

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université de Tlemcen  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique et Electronique

Thèse de Doctorat En Sciences en Productique

Intitulée :

# **Modélisation et Simulation d'Une Chaîne Logistique Inverse en Tenant Compte de La Robustesse**

Présentée le : 04 *Décembre* 2013

Par :

**Mohammed BENNEKROUF**

Devant le Jury :

**Président :**

Mohammed Amine CHIKH      Professeur      Université de Tlemcen, Algérie

**Examineurs :**

Farouk YALAOUI      Professeur      Université de Technologie de Troyes, France  
Yasmina KERBOUA-ZIARI      Maître de Conférences      Université des sciences et de la technologie  
Houari-Boumediene, Algérie

**Encadreur :**

Zaki SARI      Professeur      Université de Tlemcen, Algérie

# Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au sein du Laboratoire de Productique (MELT) du département de Génie Electrique de la Faculté Technologie de l'Université de Tlemcen.

J'adresse naturellement des remerciements tout particuliers à Mr SARI Zaki qui m'a accueilli dans laboratoire de productique. Ses grandes qualités scientifiques et humaines ont permis que ce travail puisse avancer rigoureusement, dans un esprit toujours amical. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de mon profond respect et de ma reconnaissance.

Je tiens à remercier profondément Monsieur Mohammed Amine CHIKH, Professeur à l'université de Tlemcen, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ma thèse.

J'exprime également ma profonde gratitude à tous les membres du jury qui ont accepté de juger ce Travail. A Monsieur, Farouk YALAOUI, Professeur à l'Université de Troyes (France) pour sa disponibilité et d'avoir eu l'amabilité d'examiner ce travail malgré ses préoccupations intenses. Egalement, à Madame Yasmina KERBOUA-ZIARI Maître de Conférences à l'université Houari Boumediène d'Alger, pour sa grande sympathie et pour avoir bien voulu expertiser cette thèse.

Un grand merci à tous mes collègues du Laboratoire de Productique et à tous mes amis. Aussi, en particulier Dr Wassila MTALAA chercheuse du rang senior au CRP de Luxembourg et Dr Neki Abdelkader maitres de conférences à l'université de Sergy Pantoise, qu'ils trouvent l'expression mon profond respect pour leurs précieuses collaborations

Enfin, je remercie du fond du cœur toute ma famille pour son appui durant toutes ces années.

## **TABLE DES MATIÈRES**

<b>Introduction générale</b>	<b>6</b>
<b>Chapitre I : Contextes, enjeux et définition des chaînes logistiques inverses</b>	<b>9</b>
Contexte et motivation	9
I-1 Définition de la chaîne logistique inverse	11
I-2 Complexité de la mise en place de la logistique inverse dans le système logistique	13
I-3 Quelques facteurs de motivation pour la mise en place de la chaîne logistique inverse	15
I-4 structure de la chaîne logistique inverse	16
I-5 Principaux processus impliqués dans la stratégie de récupération	19
I-6 Planification d'une chaîne logistique inverse	21
Conclusion	24
<b>Chapitre II : Revue de littérature (état de l'art) sur les problèmes de conception et pilotage des chaînes logistiques</b>	<b>25</b>
Introduction	25
II-1 Problèmes de conception de la chaîne directe	26
II-1-1 Cas déterministe	26
II-1-2 Cas dynamique	27
II-1-2 Cas stochastique	28
II-2 Problèmes de conception et pilotage de la chaîne logistique inverse	28
II-2-1 Cas déterministe	29
II-2-2 Cas dynamique	31
II-2-2 Cas stochastique	31
II-2-3 Analyses et critiques	32
II-3 Problèmes de conception de chaîne logistique globale (directe et inverse)	33
II-3-1 Cas déterministe	33
II-3-2 Cas dynamique	34
II-3-2 Cas stochastique	36
II-3-3 Analyses et critiques	42
II-4 Ensemble de tableaux résumant les indices descriptifs des travaux dédiés aux problèmes de Conception et pilotage des chaînes logistiques inverses et globales	43
Conclusion	49
<b>Chapitre III : Présentation d'approches de modélisation mathématique en entier mixte pour la conception et le pilotage de chaînes logistiques inverses et fermées</b>	<b>51</b>
Introduction	51
III-1 Problème de conception et pilotage d'une chaîne inverse CPCLII	52
III-1-1 Définition du problème de CPCLII	52
III-1-2 Présentation mathématique du modèle CPCLII	54
III-2 Problème de conception et pilotage d'une chaîne inverse CPCLI2:	61
III-2-1 Description du problème CPCLI2	61
III-2-2 formulation mathématique du modèle CPCLI2	62
III-3 Problème de conception et pilotage d'une chaîne logistique intégrale	70

<i>CPCLB</i>	
<i>III-3-1 Description du problème CPCLB</i>	<b>70</b>
<i>III-3-2 Formulation mathématique du problème CPCLB</i>	<b>73</b>
<i>Conclusion</i>	<b>80</b>
<b><i>Chapitre IV : Exemples numériques pour la validation des modèles CPCL1, CPCL2 et CPCLB</i></b>	<b>81</b>
<i>Introduction</i>	<b>81</b>
<i>IV-1 Démarche de résolution du problème de conception et pilotage CPLI1</i>	<b>81</b>
<i>IV-1-1 Génération des données d'entrée</i>	<b>83</b>
<i>IV-1-2 Analyse des résultats de variables de décisions binaires de localisation</i>	<b>86</b>
<i>IV-1-3 Résultats de localisation et allocation du modèle CPLI1</i>	<b>86</b>
<i>IV-2 Démarche de résolution du problème de conception et pilotage CPLI2</i>	<b>92</b>
<i>IV-2-1 Génération des données d'entrés du modèle CPLI2</i>	<b>93</b>
<i>IV-2-1 Résultats de localisation et allocation du modèle CPLI2</i>	<b>94</b>
<i>IV-3 Démarche de résolution du problème de conception et pilotage CPLIB</i>	<b>99</b>
<i>IV-3-1 Génération des données d'entrée du problème CPCLB</i>	<b>100</b>
<i>IV-3-2 Résultats de localisation et allocation du modèle CPCLB</i>	<b>101</b>
<i>Conclusion</i>	<b>104</b>
<b><i>Conclusion et perspectives</i></b>	<b>105</b>
<b><i>Références bibliographiques</i></b>	<b>107</b>

# Introduction générale

Si 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. Leurs activités de récupération incluent la réutilisation, la réparation, la remise à neuf, la refabrication et le recyclage, qui doivent s'opérer dans des sites spécifiques qui sont de deux types différents : 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). Dans ce contexte, la conception des réseaux inverses nécessite la définition adéquate des axes de transport pour les flux de 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 terme de quantité mais aussi en terme de qualité. Dans la plupart des études pratiques dédiées à la logistique inverse, les systèmes de reprise ont pour but le recyclage de matières premières ou la récupération d'énergie.

Le but de cette thèse est de proposer des modèles génériques complets pour une conception verte de réseaux logistiques inverses et fermées impliquant le retraitement des produits retournés. Les modèles proposés sont dynamiques et prennent en compte la saisonnalité et l'incertitude des retours de produits à la fin de leurs utilisations. Les contraintes de capacité au niveau de toutes les entités qui forment le réseau de récupération sont inévitables pour éviter toutes les sous estimations malgré la complication du problème lors de la modélisation et l'optimisation. Afin d'assurer un fonctionnement optimal et continu sans rupture ou fermeture saisonnière des centres de refabrication, le traitement repartit sur des saisons de plusieurs classes de produits de faible quantité est le plus adéquat. L'objectif de concevoir une chaîne logistique inverse plus robuste et proche de la réalité, nous a mené au cours de cette thèse à étudier et intégrer plusieurs problématiques. Avant toute étude de réalisation d'un tel réseau industriel, la stratégie de localisation d'un site est irremplaçable dans un horizon de temps court. C'est ainsi que les localisations définitives des centres intermédiaires de récupération offrent plus de stabilité et de durabilité, par le fait du maintien permanent du personnel qualifié tout en entraînant un meilleur cadre de travail socioprofessionnelle. C'est dans ce contexte que nous avons réalisé trois modèles mathématiques en entier mixte de conception et pilotage de chaîne logistique inverse.

La thèse est subdivisée en quatre chapitres, l'objet du premier chapitre est de présenter la vision actuelle de motivation de part les entreprises et les autorités en vue de la mise en œuvre du réseau logistique inverse de récupération. Plusieurs définitions, contextes de motivation et obstacles de réalisation relatifs à ce type de réseau sont brièvement présentés dans cette partie d'une manière explicite.

Pour enrichir et réactualiser nos connaissances dans ce domaine de recherche, nous avons abordé dans le chapitre deux une analyse technique des travaux de littérature importants et récents dédiés respectivement aux problèmes de conception des chaînes logistiques directe, inverse et globale. Les facteurs de motivation, outil de résolution et la structure de configuration sont discutés pour chaque type d'étude. Après une synthèse de ces travaux, la maîtrise de l'outils de modélisation en entier mixte, nous a permis de visualiser la gestion de la structure de la chaîne inverse qui peut être appliquée dans notre pays pour différents types d'articles.

