

La gestion des ressources partagées dans les chaînes logistique : dimensionnement d'un parc RTI.

C. Villamaux¹, G. Iassinovskaia¹, F. Pirard², F. Riane^{1;3;4}

¹ Catholic University of Mons, Louvain School of Management - Belgium ({clarisse.villamaux, galina.iassinovskaia, fouad.riane}@fucam.ac.be)

² ETIS CNRS/ENSEA/University of Cergy-Pontoise – France (florence.pirard@u-cergy.fr)

³ CIGMA Centre d'Excellence en Ingénierie et Management Industriel, Faculté des Sciences et Technique de Settat - Morocco

⁴ LATORIA Laboratoire de Recherche en Informatique Appliquée –Mundiapolis Université, Casablanca – Morocco (f.riane@mundiapolis.ma)

Axes du colloque : Organisation et Gestion Industrielle et Logistique (OGIL)

Résumé :

De plus en plus d'entreprises utilisent des ressources réutilisables pour le transport et la manutention de marchandises (RTI : Returnable Transport Item) comme les palettes, les containers pour des raisons économiques et environnementales. Certaines ressources circulent au sein d'une chaîne logistique en boucle fermée. La gestion des RTI influence la performance sur l'ensemble de la chaîne. Dans cet article, nous nous intéresserons particulièrement au problème de dimensionnement du parc de RTI. Pour résoudre ce problème, nous proposons un modèle mathématique et nous testons les résultats obtenus avec un modèle de simulation. Ces modèles seront appliqués à un cas réel.

Mots-clés :

RESSOURCES MOBILES, DIMENSIONNEMENT DU PARC, OPTIMISATION, SIMULATION.

Abstract:

More and more enterprises use returnable transport and handling items (RTI) such as pallets, crates and roll containers, for cost and environmental reasons. These items flow in closed-loop within a supply chain. The management of the RTI influences the performance of all the chain. In this paper, we take an interest in the RTI pool sizing problem. To solve this problem, we propose a mathematical model and its results are tested with a simulation model. We apply these models to a test problem based on a real life application.

Key words:

MOBILES RESOURCES, FLEET SIZING, OPTIMIZATION, SIMULATION.

1 Introduction

Aujourd'hui la gestion des ressources mobiles réutilisables est loin d'être maîtrisée. Chaque jour, des millions de ces ressources circulent dans le monde avec un manque de visibilité et de contrôle sur ces mouvements. Par exemple, la société CHEP (<http://www.chep.com/>), leader mondial de solutions de gestion de palettes et de containers, gère 300 millions de mouvements de ces ressources en Europe par an. L'entreprise de distribution belge Colruyt (<http://www.colruytgroup.be/>) utilise plus de 150000 bacs en plastiques réutilisables rien que pour transporter des produits alimentaires plutôt que d'employer un emballage à usage unique.

Dans la littérature, pour désigner les ressources mobiles réutilisables, les termes d'actifs mobiles, de moyens ou de supports de transport réutilisables ou retournables ou encore d'emballages réutilisables sont utilisés. Dans cet article, ces différentes expressions sont considérées comme synonymes et l'acronyme anglais RTI (Returnable Transport Items) est utilisé pour désigner ces ressources mobiles. Les RTI ont été définis comme des moyens d'assembler des marchandises pour le transport, le stockage, la manutention et la protection du produit dans la chaîne logistique et qui sont renvoyés pour une nouvelle utilisation, en incluant par exemple les palettes aussi bien que toutes les formes de caisses réutilisables, plateaux, boîtes, rolls, chariots, containers. Cette définition a été proposée par IC-RTI (International Council for Reusable Transport Items), commission regroupant producteurs et détaillants soutenu par ECR Europe et par EAN International.

Les enjeux soulevés par la gestion des RTI sont nombreux [7]. Ces enjeux concernent tout d'abord le type de gestion du parc de RTI (qui est le propriétaire, qui et comment sont pris en charge les différents coûts, ...), les mécanismes de coopération à mettre en place, l'organisation des tournées de distribution et de collecte, la gestion et la localisation des stocks, Une entreprise peut avoir à gérer des parcs de RTI de différents types, un des enjeux auquel elle se trouve alors confronté consiste au dimensionnement de ses parcs. La question soulevée dans cet article consiste à optimiser ce dimensionnement au sein d'une chaîne logistique, c'est à dire à déterminer le nombre de RTI de chaque type qui circule dans la chaîne. En effet, un parc mal dimensionné a un coût : trop de RTI engendre un surcoût de stockage inutile ; pas assez de RTI engendre des retards de livraison et une baisse de la satisfaction client.

Les RTI peuvent être utilisés par chacun des acteurs de la chaîne afin de transporter ou manutentionner leurs produits. Les RTI étant par définition réutilisables, ils circulent donc en boucle au sein de la chaîne logistique : ils peuvent être collectés et renvoyés vides à leur expéditeur ou alors être réutilisés par le destinataire pour qu'il puisse à son tour envoyer ses produits. Un même RTI peut donc être utilisé et partagé par deux ou plusieurs partenaires. En réduisant ces aléas, donc en dimensionnant de manière plus judicieuse leurs parcs de RTI, les entreprises pourraient réaliser des économies et préserver l'environnement. Hors, pour certaines entreprises, la variabilité de la demande peut-être importante, la question qui se pose alors est quel est le meilleur compromis entre les coûts des RTI et la satisfaction clients ?

