



CIRRELT

Centre interuniversitaire de recherche
sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport

Interuniversity Research Centre
on Enterprise Networks, Logistics and Transportation

Conception pour la logistique inverse : proposition d'un cahier des charges

Mhamed Abdessalem
Diane Riopel
Atidel Hadj-Alouane

Juillet 2007

CIRRELT-2007-26

Bureaux de Montréal :

Université de Montréal
C.P. 6128, succ. Centre-ville
Montréal (Québec)
Canada H3C 3J7
Téléphone : 514 343-7575
Télécopie : 514 343-7121

Bureaux de Québec :

Université Laval
Pavillon Palasis-Prince, local 2642
Québec (Québec)
Canada G1K 7P4
Téléphone : 418 656-2073
Télécopie : 418 656-2624

www.cirrelt.ca

Conception pour la logistique inverse : proposition d'un cahier des charges

Mhamed Abdessalem¹, Diane Riopel^{2,*}, Atidel Hadj-Alouane¹

1. Département de génie industriel, École Nationale d'Ingénieurs de Tunis, B.P. 37, 1002 Tunis, Belvédère, Tunisie
2. Département de mathématiques et de génie industriel, École Polytechnique de Montréal, C.P. 6079, succursale Centre-Ville, Montréal, Canada H3C 3A7 et Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport (CIRRELT), Université de Montréal, C.P. 6128, succursale Centre-ville, Montréal, Canada H3C 3J7

Résumé. L'objectif de ce travail est de développer un cahier des charges des produits de la logistique inverse. L'approche proposée se base sur la définition des critères à satisfaire par le produit en fin de cycle de vie relatif à chaque processus de traitement sélectionné (la réutilisation, la refabrication et le recyclage) et de préciser les critères globaux valables pour tout type de traitements et tenant compte du contexte général de l'entreprise et du marché. Plusieurs critères du cahier des charges sont à tenir compte dès l'étape de conception. Pour cela nous proposons une méthodologie de conception en cinq étapes favorisant la logistique inverse. Une application du cahier des charges sur deux cas de produit a été réalisée.

Mots-clés. Logistique inverse, cahier des charges, conception produit, refabriquer, recycler et réutiliser.

Remerciements. Nous tenons à remercier M. Serge Lambert et M. Yaovi Ouézou Azouma pour les échanges fructueux qui ont aidé à améliorer ce travail. Ce travail a été réalisé grâce au financement du ministère de l'enseignement supérieur de la recherche scientifique et de la technologie, Tunisie et du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CNRSG).

Les résultats et opinions contenus dans cette publication ne reflètent pas nécessairement la position du CIRRELT et n'engagent pas sa responsabilité.

Results and views expressed in this publication are the sole responsibility of the authors and do not necessarily reflect those of CIRRELT.

* Auteure correspondant: diane.riopel@polymtl.ca

1. Introduction

Durant ces dernières années, le consommateur demande de plus en plus des produits durables. Par contre, le développement technologique rapide ne fait qu'augmenter le besoin du consommateur qui cherche à avoir ces nouveautés ce qui réduit la durée de vie de la majorité des produits. Cela augmente la quantité et les quantités des produits hors usages à acheminer vers les sites d'enfouissement. Il est alors important de trouver des alternatives pour la disposition des produits à cause du taux élevé d'utilisation des sites d'enfouissement. De plus, la conscience vis-à-vis des problèmes environnementaux, et les règlements qui exercent des pressions sur les fabricants et les consommateurs les amènent à produire et à disposer des produits en tenant compte de l'environnement (Porter et Linde, 1995).

La réutilisation, la refabrication et le recyclage se présentent comme trois grandes options pour respecter les exigences législatives et environnementales. L'étape du traitement est une activité cruciale pour la réussite d'un programme de logistique inverse (LI). La figure 1 permet de positionner les traitements dans le processus de logistique inverse. Nous mentionnons que les traitements sont présentés selon un ordre de priorité.

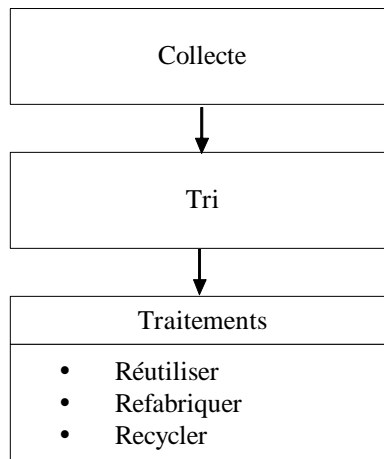


Figure 1. Positionnement des traitements dans la logistique inverse

La réutilisation des composants pour fabriquer des produits neufs permet de conserver les ressources naturelles (matières premières, énergie) et de diminuer la dégradation de l'environnement par la réduction des déchets et des émissions de gaz à effet de serre (Graedel et Alluby, 1995). Concernant le niveau économique, la réutilisation est justifiée par le fait que les composants réutilisés sont moins chers et parfois de meilleure performance. En effet, le

composant utilisé ne nécessite plus de période de rodage mais il y a un risque de réduction de la vie utile du produit. Le défi de demain est de créer, développer et produire des produits durables avec un impact mineur sur l'environnement (McCloskey, 1993). Notre travail s'inscrit dans ce contexte de développement durable en proposant un cahier des charges des produits de la logistique inverse; cela passe par la caractérisation des produits aptes à la réutilisation, à la refabrication et au recyclage.

L'objectif de ce papier est de favoriser l'expertise des produits en fin de cycle de vie destinés à la réutilisation, la refabrication et le recyclage afin de leur donner une nouvelle vie. Dans cette optique, nous développons un cahier des charges mentionnant les principales caractéristiques à satisfaire par le produit pour chaque catégorie des traitements sélectionnés. Ce papier est organisé comme suit : la section 2 présente une revue de la littérature sur la réutilisation, la refabrication et le recyclage. La section 3 décrit le cahier des charges développées pour les produits de la logistique inverse. Les caractéristiques relatives à chaque traitement considéré, ainsi que d'autres caractéristiques globales indépendantes du traitement, sont développées et analysées. La section 4 présente une méthodologie de conception favorisant la logistique inverse d'un produit. Deux études de cas sont proposées dans la section 5 pour valider le cahier des charges.

2. Revue de littérature

L'objectif d'un programme de la logistique inverse est de redonner une nouvelle vie aux produits usagés. Les activités de traitements : réutilisation, refabrication et recyclage présentent le cœur des activités de ce programme. Le produit passe par plusieurs étapes tout au long du cycle de sa vie, à sa fin de vie et à travers le traitement qu'il subit, il rejoint une étape antérieure. Par exemple, un produit recyclé dont on extrait de la matière première rejoint de nouveau le processus industriel à titre de matière première pour fabriquer le même produit ou un autre. La figure 2 présente le cycle de vie d'un produit en incorporant les traitements envisagés et illustre les possibilités de redémarrage.