Afin de respecter l'environnement par la voie de récupération des déchets issus de la remanufacture, dans le troisième chapitre nous avons décrits la modélisation mathématique ainsi que l'environnement de définition du problème pour trois modèles de conception et pilotage de chaîne logistique de récupération. Dans une approche dynamique à capacité limitée de tous les sites formant ce réseau, nous avons considéré la variation de la quantité retournée des produits usagés en intervalle de périodes. Pour refléter la réalité pratique, les modèles mathématiques proposées tiennent en compte une variété de paramètres économiques et environnementaux. En premier lieu, nous avons conçu deux modèles de gestion de chaîne inverse *CPCLII* et *CPCLI2* (respectivement problème de conception et pilotage d'une chaîne logistique inverse 1 et 2). Ainsi dans une tentative de faire une liaison entre la chaîne directe et inverse, nous avons conçu un modèle de trois échelons portant la nomenclature *CPCLB* (problème de conception et pilotage d'une chaîne logistique bouclée). Pour les trois problèmes, l'étape de la collecte se manifeste en flux poussé tandis que les étapes de récupération s'acheminent vers les différentes entités se trouvant en aval de la collecte en flux tendu. En effet, ces deux considérations sont respectées pour avoir plus de reflexe et ainsi de coordination au niveau des planifications à court, moyen et long termes. De plus, si on se met dans le cas d'étude du problème de récupération où l'intervention de la main d'œuvre humaine qualifiée est importante et indispensable, le travail *CPCLII* fait l'objet de cette pratique qui peut servir à la récupération d'articles d'électroménager, de bureautique, de mécanique, etc. Entre autre, dans le cas où le traitement semi automatique est beaucoup plus important que la main d'œuvre humaine, des instances de temps d'arrêt au profit de

réarrangement du centre de traitement pour le passage d'un produit à l'autre sont obligatoires. C'est ainsi que le problème *CPCLI2* tient compte de cette politique de récupération. Pour les applications de cette approche, leurs validité est plutôt visible dans l'étude de chaîne de grande taille avec peu de classes de produits de grandes quantités. En dernier lieu, le modèle *CPCLB* fait l'objet d'une marche de récupération d'un produit lorsqu'il est largement abandonné ou bien son traitement est typique. Les cas d'application sont si nombreux à l'égard des bateaux, avions, camions et tout article non homogène en grande quantité et ayant beaucoup de valeurs de récupération après son désassemblage en forme de modules.

Le chapitre quatre de notre travail, est dédié à présenter des exemples numériques de petite taille de système afin d'illustrer les modèles proposés. Pour tester les modèles, une série numérique de tests a été performée. Le solveur commercial **LINGO 10** est utilisé dans le but de résoudre le problème et pour obtenir la solution exacte en utilisant la méthode par défaut de Branch&Bound. Certaines considérations sont prises afin de refléter des scénarios plus réalistes dont des intervalles d'incertitude des quantités retournées en termes de qualité et quantité sont utilisées. En vue de décrire l'investissement total décomposé en trois ans, le nombre de périodes  $T$  est un ensemble équidistant partagé sur 12 intervalles de trois mois. Les résultats obtenus après la moyenne de multiples tests d'optimisation évaluent les pronostics des taux de récupération des produits ainsi que le coût moyen de revient d'un produit. Ce coût moyen est très indispensable dans l'estimation d'une taxe liée à la récupération.

Nous clôturons notre travail par une conclusion générale groupant les objectives atteintes dans notre étude avec la présentation d'éventuelles perspectives dans le futur.

# Chapitre I

## Contextes, enjeux et définition des chaînes logistiques inverses.

### Contexte et motivation

Avant de parler de la logistique inverse (reverse logistique), on voudrait présenter quelques chiffres effrayants sur la pollution provoquée par l'homme du 21<sup>ème</sup> siècle. Corbett et Kleindrofer, (2003) attestent que l'homme ajoute chaque année 15 millions de tonnes de carbone dans l'atmosphère, détruit près de 185,07 kilomètres carrés de forêt tropicale, crée 115,87 kilomètres carrés de désert, élimine entre 40 et 100 espèces et ajoute 2700 tonnes de CFC (chlorofluorocarbures) dans l'environnement. Tous cela pour une augmentation de population de 263000 par jour. De plus, à ce jour, plusieurs questions se posent. En effet, en analysant l'évolution du niveau de vie des pays émergents à grande population tels que la Chine, le Brésil et l'Inde, le bilan en chiffre de consommation des produits manufacturiers ne fait qu'augmenter et pousse forcément les chercheurs travaillant sur de la durabilité de notre planète à réfléchir d'avantage. Les préoccupations grandissent de plus en plus au sujet des changements climatiques suite à l'impact des activités industrielles sur l'environnement ; l'air, l'eau et le sol à l'échelle locale et régionale. Cela est sans doute dû à l'homme, qui grâce aux progrès de ses technologies fait croître le rendement de la production et par conséquent augmente la pollution. De plus, les produits ont de plus en plus des courtes durées de vie, encourageant un usage intensif de la matière première. A l'opposé, la croissance des déchets industriels et domestiques rejetés prématurément impose un étranglement des sites d'enfouissement et d'élimination des déchets.

Pour faire face à ce type de problématique, des tentatives multiples de récupération et de réduction des déchets sont devenues une préoccupation majeure dans les pays industriels. Le concept de retraitement et de remplacement tend peu à peu à prendre une voie à sens unique dans l'évolution de l'économie (Fleishmann, 1997). Cette interaction entre la gestion de



l'environnement et l'exploitation des ressources humaines et matérielles a conduit vers un nouveau concept appelé "reverse logistique". Ce nouveau concept a pour objectifs de ralentir la dégradation de l'écosystème, entre autres, devenu non durable et fragile. Améliorer la protection des ressources naturelles (comme la conservation des terres, la réduction de consommation des matières premières comme le pétrole, les métaux, le bois etc...) et l'économie d'énergie. En effet, il faut moins d'énergie pour fabriquer un produit à base des retraits de matériaux ou/et de composants que l'énergie pour extraire l'ensemble de matières vierges entrantes dans la composition du même produit.

Le plus important, pour l'aspect environnemental, est d'intégrer la "reverse logistique" dans la chaîne logistique globale. Cela dans le but de préserver la qualité de l'air et de l'eau et de minimiser l'espace des centres d'enfouissement ; puisque plusieurs matériaux et composants vont avoir une valeur ajoutée après retraitement. De plus, côté économique, la chaîne logistique inverse peut donner un gain d'argent, puisque souvent le coût de fabrication des produits ou composants à base de produits récupérés est plus faible que celui utilisant uniquement de nouveaux composants.

Au profit d'une conscience environnementale, la réussite de ces installations de récupération ne peut voir de succès que par une sérieuse volonté et collaboration entre clients et fabricants. La consolidation de cette collaboration a nécessité une série de lois législatives stipulées dans plusieurs pays industriels, qui exigent de certains industriels qu'ils soient responsables de la récupération de leurs produits après leurs fins de vie. Par exemple, depuis plus d'une décennie, dans certains pays de l'Union européenne, des lois ont permis la réintégration des équipements de véhicules usés dans l'industrie (Lambert et Riopel, 2003). De même dernièrement, l'activité de récupération en Chine vient de s'étendre sur plusieurs types de produits mécanique et électronique grâce aux nouvelles législations (Zhaohua et Jianhua, 2008) et (Adebanjo et Xiao, 2006).

Dans ce qui suit, nous présentons quelques enjeux et définitions nécessaires pour comprendre certaines des raisons derrière l'étude de la chaîne logistique inverse. La section 1 est dédiée à la définition de la chaîne logistique inverse. La section 2 est consacrée à présenter une comparaison entre la chaîne logistique classique et inverse, en évoquant la complexité de réalisation du réseau inverse. Les parties 3, 4 et 5 décrivent respectivement, les facteurs de motivation, la structure de la chaîne inverse et les différents types de récupération. A la fin, de

ce chapitre, nous soulignons l'importance de la planification du réseau logistique inverse par rapport aux niveaux de décision à savoir : stratégiques, tactiques et opérationnels.

### **I-1 Définition de la chaîne logistique inverse :**

Selon Grellier, (2008) la logistique inverse, comme son nom l'indique, se réfère aux activités de logistique d'une organisation mais dans un sens inversé à ce qu'il peut être dans la logistique traditionnelle. La logistique inverse est un concept émergent qui, depuis une dizaine d'années, se rencontre dans la littérature sous différents termes : logistique inversée, reverse logistics, gestion de la récupération des produits, logistique à rebours, logistique négative, etc (voir figure I-1).

La description la plus appropriée à la logistique inverse est la distribution inverse (Reverse distribution) qui fut donnée en 1981 par Lambert et Stock : « Aller dans la mauvaise direction sur une voie à sens unique étant donné que la grande majorité du flot des expéditions est dans une direction ». Les produits sont retournés pour être : réparés sous garantie, recyclés ou bien remplacés.

Carter et Ellram, (1998) disent que la distribution inverse est : « le retour, mouvement à contre-courant d'un produit ou de matière découlant de la réutilisation, du recyclage ou de la disposition. Ce mouvement à contre-courant peut être associé aux problèmes environnementaux, tout comme à la qualité et l'usure (dégradation dans le temps) et qui sont souvent effectués par de nouveaux membres auxiliaires au système». Elle constitue un segment coûteux de la chaîne logistique. Après celui des journaux, des livres et des magazines, le secteur de l'électronique est celui où les retours sont les plus importants.