L'objectif de cette étude est de répondre à cette question par le développement d'une approche de résolution basée sur la programmation mathématique et sur la simulation. L'article s'organise de la manière suivante : dans un premier temps, nous présentons un état de l'art concernant la gestion des RTI et le dimensionnement des parcs. Puis nous décrivons le problème sur lequel notre modèle s'est basé. Ensuite, le modèle mathématique et le modèle de simulation développés sont présentés. Puis nous analysons les résultats obtenus avant de conclure sur les perspectives à venir.

2 Revue de la littérature

Les RTI circulent en boucle au sein de la chaîne logistique, leur gestion fait donc partie de la logistique directe (pour la distribution) mais aussi de la logistique des retours (en anglais reverse logistics). Ces dernières années, la logistique des retours a connu une attention grandissante. [6] ont réalisé une revue de la littérature reprenant les différents modèles développés notamment sur l'organisation des tournées et sur la gestion des stocks. D'autre part [2] ont référencé plus d'une soixantaine d'études de cas sur la logistique des retours dont une dizaine concernant les RTI. Par ailleurs [9] ont réalisé une étude des différents systèmes existants pour la logistique des retours et [8] ont repris cette classification et l'ont illustrée avec différentes études de cas. Dans un précédent article, [7] nous avons analysé les différents flux des RTI et lister les différents enjeux liés à leur gestion. [3] ont étudié la gestion des retours des RTI : ils ont développé un modèle réalisant un planning de production en prenant comme contraintes supplémentaires la disponibilité des RTI. Ils déterminent également le nombre de RTI devant être retourné au producteur afin de respecter le planning établi. Ils ont appliqué leur modèle à une entreprise mexicaine utilisant des bouteilles réutilisables. [5] ont également étudié l'utilisation et la gestion des containers réutilisables de la poste canadienne qui étaient souvent en rupture de stock. Enfin [11], [12] ont développé un modèle mathématique qui intègre les décisions au niveau du planning de production et distribution ainsi qu'au niveau de l'organisation des tournées dans un environnement de ressources partagées entre les différents acteurs d'une chaîne logistique ; puis ils comparent différentes heuristiques utilisées pour résoudre leur modèle global. Les RTI étant manipulés et utilisés par plusieurs partenaires d'une chaîne logistique sont considérés comme des ressources partagées.

[4] ont développé un modèle permettant de dimensionner le parc de container et d'organiser le repositionnement des containers vides dans le domaine du transport maritime. Mais leur modèle ne peut être appliqué que dans un domaine où les tournées sont fixes et planifiées. Plusieurs travaux se sont intéressés à la question du dimensionnement du parc de RTI parallèlement à la définition du réseau et à la question de l'organisation des tournées pour le retour des RTI. [9] présentent un modèle quantitatif afin de répondre aux questions suivantes : Combien de RTI sont nécessaires dans le système ? Combien de dépôts doit il y avoir et où doivent-ils être situés ? Comment la distribution, la collecte et les déplacements des RTI doivent-ils être organisés ? Quel est le prix approprié pour le service, la collecte et la distribution ? [10] ont développé un modèle mathématique basé sur un modèle EOQ

(Economic Order Quantity) en vue de définir le réseau des dépôts et d'obtenir une estimation du nombre de RTI nécessaires avec pour objectif d'optimiser les coûts chez un producteur utilisant des RTI repliables. Ensuite, ils ont défini une procédure basée sur une heuristique afin de trouver une solution à leur problème puis ils étudient l'impact de la distance entre clients et dépôts et l'impact du coût de stockage des RTI.

Ces travaux sont proches de nos recherches, cependant les études ne concernent que la logistique des retours. Dans notre étude, nous nous intéressons à l'ensemble de la chaîne logistique et donc aussi bien aux flux de distribution qu'aux flux de retour; de plus la variabilité de la demande est importante, c'est pourquoi nous la prendrons en compte.

3 Description du problème

La chaîne logistique étudiée est une chaîne à deux étages composée d'un producteur et de plusieurs détaillants situés à des endroits géographiques différents. La Figure 1 représente la structure de la chaîne logistique étudiée ainsi que les flux des RTI y circulant. Cette cartographie a été réalisée en utilisant le modèle conceptuel que nous avons développé auparavant [7].

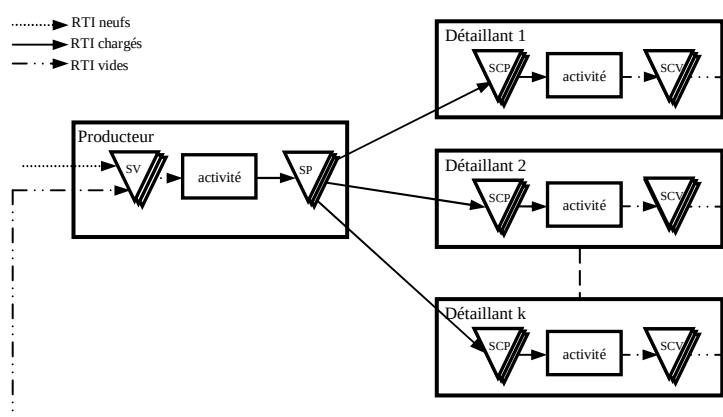


Figure 1. Flux des RTI au sein de la chaîne logistique.

