactives en cas d'incertitude de la demande». *Ordinateurs et produits chimiques Ingénierie* 32: 3090-3111.

## Annexe 1.

Tableau A1. Fournisseurs potentiels.

	Fils	Connecteurs	Des boites	Composants en plastique / caoutchouc	Les adhésifs
S1 (WE)	X				
S2 (NA)	X				
S3 (AS)	X				
S4 (WE)		X			
S5 (AS)		X			
S6 (WE)			X		
S7 (NA)				X	
S8 (AS)				X	
S9 (WE)					X
S10 (AS)					X

S: fournisseur, WE: Europe de l'Ouest, NA: Afrique du Nord, AS: Asie.

Tableau A2. Ouverture / exploitation du site coût fixe.

	Europe de l'ouest	Europe de l'Est	Afrique du Nord	Asie
Fabrication	150 000	100 000	75 000	50 000
Distribution	60 000	40 000	30 000	20 000

Tableau A3. Coût fixe par le fournisseur.

Fournisseurs d'Europe de l'Ouest	Fournisseurs nord-africains	Fournisseurs asiatiques
1000	2500	5000



Tableau A9. Frais de transport / livraison depuis les autres sites.

De à	Europe de l'ouest	Europe de l'Est	Afrique du Nord	Asie	Client
Europe de l'Est	γ	0	2.4 γ	7.2 γ	0,75
Afrique du Nord	2 γ	2.4 γ	0	7.8 γ	1,5
Asie	6 γ	7.2 γ	7.8 γ	0	4.5

" γ': Coût de transport du site d'Europe de l'Ouest au site d'Europe de l'Est.

Tableau A10. Délai de fabrication (semaines).

	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6	SP7	FP
Europe de l'ouest	0,000046	0,000056	0,000044	0,00004	0,0028	0,0036	0,006	0,008
Autres sites	0,0000598	0,0000728	0,0000572	0,000052	0,00364	0,00468	0,0078	0,0104

Tableau A11. Temps d'achat (semaines).

De à	France	Europe de l'Est	Afrique du Nord	Asie
Fournisseurs d'Europe de l'Ouest	0,2	0,5	1	4
Fournisseurs nord-africains	1	1,5	0,2	5
Fournisseurs asiatiques	4	4	5	0,2

Tableau A12. Délai de transport / livraison (semaines).

De à	Europe de l'ouest	Europe de l'Est	Afrique du Nord	Asie	Client
Europe de l'ouest	-	0,5	1	4	0,2
Europe de l'Est	0,5	-	1,5	4	0,5
Afrique du Nord	1	1,5	-	5	1
Asie	4	4	5	-	4

Le droit d'auteur de International Journal of Production Research est la propriété de Taylor & Francis Ltd et son contenu ne peut être copié ou envoyé par courrier électronique à plusieurs sites ou publié sur une liste de diffusion sans l'autorisation écrite expresse du détenteur des droits d'auteur. Cependant, les utilisateurs peuvent imprimer, télécharger ou envoyer par courrier électronique des articles pour un usage individuel.