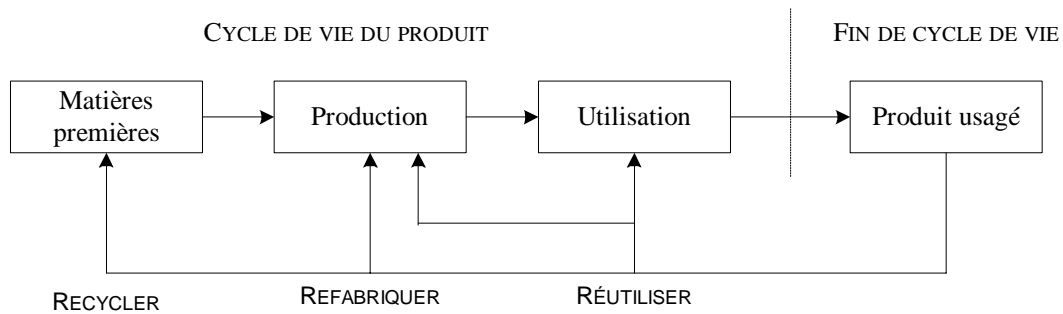


Figure 2. Cycle de vie du produit incorporant les traitements et possibilités de redémarrage

Nous présentons dans cette section, les travaux traitant les problématiques de réutilisation, de refabrication et de recyclage se rapportant essentiellement aux produits. Les cas des emballages et des métaux sont exclus. Cette revue permet d'extraire les principales caractéristiques relatives à chaque traitement ainsi que les caractéristiques globales pour réussir un programme de logistique inverse.

2.1. La réutilisation

Réutiliser un produit signifie que le produit est utilisé immédiatement dans le même contexte ou un autre, suite à une opération additionnelle mineure telle que le nettoyage, la maintenance. Réutiliser un produit peut aussi signifier la réutilisation des pièces qui le composent comme pièces de rechange. La littérature sur la réutilisation traite essentiellement de trois aspects : les emballages, le désassemblage produit en vue de sa réutilisation et de l'analyse du réseau logistique. Fleischman *et al.* (2003) intègrent le désassemblage comme une source régulière dans le planning d'approvisionnement des pièces de rechange (cas d'IBM). Ils mentionnent que la réalisation d'un gain dépend des coûts de la logistique inverse et que la gestion de l'information est une clé pour le succès d'un système logistique tenant compte de la réutilisation. Vincent *et al.* (2003) présentent un programme de valorisation de fauteuils roulants et montrent la nécessité d'améliorer le processus de valorisation sur le plan structurel, opérationnel, stratégique et systématique.

Duhaime *et al.* (2001) étudient le système de planning et de contrôle du stockage des monoteneurs réutilisables et mettent en évidence l'importance du processus de collecte pour la réussite d'un tel système. Goldsby et Closs (2000) utilisent la méthode ABC pour justifier la réutilisation des contenants de boisson. Ils montrent que les actions indépendantes des distributeurs et des détaillants pour améliorer les canaux inverses permettent de réduire

efficacement les quantités de déchets. Kroon et Vrijens (1995) développent un système logistique inverse pour la réutilisation de matériel d'emballage secondaire. Ils montrent que l'utilisation des contenants réutilisables n'est pas rentable à cause des coûts élevés et de l'investissement initial nécessaire.

2.2. La refabrication

Beaucoup de travaux sont effectués sur la refabrication. Ces travaux portent sur deux thèmes : l'intégration des contraintes de refabrication dans le processus de conception et les propriétés d'un produit facilement refabricable qui vont aider à déterminer un cahier des charges destiné aux produits aptes à la refabrication. Refabriquer est un processus de désassemblage des produits utilisés, d'inspection, de réparation / remplacement des composants et leur utilisation pour fabriquer un nouveau produit. Un produit est considéré refabriqué si ses composants proviennent d'un produit usagé. La refabrication est un outil environnemental et économique permettant d'atteindre plusieurs objectifs du développement durable (Guide et Jayraman, 2000a). Plusieurs entreprises se sont engagées dans ce processus. Nous citons par exemple Kodak avec son programme de refabrication des appareils photos numériques; IBM avec la refabrication des pièces d'ordinateurs et Siemens avec la refabrication des équipements médicaux. Guide et Jayraman (2000b) donnent un ensemble de facteurs qui influencent la gestion des opérations de refabrication. Ces facteurs sont les fréquences des retours, les quantités incertaines, l'équilibre entre la demande et les retours, le processus de désassemblage et de rétablissement incertain, le réseau de la logistique inverse, la restriction au niveau des matériaux, et les routes des véhicules.

Kerr et Wendy (2001) analysent un système de refabrication en suivant le cycle de vie du produit. Ils mentionnent que l'aptitude d'un produit à être refabriqué dépend de plusieurs facteurs : conception du produit, volume et conditions du retour, fréquence, transport, valeur du produit, et changement de la technologie. Quant à Sudin (2001), il se focalise sur la détermination des aspects techniques nécessaires pour avoir un processus de refabrication efficace en se basant sur un cas d'étude mené chez l'entreprise Electrolux en Suède. Il donne une description des propriétés essentielles pour un produit refabriqué en tenant compte des différentes étapes du processus de refabrication.

Amezquita *et al.* (1995) s'intéressent à la conception d'un produit en décrivant les critères qualitatifs et quantitatifs pour faciliter la refabrication. Parmi ces critères : le nettoyage,

l'inspection, le changement des pièces, l'assemblage, l'utilisation des composants réutilisables et la standardisation. Williams et Shu (2000), suite à une enquête, identifient un ensemble de facteurs (propriété de surface, pollution,...) qui permet à un produit d'être refabriqué tout en spécifiant les raisons qui encouragent à l'application de ces facteurs. Les facteurs sont groupés en trois catégories : processus de refabrication, environnement du travail, et conception produit. Bars et Hammond (1996) proposent un ensemble de principes pour la conception d'un produit refabriqué : facilité de désassemblage, de nettoyage, de contrôle, de remplacement, et d'assemblage. Ils établissent un certain nombre de métriques permettant de mesurer la valeur de refabrication d'un produit. Ces métriques sont appliquées sur plusieurs cas de l'industrie électronique et automobile. Shu et Flowers (1998) s'intéressent aux coûts en proposant un modèle pour estimer les coûts encourus pendant les phases du cycle de vie d'un produit refabriqué. Le modèle peut être utilisé pour comparer les différentes alternatives de conception. De plus, il permet de décrire le processus de rénovation des composants durant le processus de refabrication, et prend en compte le remplacement des composants.