Le producteur, qui est également le propriétaire des RTI, gère leur achat, distribution, collecte et retour, Il envoie des RTI chargés à ses détaillants et ceux-ci lui retournent les RTI vides. Les détaillants envoient leur commande au producteur de manière à être livrés en période $j+1$. Afin de pouvoir répondre à ces demandes, le producteur doit avoir en stock suffisamment de RTI déjà chargés (stock SP) ou des RTI vides prêts à être conditionnés (stock SV). Une fois la quantité souhaitée atteinte, il envoie la commande à son client. Les RTI sont alors stockés (SCP) en attente d'être consommés. Une fois vides, les RTI sont stockés (SCV) puis ils sont retournés vides au producteur. Les cases « activités » représentent les opérations de conditionnement ou de consommation des RTI. Les stocks sont caractérisés par un niveau maximum : leur capacité.

On considère le réseau logistique inspiré du cas d'une entreprise de conditionnement de bouteilles de gaz. Les hypothèses suivantes ont été considérées :

- La demande de chaque détaillant en période t suit la loi normale $N(\mu, \sigma)$ avec μ et σ connus.
- La capacité de production est supposée infinie, cette hypothèse s'explique par le fait que ce sont les flux de RTI qui sont étudiés et non les flux de produits. Par conséquent, si le producteur ne sait pas répondre à une demande c'est qu'il lui manque des RTI.
- L'achat des RTI neufs se fait par le producteur avant la première période.
- Les temps de transport pour la distribution ou pour le retour des RTI est égal à une période. Les temps de chargement et de déchargement ainsi que le temps de conditionnement sont inclus dans le temps de transport.
- La capacité de transport est suffisante afin de livrer ou retourner l'ensemble des RTI vides ou chargés en attente.
- Le délai de consommation (activité) d'un RTI dépend de son type et du détaillant l'ayant reçu. Après ce délai, les RTI vidés sont alors stockés (SCV) en attendant d'être renvoyés au producteur.

La période de temps est égale à un jour. Cette granularité a été choisie car cette durée semble correspondre à l'échelle de temps utilisée dans des chaînes logistiques.

4 Modèle mathématique

Afin d'optimiser le dimensionnement des parcs de RTI circulant en boucles fermées au sein d'une chaîne logistique, nous devons donc trouver le meilleur compromis entre la satisfaction des clients et les différents coûts de gestion (entre autre les coûts de stockage) de ses RTI. Pour trouver ce compromis, un modèle mathématique a été développé. Ce modèle cherche à minimiser la somme des coûts liés à la gestion des RTI sous contrainte de satisfaire la demande des détaillants et de respecter les capacités de stockage.

4.1 Description du modèle

4.1.1 Index

Dans le modèle mathématique, les ensembles suivants sont utilisés :

Détaillant : $K = \{1 \dots k\}$

Type de RTI : $I = \{1 \dots i\}$

Période de temps : $T = \{0 \dots t\}$

4.1.2 Données

Pour formuler le modèle mathématique, les données suivantes sont nécessaires :

D_{ikt} : Nombre de RTI chargé de type i demandé par le détaillant k à la période t .

Δ_{ik} : Délai de consommation d'une unité de RTI de type i par le détaillant k .

$CapSV_i$: Capacité maximale du stock de RTI vide de type i chez le producteur.

CapSPi : Capacité maximale du stock de RTI chargé de type i chez le producteur.

CapSCVi_k : Capacité maximale du stock de RTI vide de type i chez le détaillant k.

CapSCPik : Capacité maximale du stock de RTI chargé de type i chez le détaillant k.

CFi : Coût unitaire associé au remplissage d'un RTI de type i par le producteur.

CTik : Coût unitaire du transport d'un RTI de type i du producteur vers le détaillant k.

CRik : Coût unitaire du transport (retour) d'un RTI de type i du détaillant k vers le producteur.

CSVi : Coût unitaire de stockage d'un RTI vide de type i chez le producteur.

CSPi : Coût unitaire de stockage d'un RTI plein de type i chez le producteur.

CSCVi_k : Coût unitaire de stockage d'un RTI vide de type i chez le détaillant k.

CSCPik : Coût unitaire de stockage d'un RTI plein de type i chez le détaillant k.

CAi : Coût unitaire d'achat d'un nouveau RTI de type i.

4.1.3 Variables de décision

Les variables de décision suivantes sont utilisées dans le modèle mathématique :

SVit : Nombre de RTI vides en stock chez le producteur à la période t.

SPit : Nombre de RTI chargés en stock chez le producteur à la période t.

SCVit : Nombre de RTI vides en stock chez le détaillant k à la période t.

SCPit : Nombre de RTI chargés en stock chez le détaillant k à la période t.

Xit : Nombre de RTI de type i chargés par le producteur à la période t.

Yikt : Nombre de RTI de type i livrés par le producteur au détaillant k à la période t.

Rikt : Nombre de RTI de type i consommés par le détaillant k à la période t.

Φikt : Nombre de RTI vides de type i retournés par le détaillant k au producteur à la période t.

Ai : Nombre de RTI neufs de type i livrés au producteur au début de la première période.