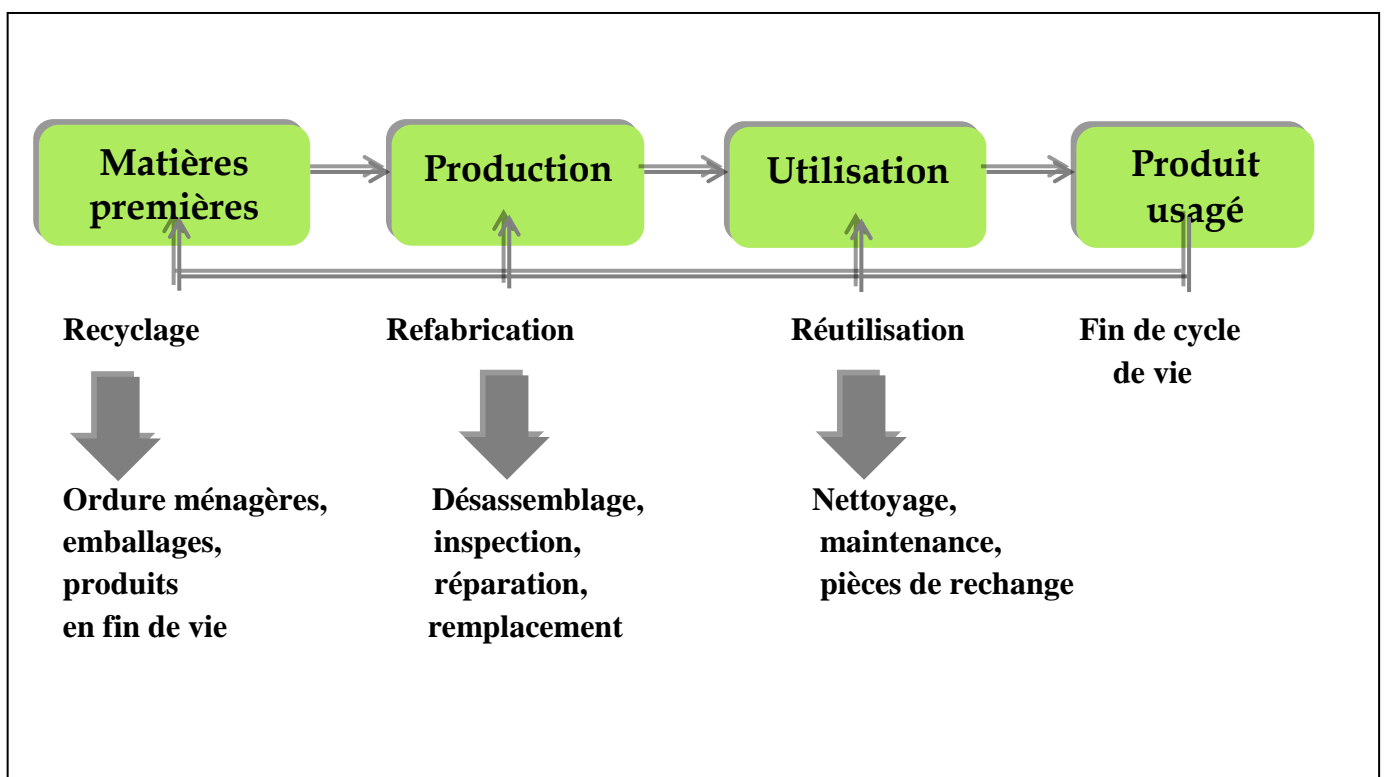
Afin de diminuer les retours des produits et leur impact environnemental, plusieurs solutions ont été proposées pour aboutir à une classification appropriée pour chaque article. Ces solutions s'appliquent non seulement aux produits en fin de vie, mais également aux invendus et aux produits défectueux. De même, les retours des caisses et des palettes pour la livraison font partis du système de récupération. Néanmoins, pour regrouper cette variété de produits retournés, on peut les classer en deux catégories de traitement tels que :

✓ ***Le traitement des déchets résultant de la consommation ou de la production :***

- Déchets de production, eaux usées, huiles usées,...
- Emballages de toutes sortes (palettes, cartons, bouteilles, tourets de câbles, containers,...)

- Ordures ménagères, bien que leur traitement ne soit pas, peut-être à tort, considéré comme ressortant de la logistique, etc.
  - Produits en fin de vie, soit jetables, soit usés (automobiles, toners d'imprimantes, micro-ordinateurs, appareils ménagers, literie, etc.), qu'ils soient repris ou non par le vendeur.
- ✓ *Le traitement des flux de produits remontant plus ou moins directement un ou plusieurs maillons de la chaîne logistique :*
- Produits défectueux rappelés par le producteur, etc.
  - Produits refusés par le consommateur en VAD (vente à distance) ou e-commerce
  - Invendus (journaux, livres, articles démodés, restants de promotion, produits périmés ou en limites de péremption, etc) ;
  - Produits défaillants à échanger ou à réparer.

D'une manière plus précise, les orientations qui concernent la nouvelle typologie de récupération de chaque article sont résumées dans la figure I-1.



**Figure I-1: Cycle de vie du produit incorporant les traitements et possibilité d'une nouvelle vie**

**I-2 Complexité de la mise en place de la logistique inverse dans le système logistique :**

Selon Lu et al. (2001), la logistique inverse est née suite au besoin des entreprises de structurer les retours. Souvent le système de logistique traditionnel n'est pas fait pour s'occuper de la logistique inverse et Dawe (1995) rappelle que celle-ci n'est pas la première priorité de l'entreprise. De même, Witt (1995) mentionne que la croissance des ventes hors magasin va augmenter dans les 18 prochaines années et que 15% de ces achats seront retournés. Aussi, il faut prendre en considération que le pourcentage de retour varie en fonction de l'industrie. Dans le sondage de Rogers et Tibben-Lembke (1998), les résultats montrent un taux de retour de 2-3% pour les produits domestiques chimiques et jusqu'à 50% pour les revues de publication.

De même Rogers et al. (2001) voir, montre les principales différences entre la logistique traditionnelle et la logistique inverse dans l'organisation le tableau I-1. Une des premières différences mentionnées est qu'il est plus difficile de prévoir les retours car ils sont aléatoires. Aussi, la distribution ne se fait plus d'un point vers plusieurs mais plutôt à l'inverse. Une autre distinction est le manque d'uniformité de la qualité et de l'emballage des retours. Souvent les options de disposition ne sont pas bien définies. Il est encore plus complexe de fixer un prix puisque celui-ci dépend de plusieurs facteurs. Il y a aussi un problème de perception quant à la vitesse requise du traitement. Ici, elle n'est pas considérée comme une priorité. Les coûts de distribution sont plus difficiles à identifier. La gestion des stocks est particulièrement complexe. Le cycle de vie du produit est de plus en plus court donc l'entreprise doit considérer ce facteur dans le système de logistique inverse. Pour ce qui touche la négociation avec le client, elle doit tenir compte d'autres considérations. Du point de vue marketing, il est plus complexe de revendre les produits retournés. Finalement, la visibilité sur le processus est moins transparente.

Ainsi, la logistique inverse est un système réactif. L'élément déclencheur du processus de logistique inverse est un retour vers l'entreprise. Le fait d'avoir plus de difficulté à prévoir les retours, à savoir d'où les produits vont revenir et leur qualité rend le processus plus complexe que la logistique traditionnelle. (Lambert et Riopel, 2003) et (Taylor, 2009).

Aspects	Logistique traditionnelle	Logistique inverse
<b>Prévision</b>	Relativement simple	Plus difficile (aléatoire)
<b>Points de distribution (Transport)</b>	Un à plusieurs	Plusieurs à un
<b>Qualité des produits</b>	Uniforme	Non uniforme
<b>Emballage des produits</b>	Uniforme	Non uniforme
<b>Destination/route</b>	Définie	Indéfinie
<b>Options de disposition</b>	Clares	Mal définies
<b>Prix</b>	Relativement uniforme	Dépend de plusieurs de facteurs
<b>Importance de la vitesse de disposition</b>	Reconnue	Pas considérée comme une priorité
<b>Coût de distribution</b>	Facilement identifiable	Moins facilement identifiable
<b>Gestion des stocks</b>	Cohérente	Incohérente
<b>Cycle de vie du produit</b>	Facile à gérer	Plus complexe à gérer
<b>Négociation</b>	Directe entre les parties	Complicquée
<b>Méthodes de marketing</b>	Bien connues	Complicquée par plusieurs facteurs
<b>Visibilité du processus</b>	Plus transparent	Moins transparent

**Tableau I-1** : Comparaison entre logistique traditionnelle et inverse (Lambert et Riopel, 2003)

Afin de mettre en place ces normes, il reste beaucoup de problèmes à soulever. En effet, il faut sensibiliser les consommateurs en premier puisque c'est à eux que revient le choix de préserver l'environnement à travers leurs modes de consommation. En outre, il y'a beaucoup de défis qui restent un tabou surtout au niveau de l'information, la sensibilisation et l'interaction entre les différents acteurs de la société (Sympson, 2008). Pour surmonter ce problème, on discutera dans la prochaine étape des motivations qui favorisent la mise en marche de la chaîne logistique inverse.

### **I-3 Quelques facteurs de motivation pour la mise en place de la chaîne logistique inverse :**

Pour encourager l'implication de l'industrie de récupération et ainsi pour permettre le déclenchement de la chaîne logistique inverse, certains aspects de motivation sont proposés par l'ensemble des acteurs responsables :

#### **Motivation :**

Dans l'ordre d'idées à la fois dans la portée et l'envergure, au cours de la dernière décennie, il y'a eu une croissance explosive des activités de retraitement. De plus en plus, les clients attendent les entreprises à réduire l'impact environnemental de leurs produits et procédés. En outre, la législation met en cause la responsabilité des producteurs dans la politique de protection de l'environnement. Plusieurs pays, en particulier dans l'Union européenne, ont mis en place la législation environnementale de la tarification des fabricants avec la responsabilité de l'ensemble du cycle de vie de leurs produits. Les obligations de la collecte des produits utilisés et de leur retraitement ont été adoptées pour un certain nombre de catégories de produits, y compris les équipements électroniques dans l'Union européenne et le Japon, les voitures dans l'Union européenne et Taiwan, et des matériaux d'emballage en Allemagne (Lambert et Riopel , 2003).

Par ailleurs l'avantage de la logistique inverse apporte un grand intérêt économique qui peut être remarqué au niveau de la conciliation et la collaboration du réseau logistique global. Cet intérêt aura une influence pertinente sur la balance du coût de la matière qui engendre nécessairement une augmentation du taux du service client. Aussi, les entreprises sont conscientes des possibilités opportunistes résultant de la combinaison de la gestion de l'environnement pour l'accès à de nouveaux segments dans le marché de consommation.

Suite à cette analyse, les motivations pour se lancer dans la logistique inverse sont variées. Dans la littérature on retrouve comme principales motivations : les législations, l'aspect marketing et l'intérêt des consommateurs désirants des produits sains pour l'environnement, l'aspect économique ainsi que les aspects écologiques et environnemental.