2.3. Le recyclage

Le recyclage est un procédé adopté par un grand nombre d'entreprises pour respecter les législations environnementales. Il est vu comme la solution la plus facile à mettre en œuvre et en plus elle crée des valeurs économique et environnementale. La littérature s'intéressant au recyclage peut être classée selon trois catégories qui dépendent de la nature du produit : (1) déchet ménager, (2) emballage et (3) produit en fin de cycle de vie. Nous nous intéressons à la troisième catégorie. Parmi les produits et les matériaux dont le système de recyclage est traité nous citons :

- les photocopieuses : Krikke (1998);
- les ordinateurs : Knemeyer *et al.* (2002);
- les appareils photos : Nagel (1997);
- les pièces automobiles : Guide *et al.* (2003);
- le papier : Huttunen (1996).

Le recyclage consiste à collecter et désassembler un produit à la fin de son cycle de vie en vue de la récupération des matériaux. La valeur ajoutée des activités de recyclage est très minime. Realff *et al.* (2004) développent un système de production inverse pour les tapis à travers la formulation du problème en un programme linéaire à variables mixtes et multipériode et

proposent un modèle robuste qui tient compte de la performance du système à long terme. Krikke *et al.* (2003) conçoivent une chaîne logistique en tenant compte de la conception produit et du choix du traitement de remise en état (cas de réfrigérateurs) et proposent un programme linéaire à variables mixtes minimisant les coûts totaux. Ils analysent la robustesse du taux de retour et de la faisabilité des traitements de remise en état. Shih (2001) propose un modèle mathématique (un programme linéaire à variables mixtes) pour optimiser les coûts d'infrastructure et des flux relatifs au recyclage des appareils ménagers et d'ordinateurs à Taiwan en tenant compte des contraintes technologiques et environnementales. Istvan et Garamvolgyi (2000) ont établi les bases théoriques pour pouvoir recycler les produits électriques de la meilleure façon pour l'environnement. Ils proposent d'analyser le cycle de vie du produit afin de définir les stratégies de recyclage et de réutilisation des retours produits. Kleineidam *et al.* (2000) étudient les propriétés d'une chaîne logistique de production incluant le recyclage (cas du papier) en particulier la stabilité et la contrôlabilité. Ils ont recours à la théorie de contrôle pour analyser l'environnement dynamique du modèle. Wrigh *et al.* (1998) comparent le facteur environnemental dans la collecte et le recyclage des téléphones cellulaires par rapport aux bénéfices attendus. Nagurney et Toyasaki (2005) développent un modèle multi-échelle pour le recyclage des déchets électroniques et proposent une formulation en quatre sous-problèmes relatifs à chaque étape du système et déterminent les propriétés entre les flux de matières et le prix des déchets.

Nous avons remarqué l'absence des travaux génériques qui définissent les caractéristiques du produit qui peuvent faciliter son traitement en fin de son cycle de vie. Les travaux traitant cette problématique se basent seulement sur des études de cas relatif à un produit ou un secteur d'activité spécifique. En effet, pour réussir un programme de la LI le concepteur doit tenir compte du traitement souhaitable en fin d'usage dès l'étape de conception et cela passe par le choix du traitement approprié en fin d'usage du produit. Nous présentons un cahier des charges des produits de la logistique inverse où les caractéristiques relatives à chaque traitement considéré, ainsi que d'autres caractéristiques plus globale, sont développées et analysées.

3. Cahier des charges des produits de la logistique inverse

Par définition, un cahier des charges est un document visant à définir exhaustivement les spécifications de bases d'un produit à réaliser. Un cahier des charges d'un produit de la logistique inverse est un ensemble de caractéristiques permettant de déceler et exprimer le

besoin pour une meilleure stratégie de traitement en fin de cycle de vie. Certaines caractéristiques d'un cahier des charges d'un produit de la logistique inverse sont relatives à un traitement spécifique (refabrication, réutilisation, recyclage) et d'autres sont d'ordre global.

3.1. Caractéristiques des produits destinés à la réutilisation

Les caractéristiques d'un produit réutilisé dépendent énormément de son profil. La décision de réutiliser un produit doit être précédée par un diagnostic. Parmi les caractéristiques qui facilitent la réutilisation d'un produit nous en citons deux qui sont principales.

a) La facilité de séparation

La facilité de séparer les composants d'un produit est une caractéristique importante vu qu'elle offre la possibilité de réparer un produit et accéder facilement aux pièces défectueuses. Le concepteur doit tenir compte de ce paramètre au niveau de l'assemblage produit en offrant une facilité d'accéder aux différentes pièces. La réalisation de cette caractéristique passe par le bon choix des éléments de fixation utilisés et par le recours à des composants de séparation. Par exemple, pour le cas des ordinateurs de bureaux, l'entreprise Dell met en place des éléments de séparation entre le lecteur de disque, la carte mère et le bloc d'alimentation.

b) La standardisation

Un produit standardisé offre la possibilité d'extraire des pièces de rechange qui peuvent servir par la suite à réparer d'autres produits ou les intégrer dans la refabrication.

3.2. Caractéristiques des produits destinés à la refabrication

Suite à l'étude et l'analyse des travaux portant sur la refabrication, nous présentons dans cette partie des caractéristiques à satisfaire par un produit destiné à la refabrication.

a) La structure modulaire

Nous avons constaté que la conception d'un produit est un facteur dominant qui influence la décision vis-à-vis du traitement des produits en fin de cycle de vie. La conception en vue de désassemblage est une caractéristique d'importance majeure aussi bien que le coût, la fonctionnalité et la durabilité d'un produit. Un produit destiné à la refabrication doit mettre en priorité l'assemblage par groupe de fonctions et non pas selon la nature des matériaux. Un assemblage par groupe de fonction est réussi si l'obtention de chaque fonction avec un minimum de mécanismes et de matériaux est assurée. Cela permet d'extraire le maximum de groupes de pièces fonctionnelles et de diminuer le temps et le coût de désassemblage. La

consolidation des composants en modules permet de faciliter leur identification et réduit les étapes de désassemblage non nécessaires. Dans ce contexte, Veerakamolmal (1999) propose une technique qui permet d'analyser l'efficacité de la conception des produits électroniques. L'efficacité de la conception est mesurée par un indice de conception pour désassemblage (DfDI, Design for Disassembly Index).