4.1.4 Modèle

Le modèle mathématique est le suivant :

Minimiser la somme des coûts :

$$f = \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} CF_i X_{it} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} CT_{ik} Y_{ikt} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} CR_{ik} \Phi_{ikt} + \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} CSP_i SP_{it} + \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} CSV_i SV_{it} \\ + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} CSCP_{ik} SCP_{ikt} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} CSCV_{ik} SCV_{ikt} + \sum_{i \in I} CA_i A_i \quad (1)$$

Sous les contraintes suivantes :

- Conservation des flux

$$SCP_{ikt-1} + Y_{ikt} = D_{ikt} + SCP_{ikt} \quad \forall i \in I, \forall k \in K, \forall t > 0 \quad (2)$$

$$SCV_{ikt-1} + R_{ikt} = \Phi_{ikt} + SCV_{ikt} \quad \forall i \in I, \forall k \in K, \forall t > 0 \quad (3)$$

$$SP_{it-1} + X_{it} = \sum_{k \in K} Y_{ikt} + SP_{it} \quad \forall i \in I, \forall t > 0 \quad (4)$$

$$SV_{it-1} + \sum_{k \in K} \Phi_{ikt} = X_{it} + SV_{it} \quad \forall i \in I, \forall t > 0 \quad (5)$$

$$SV_{i0} = A_i \quad \forall i \in I \quad (6)$$

- Contraintes sur le transport

$$Y_{ikt} \leq SCP_{ikt} \quad \forall i \in I, \forall k \in K, \forall t > 0 \quad (7)$$

- Consommation des RTI

$$R_{ikt} = D_{ik(t-\Delta_{ik})} \quad \forall i \in I, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (8)$$

$$X_{it} \leq SV_{it-1} \quad \forall i \in I, \forall t > 0 \quad (9)$$

- Respect des capacités de stockage

$$SV_{it} \leq CapSV_i \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (10)$$

$$SP_{it} \leq CapSP_i \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (11)$$

$$SCV_{ikt} \leq CapSCV_i \quad \forall i \in I, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (12)$$

$$SCP_{it} \leq CapSCP_i \quad \forall i \in I, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (13)$$

L'objectif (1) du modèle est de minimiser le coût total qui englobe les coûts de transport, les coûts de stockage, les coûts de production et les coûts d'achat de RTI neuf. Les contraintes (2), (3), (4) et (5) décrivent la conservation des flux des RTI vides ou pleins chez le producteur et chez les détaillants. La contrainte (6) permet d'initialiser le stock de RTI vides chez le producteur. La contrainte (7) impose que les RTI pleins livrés à un détaillant ne peuvent pas être directement utilisés et consommés et sont alors stockés pour une période au minimum. La contrainte (8) définit la consommation des RTI pleins par les détaillants et la contrainte (9) impose que la quantité de RTI remplit par le producteur durant une période t ne peut être supérieure à la quantité de RTI vides qu'il possède en stock. Enfin, les contraintes (10), (11), (12), et (13) définissent les contraintes des capacités de chaque stock que ce soit chez le producteur comme chez les détaillants.

4.2 Résultats

Pour résoudre le programme mathématique présenté ci-dessus, le solveur Cplex a été utilisé. Pour le problème traité, nous n'avons considéré qu'un seul type de RTI circulant en boucle au sein de la chaîne logistique composée d'un producteur et de deux détaillants. Le Tableau 1 reprend les données du problème. A l'état initial, afin de trouver une solution, la quantité de RTI demandée par chaque détaillant en première période doit déjà se trouver dans ses stocks (SCP). Cet état initial est une conséquence de la contrainte (7) qui impose que les RTI consommés par un détaillant en période t soient présents dans ses stocks au début de cette même période. En appliquant les hypothèses présentées en partie 3 et en fixant l'écart-type σ

= 0, le modèle mathématique a calculé pour 30 périodes un nombre de RTI nécessaires s'élevant à 240 unités et un coût total de 45208€.

		Producteur	Détaillant1	Détaillant2
Moyenne de la demande	μ		40	30
Délai de consommation (exprimé en périodes)	Δ		1	2
Coût d'achat d'un RTI neuf	CA	120		
Coût unitaire de remplissage d'un RTI	CF	0,3		
Coût de stockage d'un RTI chargé chez le producteur	CSP	0,08		
Coût de stockage d'un RTI vide chez le producteur	CSV	0,03		
Coût de transport unitaire d'un RTI du producteur vers le détaillant	CT		4	4
Coût de transport unitaire d'un RTI du détaillant vers le producteur	CR		4	4
Coût de stockage d'un RTI chargé chez le détaillant	CSCP		0,08	0,08
Coût de stockage d'un RTI vide chez le détaillant	CSCV		0,03	0,03

Tableau 1. Données du problème.

Afin de mieux étudier la répartition des coûts, nous avons modifié la fonction objectif de manière à ce que dans un premier temps ne rentrent en compte que les coûts afférant au producteur (achat, coût de production ou conditionnement, coût de stockage) et dans un second temps ceux liés aux détaillants (coûts de stockage, coût de retour).