**La législation :** la première raison de la logistique inverse peut être de nature légale de telle sorte qu'elle a mis en cause la responsabilité des producteurs dans la politique de protection d'environnement. Plusieurs pays, en particulier dans l'Union européen, ont mis en place la législation environnementale de tarification des fabricants avec la responsabilité de l'ensemble du cycle de vie de leurs produits. Les obligations de collecte des produits utilisés et de leur

retraitement ont été adoptées ou sont en cours pour un certain nombre de catégories de produits dans plusieurs pays industrialisés.

**Aspect marketing et intérêt des consommateurs désirant des produits sains pour l'environnement :** Après l'Allemagne et grâce au programme Green Dot qui met le recyclage de l'emballage à la charge de l'entreprise Duales System Deutschland, l'initiative de fabriquer des produits sains pour l'environnement s'est répandue dans plusieurs régions du monde, même si les consommateurs doivent payer plus cher dans le but d'avoir moins d'impact sur l'environnement.

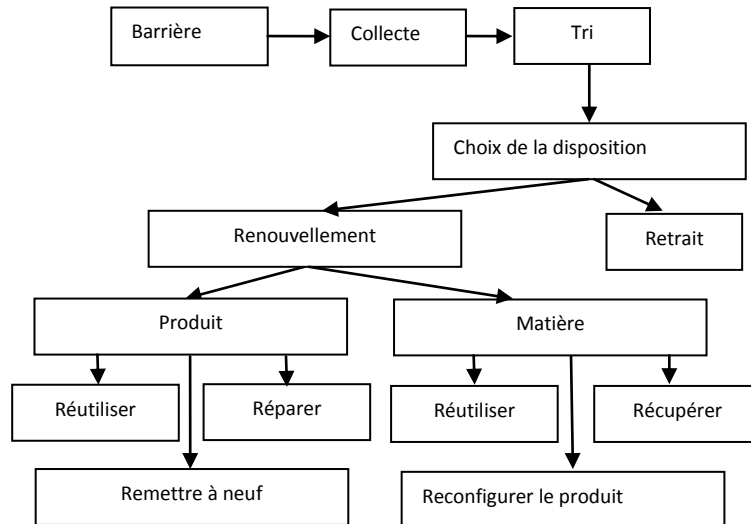
**Aspect économique :** la volonté de mettre en évidence la logistique inverse au niveau des entreprises n'est pas évidente vu les investissements souvent lourds derrière sa mise en place. En effet, même si la reprise d'un produit permet de générer des économies par rapport à la fabrication d'un produit neuf ou l'achat de matières premières neuves, il est nécessaire de mettre en place un nouveau réseau logistique inverse. De plus, les entreprises sont plus que jamais conscientes des possibilités opportunistes pour combiner à la fois leurs activités principales avec celles en relation avec la préservation de l'environnement qui permettent d'avoir un accès à de nouveaux segments du marché (Simpson, 2008).

**Aspects écologique et environnemental :** ce dernier point vient d'exister suite à l'apparition de la norme ISO 14000, qui est considérée comme motivateur de la logistique inverse. Cette norme stipule la mise en place d'un programme qui concerne la gestion efficace du réseau logistique en vue de sensibiliser l'ensemble des partenaires du réseau (fournisseurs, centres de production, centres de distribution, détaillants, consommateurs, etc.) à préserver l'environnement.

#### **I-4 structure de la chaîne logistique inverse:**

La chaîne logistique inverse est composée d'une série d'activités, parmi les plus importantes la récupération des produits ou composants en fin de vie. Sa mise en œuvre requiert au moins trois parties, à savoir : les centres de collecte où les consommateurs assurent le retour des produits usagés, les centres de re-processus dont les installations assurent les tâches en succession de désassemblage, tri et nettoyage, afin d'expédier les parties récupérées vers les derniers centres pour la récupération ou le retraitement (reconditionnement ou recyclage) voir Figure I-2. Il est possible de subdiviser ce type de réseau en plusieurs étapes suivant la nature de l'activité performée. Le point d'entrée dans ce réseau est la

reconnaissance du retour. Cette étape est cruciale pour réussir la gestion du réseau et assurer sa rentabilité du fait qu'il soit externe ou interne. Elle est suivie par l'étape de tri qui consiste à décider vers quelle destination ira le produit pour la prochaine étape. Cette étape demande que le produit ait été préalablement reçu, examiné ou testé pour déterminer son état et ensuite une décision concernant sa disposition est prise.



**Figure I-2** Structure de la chaîne inverse avec ses choix de décisions de flux (Lambert et Riopel, 2003).

Dans ce réseau, la définition de l'itinéraire des produits collectés n'est pas aussi simple qu'on peut l'imaginer. Très souvent, l'état du produit retourné n'est pas connu et nécessite une inspection pour connaître l'itinéraire qu'il doit prendre. Des complications dans le problème d'allocation du flux inverse vont être ajoutées du fait qu'il faut transporter uniquement les parties ou les composants du produit dites de valeurs vers les usines de retraitement. Dans le tableau ci-dessous les principales définitions et activités que compte un réseau logistique inverse sont résumées.



<b><u>C'est quoi la logistique inverse ?</u></b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Un processus.</li> <li>▪ Une tâche.</li> <li>▪ Compétence et activité.</li> </ul>
<b><u>Entrées</u></b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Produits à éliminer.</li> <li>▪ Produits à utiliser.</li> <li>▪ Emballage et produits considérés comme des déchets dangereux et non dangereux.</li> <li>▪ Matière première.</li> <li>▪ Information.</li> <li>▪ Processus d'inventaire.</li> <li>▪ Information de coordination.</li> </ul>
<b><u>Activités</u></b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Planification, implémentation et contrôle du coût et de l'efficacité de flux.</li> <li>▪ Collection, transport. Stockage, processus, acceptation, récupération, emballage, élimination, assemblage, allocation, management, désassemblage, production et inventaire.</li> </ul>
<b><u>Sorties</u></b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Produits aussi réutilisables, produits à recycler, produits pour remanufacture et produits à éliminer</li> <li>▪ Management et recapture des valeurs</li> </ul>
<b><u>A partir</u></b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Point de consommation</li> </ul>
<b><u>Vers</u></b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Point de manufacture</li> <li>▪ Point de collection</li> <li>▪ Point d'origine.</li> </ul>

**Tableau I-2 :** Principales définitions et activités que compte un réseau logistique inverse (Pochampally et *al.*, 2009).

### **I-5 Principaux processus impliqués dans la stratégie de récupération :**

Aux termes de flux inverses, la logistique inverse regroupe plusieurs profils à savoir : le retour des produits suite à la non satisfaction d'un critère, la réutilisation de certains produits comme l'emballage et les containers, le retraitement (*remanufacture*) et le (*cannibalizing*) ou en fonction de l'indice de qualité des produits récupérés. Pour des produits à base de matières premières abondantes, le recyclage est synonyme de changement dans la structure de la matière récupérée. Sans oublier, qu'il est toujours possible de détruire complètement les

produits retournés qui ne peuvent servir à grand chose comme les huiles industrielles par exemple.

***I-5-1 Réparation (remise en état):***

La réparation se veut une partie importante de la logistique inverse. Elle a pour but de remettre le produit récupéré à son état fonctionnel. Au lieu de réparer la panne, le produit est désassemblé et les pièces qui le composent sont remplacées. Ce qui influe sur la qualité des produits réparés, s'avère légèrement inférieur à celle des produits neufs. Lors de la réparation, le désassemblage et le réassemblage sont proportionnellement limités, car la réparation nécessite uniquement le changement ou la réparation des pièces défectueuses.

***I-5-2 Remise à neuf (reconditionnement):***

Le reconditionnement est l'alternative retenue afin de ramener le produit récupéré à un certain niveau de qualité fixé par l'organisation (Thierry *et al.* , 1995). Les produits reconditionnés ne peuvent pas être revendus en tant que produit neuf, puisque les standards de qualité sont habituellement moindres. Un désassemblage partiel ou complet est nécessaire et une attention est plus particulièrement accordée aux composants et/ou aux modules jugés comme étant les plus critiques. Ces éléments critiques seront inspectés et les actions correctives qui s'imposent seront alors apportées, c'est-à-dire que le matériel défaillant sera remplacé ou encore réparé. Les activités de reconditionnement nécessitent bien souvent l'utilisation de pièces de rechange. Ces pièces sont habituellement dispendieuses à l'état neuf. C'est pourquoi, en vue de retirer un maximum de valeur du produit retourné, on cherche à diminuer les coûts de traitement en ayant recours à des éléments en bon état retirés de produits récupérés (cannibalisation). On profitera habituellement du fait que le produit est désassemblé afin de procéder au nettoyage et/ou à la lubrification de certains composants mobiles. Selon la condition du produit et de sa complexité, cette classe d'intervention est relativement plus longue et difficile à réaliser que les activités de réparation. L'achat de produits reconditionnés représente habituellement une opportunité pour les consommateurs, puisque leur état est encore appréciable et que leur coût est très souvent bien inférieur à ceux à l'état neuf

***I-5-3 Réassemblage (reproduction) : (Chouinard M. 2007)***

Le réassemblage se distingue du reconditionnement par des opérations de remise en état plus importantes. Les standards de qualité sont alors aussi rigoureux que ceux établis pour les produits neufs (Thierry *et al.* 1995). Les produits retournés seront complètement désassemblés. Chacun des composants ou modules sont ensuite minutieusement inspectés. Les items défectueux ou qui présentent un niveau de dégradation avancé sont réparés ou

encore remplacés par le matériel neuf ou valorisé accessible au moment des activités de remise en état. On tentera de réduire le coût total des opérations en accédant à un maximum d'items valorisés, moins dispendieux que leurs équivalents à l'état neuf. On peut également profiter de la situation pour remplacer une technologie désuète par une autre plus récente. Encore une fois, un matériel de très bonne qualité retournera sur le marché, mais à moindre coût comparativement aux produits neufs.

