



**HAL**  
open science

## Modèle générique pour la conception de réseaux logistiques impliquant des activités de refabrication

Mohammed Bennekrouf, Wassila Mtalaa, Fethi Boudhari, Zaki Sari

### ► To cite this version:

Mohammed Bennekrouf, Wassila Mtalaa, Fethi Boudhari, Zaki Sari. Modèle générique pour la conception de réseaux logistiques impliquant des activités de refabrication. 9th International Conference on Modeling, Optimization & SIMulation, Jun 2012, Bordeaux, France. hal-00728596

**HAL Id: hal-00728596**

**<https://hal.science/hal-00728596>**

Submitted on 30 Aug 2012

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# MODÈLE GÉNÉRIQUE POUR LA CONCEPTION DE RÉSEAUX LOGISTIQUES IMPLIQUANT DES ACTIVITÉS DE REFABRICATION

M. BENNEKROUF

EPST / Tlemcen  
et Laboratoire MELT  
Tlemcen- Algérie

W. MTALAA

CRP Henri Tudor  
29 av. J.F.Kennedy  
L-1855 Luxembourg, G.D.Luxembourg  
wassila.mtalaa@tudor.lu

F. BOUDHARI, Z. SARI

Laboratoire MELT  
Chetouane, BP 230  
13000 Tlemcen, Algérie

**RÉSUMÉ :** *Le "Green supply chain management" consiste pour les entreprises à appliquer des concepts verts dans la gestion de leur chaîne logistique. Cela est devenu un moyen d'accroître leur compétitivité. En particulier, la logistique inverse a pour but d'optimiser les flux retours de produits afin de limiter les déchets. Un des problèmes critiques dans le champ de la logistique inverse est la conception de réseaux logistiques verts. Le but de ce travail est donc de proposer un modèle générique le plus complet possible qui puisse aider les preneurs de décision à concevoir de tels réseaux qui englobent des activités de refabrication. Ce modèle vise aussi à aider à établir des stratégies pour la mise en place des prix des produits usagers ou refabriqués. Plus précisément, un problème de localisation dynamique multi-produits à deux échelons pour la conception de réseaux logistiques verts est présenté. Pour cela, les coûts économiques ainsi que les coûts écologiques des activités logistiques inverses sont pris en compte afin d'aider à minimiser les dommages causés par la chaîne logistique sur l'environnement.*

**MOTS-CLÉS :** *Logistique inverse, refabrication, problème dynamique, multi-produits, émissions de CO<sub>2</sub>.*

## 1 INTRODUCTION

Les questionnements sur l'environnement des dernières décennies ont permis une réelle prise de conscience sur la nécessité de traiter les problèmes de pollution environnementale qui sont le corollaire pour le moment inévitable du développement et du processus de gestion de la chaîne logistique. Dès lors, la gestion des chaînes logistiques vertes s'impose naturellement comme nouvel outil logistique pour gérer tous les processus directs comme l'achat de matières premières, la production et la distribution mais aussi les flux inverses de produits afin d'assurer un équilibre économique et écologique durable. En particulier, la logistique inverse réfère aux activités dédiées au traitement des produits retournés jusqu'à ce qu'ils soient récupérés de manière satisfaisante ou mis au rebut de la chaîne logistique, voir (Rogers and Tibben-Lemke, 1998) comme par exemple la collection, le nettoyage, le désassemblage, les activités de test et tri, le stockage, le transport et les options de récupération. Ces activités de récupération incluent la réutilisation, la réparation, la remise à neuf, la refabrication et le recyclage. Ces activités s'opèrent

dans des sites spécifiques qui sont de deux types différents, voir (Melo et al., 2009): les centres de collection (magasins où les consommateurs déposent les produits usés) et les sites de retraitement (centres de remanufacture ou centres de réparation ou remise à neuf). C'est pour cela que la conception de réseaux inverses nécessite la définition adéquate des axes de transport pour les flux retours des consommateurs vers les sites de retraitement.

Une autre caractéristique à prendre en compte dans la conception de chaînes inverses est le grand degré d'incertitude accompagnant le retour des produits usagés par les consommateurs non seulement en termes de quantité mais aussi en termes de qualité. Par ailleurs ces retours de produits peuvent s'opérer durant leur cycle d'utilisation (comme pour les produits sous garantie qui doivent être réparés), en fin d'utilisation, ou en fin de vie et donc à des périodes différentes de l'année. Cela oblige à considérer les caractéristiques des produits retournés pour optimiser le procédé de récupération de la valeur. Par ailleurs dans la plupart des études dédiées à la logistique inverse, les systèmes de reprise ont pour but le recyclage de matières premières ou la

récupération d'énergie. Excepté quelques articles (comme (Schuh et al., 2011) ou (Golinska and Kawa, 2010)), qui traitent du retour de produits électroniques, les potentiels de récupération fonctionnelle d'un produit ne sont pas suffisamment investigués. Enfin, les travaux sur la logistique inverse incluant des activités de refabrication, négligent souvent le fait que les quantités de produits retournés sont aléatoires et dépendent du temps (Pokharel and Mutha, 2009), nécessitant des capacités adaptées pour les centres de collection et de retraitement. Ce sont ce type de considérations qui sont souvent négligés dans la littérature et qui sont faites dans cette étude. Plus précisément, le but de ce travail est de proposer un modèle générique complet pour la conception verte de réseaux logistiques inverses incluant des activités de remanufacture de produits non homogènes, électroniques ou électroménagers. Tout d'abord, ce modèle est dynamique prenant en compte la saisonnalité et l'incertitude des retours de produits à la fin de leur utilisation, comme les travaux (Hinojosa et al., 2008) et (Gourdin and Klopfenstein, 2008) qui définissent également des modèles dynamiques avec problèmes de capacité mais pour des chaînes logistiques directes. Deuxièmement, de multiples classes de produits peuvent être collectées et traitées dans une même période afin d'améliorer le transport et d'assurer un fonctionnement optimal des centres de refabrication. Excepté le travail récent (Sadjady and Davoudpour, 2012) dans le contexte de la logistique directe, pas ou peu de travaux considèrent des problèmes de localisation multi-produits pour des chaînes logistiques inverses. En plus, les marchés pour les produits retournés ne sont pas toujours bien connus, voir (Fleischmann et al., 1997). Par ailleurs, les compétences requises ainsi que les expertises diffèrent et imposent donc des contraintes sur les acteurs potentiels impliqués dans les activités de récupération qui peuvent être les fabricants d'équipements ou des sous-traitants, voir (Min and Ko, 2008). Ces différents acteurs participent à la chaîne logistique étudiée dans cet article.