Concernant le producteur, la fonction objectif devient alors:

Minimiser la somme des coûts :

$$f' = \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} CF_i X_{it} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} CT_{ik} Y_{ikt} + \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} CSP_i SP_{it} + \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} CSV_i SV_{it} + \sum_{i \in I} CA_i A_i \quad (14)$$

Pour les détaillants, la fonction objectif est la suivante :

Minimiser la somme des coûts :

$$f'' = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} CR_{ik} \Phi_{ikt} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} CSCP_{ik} SCP_{ikt} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} CSCV_{ik} SCV_{ikt} \quad (15)$$

Le détail des coûts est présenté dans le Tableau 2. En comparant le coût total, on peut noter une légère différence entre le modèle global (fonction f) et celui ne tenant compte que des coûts du producteur (fonction f'). Ceci s'explique par le fait que le producteur ayant la charge de l'achat des RTI, va tenter de minimiser son parc au strict nécessaire. De plus, il va conditionner le plus rapidement les RTI afin que ceux-ci soient stockés chez les détaillants et non chez lui. Le modèle est donc dans ce cas en flux poussés. Par contre la différence entre le modèle global et celui ne tenant compte que des coûts des détaillants (fonction f'') est beaucoup plus importante. Elle peut s'expliquer par le fait que les détaillants ont à leur charge les coûts de retour des RTI vides, donc ils essayent de diminuer ces coûts en gardant les RTI en stock. Par conséquent, le producteur a besoin d'acheter plus de RTI afin de répondre aux demandes, ce qui fait augmenter considérablement le coût total. Par ailleurs, nous observons que dans ce cas, le modèle est en flux tirés.

Fonction objectif	f	f'	f''
coût fonction objectif	45208,1	37589,9	7380
nombre RTI	240	240	370
coût d'achat	28800	28800	44400
coût de conditionnement	609	609	609
coût de transport	8120	8120	8120
coût de retour	7440	7440	7200
coût de stockage RTI plein chez le producteur	0	0	13,6
coût de stockage RTI vide chez le producteur	64,8	60,9	174,9
coût de stockage RTI plein chez les détaillants	168	178,4	168
coût de stockage RTI vide chez les détaillants	6,3	6,3	12
coût total	45208,1	45214,6	60697,5
coût producteur	37593,8	37589,9	53317,5
coût détaillants	7614,3	7624,7	7380

Tableau 2. Détails et comparaison des coûts.

Par la suite, il serait intéressant de faire varier les différents coûts unitaires de transport et de stockage afin d'étudier les comportements des différents acteurs de la chaîne logistique.

5 Validation des résultats à l'aide de la simulation

Afin de valider les résultats du modèle mathématique et d'évaluer les différentes mesures de performance, un modèle de simulation a été développé. A l'aide de ce modèle nous avons aussi étudié l'impact de la variabilité de la demande sur le fonctionnement de la chaîne.

5.1 Description du modèle

Le modèle a été développé à l'aide du simulateur à événement discret RAO (Ressources - Actions - Opérations) : [1] et reproduit au cours du temps la circulation des flux de RTI et des flux d'information (Figure 2) à travers la chaîne logistique.

Tous les processus du système étudié sont reproduits dans le modèle: selon la consommation journalière des détaillants les ordres de réapprovisionnement (OA) sont générés et envoyés au producteur ; lorsque le producteur reçoit la demande de ses détaillants (OA), il génère un ordre de fabrication (OF) et, selon la disponibilité des RTI vides et celle des ressources nécessaires pour la fabrication, il lance la production. Ensuite les RTI remplis sont envoyés aux détaillants pour être échangés contre des RTI vides et ces derniers sont retournés au producteur. Le modèle a été développé sur les hypothèses suivantes :

- Au début de simulation tous les RTI vides sont stockés chez le producteur, tous les autres stocks sont vides.
- Les demandes, OA et OF sont traités suivant l'ordre de leur arrivé (FIFO). En cas d'insuffisance de RTI vides, le producteur sert les détaillants à tour de rôle. Si le

producteur ne peut pas exécuter toutes les commandes, il livre au premier détaillant la quantité commandée, la commande de deuxième sera mise en attente. Si ce cas de figure se représente, le deuxième détaillant sera alors servi en premier.

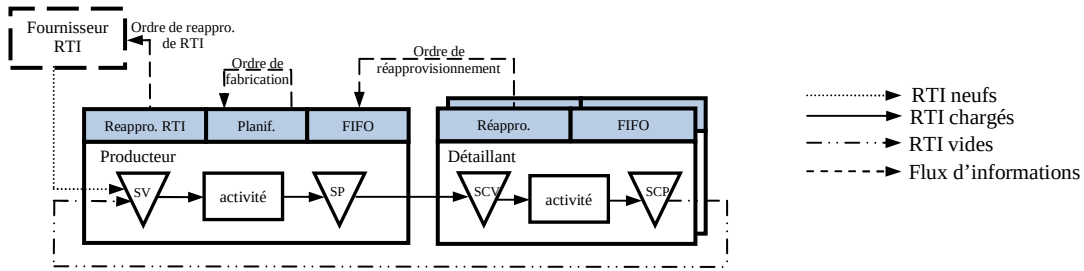


Figure 2. Schéma des flux

Le modèle construit se compose de trois ressources permanentes qui permettent de décrire la structure du système. La première est associée à la chaîne logistique. La deuxième, appelée « acteur », est attachée à chaque maillon du réseau. Elle est caractérisée par un ensemble d'attributs (e.g. numéro, état, numéros des stocks associés) dont les valeurs peuvent être modifiées au cours de la simulation (e.g. quantité des ordres de fabrication en cours d'exécution). Un de ces paramètres définit le type de l'acteur (producteur ou détaillant) et, par conséquent, sa propre mission dans la chaîne logistique. La dernière ressource représente les stocks avec une liste d'attributs (e.g. numéro, les quantités des RTI disponibles ou réservées à la production). Pour modéliser l'information échangée et les flux de matières dans le réseau logistique, quatre types de ressources temporaires ont été utilisés. Il s'agit de la ressource « demande » (consommation des détaillants) ; la ressource « ordre de réapprovisionnement » (OA) ; la ressource « ordre de fabrication » (OF) et la ressource « ordre de retour » (OR). Ces différentes ressources se caractérisent par un ensemble d'attributs (e.g. état, quantité demandée, date d'émission, acteur émetteur).