b) La standardisation du produit

En plus de l'assemblage par groupe fonctionnel, le produit doit être standardisé et fabriqué avec des pièces interchangeables. Cela facilite le changement d'une pièce défectueuse par une pièce neuve sans faire des modifications sur le reste des pièces fonctionnelles.

c) La technologie de fabrication

Un autre critère qui caractérise les produits à refabriquer est d'ordre stratégique et se rapporte à la technologie utilisée pour les fabriquer. Le constructeur doit penser à ce que cette technologie puisse être utilisée pour une période plus longue que le cycle de vie du produit. Une telle caractéristique facilite la refabrication et diminue les coûts vu que le processus de refabrication est similaire à celui de la fabrication (processus maîtrisé).

d) Le besoin du marché

Une étude du besoin du marché que ce soit le marché principal ou secondaire, est nécessaire pour la réussite d'un programme de refabrication. L'entreprise doit s'assurer de la possibilité de vente du produit refabriqué.

3.3. Caractéristiques des produits destinés au recyclage

Le recyclage d'un produit se caractérise par la diversité que ce processus peut engendrer. Par exemple, le recyclage d'un ordinateur se ramène au recyclage du métal, du verre et du plastique.

a) L'assemblage du produit

L'opération d'assemblage du produit destiné au processus de recyclage à sa fin de cycle de vie est d'une grande importance vu le rôle qu'elle présente au niveau de réduction du temps et du coût de cette opération. Le produit doit être conçu en tenant compte de la nature des matériaux qui le compose. De plus, le concepteur doit avoir recours à des solutions techniques démontables en évitant par exemple le soudage et les ajustements incertains.

b) La nature des matériaux

Un produit apte au recyclage doit être fabriqué à partir de matériaux recyclables capables de réintégrer le processus industriel, tels que le plastique, le verre et les métaux. Le nombre de variétés des matériaux influence l'efficacité du processus de recyclage. Un produit fabriqué avec un nombre limité de matériaux permet de réduire les coûts logistiques, les coûts de stockage et de traitement.

c) La réduction du nombre de matériaux

La réduction du nombre de matériaux joue un rôle important au niveau de la réduction du temps et du coût de désassemblage, ainsi que du tri des produits recyclables. Le minimum de matériaux implique le minimum de procédés de traitement vu que chaque matériau récupéré a ses propres procédés de recyclage.

d) Les normes environnementales

Le respect des normes environnementales en vigueur relatives au recyclage de certains produits doit être vérifié avant de procéder au traitement de recyclage. Cette vérification doit être faite surtout pour les produits dangereux ou nuisibles à la santé. A titre indicatif, nous citons la norme générale européenne (1994) sur la dioxine dans les incinérateurs de déchets spéciaux qui réglemente le taux de dégagement à $0,1 \text{ ng/m}^3$.

3.4. Caractéristiques opérationnelles ou organisationnelles

Les caractéristiques opérationnelles ou organisationnelles du cahier des charges sont l'ensemble de critères à satisfaire pour mieux réussir la logistique inverse du produit, ces caractéristiques sont indispensables quelque soit le traitement.

a) Le retrait du produit

Pour faciliter la gestion du produit en fin de cycle de vie qui inclut les tâches suivantes : collecte, tri et traitement; il faut mettre en place un système d'information capable de récupérer facilement le produit et le réintégrer de nouveau dans un autre cycle de vie.

b) La qualité

La mise en place des points d'inspection de la qualité facilite le contrôle de la qualité et par la suite le processus de traitement en fin de cycle de vie qui nécessite des interventions au niveau des pièces qui ne satisfont pas les critères de qualité.

c) La quantité

La quantité des produits à acheminer vers les différents processus de la logistique inverse est un élément clé pour la réussite de cette stratégie. Cela permet de réaliser des économies d'échelle et par la suite la réduction des coûts.

d) La testabilité du produit

La prise en compte du critère de testabilité dès la conception produit facilite le diagnostic et la prise de décision pour le choix de traitement le plus bénéfique pour l'entreprise dans un temps minimum. Cela se réalise par la proposition des techniques bien définies permettant de préciser les procédures adaptées pour mener les tests. Il peut s'agir de vérifier la continuité électrique des composants employés par le système, c'est à dire détecter les courts circuits ou les circuits ouverts/déconnectés. Ces diagnostics électriques se font en surveillant les tensions et courants aux bornes des équipements considérés : un défaut est détecté lorsque la valeur surveillée dépasse les bornes connues de la plage de fonctionnement normale.

3.5. Synthèse de critères pour produits de la logistique

La majorité des caractéristiques favorables au processus de la logistique inverse sont à tenir compte dès l'étape de conception du produit. Il existe d'autres caractéristiques qui dépendent de l'environnement de l'entreprise comme l'infrastructure logistique de l'entreprise et le besoin du marché. Nous présentons au tableau 1, un récapitulatif des différentes caractéristiques traitées dans le cahier des charges. Une classification du type de caractéristique selon la nature du traitement est proposée et nous mentionnons les caractéristiques à prendre en compte à l'étape de conception du produit.

Tableau 1. Synthèse de critères pour les produits de la logistique

Caractéristiques	Réutiliser	Refabriquer	Recycler	Conception
Consolidation des composants par fonction.		✓		✓
Assemblage selon la nature des matériaux.			✓	✓
Standardisation.	✓	✓		✓
Recours à des liaisons complètes démontables sans détérioration.	✓	✓		✓
Facilité d'accès aux pièces.	✓	✓		✓
Technologie de fabrication pour refabriquer le produit.		✓		✓
Type des matériaux utilisés.			✓	✓
Réduction de l'utilisation des matières dangereuses.			✓	✓
Retrait et collecte du produit.	✓	✓	✓	✓
Proposition des techniques de testabilité du produit.	✓	✓	✓	✓
Mise en place des points d'inspection de la qualité.	✓	✓	✓	✓
Quantité suffisante acheminée vers le processus de LI	✓	✓	✓	
Besoin du marché.		✓		

Nous remarquons à partir du tableau de synthèse que la conception d'un produit occupe un rôle important permettant de faciliter la logistique inverse d'un produit pour les différents traitements sélectionnés. Dans la section suivante, nous proposons une méthodologie qui permet au concepteur de tenir compte des caractéristiques relatives à la conception pour une meilleure stratégie de traitement en fin du cycle de vie du produit.