Enfin, le dernier but de ce travail est de proposer une conception de réseau logistique qui inclut à la fois les coûts économiques et écologiques. Pour ce faire, l'environnement est pris en compte dans les coûts d'élimination et dans les calculs des coûts de transport. Ces derniers sont expliqués dans la suite de l'article. Ce travail s'articule comme suit. D'abord, le problème est décrit. Puis, le modèle mathématique est présenté. Les résultats de tests sont présentés en troisième partie. La dernière section conclut ce travail et propose des pistes de recherche pour le futur.

## 2 DÉFINITION DU PROBLÈME

Cette partie est consacrée à la présentation d'une formulation mathématique pour le problème. Cette modélisation a pour but d'être générique et applicable à la plupart des chaînes logistiques inverses. Le réseau logistique considéré dans ce travail est d'abord décrit. Puis les variables et les paramètres du modèle sont donnés pour les deux échelons de la chaîne logistique. Enfin, une formulation du modèle est proposée.

### 2.1 Réseau logistique inverse

Dans ce paragraphe, la chaîne logistique inverse étudiée est définie. Dans la figure 1 les différents maillons de la chaîne logistique sont représentés. Le flux dynamique de multiples classes de produits avec retours stochastiques est considéré. Les réseaux logistiques peuvent être classés dans quatre principales catégories, voir (Lu and Bostel, 2007): les réseaux de réutilisation directe, les réseaux de refabrication, les réseaux de service de réparation et les réseaux de recyclage. Dans ce travail, ces réseaux sont tous considérés en même temps. Ainsi, la chaîne logistique inverse à deux échelons se compose de points de collection (qui peuvent représenter aussi bien la présence de consommateurs que de détaillants), de centres de collection et de centres de refabrication. Plus précisément, les produits à la fin de leur utilisation sont transportés des points de collection aux centres de collection. Ensuite, si les produits retournés sont de qualité satisfaisante, ils sont vendus dans un marché secondaire. Sinon, les produits sont traités dans un centre de remanufacture à moins qu'il n'y ait pas de capacité suffisante dans ce centre de refabrication. Dans ce cas, les produits sont repris par un sous-traitant. Le manque de place conduit également à avoir recours aux centres d'élimination (ou déchetteries) pour de grandes quantités de produits, voir figure 1. Le but de ce modèle est donc d'optimiser le réseau et le flux inverse de produits afin de minimiser les quantités de produits qui sont jetés. Il s'agit de résoudre un problème de localisation dynamique à deux échelons avec contraintes de capacité de manière séquentielle pour refléter au mieux les retours réels de produits. L'horizon de l'étude se divise en périodes correspondant à des saisons. Dans une première étape, le problème de collecter des quantités incertaines de produits situés aux points de collection est formulé par un modèle d'allocation-localisation. Ensuite, lorsque la quantité disponible exacte est connue pour chacune des classes de produits à chacun des centres de collection, il reste à résoudre un problème p-médian pour localiser les centres de refabrication. Les usines à localiser sont en gris clair dans la figure 1, avec des triangles pour représenter les centres de collection et des rectangles pour les centres de refab-

rication.

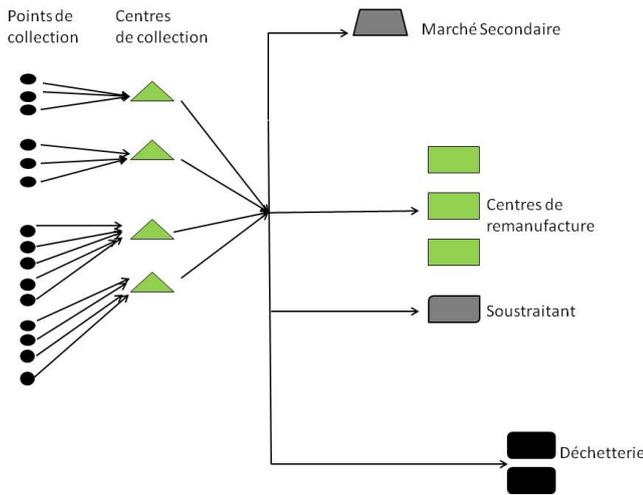


Figure 1: Réseau logistique inverse étudié

D'autres hypothèses ont été ajoutées pour refléter au mieux ce qui se passe dans la réalité. D'abord, des contraintes de capacité aux sites potentiels des centres de collection et de remanufacture sont considérées. Par ailleurs, les coûts d'investissement sont supposés être partagés par les autorités locales et les fabricants. Cela permet d'encourager les investissements qui peuvent être payés étape par étape dans l'horizon de l'étude car les coûts de mise en place des centres de retraitements sont importants. Finalement cela permet aussi d'étendre la capacité de ces centres de refabrication ce qui conduit en retour à plus de produits récupérés.

Enfin le problème de conception de réseau est formulé de manière à aider à minimiser les coûts environnementaux de la chaîne logistique inverse. Plus précisément, les émissions de dioxyde de carbone dues au transport sont quantifiées et leurs coûts sont ajoutés aux coûts de transport classiques. Des coûts de pénalité pour les produits qui sont envoyés à la déchetterie sont également inclus dans le modèle. Des subventions des autorités locales sont aussi ajoutés pour chaque produit récupéré.