Le modèle de simulation nous permet de tester plusieurs scénarios. Dans le premier scénario, le nombre de RTI circulants dans le système défini par le modèle mathématique ne peut pas être augmenté en cours de simulation. Dans le deuxième, le producteur peut acheter des RTI neufs en cours de simulation. Le moment de réapprovisionnement du stock SV pour période t est défini par la règle :

$$SV_{it} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \Phi_{ikt} + \sum_{i \in I} AF_{it} < 0 \quad (16)$$

où AF_{it} correspond au nombre de RTI de type i affectés à la production.

Différentes mesures de performance sont évaluées au cours de la simulation pour estimer le niveau de service, l'utilisation des ressources et les délais. Les mesures les plus importantes sont :

- Les taux de satisfaction de la demande pour la chaîne totale (Taux_total) et pour chaque détaillant (Taux_1, Taux_2). Cette mesure correspond au pourcentage de commandes qui sont satisfaites à la date promise aux clientes.
- Délais de livraison (le temps moyen d'exécution) d'une demande pour les détaillants (Tems_dem_1, Tems_dem_2).

- Les taux de livraison des demandes qui correspondent au pourcentage de demandes livrées en période j , période $j+1$, $j+2$...
- Les quantités maximale ($Q_{\max}$) et moyenne (Q_{moyenne}) des RTI circulants dans la chaîne (pour le scénario 2).
- Le coût total de circulation des RTI dans la chaîne.

5.2 Résultats et analyse

Pour valider les résultats du modèle mathématique, nous avons d'abord effectué l'expérience avec la demande stationnaire (avec les paramètres $\mu_1 = 40$, $\mu_2 = 30$, $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$) pour une période de 30 jours sur le modèle de simulation. Ce test a confirmé que le nombre des RTI obtenu par le modèle mathématique est suffisant pour livrer toutes les commandes endéans des délais prévus (1 jour), par conséquent, le taux de satisfaction clients est égal à 100%.

Afin de comparer le modèle mathématique et le modèle de simulation, nous avons réalisé un tableau récapitulatif des coûts des deux modèles (Tableau 3). Pour calculer le coût total, les coûts unitaires présentés dans le Tableau 1 ont été utilisés. La différence entre les coûts obtenus par les deux modèles est expliquée par les états initiaux différents. De plus, les statistiques concernant le nombre RTI disponibles dans les stocks sont calculées différemment : pour le modèle mathématique c'est un nombre de RTI cumulés, pour le modèle de simulation c'est le nombre moyen de RTI disponibles dans les stocks pour chaque période.

	Modèle math.	Modèle de simulation		Modèle math.	Modèle de simulation
Nbr de RTI total	240	240	CA	28800	28800
Nbr de RTI retournés au producteur	1860	1860	CTR	7440	7440
Nbr de RTI envoyés aux détaillants	2030	2030	CTA	8120	8120
Nbr de RTI consommés	2030	2100	CF	609	630
Stock de RTI vides chez le producteur	2160	10	CSV	64.8	0.3
Stock de RTI pleins chez le producteur	0	0	CSP	0	0
Stock de RTI pleins chez le détaillant1	1200	0	CSCP1	96	0
Stock de RTI vides chez le détaillant1	120	0	CSCV1	3.6	0
Stock de RTI pleins chez le détaillant 2	900	0	CSCP2	72	0
Stock de RTI vides chez le détaillant 2	90	0	CSCV2	2.7	0
Coût total				45208.1	44990.3

Tableau 3. Comparatif des coûts entre modèle mathématique et modèle de simulation.

Ensuite, une étude de l'impact de la variabilité de la demande a été réalisée. Nous avons effectués dix séries de tests avec une variation de la demande v ($v = \sigma / \mu * 100\%$) entre 10% et 100% pour les deux scénarios expliqués précédemment. Afin d'obtenir des résultats fiables, 30 réplifications de chaque série ont été exécutées.

Les résultats de ces expériences pour le premier scénario (pas d'augmentation du nombre de RTI) sont présentés au Tableau 4 et aux figures 3, 4, et 5. Ils montrent qu'avec une demande variable et un nombre des RTI circulant dans le système constant, le taux de satisfaction de la demande baisse considérablement et reste presque au même niveau pour toutes les valeurs de σ , donc l'achat de nouveaux RTI est nécessaire. Dans le modèle de coût actuel, le coût de

rupture n'est pas pris en compte, ce fait explique la diminution du coût total avec l'augmentation de variabilité de la demande.

	v	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
TauxTot	Moyenne	100	38,172	39,356	43,773	37,027	43,576	35,520	43,047	40,498	32,808	39,876
	Ecart-type de la moyenne		15,264	16,612	20,982	22,832	22,337	17,980	19,975	21,025	18,171	21,134
	Intervalle de confiance 95		5,690	6,193	7,823	8,512	8,327	6,703	7,447	7,838	6,775	7,879
C_total	Moyenne	44990,3	43959,064	43873,398	43675,275	43634,608	43287,983	43186,816	43087,175	42867,170	42885,289	42666,477
	Ecart-type de la moyenne		248,115	211,387	299,674	306,690	684,620	472,025	473,397	521,899	507,301	710,362
	Intervalle de confiance 95		92,501	78,809	111,723	114,339	255,237	175,979	176,490	194,572	189,130	264,835

Tableau 4. Les résultats de simulation de scénario 1.