4. Méthodologie de conception de produit pour la logistique inverse

Plusieurs caractéristiques du cahier des charges de la logistique inverse sont à tenir compte dès l'étape de conception. Le travail du concepteur doit tenir compte de la fin du cycle de vie du produit par l'intégration des caractéristiques techniques favorisant les traitements. L'étude du processus de fabrication et du processus de traitement est d'une importance majeure afin de pouvoir proposer des modifications techniques favorables tout au long du cycle de vie du produit et en sa fin de vie. La figure 3 présente la méthodologie proposée.

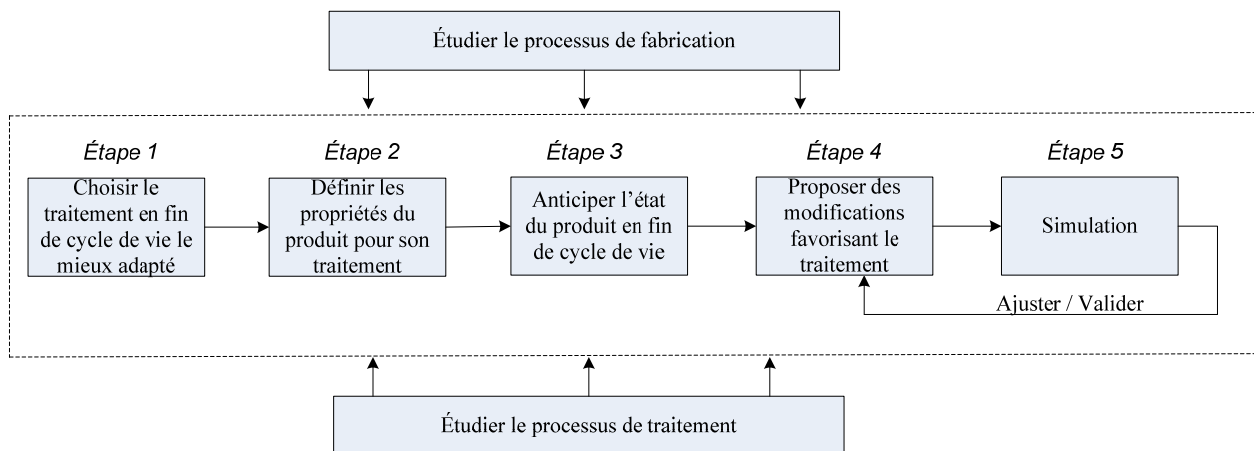


Figure 3. Méthodologie de conception de produit pour la logistique inverse

Après l'étude du processus de fabrication et les processus de traitement possibles qui vont permettre de respecter les contraintes techniques, vient l'étape 1 où le concepteur doit choisir le traitement en fin de cycle de vie le mieux adapté pour le produit en question. Le choix entre la réutilisation, la refabrication et le recyclage dès l'étape de conception va orienter le concepteur à des solutions plus favorables destinées à un traitement spécifique. Une attention plus réfléchie portée au choix de matériaux (biodégradables, intégration de matériaux recyclables, réduction des matières dangereuses), la modularité, la durabilité, et la traçabilité. Le critère économique est d'une grande importance dans le choix du traitement en fin de cycle de vie. Pour cela, l'entreprise doit sélectionner l'option qui procure le plus de valeur.

L'étape 2 de cette méthodologie consiste à définir les propriétés du produit après son traitement. Ceci permet de fixer les objectifs à atteindre afin de mettre en œuvre les moyens nécessaires et en tenir compte dès la conception. Par exemple, pour le traitement de recyclage,

la définition d'un taux de pureté des matériaux à extraire à la fin du cycle de vie aide le concepteur à choisir la nature des matériaux et les techniques d'assemblage des pièces.

L'étape 3 consiste à anticiper l'état d'un produit en fin de son cycle de vie et réaliser un profil tenant compte des critères techniques (nombre de pièces fonctionnelles, âge du produit...) et des critères du milieu d'usage du produit (marché, législation...).

L'étape 4 est l'étape principale où intervient essentiellement le travail du concepteur à travers la proposition des modifications techniques favorisant les traitements en fin de cycle de vie. Le concepteur peut se baser sur des cas de produits dont le traitement a déjà réussi en faisant un travail d'analogie.

L'étape 5 est celle de la simulation afin d'évaluer l'impact des modifications proposées à l'étape 4 en étudiant le fonctionnement et la performance du produit reconçu. Il faut souligner que les éventuels changements ou la validation des modifications dépendent des résultats de cette simulation.

5. Validation du cahier des charges

Nous proposons deux cas de produits dans différents secteurs afin de valider notre cahier des charges. Le choix s'est porté sur un ordinateur et un matériel agricole.

La démarche de validation est comme suit :

- Rechercher des dossiers de fabrication.
- Décomposer chaque produit en modules ou mécanismes, sous-ensembles, et composants.
- Appliquer le cahier des charges à chaque produit.
- Analyser et discuter les résultats.

Le choix de ces produits se base sur la diversité du domaine du produit afin de pouvoir valider notre cahier des charges d'une façon globale non restreinte à des produits spécifiques.

5.1. Cas d'un ordinateur

a) Décomposition du produit

Un ordinateur est un ensemble de composants modulaires, il est constitué essentiellement d'une unité centrale et ses périphériques (écran, clavier, souris...).

Les éléments constitutifs de l'unité centrale sont:

- Le boîtier : châssis métallique accueillant les éléments internes de l'ordinateur. La plupart du temps il est fourni avec son alimentation électrique.

- La carte mère est le socle permettant la connexion de l'ensemble des éléments essentiels de l'ordinateur tels que carte son, carte graphique, carte réseau, contrôleurs... (figure 4).
- Le processeur, circuit intégré principal de l'ordinateur, véritable cerveau de l'ordinateur chargé des principaux calculs.
- Les barrettes de mémoire vive.
- Les périphériques de stockage tels que les disques durs, les lecteurs ou graveurs de CD-ROM et DVD-ROM, ainsi que le lecteur de disquettes.