Les ensembles et indices utilisés dans ce modèle sont comme suit:

- $i \in I$ , indice des points de collection, (qui peuvent être les consommateurs ou les détaillants),
- $j \in J$ , indice des sites potentiels des centres de collection,
- $k \in K$ , indice des marchés secondaires,
- $l \in L$ , indice des sites potentiels pour les centres de refabrication,
- $m \in M$ , indice des sous-traitants,
- $n \in N$ , indice des déchetteries,
- $p \in P$ , indice des classes de produits,
- $t \in T$ , indice des périodes de temps,

$v \in V$ , indice des véhicules (les camions sont classés par leur Poids Total Autorisé en Charge).

Les paramètres du problème sont présentés dans ce qui suit.

## 2.2 Problème d'allocation-localisation du premier niveau

### 2.2.1 Paramètres du premier niveau

Pour optimiser l'allocation des produits collectés au regard de la capacité volumique de chaque centre de collection, une taille standard est allouée à chaque classe de produits.

$S_p$  = volume moyen des produits de la classe  $p$  en  $m^3$ ,

$w_p$  = poids moyen d'un produit de classe  $p$ ,

$n_p$  = nombre de classes de produits,

$FS_j$  = coûts fixes d'installation d'un centre de collection au site  $j$ ,

$FO_j$  = coûts fixes pour le fonctionnement du centre de collection  $j$ ,

$d_{ij}$  = distance euclidienne du point de collection  $i$  au centre de collection  $j$  en km,

$M_j^{min}$  = capacité minimum du centre de collection  $j$ ,

$M_j^{max}$  = capacité maximum du centre de collection  $j$ ,

$Q_{p,i}^t$  = quantité de produits de classe  $p$  disponible au point  $i$  durant la période  $t$ ,

$Q_{p,i}^{max,t}$  = quantité maximum de produits  $p$  pouvant être collectée au point de collection  $i$  en période  $t$ ,

$c_{i,j}^v$  = coûts de transport par unité de poids de produit du point de collection  $i$  au centre de collection  $j$  par le véhicule  $v$ .

Plus précisément les coûts totaux de transport se divisent en deux: les coûts fixes de fonctionnement du véhicule  $v$  et les coûts variables.

Ces coûts variables incluent les coûts par kilomètre par véhicule et la somme des coûts de la consommation de carburant lorsque le véhicule n'est pas chargé, les coûts de consommation de carburant par tonne transportée et les coûts environnementaux. Ces derniers sont expliqués dans le paragraphe suivant.

### 2.2.2 Coûts environnementaux du transport

Les coûts environnementaux du transport se calculent en deux étapes. Premièrement, la méthode de quantification développée conjointement par l'ADEME et EpE (Entreprises Pour l'Environnement) est utilisée pour estimer  $e^v$  le facteur d'émission factor par véhicule par ton.km, voir (ADEME, 2011) et le site internet suivant ([www.epe-asso.org](http://www.epe-asso.org)). Puis le coût des émissions de  $CO_2$  en euro/ton.km par véhicule est calculé avec l'indice du prix européen pour le réchauffement climatique, à l'aide de la méthode "shadow price" pour les émissions de dioxyde de carbone, voir (Van Harmelen et al, 2007).  $e^v$ , le facteur d'émission par ton.km par véhicule  $v$  en  $kg\ CO_2\ éq/ton.km$ , est défini par la formule suivante:

$$e^v = [e^{vkm}/(1 - t^{dv})]/t^m$$

où  $e^{vkm}$ , le facteur d'émission par véhicule.kilomètre en kg CO<sub>2</sub>éq/km est calculé comme suit:

$$e^{vkm} = e^{fab} + e^{vv} + (e^{vpc} - e^{vv}) * (1 - t^{dv}) * t^{rm}$$

$e^{fab}$  = émissions liées à la fabrication du camion v en kg CO<sub>2</sub>éq,

$e^{vv}$  = émissions lorsque le véhicule v est vide en kg CO<sub>2</sub>éq/km,

$e^{vpc}$  = émissions lorsque le véhicule v est plein en kg CO<sub>2</sub>éq/km,

$t^{dv}$  = taux de distance effectuée par le véhicule v à vide,

$t^{rm}$  = tonnage moyen pour le véhicule v en charge divisé par la charge utile moyenne,

$t^m$  = tonnage moyen pour le véhicule v en charge en tonnes.

### 2.2.3 Modèle d'allocation-localisation du premier niveau

Les variables de décision du modèle sont comme suit:

$X_j^t=1$ , si un centre de collection est localisé et mis en place au site potentiel j à la période t, 0, sinon,

$Y_{ij}^t=1$ , si le point de collection i est assigné au centre de collection j à la période t, 0, sinon,

$V_{p,ij}^t$  = quantité de produits p transportée du point de collection i au centre de collection j durant la période de temps t.