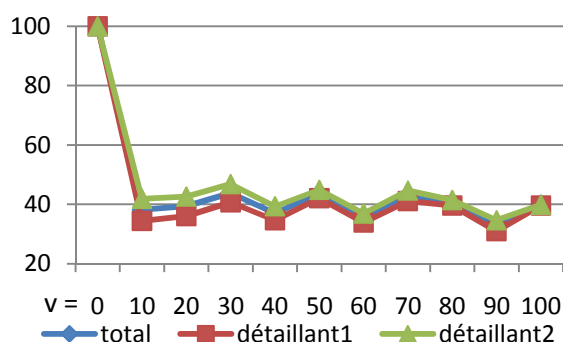


Figure 3. Taux de satisfaction de la demande.

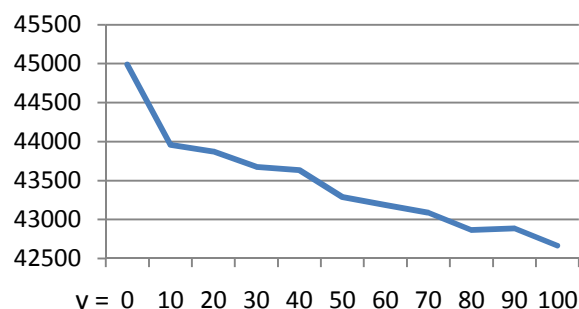


Figure 4. Coût total.

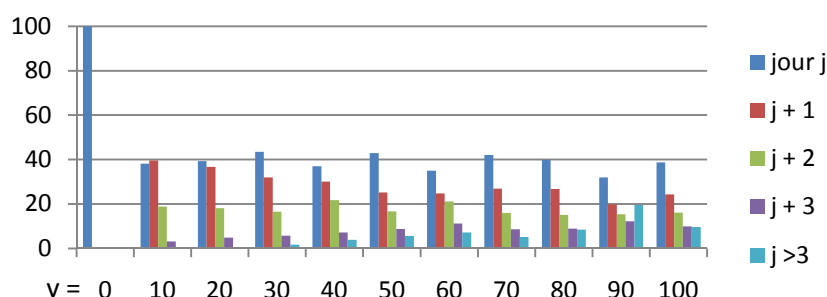


Figure 5. Taux de livraison en fonction de la variabilité de la demande.

Le Tableau 5 et les figures 6, 7 et 8 reprennent les résultats de simulation de scénario2 (possibilité d'acheter des RTI neufs). Avec une augmentation de variabilité de la demande le producteur doit acheter un plus grand nombre de RTI pour satisfaire ses clients. De plus, dans le cas où $v > 90$, le taux de satisfaction de clients est inférieur à 90% ; pour l'augmenter, la règle de gestion de stock des RTI vides chez le producteur (équation 16) doit être changée et un stock de sécurité doit être prévu.

	v	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Q_max	Moyenne	240	256,433	271,967	289,733	321,500	340,567	357,333	354,033	354,767	373,167	377,833
	Ecart-type de la moyenne		5,063	12,593	25,479	31,331	36,656	46,375	53,010	33,302	45,377	45,017
	Intervalle de confiance 95		1,888	4,695	9,499	11,681	13,666	17,289	19,763	12,415	16,917	16,783
TauxTot	Moyenne	100	100	99,939	99,393	97,147	95,208	92,691	92,814	92,134	88,776	88,979
	Ecart-type de la moyenne		0	0,332	1,379	2,283	3,463	4,125	4,575	3,580	5,239	3,758
	Intervalle de confiance 95		0	0,124	0,514	0,851	1,291	1,538	1,706	1,335	1,953	1,401
C_total	Moyenne	44990,3	47059,601	48909,955	50913,014	54691,400	57067,406	58767,759	58140,764	58197,883	60626,915	61210,722
	Ecart-type de la moyenne		734,115	1770,403	3552,408	4334,318	4985,706	6121,522	7275,398	4636,456	6263,084	5990,307
	Intervalle de confiance 95		273,690	660,035	1324,396	1615,905	1858,753	2282,204	2712,388	1728,547	2334,981	2233,285

Tableau 5. Les résultats de simulation de scénario 2.

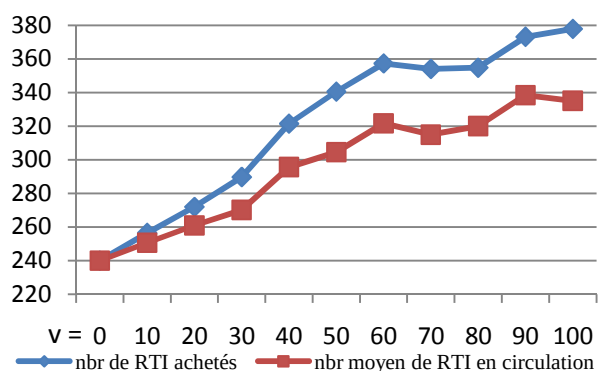


Figure 6. Evolution du nombre de RTI.