***I-5-4 Cannibalisation:***

On parle de cannibalisation lorsqu'on a un produit usagé et on veut récupérer uniquement ses modules ou ses composants. La qualité dépendra du procédé de récupération utilisé. La cannibalisation est différente aux trois options de récupérations précédentes (Remise à neuf, reproduction, et réparation) car ces dernières cherchent à récupérer le produit dans sa globalité ; mais cela se spécifie sur un nombre précis de modules ou de pièces qui peuvent être utilisés lors de la reproduction. Donc, cette option nécessite un démontage sélectif du produit et une analyse spécifique pour les modules pouvant être plus ou moins réutilisables.

***I-5-6 Recyclage :***

Ce concept est choisi pour l'unique but 'respect de l'environnement'. Le recyclage affecte la fonctionnalité des produits et même leur identité. On réutilise les matières premières qui le constituent. Il est donc impérativement désassemblé et séparé en plusieurs catégories dépendant du genre de la matière. Ensuite ces matières sont utilisées dans le même contexte après être recyclées ou dans un autre.

Pour clôturer cette partie, le tableau ci-dessous, fait une distinction des différents processus de récupération en fonction des paramètres d'évaluation.

Option de récupération	Degré de désassemblage	Qualité exigée	Produit résultant
Réparation	Au niveau du produit	Remettre le produit en état de marche	Pièces réparées ou remplacées
Remise à neuf	Au niveau des modules	Inspecter et remettre à jour les modules	Modules réparés ou remplacés
Reproduction	Au niveau des pièces	Inspecter et mettre à jour les pièces et les modules	Des pièces et modules usés et neufs au sein du produit neuf
Cannibalisation	Récupération sélective de pièces	Dépend de l'utilisation des options de récupération	Des pièces réutilisées, d'autres mise au rebut ou recyclées
Recyclage	Au niveau matière	Dépend de l'utilisation dans la reproduction	Matières dans des produits neufs

**Tableau I-3:** Options de récupération des produits (Krikke, 1998)

### **I-6 Planification d'une chaîne logistique inverse :**

Pour concevoir une chaîne logistique inverse/ globale (directe et inverse) robuste et durable, les prises de décisions au niveau des activités des différents éléments formant cette chaîne, doivent être cohérentes. Sachant que le redéploiement des activités doit suivre les changements hiérarchiques par ordre de priorité sur un horizon de planification, une classification regroupant trois niveaux de décisions hiérarchiques est respectée. Respectivement du long terme au cours terme, les niveaux de décisions sont stratégiques, tactiques et opérationnelles.

#### **I-6-1 Niveau stratégique :**

Ce niveau correspond aux décisions du long terme qui sont difficiles à changer. Il doit définir la gestion des retours, la localisation des sites et leurs activités et leurs capacités, et si l'organisation intègre elle-même le système logistique des retours ou bien le partage avec d'autres entreprises ou organisation. Cette dernière décision est une des plus importantes. Les fonctions de transports, de traitement et de gestion font les motifs pour un partage ou non des

activités de retour. En ce qui est de la localisation, Fleischmann (2001), dit qu'elle a deux fonctions : la première consiste à ajouter la logistique inverse à un réseau de logistique existant, et la seconde consiste à introduire un nouveau réseau de logistique en tenant compte des flux en aval et inverse.

En se basant sur plusieurs aspects tel que : le volume des retours par catégories, la localisation de ces sites, et les coûts de transport etc., cette décision sert à attribuer en parallèle les différentes options de récupération pour chaque site. Elle est donc, indispensable pour visualiser un équilibre des capacités des installations.

Autrement, lors de la conception du réseau la politique du retour influence sur sa conception et il faut donc respecter les délais de transport, la capacité d'effectuer rapidement une opération de récupérations. Même la conception du produit a une influence sur l'activité des retours. Le traitement d'un produit retourné est simple lorsque ce produit a été conçu dans le contexte du respect environnemental ou pour être désassemblé. Ceci poussera l'entreprise à récupérer le produit à un faible coût.

### **I-6-2 Niveau tactique :**

Le niveau tactique de la logistique inverse traite essentiellement deux côtés : la détermination des meilleures stratégies de récupération, et la conception du réseau logistique inverse global. La stratégie de récupération d'un produit est une démarche proactive qui tend à trouver la façon la plus efficace pour récupérer un produit.

La diversité des stratégies réalisables permet d'avoir une quantité importante de solutions qui peuvent être mises en place pour la récupération du produit.

L'entreprise doit avoir les compétences nécessaires pour pouvoir choisir la revalorisation acquise pour le produit : destruction, reproduction. Cela implique la connaissance et la maîtrise de nombreux procédés de récupération, qui peuvent différer selon la gamme des produits étudiés.

La deuxième activité est la conception de la logistique inverse. Krikke (1998) la définit comme l'optimisation des localisations et des capacités des diverses installations de ce réseau, ainsi que les flux de produits transitant entre ces installations. Mais avant cette étape, l'entreprise est amenée à faire une analyse adéquate de la récupération au niveau du réseau ; mais aussi avoir toutes les données prévisionnelles exactes sur le changement des produits qui arrivent en fin de vie. Encore dans Krikke(1998), il détermine dans un premier temps diverses stratégies de récupération pour un certain type de produits, puis il utilise ces stratégies comme

données pour concevoir le réseau logistique de manière à pouvoir implémenter et appliquer les stratégies trouvées. Donc à ce niveau les décisions tactiques concernent des réajustements locaux en s'occupant d'un secteur spécifique de la chaîne : amélioration des transports entre les sites, analyse de relation avec les fournisseurs

### **I-6-3 Niveau opérationnel :**

Ce niveau intègre divers aspect de la logistique classique comme : la gestion des stocks, le transport, la planification des opérations de production/re-production. Il est à aspect plus spécifique au recyclage, qui concerne l'identification et le tri des produits (Fleischmann, 1997).

Le transport représente aussi une partie importante en permettant de concrétiser les flux entre les entités du réseau. Ceci se fait notamment au niveau des secteurs de collecte, de l'acheminement vers les installations de traitement des produits et de recyclage des déchets, ou lors de la redistribution vers les marchés secondaires (Bloemhof-Ruwaard et al. 1999).

Une fois qu'un produit en fin de vie est collecté, la détermination du mode de récupération le plus adaptable surgit. Il doit être diagnostiqué et analysé afin de choisir l'option la plus appropriée pour le récupérer. Après être analysé, il peut ne pas passer directement à la récupération mais il passera dans un premier temps au stock. Ici on parlera de gestion des stocks autre que celle de la logistique classique.

<b><i>Décisions stratégiques</i></b>
Stratégie (option) de récupération
Conception du produit
Capacité et conception du réseau
Outils stratégiques
<b><i>Décisions tactiques</i></b>
Distribution (inverse)
Coordination
Planification de la production
Gestion des stocks
Marketing
Technologie de l'information
<b><i>Décisions opérationnelles</i></b>
Ordonnancement et contrôle de la production
Gestion de l'information

**Tableau I-4 :** Décision stratégiques, tactiques et opérationnelle dans une chaîne logistique inverse

**Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons évoqué les différents contextes encourageant la mise au point d'une chaîne logistique inverse. Face aux obstacles ralentissant sa concrétisation sur le terrain, nous avons présenté une étude groupant l'aspect de sensibilisation de tous les partenaires des chaînes directes et inverses, afin de lancer la gestion du problème de récupération. Nombreux paramètres faisant la différence entre la chaîne directe et inverse ont été détaillés, dans le but de faire une bonne analyse lors de l'étude d'un problème de conception et pilotage d'une chaîne semblable. Actuellement, comme les travaux de recherche sont importants dans cet axe, une expertise correcte analysant minutieusement la réalisation d'une chaîne logistique inverse doit prendre en compte les avantages et les inconvénients cités. Pour cela, nous présentons dans le chapitre suivant un état de l'art restreint aux problèmes de conception et pilotage des chaînes logistiques.

# Chapitre II

## Revue de littérature (état de l'art) sur les problèmes de conception et pilotage des chaînes logistiques.

### **Introduction :**

Il y'a bien longtemps et depuis l'apparition du système de troque, la recherche d'un intérêt commun pour une satisfaction équitable entre deux acteurs de vente/achat a exigé certaines règles imposant souvent la valeur des marchandises en dépit de plusieurs facteurs comme la qualité, la période de disponibilité, le coût liées au risque de transport etc. Depuis ce moment, et avec l'arrivée de la production en continu et cadencé, la politique de développer l'organisation de vente entre producteur et consommateur n'a cessé de se consolider et de prendre l'art d'une discipline scientifique. En effet, face au facteur de compétitivité productive, l'organisation de la production pour de meilleures planifications, devient actuellement un élément fondamental pour la survie de n'importe quelle entreprise d'approvisionnement de produit ou matière. Entre autre, et en vu de mieux répondre à l'exigence du marché de consommation, tous les éléments physiques et mobiles responsables à l'approvisionnement d'un produit de la source de matière première jusqu'au consommateur doivent être très flexible et agile. D'où la nécessité de faire apparaitre la vision de la conception et le pilotage des chaînes logistiques comme un art de maîtrise pour une survie plus durable du système de production à l'échelle de supervision.

Par ailleurs, rien que pour la chaîne logistique directe et uniquement, si on se met dans l'étude de la classe de conception et pilotage d'une chaîne directe à trois échelons, l'état de l'art dédié à cet



axe et très riche et illimité. En plus si on ajoute les éléments de différence entre les chaînes logistiques directe, inverse et intégrale (directe et inverse), on peut imaginer ce qu'on peut trouver si on fait une recherche de type "integral supply chain" sur une base de données. Néanmoins, on présente dans cette partie, une présélection des travaux originaux dédiés au problème de conception et pilotage de chaînes logistiques. En premier lieu, on donne une recherche bibliographique sur des travaux dédiés aux chaînes directes pour plusieurs approches. Juste après, on expose un ensemble de travaux destinés aux problèmes de localisation et allocation des flux physique dans les chaînes logistiques inverses à un échelon, deux échelons et plusieurs échelons. Egalement, plusieurs paramètres techniques liés à la structure de chaque chaîne apparaissent de façon explicite.