Le problème de localisation avec contraintes de capacité consiste à minimiser la quantité:

$$\begin{aligned} & \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} (FS_j + FO_j) X_j^t \\ & + \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij}^v w_p d_{ij} Y_{ij}^t Q_{max}^t x_{p,i}^t \end{aligned} \quad (1)$$

Sachant que:

$$\sum_{i \in I} Y_{ij}^t = 1 \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (2)$$

$$Y_{ij}^t \leq X_j^t \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{i \in I} Q_{p,i}^t S_p Y_{ij}^t \leq M_j^{max} X_j^t \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{i \in I} Q_{p,i}^t S_p Y_{ij}^t \geq M_j^{min} X_j^t \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} Q_{p,i}^t = Y_{ij}^t V_{p,ij}^t \quad \forall j \in J, \forall p \in P, \forall t \in T \quad (6)$$

$$V_{p,ij}^t \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall p \in P, \forall t \in T \quad (7)$$

$$X_j^t, Y_{ij}^t \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (8)$$

La fonction objective (1) se divise en deux parties: les coûts fixes d'ouverture et de fonctionnement des usines (qui peut être considéré comme un investissement pour un nouveau site ou pour de nouvelles unités de test ou de tri), et les coûts de transport variables liés à la collection de produits retournés. L'ensemble des contraintes (2) assure que chaque point de collection point est connecté à un seul centre de collection. Les contraintes (3) assignent le point de collection i au centre de collection j en cas d'ouverture de ce dernier. Les inégalités (4-5) sont des contraintes de capacité. Le sixième ensemble de contraintes définit le flux des produits transportés du point de collection i au centre de collection j durant la période t. Les contraintes 7 vérifie la non-négativité et les contraintes 8 imposent des conditions de binarité.

Après la phase de collection intervient une phase durant laquelle les centres de refabrication doivent être localisés. Cela correspond à la période de temps t+1.

### 2.3 Problème p-median du second niveau

Les paramètres, variables et formulation du problème sont comme suit:

$d_{j,\alpha}$  distance euclidienne entre le centre de collection j et le point  $\alpha$ , avec  $\alpha \in \{k, l, m, n\}$ .

$c_{j,\alpha}^v$  coûts de transport par unité de poids du centre de collection j au point  $\alpha$  par le véhicule v en euro/ton.km.(notez que ces coûts sont calculés de la même manière que pour le premier niveau, voir paragraphe 2.2.2).

$\gamma^{t+1} = 1$  si un transport est effectué des centres de collection vers les sous-traitants ou la déchetterie, 0 sinon.

#### 2.3.1 Paramètres et variables de décision liés aux marchés secondaires

$\beta_{p,j}^{t+1}$  = pourcentage de produits retournés de classe p au centre de collection j, pouvant être revendus à un marché secondaire à la période t+1.

$dem_{p,k}^{t+1}$  = demande pour des produits de classe p au marché secondaire k à la période t+1.

$U_{p,k}^{t+1}$  = prix d'un produit de classe p au marché secondaire k à la période t+1.

$V_{p,jk}^{t+1}$  = quantité de produits de classe p transportés du centre de collection j au marché secondaire k à la période t+1.

#### 2.3.2 Paramètres et variables de décision liés aux centres de refabrication

$FS_l$  = coût fixe d'ouverture d'un centre de refabrication au site l,

$F_{ad,l}^{t+1}$  = coûts fixes additionnels correspondant à l'extension de la capacité du centre de remanufacture

l à la période t+1.

$FO_{p,l}^{t+1}$  = coûts correspondant à la réorganisation du centre de refabrication l pour traiter les produits de classe p durant la période t+1.

$U_{p,l}^{t+1}$  = bénéfice unitaire pour un produit de classe p au centre de remanufacture l à la période t+1 (ces coûts incluent aussi bien la valeur unitaire du produit récupéré que les subventions des autorités).

$O_{p,l}^{t+1}$  = coûts opérationnels pour le traitement d'un produit de classe p au centre de refabrication l au temps t+1.

Afin de décrire efficacement la capacité de traitement par produit aux centres de remanufacture, une charge de travail est utilisée. En fait, les activités de récupération sont rarement opérées par des machines. Les processus de tri et de refabrication induisent plutôt des ressources humaines. C'est pour cela que la charge de travail est quantifiée en heures de travail effectuées à la main pour décrire les besoins en terme de capacité.

$WL_{p,l}$  = charge de travail nécessaire au traitement des produits de classe p au centre de remanufacture l.

$WLO_{p,l}^{t+1}$  = charge de travail correspondant à la réorganisation du centre de refabrication l pour traiter les produits de classe p durant la période t+1.

$WL_{tot,l}^{t+1}$  = charge de travail totale disponible au centre de refabrication l, pour la période t+1.

$WL_{tot-ad,l}^{t+1}$  = charge de travail additionnelle au centre de remanufacture l, pour la période t+1.

$V_{p,jl}^{t+1}$  = volume de produits de classe p transportés du centre de collection j au centre de refabrication l, à la période t+1.

$\alpha_{p,l}^{t+1}$  = pourcentage de capacité requise au centre de refabrication l pour traiter les produits de classe p à la période t+1.

$nr c_l^{t+1}$  = nombre de centres de remanufacture l qui devraient être ouverts à la période t+1,

$X_l^{t+1} = 1$ , si un centre de refabrication est localisé et mis en place au site potentiel l à la période t+1, 0, sinon,

$XO_{p,l}^{t+1} = 1$ , si un centre de remanufacture l est réorganisé afin de traiter les produits de classe p à la période t+1, 0, sinon.

### 2.3.3 Paramètres et variables de décision liés aux sous-traitants

$U_{p,m}^{t+1}$  = bénéfice unitaire pour un produit de classe p chez le sous-traitant m à la période t+1.

$O_{p,m}^{t+1}$  = coûts opérationnels pour le traitement d'un produit de type p chez le sous-traitant m à la période t+1.

$WL_{p,m}$  = charge de travail nécessaire au traitement d'un produit de classe p chez le sous-traitant m.

$M_{p,m}^{t+1}$  = capacité totale disponible chez le sous-traitant m durant la période t+1 pour traiter les produits de classe p.

$V_{p,jm}^{t+1}$  = volume de produits de classe p transportés du

centre de collection j au sous-traitant m à la période t+1.

### 2.3.4 Paramètres et variables de décision liés aux centres d'élimination

$Pe_{p,n}^{t+1}$  = coût de pénalité unitaire pour l'élimination d'un produit de classe p au centre d'élimination n, à la période t+1. (Ces coûts peuvent représenter la matière première et l'énergie qui n'ont pas pu être récupérées.)