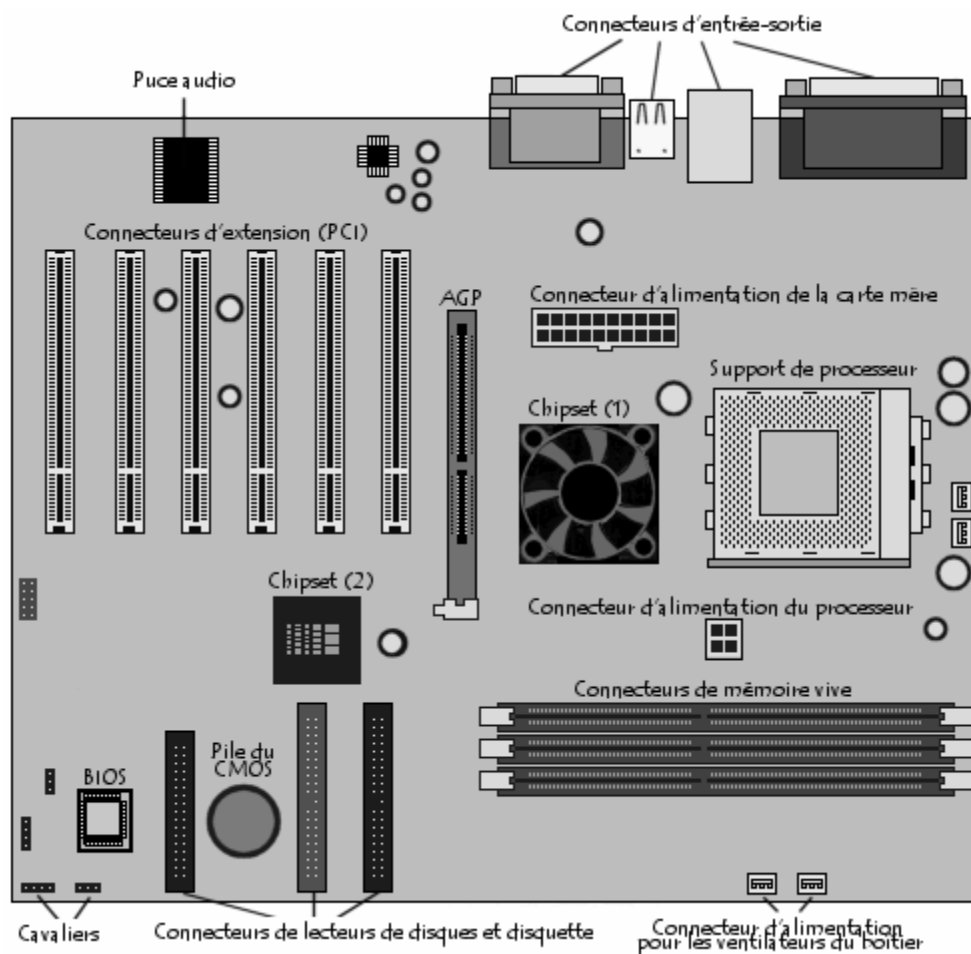



Figure 4. Carte mère d'un ordinateur

b) Application du cahier des charges et discussion des résultats

Caractéristiques	Observations
Consolidation des composants par fonction.	Cette caractéristique est respectée vue que les composants d'un PC sont modulaires ce qui facilite la réutilisation des composants.
Standardisation.	La standardisation des composants existe dans certains composants (modem, RAM) mais pour d'autres, ils sont spécifiques à un fabricant. On distingue les disques durs où les connecteurs varient, les processeurs où le nombre de broches peut varier. Nous mentionnons également la non compatibilité des logiciels
Recours à des liaisons complètes démontables sans détérioration.	Les liaisons complètes ne sont pas utilisées entre les modules du PC mais il y a des pièces fragiles dont l'extraction est très délicate. La majorité des composants dans une carte mère ne sont pas récupérables. En somme, cette caractéristique est vérifiée; ce qui favorise davantage la réutilisation des composants.
Facilité d'accès aux pièces.	Les composants d'un PC sont montés par des vis ou des entretoises, cela facilite leur séparation. Un autre point favorisant la réutilisation ou la refabrication est la facilité d'accès aux différentes pièces.
Technologie de fabrication pour refabriquer le produit.	L'évolution rapide de la technologie dans le domaine de l'informatique ne favorise pas la refabrication des composants; d'où l'orientation vers la récupération des matériaux.
Type des matériaux utilisés.	Un grand nombre de matériaux utilisés dans la fabrication d'un PC : des matières qui ont une valeur commerciale (l'aluminium, l'acier, le cuivre) et des métaux précieux (or, palladium, platine et argent). Ceci complique davantage les procédés de recyclage.
Réduction de l'utilisation des matières dangereuses.	Diminution de l'utilisation des matières dangereuses (PVC, mercure, plomb, cadmium), mais elles restent présentes dans certains composants (les condensateurs).
Retrait et collecte du produit.	L'existence d'un symbole sur l'emballage des ordinateurs qui indique que ce produit ne doit pas être jeté avec les ordures ménagères. Il faut plutôt s'en débarrasser en les apportant à un point de collecte désigné. Nous mentionnons la non existence de l'information sur le produit pour informer sur la procédure de disposition. 
Proposition des techniques de testabilité du produit.	A part les moyens existants de testabilité technique pour vérifier le fonctionnement des composants (appareils électroniques), il existe des moyens logiciels pour vérifier l'état d'un composant tel que le logiciel BurnIntest (www.passmark.com) qui permet de tester le bon fonctionnement de tous les composants du PC.
Mise en place des points d'inspection de la qualité.	Les techniques offertes pour tester la qualité du matériel sont généralement à travers le Bios. Nous citons la surveillance du CPU, la vitesse du disque dur, et la transmission de données.
Quantité suffisante acheminée vers le processus de LI	Environnement Canada (http://science.sv.qc.ca/dossiers/recycler.htm) estime la quantité des déchets provenant des ordinateurs personnels pour l'année 2005 à 23349 tonnes dont 60,5% sont acheminées au processus de la LI.
Besoin du marché.	Marché secondaire, organisme de charité.

5.2. Cas d'une charrue à traction animale

a) Décomposition du produit

Après avoir étudié un produit de haute technologie (ordinateur), nous nous intéressons à étudier un produit agricole : charrue à traction animale utilisée pour de faible superficie dans les pays non-industrialisés.

La figure 5 permet d'identifier les différents éléments de la charrue.