Avec les exigences très raisonnables concernant l'exploitation des ressources naturelles de façon plus rationnelle, on remarque que dans ces 5 dernières années, les études menées dans la conception et le pilotage des chaînes logistiques directes et inverses à la fois portent un grand intérêt à l'échelle économique et environnementale. Dans la dernière partie, on discute les soucis pratiques apportés aux différents mécanismes de l'ordonnancement des entreprises à l'échelle d'une vision globale, qui préoccupent à la fois les chercheurs et les entreprises. Afin de visualiser les principaux travaux cités, un ensemble de tableaux descriptifs des problèmes de conception et pilotages des chaînes logistiques inverses et intégrales (directes et inverses) est présenté à la fin de ce chapitre. (Pokharel et Mutha, 2008), (Srivastava, 2007) et (Bennekrouf et al.2010)

## **II-1 Problèmes de conception de la chaîne directe :**

### **II-1-1 Cas déterministe :**

La localisation-allocation résulte de deux problèmes de prise de décision à différents niveaux: niveau stratégique (décision de localisation) et niveau tactique (décision d'allocation). Dans le cas où la quantité des flux des produits qui circulent à travers chacun des sites est connue, les coûts d'implantation et d'opération d'un site dépendent de l'endroit où il se situe. Ainsi le problème consiste à chercher la meilleure localisation des sites de façon à minimiser une fonction coût total linéaire (Martel, 2001). Fréquemment, les décisions de localisation et les décisions d'allocation sont prises conjointement. Les modèles déterministes qui constituent la base de ces problèmes sont: le problème P médian (*P-median problem*), le problème de recouvrement (*set covering problem*), le problème de couverture maximale (*maximal covering problem*) et le problème du centre (*center problem*).

Le problème  $P$  médian introduit par (Hakimi, 1964), se place parmi les tous premiers modèles qui concernent le problème de localisation. Son élaboration a été faite dans le but de chercher la meilleure localisation de  $P$  unités industrielles de même classe (exemple usine, fournisseurs, centre de collecte etc.). Son objectif est de minimiser la somme des distances entre ces unités et la zone de la demande.

La première version du problème de recouvrement (*set covering problem*) revient à (Toregas et al, 1971). Elle a été formulée pour choisir parmi les  $P$  sites d'unités industrielles candidates de même classe, le sous ensemble de  $P'$  sites d'unités industrielles qui peut couvrir la zone de la demande à un coût minimal. La technique de recherche de sous ensemble suffisant pour la couverture, peut se faire à partir de la méthode d'ensemble de sommets d'un graphe.

Le problème de centre modélisé par Hakimi, (1965), (Mineaka, 1970), et (Francis et al, 1982) en plusieurs versions, vient comme une extension du problème  $p$  médian. Son but est de minimiser la distance maximale entre la zone de la demande et l'unité industrielle la plus proche qui approvisionne cette zone.

Avec la croissance de la globalisation des entreprises, l'exigence de revoir le coût fixe d'ouverture d'une unité manufacturière (usines, centre de distribution, centres de collecte etc.) dans le problème de conception, devient un objectif additionnel à la minimisation de la distance. Ceci a multiplié le nombre de modèles qui traitent le problème de localisation à charge fixe (Daskin, 2003) et (Aikens, 1985). Parmi les modèles les plus répandus dans la littérature, on fait appel aux modèles déterministes à charge fixe sans et avec capacité. Le modèle *UCFLP* (uncapacited fixed charge facility location problem) reste le plus classique (Baliniski, 1961). Il est issu de l'hypothèse où la demande est connue à l'avance. Au-delà de la minimisation de la distance entre une unité de production et une zone de demande (unité de production ou de consommation ou stockage etc.), son objectif est de chercher la localisation d'un ensemble de zones de demande, ainsi que la *localisation* d'un ensemble d'unités de production qui sert chaque zone de demande avec une couverture totale de la demande (Daskin, 2001)

## **II-1-2 Cas dynamique**

Pour une classe de produits (exemple : habillements, articles du tourisme et certains produits alimentaires comme les glaçons, les fruits...), parler d'une production continue d'un produit dans un système de production à plein temps est quasiment impossible. Sauf si on tient compte du stockage, qui représente un facteur indésirable, surtout à une grande échelle dans le monde B&B (Business to Business). Sur le plan pratique et dans ces circonstances, on dit que la chaîne de

production devient dynamique, de façon à répondre en temps réel au besoin de la demande considérée comme saisonnière. Ainsi, afin de préserver l'équilibre entre la demande périodique et le fonctionnement normal de la chaîne de production, l'élaboration d'un modèle dynamique devient une nécessité. Les travaux de Aikens, (1985) représentent le premier papier qui a introduit au niveau stratégique, le facteur temps. Ce modèle **DUFL** (dynamic uncapacitated facility location problem) prévoit la possibilité d'ouvrir les usines durant une période donnée pour répondre aux besoins périodiques des clients. Ce modèle qui est issu de l'extension du modèle **UCFLP**, est restreint à un seul échelon. Dans sa formulation mathématique, il ajoute par rapport au **UCFLP** : le coût d'installation ou de la mise à période (setup) de l'établissement où la reconfiguration d'une usine  $i$  pour une période  $t$ .

### II-1-3 Cas stochastique

L'auteur Snyder présente un état de l'art très riche des modèles stochastiques existants, ainsi que des méthodes de résolution développées (Snyder, 2003-2004). La plupart des modèles ont comme objectif la minimisation des coûts ou la maximisation du profit de l'ensemble du réseau logistique. Certains modèles sont développés en utilisant des approches probabilistes, ainsi que dynamiques. L'auteur rapporte que les méthodes développées utilisent le plus souvent des heuristiques basées sur la relaxation Lagrangienne, la recherche Tabou, les algorithmes génétiques etc. D'autres auteurs utilisent la technique généralisée de programmation stochastique comme l'analyse par scénario. Les modèles **RCFL** (Stochastic capacitated facility location) (Aikens, 1985) et Stochastic fixed charge location problème (Planning under uncertainty) (Snyder, 2004) font de bons exemples, et ce malgré leur besoin de beaucoup d'efforts sur le plan de développement d'outils de résolution.

### II-2 Problèmes de conception et pilotage de la chaîne logistique inverse :

Réciproquement aux chaînes directes, le flux physique de récupération se manifeste entre plusieurs entités. Notamment les centres de collecte et de retraitement (peut regrouper plusieurs activités) font partie des usines intermédiaires et fondamentales. Pour une localisation de ces deux centres associés à des allocations optimales des flux physiques ; nombreux critères technique, sociaux et/ou environnementaux doivent être respectés tout en posant un challenge dans la recherche opérationnelle de conception et pilotage. Par degré de perspectives et de difficulté, on présente dans la partie suivante l'outil de modélisation ainsi que les approches et les techniques de résolution pour divers cas: déterministe (données certaines), dynamique (données variables mais dans des instances

de temps appelées période) et stochastique ou en plus stochastique et dynamique (beaucoup de paramètres de l'incertain). Nombreux sont les critères adaptés à chaque étude, qualitative en premier lieu pour une estimation économique. Avec les exigences environnementales et pour une couverture totale avec les meilleures satisfactions, dans certaines études, le cas mono objectif associé a des outils d'analyse qualitative multicritères présente aussi beaucoup d'intérêt. Le cas du problème de localisation et d'allocation dans les chaînes logistiques inverses à un et à deux échelons sont exploitées par ces techniques d'analyses hybridées en vue de dévoiler les zones de solutions les plus optimales.

### **II-2-1 Cas déterministe**

Le modèle proposé par Cruz-Revera et Ertel, (2009) est considéré comme un des modèles les plus simples dans sa formulation mathématique. Similaire au modèle UFCFLP (Uncapacitated fixed charge facility location problem), il est utilisé pour résoudre le problème de récupération des véhicules en fin de vie au Mexique. Son objectif est de déterminer le nombre minimum de centres de collectes à localiser afin de minimiser la distance totale de transport lors de la collecte des véhicules avec un maximum de couverture des zones desservies. En utilisant une analyse par scénario et un simulateur SITUATION, proposé initialement par Daskin, (2006), les auteurs ont pu faire des pronostics de localisation des centres de collecte à l'horizon 2025.

Dans le même contexte, Si-bo et Wei-Lai (2008), ont présenté un travail semblable à celui de Cruz-Revera et Ertel, (2009), regroupant plusieurs coûts opérationnels. Ce travail concerne l'optimisation du problème de localisation des sites et d'allocation du flux de matière dans un réseau logistique inverse. Son but est de résoudre un problème multi- objectifs qui consiste à minimiser les coûts d'installation des points de collectes initiaux en tenant compte de la maximisation des revenus des produits retournés. Par l'aide des algorithmes génétiques, la localisation des centres de collecte ainsi que des centres de retours centralisés ont été optimisés.

Dans un autre cas d'étude de conception multi-objectifs d'un réseau logistique inverse à deux échelons, Lu *et al*, (2008) ont fait une recherche sur les localisations optimales de deux centres principaux du réseau appelés respectivement, centre de transit et centre de processus. La nouveauté dans leur travail est que l'aspect d'environnemental est considéré afin de réduire les impacts négatifs au niveau du centre de processus. Afin de soulever le problème d'analyse combinatoire, les auteurs ont utilisé des algorithmes génétiques, en tenant compte de la minimisation des coûts fixes

d'installation et opérationnels des différents centres (facteur de recyclage des déchets, qualité, quantité, fréquence etc.).