$O_{p,n}^{t+1}$  = coûts opérationnels pour l'élimination d'un produit p au centre n, à la période t+1.

$WL_{p,n}$  = charge de travail nécessaire au traitement du produit p au centre d'élimination n.

$M_{p,n}^{t+1}$  = capacité totale du centre d'élimination n pour le traitement des produits de classe p durant la période t+1.

$V_{p,jn}^{t+1}$  = volume de produits p transportés du centre de collection j au centre d'élimination n, à la période t+1.

Le problème p-médian consiste à minimiser:

$$\begin{aligned}
& \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \left( c_{jk}^v w_p d_{jk} - U_{p,k}^{t+1} \right) V_{p,jk}^{t+1} \\
& + \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \left( F S_l + F_{ad,l}^{t+1} \right) X_l^{t+1} \\
& + \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} \sum_{l \in L} F O_{p,l}^{t+1} X O_{p,l}^{t+1} \\
& + \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \left( c_{jl}^v w_p d_{jl} - U_{p,l}^{t+1} + O_{p,l}^{t+1} \right) V_{p,jl}^{t+1} \\
& + \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} \left( c_{jm}^v w_p d_{jm} - U_{p,m}^{t+1} + O_{p,m}^{t+1} \right) V_{p,jm}^{t+1} \\
& + \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{n \in N} \left( c_{jn}^v w_p d_{jn} + P e_{p,n}^{t+1} + O_{p,n}^{t+1} \right) V_{p,jn}^{t+1}
\end{aligned} \tag{9}$$

Sachant que:

$$\sum_{l \in L} X_l^{t+1} = n r c_l^{t+1} \quad \forall t \in T \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
\sum_{i \in I} V_{p,ij}^{t+1} &= \sum_{k \in K} V_{p,jk}^{t+1} + \sum_{l \in L} V_{p,jl}^{t+1} + \sum_{m \in M} V_{p,jm}^{t+1} \\
& + \sum_{n \in N} V_{p,jn}^{t+1} \quad \forall p \in P, \forall t \in T
\end{aligned} \tag{11}$$

$$\sum_{k \in K} V_{p,jk}^{t+1} \leq \beta_{p,j}^{t+1} \sum_{i \in I} V_{p,ij}^t \quad \forall j \in J, \forall p \in P, \forall t \tag{12}$$

$$\sum_{j \in J} V_{p,jk}^{t+1} \leq dem_{p,k}^{t+1} \quad \forall k \in K, \forall p \in P, \forall t \in T \tag{13}$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} V_{p,jk}^{t+1} = \min \left( \sum_{k \in K} dem_{p,k}^{t+1}, \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \beta_{p,j}^{t+1} V_{p,ij}^t \right) \quad \forall p \in P, \forall t \in T \tag{14}$$

$$XO_{p,l}^{t+1} \leq X_l^{t+1} \quad \forall l \in L, \forall p \in P, \forall t \in T \quad (15)$$

$$\sum_{p \in P} XO_{p,l}^{t+1} \leq n_p X_l^{t+1} \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j \in J} V_{p,jl}^{t+1} WL_{p,l} + WLO_{p,l}^{t+1} XO_{p,l}^{t+1} \\ & \geq \alpha_{p,l}^{t+1} \left( WL_{tot,l}^{t+1} + WL_{tot-ad,l}^{t+1} \right) X_l^{t+1} \quad \forall l \in L, \forall p, \forall t \quad (17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} V_{p,jl}^{t+1} WL_{p,l} + \sum_{p \in P} WLO_{p,l}^{t+1} XO_{p,l}^{t+1} \\ & \leq \left( WL_{tot,l}^{t+1} + WL_{tot-ad,l}^{t+1} \right) X_l^{t+1} \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (18) \end{aligned}$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{j \in J} V_{p,jm}^{t+1} WL_{p,m} = \gamma^{t+1} M_{p,m}^{t+1} \quad \forall m \in M, \forall t \quad (19)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{j \in J} V_{p,jn}^{t+1} WL_{p,n} \leq \gamma^{t+1} M_{p,n}^{t+1} \quad \forall n \in N, \forall t \quad (20)$$

$$V_{p,jk}^{t+1} \geq 0 \quad \forall j \in J, \forall k \in K, \forall p \in P, \forall t \in T \quad (21)$$

$$V_{p,jl}^{t+1} \geq 0 \quad \forall j \in J, \forall l \in L, \forall p \in P, \forall t \in T \quad (22)$$

$$V_{p,jm}^{t+1} \geq 0 \quad \forall j \in J, \forall m \in M, \forall p \in P, \forall t \in T \quad (23)$$

$$V_{p,jn}^{t+1} \geq 0 \quad \forall j \in J, \forall n \in N, \forall p \in P, \forall t \in T \quad (24)$$

$$X_l^{t+1} \in \{0, 1\} \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (25)$$

$$XO_{p,l}^{t+1} \in \{0, 1\} \quad \forall l \in L, \forall p \in P, \forall t \in T \quad (26)$$

L'objectif du problème (9) est de minimiser la fonction coût composée de coûts fixes et variables. Les coûts fixes viennent de l'ouverture et du fonctionnement des centres de refabrication, ainsi que de la possibilité d'étendre la capacité à la fin de chaque année. Ces coûts incluent aussi les coûts liés à la réorganisation des centres de remanufacture, à chaque fois qu'une nouvelle classe de produits doit être traitée. Les coûts variables se composent des coûts de transport, des coûts opérationnels et des bénéfices aux marchés secondaires, sous-traitants et centres de refabrication ainsi que des coûts de pénalité aux centres d'élimination.