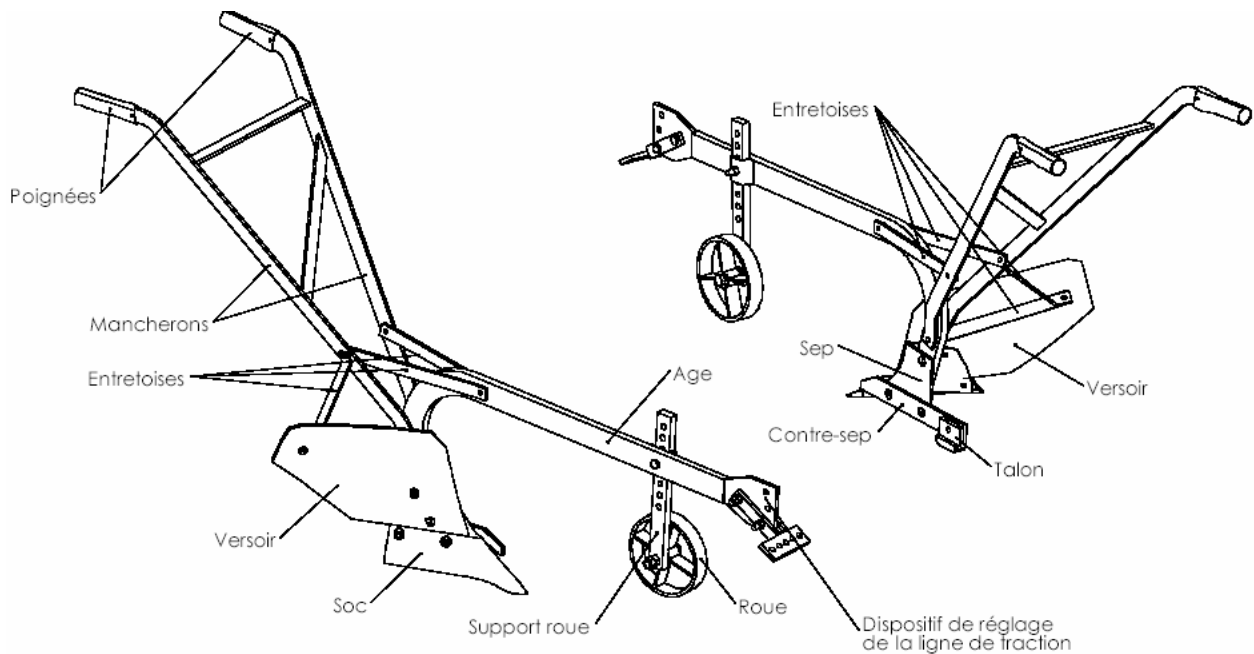


Figure 5. Identification des différents éléments de la charrue (www.isf.iai.be)

- Le soc : la fonction du soc est de trancher la terre; c'est lui qui amorce le sillon. Il s'agit d'une pièce fortement soumise à l'usure. Il est fabriqué avec de l'acier à ressort manganosiliceux et assemblé avec le reste des éléments avec des vis à tête plate.
- Le versoir : c'est la pièce de la charrue qui retourne sur le côté la terre tranchée par le soc. Il est fabriqué en tôle d'acier ordinaire ou d'acier légèrement enrichi avec le carbone. Il est fixé sur le soc avec des vis à tête plate.
- L'âge : c'est la pièce qui relie le reste de la charrue avec l'animal. Elle est fabriquée avec un acier mi-dur.

- La roue : c'est un élément de stabilisation qui permet de diminuer beaucoup d'efforts à l'agriculteur en absorbant une grande partie des oscillations dues à la non homogénéité des sols. Le pied de la roue est en acier mi-dur, l'axe est en acier dur et la roue est en acier doux.
- Le sep : c'est la partie centrale de la charrue, où viennent se fixer les autres pièces principales (âge, versoir, soc, contre sep). Il est réalisé avec un acier ordinaire.
- Le contre sep : il permet la stabilisation de la charrue en soutenant le talon. Il est fabriqué avec un acier ordinaire.
- Le talon : il assure la stabilité longitudinale de la charrue, fabriqué en fonte afin de résister à l'usure.
- Les mancherons et entretoises : les mancherons permettent à l'agriculteur de maintenir la charrue pour assurer la stabilité. Les entretoises permettent d'assurer la rigidité de l'ensemble de la charrue. Ces pièces sont fabriquées à partir d'un acier standard.

b) Application du cahier des charges et discussion des résultats

Caractéristiques	Observations
Consolidation des composants par fonction.	Cette condition est respectée par la charrue à traction animale vu le nombre restreint de fonctions qui se limite au sillon de la terre. Cela favorise la refabrication et la réutilisation des composants.
Standardisation.	Les composants de la charrue ne sont pas standard mais ils sont produits localement avec des techniques abordables; ce qui augmente la possibilité de trouver des pièces de rechange.
Recours à des liaisons complètes démontables sans détérioration.	Toutes les pièces de la charrue sont démontables, les liaisons sont assurées par des vis. Cela favorise la refabrication et la réutilisation.
Facilité d'accès aux pièces.	Les composants de la charrue sont accessibles facilement ce qui facilite toute intervention (réparation, refabrication).
Technologie de fabrication pour refabriquer le produit.	La technologie de fabrication de la charrue est très simplifiée, elle est adaptée à un environnement non industrialisé et ne demande pas de matériels sophistiqués (atelier de forgeron). Cela favorise la refabrication des composants.
Type et nombre de matériaux utilisés.	Les matériaux utilisés pour la fabrication de la charrue sont essentiellement de l'acier avec différents alliages; ce qui facilite le recyclage du produit vu le nombre limité de matériaux et le procédé maîtrisé de recyclage des aciers.
Réduction de l'utilisation des matières dangereuses.	La charrue ne contient pas de matières dangereuses.
Retrait et collecte du produit.	Sans objet

Proposition des techniques de testabilité du produit.	Sans objet
Mise en place des points d'inspection de la qualité.	Sans objet
Quantité suffisante acheminée vers le processus de LI	Sans objet
Besoin du marché.	Sans objet

5.3 Discussion et analyse des résultats

L'application du cahier des charges sur deux cas de produits dans des domaines variés a permis d'affirmer le caractère général des caractéristiques proposées. De plus, l'utilisation du cahier de charge permet de valider ou de modifier le choix du concepteur en s'apercevant l'importance et l'impact de chaque caractéristique sur la fin de vie du produit. Ainsi, le concepteur peut donner plus d'importance sur certaines caractéristiques qui facilitent la LI du produit. Par exemple, pour le cas de la charrue où le traitement le mieux adéquat en fin de vie est la réutilisation, donner plus d'importance au critère « recours à des liaisons complètes démontables sans détérioration » facilite davantage sa LI.