Par ailleurs, et pour expliquer les diversifications issues de la récupération d'un produit en fin de vie, Hang et Chen (2008) considèrent un autre cas de construction d'un réseau logistique inverse avec la prise en compte de capacités des centres de traitement. Ce réseau comprend un ensemble de points de collecte, d'usines de traitement, d'usines qui demandent des produits réutilisables et d'usines qui demandent de la matière première. Une formulation en un modèle mathématique linéaire en variables mixtes (entières et réelles) est proposée et relaxée par la relaxation Lagrangienne.

Un autre point très sensible et important de la problématique qu'on doit évoquer est celle de la localisation de certains types de centre de traitement restreints aux déchets domestiques. Dans le cas où les installations optimales des usines de traitement deviennent indésirables près des points de collecte et cause de problème nuisible de pollution, la localisation convenable de ces centres doit être loin des villes. Néanmoins, Yin et Wang, (2008) ont utilisé une approche hybride couplant logique floue et relaxation Lagrangienne pour résoudre un problème de conception d'un réseau logistique inverse. L'approche est appliquée dans le cas du traitement et le recyclage des batteries de portable usées en Chine. Dans ce même pays, He *et al*, (2007) abordent un problème analogue relatif à la récupération des déchets municipaux solides. A l'aide des algorithmes génétiques en couplage avec des algorithmes de logique floue, l'analyse combinatoire du problème localisation-allocation est optimisée.

En fin de cette section, on présente un cas d'étude très passionnant proposé par Wang et Yang, (2007) et traitant le problème de conception et pilotage d'une chaîne logistique inverse complexe. Vu l'intérêt porté au recyclage et au traitement d'une série de classe de produits électroniques, la structure de la chaîne proposée se compose de points de collecte, de centres de stockage, d'usines de recyclage et de sites de traitement. Aussi, sachant qu'au niveau stratégique l'analyse combinatoire à partir des outils d'optimisation classique tels que le Cplex ou le Lingo prend beaucoup de lenteur, surtout quand il s'agit de traiter un problème de grande taille d'allocation et de localisation pour des entités de multi-configurations, les auteurs ont proposé de nouveaux algorithmes d'optimisation. Pour un maximum de couverture, ils ont introduit la possibilité de créer de nouvelles entités de la chaîne aux configurations multiples comme une décision stratégique.

### II-2-2 Cas dynamiques

Les déchets industriels représentent aussi un bloc de produit et de matière important qui retiennent une grande attention d'étude. Pourmohammadi *et al*, (2003) ont présenté un exemple d'études de récupération des déchets industriels d'aluminium dans la ville de Los Angeles aux USA. Dans leurs travaux, ils ont proposé un modèle formulé en entier mixte linéaire, qui a pour objectif de minimiser les coûts des opérations (relatif à chaque étape du cycle retour jusqu'à la récupération ou la destruction), ainsi que les coûts environnementaux (relatif à l'énergie, la pollution précisément le taux de CO<sub>2</sub> et l'eau en quantité consommée). En considérant les capacités des sites et les coûts d'inventaire, le problème de localisation et d'affectation de flux physique vers les centres **VAPC** (Value Added Process Center) a été résolu à l'aide des algorithmes génétiques dans un environnement dynamique. D'après les résultats obtenus et pour des raisons de protection de l'environnement, les auteurs ont discuté la possibilité d'ajouter dans certains cas des taxes de pénalité afin de pousser l'utilisation des produits dits secondaires au lieu des produits vierges. Aussi, ils ont évoqué la possibilité de développer un réseau de traitement des déchets à l'échelle globale ainsi que d'introduction de l'aspect probabiliste.

### II-2-3 Cas stochastiques

Pour s'approcher d'une conception plus réaliste, Kim *et al*, (2008) ont proposé un modèle mathématique d'entiers mixtes qui facilite le pilotage au niveau opérationnel du processus de traitement de multi produits dans une approche déterministe dynamique. Ce modèle traite de façon détaillée la balance du prix de revient relatif à l'intégration d'un produit récupéré par rapport à l'approvisionnement d'un produit similaire neuf auprès d'un fournisseur. Dans un objectif de satisfaire la demande des sites de manufacture et à l'aide de l'outil d'optimisation **OPL studio**, les coûts d'opération, de transport, d'inventaire et d'enfouissement ont été évalués. Comme remarque importante qu'on doit signaler, c'est le renforcement de la collaboration et de la conciliation qui apparait entre les différents niveaux de la chaîne globale. Aussi dans le cas d'un surplus de charge de quantité collectée dédiée vers le centre d'enfouissement, un **sous-traitant** est ajouté à la chaîne afin de protéger l'environnement (*minimiser la quantité des produits à envoyer vers les centres d'enfouissement*) et de maximiser le coût de sauvegarde du processus de traitement. En plus de cette riche structure de conception, des analyses de sensibilité par scénarios ont permis d'évaluer les

coûts de sauvegarde du processus de traitement en fonction de la variation de la capacité des trois sites de la chaîne de récupération (les sites de collecte, de désassemblage, de la remise à état neuf).

En chine, le traitement des déchets électroniques **WEEE** (waste electric and electronic equipment) devient une préoccupation des autorités, qui ne cessent de chercher à exploiter de nouveaux moyens de conception destinés à faire le recyclage des composants électroniques caractérisés par leur teneur en métaux et éléments toxiques. Dans cet axe de recherche, Meng, (2008) a présenté un modèle de conception d'une chaîne formulé en entier mixte linéaire décomposé en trois niveaux. Sous le critère de minimisation de la distance avec la considération des capacités et en utilisant le solveur d'optimisation **Lingo 08**, l'auteur a pu localiser les entrepôts de recyclage par catégorie ainsi que la zone des points de collecte affectée à chaque entrepôt. Et à partir des résultats obtenus de la localisation des entrepôts de recyclage par catégorie, dans un deuxième niveau du modèle, l'auteur a trouvé les localisations optimales des usines de traitement existantes et nouvelles, capables de recevoir les différentes catégories de produits à partir des entrepôts. Par succession, il optimise la localisation des usines finales de traitement. Pour donner au modèle une représentation stochastique, il a ajouté à la formulation mathématique des paramètres probabilistes.

Avec l'écart important entre la demande et l'offre en matière de papier pour des zones industrielles dans des pays émergents comme la Turquie, le recyclage de cette matière est évident pour compenser ce besoin. Rien que pour une chaîne inverse composée de client et de centre de recyclage avec possibilité d'élimination, les travaux de Kara et Onut (2010) ont montré la complexité réelle de ce secteur sur le plan de la conception stratégique pour des résultats plus robustes de localisation et d'allocation. En effet pour un retour aléatoire de variétés de qualité de matières ainsi que de majeures déviations de coûts de stockage, la modélisation en entier mixte accommodée par l'algèbre de scenario était ajustée et présentée dans leurs étude. En plus de l'échelle de modélisation, une échelle d'analyse des moyennes pour des variations minimales des données d'entrée sont affinées pour chaque scenario.

### **II-2-3 Analyses et critiques :**

Dans la partie précédente, nous avons discuté sur certains travaux concernant les problèmes de conception et pilotage de la chaîne logistique inverse. Mise à part quelques études qui se sont pratiquées sur des cas réels celles de (Pourmohammadi et al.2003), (Yin et Wang ,2008), (Cruz-Revera et Ertel, 2009) et (Kara et Onut, 2010), les autres travaux, se sont manifestés sur des cas d'études imaginaire. Ceci reflète d'une part, la volonté des chercheurs de concevoir plusieurs

structures possibles qui peuvent servir cet axe de recherche qui est relativement en cours d'exploitation. Et d'autre part, le manque d'une vraie collaboration, au niveau de tous les partenaires de la chaîne, puisqu'il ya une quasi absence de paramètres qui indiquent un bon pronostic. Malgré cela, plusieurs outils de modélisation et d'optimisation ont été appliqués en vue de répondre aux différents mécanismes de conception à différents niveaux (stratégique et tactique) et différents environnements (déterministe, dynamique, stochastique, avec/sans considération de capacité, partant deux échelons à multi-échelons). Toutefois, ces recherches peuvent servir la recherche opérationnelle au niveau du traitement du problème de localisation-allocation qui est de nature difficile. Aussi nous remarquons que toutes les données à base desquelles ces études ont été menées sont déterministes. Ce qui indique qu'il reste beaucoup d'efforts à déployer ; que ce soit au niveau de la modélisation et/ou au niveau de la simulation comme une hybridation en temps réels des deux problèmes.

### **II-3 Problèmes de conception de chaîne logistique globale (directe et inverse) :**

#### **II-3-1 Cas déterministes**

La récupération des ordinateurs usés représente un cas de chaîne logistique inverse très important. Pour donner un ordre de grandeur uniquement en Chine, le marché d'ordinateurs consomme chaque année 100 millions de machines et en rejette 15 millions. Dans une approche déterministe à deux flux directe et inverse, Zhaohua et Jianhua, (2008) ont proposé un exemple concret appliqué à la cité de Tai'an a Shandong en Chine. Par leur intérêt à trouver la meilleure façon de localiser les entités de récupération, de réutilisation et d'élimination, ils ont développé un modèle en entier mixte linéaire qui regroupe quatre entités : client (en plus de la demande directe, la récupération des ordinateurs usés est considérée), centre intermédiaire de retraitement (collection, désassemblage, vérification et stockage), centre de traitement (accepte les produits valables pour traitement) et l'usine de production. En partant de l'hypothèse où, les produits récupérés des machines usées ont la même qualité que les nouveaux produits fabriqués dans l'usine, la demande des clients pourra être satisfaite soit par les usines soit par les centres de traitement. En utilisant la méthode de la relaxation Lagrangienne, ils ont minimisé les coûts totaux, fixes et variables.