Les contraintes (10) donnent le nombre de centres de refabrication qui peuvent être ouverts. Les égalités (10) sont des contraintes d'équilibre de flux. L'ensemble des contraintes (12) à (14) définit la quantité de produits qui sont envoyés des centres de collection vers les marchés secondaires à condition que la demande des marchés secondaires soit satisfaite et que la qualité des produits est suffisamment bonne. Les inégalités (15) garantissent que le traitement des produits de classe  $p$  est possible au centre de remanufacture  $l$  seulement si celui-ci est ouvert. Les contraintes (16) définissent le nombre de fois que le centre de refabrication  $l$  est réorganisé pour traiter une autre classe de produits. Les inégalités (17) stipulent qu'une quantité minimum de produits de classe  $p$  est requise pour décider de réorganiser le centre de remanufacture  $l$  à la période  $t+1$ . Les trois ensembles suivants de contraintes (18) à (20) sont liés.

Plus précisément, les contraintes (18) imposent que la charge totale de travail disponible au centre de remanufacture  $l$  qui est la somme des temps opérationnels et de réorganisation ne doit pas dépasser la capacité à ce centre de refabrication. Dans le cas où tous les produits sont traités aux centres de remanufacture,  $\gamma^{t+1}$  est nul dans les contraintes (19) et (20) qui définissent les contraintes de capacité chez les sous-traitants et aux centres d'élimination. Sinon, bien que les centres de remanufacture travaillent au maximum de leur capacité, la totalité des produits ne peut pas y être traitée. Cela implique que la quantité restante de produits est envoyée chez les sous-traitants et aux centres d'élimination. Dans ce cas, l'inégalité (18) devient une égalité et  $\gamma^{t+1} = 1$  dans les contraintes (19) et (20).

Les inégalités (21) à (24) garantissent la non-négativité des variables de décision. Enfin, les contraintes (25) et (26) imposent les conditions de binarité.

Les résultats de l'application de ce modèle sont présentés dans ce qui suit.

### 3 CALCULS EXPERIMENTAUX

Dans cette partie, le modèle est évalué à l'aide d'un solveur commercial basé sur les méthodes du simplexe et de séparation et évaluation. La méthode est testée sur une série de données construite sur la base de problèmes tests de la littérature.

#### 3.1 Génération de données

Pour tester le modèle, une série de calculs a été réalisée. Le logiciel commercial LINGO 12 a été choisi. Il a permis de résoudre le problème et d'obtenir des solutions exactes en utilisant la méthode de séparation et évaluation avec les paramètres du solveur par défaut. Un certain nombre d'hypothèses a été émis pour simuler au mieux des scénarios réalistes. Le nombre total de périodes de  $T$  est 12 pour couvrir un investissement total de trois ans. Les localisations de tous les centres possibles ont été uniformément distribuées dans la surface définie par le carré  $[0,1000][0,1000]$  comme le montre la figure 2. En fait, cet exemple est réalisé à un niveau national, mais d'autres considérations peuvent être ajoutées pour la conception d'un réseau logistique inverse à un niveau plus étendu.

Trois classes de produits sont considérées dans cet exemple. Ces produits doivent en premier lieu être collectés des 16 points de collection. Le tableau 1 donne pour chaque saison, la quantité des produits de classe  $P_1$  à chaque point de collection. Plus précisément, les quantités de ces produits sont générées de manière aléatoire à l'aide d'une distribution uniforme sur des espaces différents. Les bornes de ces

espaces apparaissent entre crochets dans le tableau. La première classe de produits regroupe les produits qui sont rapportés le plus en hiver et sont donc utilisés massivement avant. C'est ainsi que la période de référence pour ces produits est l'hiver et que les bornes des espaces pour les autres saisons sont calculées en multipliant celles de l'hiver par des coefficients spécifiques à chaque saison. Le même type de génération de données a été réalisé pour les classes de produits  $P_2$  et  $P_3$ . La classe de produits  $P_2$  groupe des produits rendus le plus en été. Les produits de type  $P_3$  sont supposés être retournés le plus en été et en hiver.

Deux marchés secondaires ainsi que deux centres d'élimination (déchetteries) sont considérés dans cet exemple. Le nombre de sous-traitants est trois. Chacun de ces sous-traitants est supposé ne pouvoir traiter qu'une seule classe de produits à la fois pour toute la durée de l'étude. Ainsi, la classe de produits  $P_1$  a été allouée au sous-traitant numéro un, et les produits  $P_2$  et  $P_3$  respectivement aux sous-traitants deux et trois, mais seulement si il y a besoin d'impliquer des sous-traitants dans le processus de récupération. Les poids totaux autorisés à charge pour les camions sont respectivement de 12 tonnes et 40 tonnes pour les transports du premier et second niveaux. En effet, les quantités de produits collectées aux points de collection ne représentent pas de grandes quantités et les transports peuvent être fréquents. Par contre, au second niveau de la chaîne, plus de volume doit être transporté.

Les coûts fixes d'ouverture des centres de collection se calculent de la même manière que dans l'article (Thanh and Peton, 2008) et les quantités maximum de chaque classe de produits à traiter sont données dans le tableau 2. L'ouverture d'un centre de refabrication est supposé coûter cent fois plus cher que l'ouverture d'un centre de collection, et s'élève à 18056500. Cela engendre une capacité totale de 12794000 unités de temps pour traiter tous les produits aux centres de remanufacture. D'autres données utilisées pour les calculs du second niveau apparaissent dans le tableau 2. Le tableau 3 présente des données liées aux centres de refabrication. En ce qui concerne les quantités  $WLO_{p,l}$  et  $FO_{p,l}$ , les valeurs données sont des valeurs initiales pour les calculs. Si à une période  $t$ , on traite le produit de type  $P_2$  au centre de remanufacture  $l$ , alors à la période  $t+1$  suivante, la quantité  $WLO_{2,l}$  sera nulle, de même pour  $FO_{2,l}$ . En effet, si les produits de type  $P_2$  sont traités à une période donnée, le centre de remanufacture n'aura pas besoin d'être réagencé pour traiter ce même type de produits à la période suivante.