6. Conclusion

La contribution majeure de notre travail consiste à renseigner à la fois les concepteurs et les décideurs sur les caractéristiques d'un produit destiné à la logistique inverse. Ce travail permet d'aider un concepteur à clarifier les objectifs et les besoins pour un produit en fin du cycle de vie. D'autre part, il permet à un décideur de mieux identifier le traitement adéquat pour un produit en fin de son cycle de vie en analysant les caractéristiques nécessaires à la refabrication, recyclage et réutilisation. Notre proposition de cahier des charges est élaborée essentiellement pour la phase de fin de vie d'un produit et non pas tout au long de son cycle de vie. Elle montre aussi que les processus sélectionnés (réutiliser, refabriquer et recycler), dans un contexte de développement durable, sont à la fois guidés par des aspects : économique, environnemental et social. Le cahier des charges développé se base principalement sur deux axes : les caractéristiques spécifiques à chaque processus de traitement regroupant des propriétés techniques et respectant à la fois des contraintes économique et environnemental; et des caractéristiques globales incluant des propriétés techniques et d'autres relatives au contexte

général de l'entreprise et du marché. Le cahier des charges montre que la conception du produit est une étape cruciale pour définir les caractéristiques d'un produit destiné à la logistique inverse. Une méthodologie en cinq étapes est proposée afin de faciliter l'intégration de ces caractéristiques dès l'étape de conception et d'améliorer par la suite la logistique inverse d'un produit. La validation du cahier des charges à travers deux cas de produits a mis en évidence son caractère général et a permis de faciliter la compréhension des critères proposés pour un éventuel usage par un concepteur produit. Nous proposons comme future direction de ce travail le développement d'un outil d'aide à la décision pour le produit de la logistique inverse partant de l'analyse des caractéristiques du produit en fin de cycle de vie et aboutissant à la clarification du traitement le mieux approprié.

Références bibliographiques

Amezquita H., Bras B., Hammond R., Salzar M., (1995) «Characterizing the remanufacturability of engineering systems», *Proceedings 1995 ASME Advances in Design Automation Conference*, Boston, Massachusetts, vol.82, p. 271-278, Septembre 17-20 1995.

Brass B., Hammond R., (1996) «Design for remanufacturing Metrics», *Proceeding of the 1st international workshop on reuse*, Eindhoven, The Netherlands, p. 5-22, November 11-13 1996.

Duhaime R., Riopel D., Langevin A., (2001) «Value analysis and optimisation of reusable containers at Canada post», *Interfaces*, vol. 31, n° 3, part 1/2, p. 3-15.

Fleischmann M., van Nunen Jo., (2003) «Integrated closed-loop supply chains and spare-parts management at IBM», *Interfaces*, vol. 33, n° 6, p. 44-56.

Goldsby T., Closs D., (2000) «Using activity-based costing to reengineer the reverse logistics channel», *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 30, n° 6, p. 500-514.

Gradel T., Allemby B., Comrie P., (1995) «Matrix approaches to abridged life cycle assessment », *Environmental Science & Technology*, vol. 29, n° 3, p. 134-139.

Guide J., Jayaraman V., Linton J., (2003) «Building contingency planning from closed loop supply chains with product recovery», *Journal of Operations Management*, vol. 21, n° 3, p. 259-279.

Guide V., Jayaraman V., (2000a) «Product acquisition management: Current industry practice and a proposed framework», *International Journal of Production Research*, vol. 38, n° 16, p. 3779-3800.

Guide V., Jayaraman V., (2000b) «Supply chain management incorporating reverse logistics», *Research paper series*, APICS, Alexandria, VA, USA.

Huttunen A., (1996) «The finish solution for controlling the recovered paper flows», *Proceedings of the first international seminar on reuse*, Eindhoven, The Netherlands, p. 177-187, Novembre 11-13 1996.

Istevan Z., Garmvolgyi E., (2000) «Reverse logistics and management of end-of-life electric products», *International symposium on electronics and the environment, 2000*, p. 15-19.

Kerr W., Ryan C., (2001) «Eco-efficiency gains from remanufacturing: a case study of photocopier remanufacturing at Fuji Xerox Australia», *Journal of Cleaner Production*, vol. 9, n° 1, p. 75-81.

Kleineidam U., Lambert A., Blansjaar J., Kok J., (2000) «Optimizing product recycling chains by control theory», *International Journal of Production Economics*, vol. 66, n° 2, p. 185-195.

Knemeyer A., Ponzurick T., Logar C., (2002) «A qualitative examination of factors affecting reverse logistics systems for end-of-life computers», *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 32, n° 6, p. 455-479.

Krikke H., (1998) «Recovery strategies and reverse logistics network design », *Ph.D. dissertation, University of Twente, Eindhoven, The Netherlands*.

Krikke H., Ammons J., Newton D., (2004) «Concurrent product and closed-loop supply chain design with an application to refrigerators», *International Journal of Production Research*, vol. 41, n° 16, p. 3689-3719.

Kroon L., Vrijens G., (1995) «Returnable containers: an example of reverse logistics», *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 25 n° 2, p. 56-68.

McCloskey J., Smith D., Graves B., (1993) «Exploring the green sell: marketing implication of the environmental movement, business and the environment: implications of the new environmentalism», *Paul Chapman Publishing*, p. 84-97.

Nagel C., (1997) «Single-use cameras within a multi-use concept», *IEEE*, p. 69-72.

Nagurney A., Toyasaki F., (2005) «Reverse supply chain management and electronic waste recycling: a multitiered network equilibrium framework for e-cycling», *Transportation Research Part E*, vol. 41, p. 1-28.

Ontiveros M., Zwolinski P., Brissand D., (2006) «Integrated design of remanufacturable products based on product profiles», *Journal of Cleaner Production* (in press), p. 1-13

Porter M., Linde E., Class V., (1995) « Green and Competitive: ending the stalemate », *Havard Business Review*, September-October, p.120-134.

Realf M., Ammons J., Newton D., (2004) «Robust reverse production system design for carpet recycling», *IIE Transactions*, Vol. 36, n° 8, p. 767-776.

Shih L., (2001) «Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan», *Resources Conservation and Recycling*, vol. 32 n° 1, p. 55-72.

Shu L., Flowers W., (1995) «Considering remanufacture and other end-of-life options in selection of fastening and joining methods», *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, Edinburgh, Scotland, p.75-80.

Veerakamalmal P., Gupta S., (1999) «Analysis of design efficiency for the disassembly of modular electronic product», *Journal of electronic manufacturing*.

Vincent C., Routhier F., Guérette C., (2003) «Evaluation d'un programme de recyclage de fauteuils roulants », *Canadian Journal of Occupational Therapy*, Pre-release 2003.

Williams J., Shu L., (2000) «Analysis of toner-cartridge remanufacture waste stream», *Proceedings of the IEEE international symposium on electronics and the environment*, San Francisco, CA, USA, p. 260-5, Mai 8-10 2000.

Wright L., McLaren J., Jackson T., Parkinson S., (1998) «Mobile phone take-back and recycling: analysis of the ECTEL project», *International symposium on electronics and the environment*, p. 54-59.