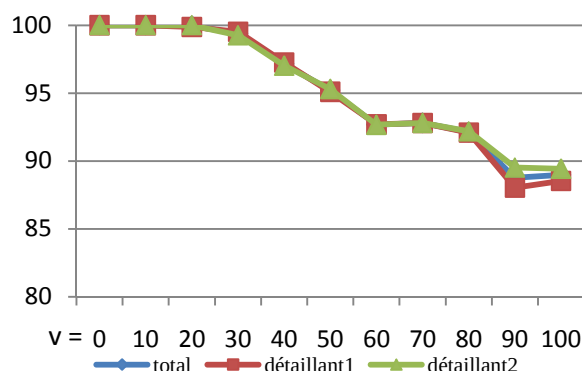


Figure 7. Taux de satisfaction de la demande.

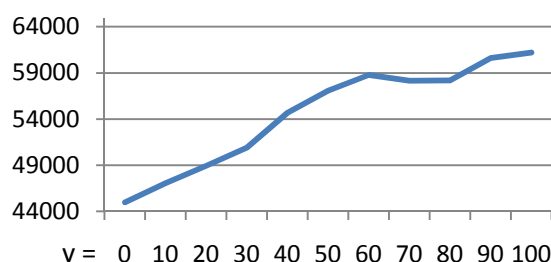


Figure 8. Coût total.

6 Conclusion et perspectives

De plus en plus d'entreprises, pour des raisons financières et environnementales, utilisent des supports de transports réutilisables. Aujourd'hui, la gestion de ces supports est loin d'être maîtrisée. Afin de répondre à un des enjeux de la gestion des RTI, à savoir l'optimisation du dimensionnement du parc de RTI, nous avons présentés dans cet article le modèle mathématique et le modèle de simulation que nous avons développés. Une présentation et une analyse des résultats ont également été effectuées. La simulation nous a permis de valider les résultats obtenus par le modèle mathématique ; et de mettre en évidence qu'avec la variabilité de la demande, il est préférable d'augmenter le nombre de RTI total circulant dans la chaîne logistique afin de répondre aux demandes.

Différentes perspectives de travail sont envisageables, une variation des coûts pourrait être mise en œuvre afin d'étudier le comportement des différents partenaires de la chaîne logistique. Il serait également intéressant d'étudier l'impact d'une modification de la répartition des coûts (par exemple, les détaillants participeraient à l'achat des RTI, ou le producteur prend en charge les coûts de collecte, ...). Enfin, d'autres coûts ont pour le moment été négligés, tels que les coûts de rupture de stock. Ceux-ci pourraient être intégrés dans les modèles afin d'en tenir compte.

Suite à l'étude de l'impact de la variabilité de la demande faite avec le modèle de simulation, il serait judicieux de faire un retour vers le modèle mathématique en implémentant une approche d'hybridation optimisation-simulation. Modèle mathématique qui sera d'ailleurs complexifié avec l'intégration de plusieurs types de RTI et plusieurs étages au niveau de la chaîne logistique.

7 Remerciements

Ces travaux ont été effectués dans le cadre du projet FEDER : MEDIATIC – TRACEMEDIA financé par la Région Wallonne et l’Union Européenne.

8 Bibliographie

- [1] Artiba, A., Emelyanov, V. and Iassinovski, S. : **“Introduction to intelligent simulation: The RAO language”**, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [2] De Brito, M., R. Dekker, and S. Flapper: **“Reverse logistics: A review of case studies”**, research paper, 2004.
- [3] Del Castillo, E., and J.K. Cochran: **“Optimal short horizon distribution operations in reusable container systems”**, Journal of the Operational Research Society, vol. 47(1), p48-60, 1996.
- [4] Dong, J.X., and D.P. Song: **“Container fleet sizing and empty repositioning in liner shipping systems”**, Transportation Research Part E45, p860-877, 2009.
- [5] Duhaime, R., D. Riopel and A.Langevin: **“Value analysis and optimization of reusable containers at Canada post”**, Interfaces, vol. 31(3), p3-15, 2001.
- [6] Fleischmann, M., J.M. Bloemhof-Ruwaard, R. Dekker, E. Van der Laan, J. Van Numen and L. Van Wassenhove: **“Quantitative models for reverse logistics: a review”**, European journal of operational research, vol.103, p1-17, 1997.
- [7] Iassinovskaia, G., C. Villamaux, F. Riane, and F. Pirard : **« Problématique des ressources mobiles au sein d’une chaîne logistique »**, 8ème Conférence Internationale de MODélisation et SIMulation - MOSIM’10, Casablanca, Tunisie, 2010.
- [8] Kärkkäinen, M., T. Ala-Risku, and M. Herold: **“Managing the rotation of reusable transport packaging – a multiple case study”**, 13th International Working Seminar on Production Economics, Igls/Innsbruck, Austria, 2004.
- [9] Kroon, L., and G. Vrijens: **“Returnable containers: an example of reverse logistics”**, International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, vol. 25(2), p56-68, 1994.
- [10] Lange, J.C., J.S. Tancrez, P.Semal, G. Strack, and K. Evrard: **“Should reusable items be accumulated inregional depots?”**, 3rd International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain, Casablanca, Morocco, 2010.
- [11] Strack, G., B. Fortz, F. Riane: **“Comparison of heuristics procedures for an integrated model for production and distribution planning in an environment of shared resources”**, 8ème Congrès International de Génie Industriel, Bagnères de Bigorre, France, 2009.
- [12] Strack, G., B. Fortz, F. Riane: **“Heuristic approaches for integrated production and distribution planning”**, International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, Montréal, Canada, 2009.