La capacité additionnelle pour ces centres est supposée croître de 25% à la fin de chaque année. La capacité chez les sous-traitants est de 150000 unités de temps tandis que celle dans les centres d'élimination est supposée illimitée. Le problème a été résolu avec

ces définitions pour la génération des données. Les résultats des calculs apparaissent dans ce qui suit.

### 3.2 Exemple illustratif

Les résultats des calculs se résument dans la figure 2. Les flèches noires montrent l'allocation de chaque

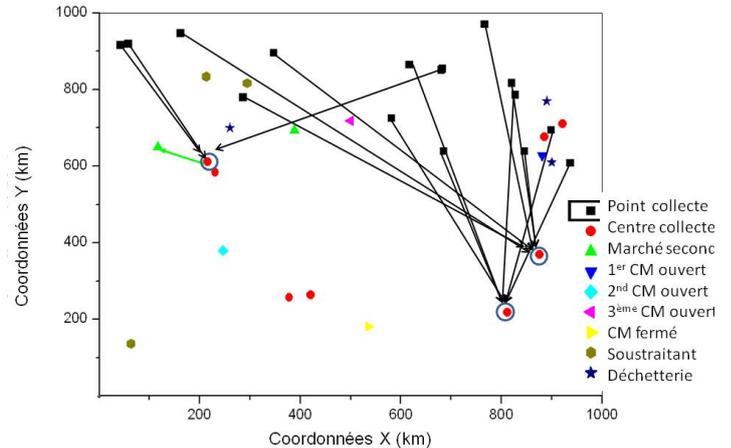


Figure 2: Localisation des centres de collection et de refabrication

point de collection à l'un des centres de collection choisis. A la fin de la durée d'étude, trois centres de collection sont installés sur les huit localisations possibles. Leur emplacement est entouré en bleu dans la figure 2. La flèche grise représente un lien de transport entre un centre de collection et un marché secondaire.

Finalement à la fin des trois ans de l'étude, trois centres de remanufacture ont été ouverts sur les quatre sites possibles. Plus précisément, la première année, un centre de refabrication est ouvert. Ce centre portait le numéro 4 lors des calculs. A la fin de la deuxième année, un second centre de refabrication est ouvert (le centre numéro deux) tandis que la capacité du premier centre de remanufacture est étendue de 25% pour atteindre les 15992500 unités de temps. Enfin, à la fin de la troisième année, un troisième centre de refabrication (référéncé comme le centre numéro trois) est mis en place. Les deux autres centres de refabrication ont alors des capacités respectives de 15992500 et 19191000 unités de temps pour retraiter les produits.

Dans la figure 3 apparaît le taux de récupération pour chacune des trois classes de produits pour toute la durée de l'étude. Après un an et demi, plus de 30% des produits peuvent être retraités. La troisième année, les investissements permettent de récupérer plus de la moitié des produits rendus par les consommateurs.

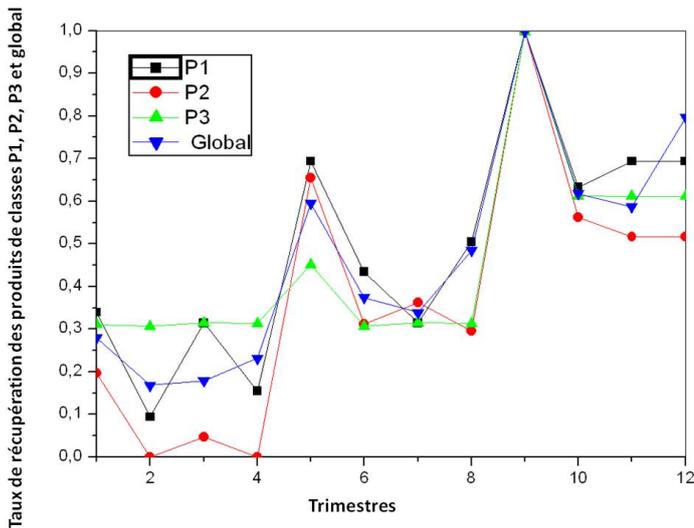


Figure 3: Taux de récupération par classe de produits pour la durée d'étude

#### 4 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans ce travail, un modèle dynamique de localisation avec contraintes de capacité pour la conception verte de réseaux logistiques inverses a été proposé. Pour gérer la complexité de cas industriels réalistes, des caractéristiques additionnelles ont été prises en considération. Ces critères sont par exemple la saisonnalité des retours de produits et la possibilité d'étendre la capacité des sites de travail de récupération. Les coûts environnementaux de la chaîne logistique inverse ont également été pris en compte lors des calculs en estimant les émissions de dioxyde de carbone dues au transport, et en ajoutant des pénalités pour chaque produit jeté en déchetterie.

Cette étude a été menée à un niveau régional ou national par exemple en Europe. Il serait judicieux d'investiguer ce que l'on nomme les chaînes logistiques globales pour lesquelles les fournisseurs et les consommateurs peuvent se trouver dans des continents différents. Explorer les solutions de transport multimodal serait le corollaire de cette étude qui permettrait d'aider à minimiser les coûts de transport pour de tels réseaux.

D'autres pistes de développements de ce travail seraient l'étude des aspects qualitatifs de la chaîne inverse pour la localisation des sites.

Enfin, des perspectives à cette étude sont de considérer la possibilité d'intégrer la chaîne inverse dans un réseau logistique en boucle fermée.

#### REFERENCES

- ADEME, 2011. *Bilan Carbone "Entreprises et Collectivités". Guide des facteurs d'émissions version 6.1.*, www.ademe.fr.
- Fleischmann, M., J. M. Bloemhof-Ruwaard, R.

Dekker, E. Van der Laan, J. A. E. E. Van Nunen, and L. N. Van Wassenhove, 1997. Quantitative models for reverse logistics: A review. *European Journal of Operational Research*, 103, p. 1-17.

Golinska, P. and A. Kawa, 2012. Recovery Network arrangements - the WEEE case. *Information Technologies in Environmental Engineering, Environmental Science and Engineering*, 3. DOI: 10.1007/978-3-642-19536-5\_45.

Gourdin, E. and O. Klopfenstein, 2008. Multi-period Capacitated Location with Modular Equipments. *Computers & Operations Research*, 35(3), p. 661-682.

Hinojosa, Y., J. Kalcsics, S. Nickel, J. Puerto, and S. Velten, 2008. Dynamic supply chain design with inventory. *Computers & Operations Research*, 35(8), p. 373-391.

Lu, Z. and N. Bostel, 2007. A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities. *Computers & Operations Research*, 34, p. 299-323.

Melo, M. T., S. Nickel and F. Saldanha-da-Gama, 2009. Facility location and supply chain management - A review. *European Journal of Operational Research*, 196, p. 401-412.

Min, H. and H. J. Ko, 2008. The dynamic design of a reverse logistics network from the perspective of third-party logistics service providers. *International Journal of Production Economics*, 113, p. 176-192.

Pokharel, S. and A. Mutha. Perspectives in reverse logistics: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 53, p. 175-182.

Rogers, D. S. and R. S. Tibben-Lemke, 1998. *Going backwards: reverse logistics trends and practices*. Center for Logistics Management, University of Nevada, Reno, Reverse Logistics Executive council.

Sadjady, H. and H. Davoudpour, 2012. Two-echelon, multi-commodity supply chain network design with mode selection, lead-times and inventory costs. *Computers & Operations Research*, 39, p. 1345-1354.

Schuh, G., T. Novoszel, and M. Maas, 2011. Rebound Logistics: An Integrative Reverse Supply Chain for Multiple Usage Products. *Advances in Sustainable Manufacturing: Proceedings of the 8th Global Conference on Sustainable Manufacturing*, G. Seliger et al. (eds.) DOI 10.1007/978-3-642-20183-7\_58.

Thanh, P. N., N. Bostel, and O. Peton, 2008. A dynamic model for facility location in the design of complex supply chains. *International Journal of Production Economics*, 113, p. 678-693.

Van Harmelen, T., R. Korenromp, C. Van Deutekom, T. Ligthart, S. Van Leeuwen, R. Van Gijlswijk, 2007. The price of toxicity. Methodology for the assessment of shadow prices for human toxicity, ecotoxicity and abiotic depletion. *EcoEfficiency in Industry and Science*, 22(1), p. 105-125. Quantified Eco-Efficiency: an Introduction with Application, G. Huppes and M. Ishikawa (Eds.)Springer Netherlands.

## ANNEXES

| Point de collection | Printemps    | Eté       | Automne | Hiver     |
|---------------------|--------------|-----------|---------|-----------|
| 1                   | [90,120]     | [120,160] | [60,80] | [180,240] |
| 2                   | [112.5,135]  | [150,180] | [75,90] | [225,270] |
| 3                   | [82.5,90]    | [110,120] | [55,60] | [165,180] |
| 4                   | [97.5,127.5] | [130,170] | [65,85] | [195,255] |
| 5                   | [37.5,60]    | [50,80]   | [25,40] | [75,120]  |
| 6                   | [97.5,127.5] | [130,170] | [65,85] | [195,255] |
| 7                   | [37.5,52.5]  | [50,70]   | [25,35] | [75,105]  |
| 8                   | [22.5,37.5]  | [30,50]   | [15,25] | [45,75]   |
| 9                   | [52.5,67.5]  | [70,90]   | [35,45] | [105,135] |
| 10                  | [15,30]      | [20,40]   | [10,20] | [30,60]   |
| 11                  | [67.5,82.5]  | [90,110]  | [45,55] | [135,165] |
| 12                  | [112.5,135]  | [150,180] | [75,90] | [225,270] |
| 13                  | [67.5,82.5]  | [90,110]  | [45,55] | [135,165] |
| 14                  | [52.5,67.5]  | [70,90]   | [35,45] | [105,135] |
| 15                  | [37.5,45]    | [50,60]   | [25,30] | [75,90]   |
| 16                  | [60,75]      | [80,100]  | [40,50] | [120,150] |

Tableau 1: Quantités de produits de classe  $P_1$  disponibles aux points de collection (à multiplier par 1000)

| Classe de produits | Volume en $m^3$ | Poids en kg | Quantité max Centres collect. | Marché second. Demande | Prix | Sous-traitant Coûts (Oper-ben) | Déchetterie Coûts (Oper+pen.) |
|--------------------|-----------------|-------------|-------------------------------|------------------------|------|--------------------------------|-------------------------------|
| $P_1$              | 0.8             | 25          | 26710000                      | 1000                   | 30   | 45                             | 10.2                          |
| $P_2$              | 1.3             | 33          | 3430000                       | 1000                   | 25   | 50                             | 12.3                          |
| $P_3$              | 0.6             | 35          | 1980000                       | 1000                   | 30   | 46                             | 14.4                          |

Tableau 2: Données aux marchés secondaires, sous-traitants, déchetteries(oper, ben et pen pour opérationnel, bénéfice et de pénalité)

| Classe de produits | Coûts Oper | Profit | temps Oper | Coûts $FO_{p,l}$ | Temps $WLO_{p,l}$ |
|--------------------|------------|--------|------------|------------------|-------------------|
| $P_1$              | 7          | 40     | 15         | 1200             | 1000              |
| $P_2$              | 8          | 50     | 23         | 2000             | 1500              |
| $P_3$              | 9          | 60     | 16         | 2500             | 2000              |

Tableau 3: Données aux centres de remanufacture