Zhou et *al*, (2008) ont développé un modèle qui fait partie des modèles actuels traitant les chaînes directe et inverse à la fois. Dans leur structure de conception, ils utilisent quatre partenaires: clients, centres de distribution, usines et centres de récupération (CRC). Le flux direct prend la direction des usines ou des CRC vers le client à travers le centre de distribution. Cependant le flux inverse



s'effectue des clients vers les CRC via les centres de distribution. Comme propositions de motivation au terme de collaboration, les auteurs adoptent : la possibilité de réparer et/ou de remanufacturer un produit au niveau d'un CRC, des coûts de pénalité peuvent surgir suite à la non satisfaction de la demande des clients ainsi que la possibilité d'attribuer l'activité d'enfouissement au centre de récupération (pour une certaine portion des produits retournés). En rappelant que le modèle se manifeste au niveau stratégique (location-allocation) et dans une situation déterministe à quatre échelons pour des capacités illimités des sites : sous la contrainte d'une couverture totale de la demande, l'objectif est de minimiser le nombre d'ouverture des potentiels relatifs à la chaîne directe (usines et centre de distribution) en parallèle à l'augmentation des nombres des centres **CRC**. La validation du modèle se pratique sur le logiciel **MILP-solver de Lingo 8.0** en vue de maximiser la fraction des produits remanufacturé par rapport à la fraction des produits manufacturés.

De même, Lua *et al.* (2008) ont présenté un modèle à deux niveaux sous le code **UNRM** (Uncapacitated Network Remanufacturing Model), programmé en entier mixte 0-1. Sa structure contient trois types d'usine à localiser : l'usine de production, le centre de remanufacture et le centre intermédiaire. Ce dernier centre regroupe les activités de nettoyage, de désassemblage, de vérification et de tri. L'objectif de leurs travaux est de répondre à la demande des clients avec la minimisation des coûts d'ouverture, de transport, d'élimination et de nombre d'usines à localiser. Partant d'une hypothèse simplificatrice où le produit remanufacturé a la même qualité qu'un nouveau produit et après avoir relaxé quelques contraintes par la méthode de relaxation Lagrangienne, les auteurs ont utilisé dans leurs calculs le générateur du modèle de programmation linéaire **LP-ToolKit 4.15**.

A propos de la remanufacture de plusieurs produits, (Lee *et al.* (2008) ont proposé un modèle mathématique complet sous le code **m-RLNP** (Multi level Reverse Logistic Network Problem), formulé en MILP et qui a pour but de minimiser les coûts de distribution (transport) et d'ouverture des sites (centres de désassemblage et de traitement). Vu la complexité du problème, la fonction objective est décomposée en trois niveaux. Le premier niveau traite la partie centre de retour vers le centre de désassemblage. Le second niveau s'occupe de la gestion du flux inverse entre le centre de désassemblage et le centre de processus. A ces deux niveaux, les problèmes d'optimisation ont été gérés par **GA** (Genetic Algorithm) combinés avec de nouveaux opérateurs croisés appelés **WMX** (Weight Mapping Crossover). Pour l'étape restante reliant les centres de processus aux autres entités de la chaîne (le centre de recyclage, les usines et le centre d'élimination), une approche heuristique a été appliquée pour résoudre le problème de transport entre les centres de processus et les usines.

### II-3-2 Cas dynamiques

Tang et Xie, (2007) ont présenté un travail motivant destiné à respecter les nouvelles lois de protection de l'environnement. Du fait qu'il est possible d'intégrer un produit où une parcelle de ce produit dans la chaîne globale, leur intérêt s'est manifesté sur l'optimisation des coûts d'opérations des produits retournés des clients pour réparation. Pour cela, ils ont conçu une chaîne à quatre entités : client, centre de collecte, centre de réparation et usine. Par l'application des algorithmes génétiques, ils ont résolu le modèle formulé en entier mixte linéaire dans une approche dynamique à produits multiples avec capacité limitée. De plus, ils ont considéré la possibilité de transmettre un produit du client vers l'usine ainsi que le choix d'ouverture ou la fermeture périodique des centres de réparation et de collecte.

D'autre part, Min *et al.* (2006a) ont proposé un modèle formulé en entier mixte non linéaire à deux échelons : le premier échelon couvre la zone de retours (clients) et le centre de collection (intermédiaire à faible capacité mais proche des clients). Alors que, le deuxième échelon fait le lien entre le centre de collecte et le centre **CRC** (Centralized Return Center) de grande capacité de stockage. Sous la condition que le nombre et le niveau de capacité des centres de collectes soient considérés dans les choix de décision stratégique pour répondre aux besoins du service, l'objectif de ce travail est de chercher les localisations optimales des sites potentiels (centres de collections et **CRC**). Ceci est réalisé en parallèle à la minimisation des distances et des coûts (inventaire, location, manutention, installation et transport). L'avantage remarqué dans ce modèle est l'insertion du temps en tant qu'une variable dans la fonction objectif, et ceci dans le but de quantifier les temps d'opérations et les périodes de collecte. A l'aide des algorithmes génétiques (GAs), l'optimisation du problème est résolue.

Malgré l'importance économique qu'apporte la réparation des produits sous garantie retournés (suite à une défaillance) par les clients vers la chaîne directe, une minorité de travaux ce sont lancés dans l'intégration des sites de réparation dans la logistique de leur chaîne. Néanmoins, Min *et al.*, (2008b) ont proposé un cas d'étude de référence qui tient compte de l'activité de réparation. En se mettant dans un environnement dynamique multi-produits, ils ont conçu une chaîne à trois entités classiques (usine, centre de distribution, client) et le centre de réparation comme une quatrième entité potentielle. L'objectif du modèle proposé est de rechercher le nombre optimal de centres de distribution et de réparation à localiser en tenant compte de la coordination entre les clients et les usines. Egalement, les auteurs ont inclus dans leur modèle les capacités des différents sites et la

possibilité d'utiliser le centre de distribution comme un centre de réparation. Pour une telle taille de chaîne, le recours aux algorithmes génétiques pour résoudre le problème d'optimisation du modèle développé en entier mixte est inévitable.

Dans le but d'améliorer la performance de la qualité du service client, Liu et Ni (2007) s'intéressent à l'étude d'une chaîne globale bouclée. Dans une approche dynamique, multi produit à capacité limitée des sites (usine, centres intermédiaires (*récupération* + *entrepôt*)), le flux direct se manifeste à travers les trois entités classiques. Cependant afin de fermer la boucle, le flux de retour passe du client vers l'usine via le centre de récupération. Vu la complexité du problème (multi produit, multi période) et pour un service client haute qualité, la localisation des centres de récupération et des entrepôts, qu'ils soient anciens ou nouveaux, est assez stratégique et demande un outil de calcul très puissant. C'est ainsi que les auteurs ont développé une nouvelle méta-heuristique dite "Immune Genetic Algorithm", inspirée de la biologie et qui s'avère plus rapide que les algorithmes génétiques dans le temps d'exécution.

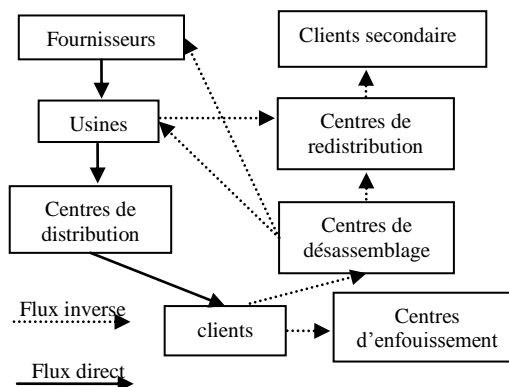
Pour la chaîne logistique et dans une vision intégrale, le choix de fournisseurs reste un élément précurseur pour la durabilité de n'importe quel système d'entreprises. C'est ainsi que S. Hassanzadah et Zhang (2012) ont récemment contribué dans l'exploitation du choix de fournisseurs envers la logistique durable et verte. Sur le plan technique leur effort s'est manifesté sur la pondération des fournisseurs principaux qui devrait alimenter la chaîne bouclée par la méthode du choix multicritère de Process Analytique Hiérarchique (AHP) combinée avec la logique floue. D'autre part, les meilleurs fournisseurs respectant l'environnement, participent dans l'achèvement du circuit fermé composé de fournisseur, centre de désassemblage avec option d'élimination et centre de remise à neuf. Notons, que leur objectif principal était quantitatif, une modélisation mathématique en entier mixte est utilisée comme un support afin de maximiser le coût de profit liée au vente de produit par minimisation des coûts des différents processus à savoir : approvisionnement à partir des fournisseurs, désassemblage en partie, élimination des parties défectueuses et le coût de réarrangement (set up) des entités de récupération pour une telle partie. Pour une telle étude multi-objective, avec la considération d'en plus des coûts de profit, de la minimisation des parties défectueuses et de choix de meilleurs fournisseurs qui apparaissent dans deux autres fonctions objectives, les auteurs ont résolu le problème d'assignement des flux de plusieurs produits avec la méthode de pondération (compromise programming method **CPM**).

### **II-3-3 Cas stochastiques**

Afin de s'approcher de la réalité, l'étude du problème de conception et pilotage de chaîne logistique bouclée (une chaîne logistique directe en dualité avec une chaîne logistique inverse) dans un

environnement incertain est très intéressante. Cependant au niveau de la résolution, le problème se complique de plus en plus, surtout que plusieurs paramètres inconnus préalablement vont intervenir (la quantité retournée, le temps et la qualité). Nous abordons dans cette partie une série de travaux de recherche qui nous semble assez conséquents.

El-sayed *et al.* (2008) ont réalisé un travail assez riche au niveau de la construction des réseaux logistiques. Ils ont développé un modèle à tous les niveaux, stochastique, multi-produit, multi-échelon, logistique directe et inverse, avec considération des capacités des sites. Pour le réseau direct sa structure est conçue de fournisseur, usine, centre de distribution et de client. Cependant le réseau inverse regroupe respectivement : le client, le centre de désassemblage, le centre de distribution ainsi que le client secondaire (deuxième marche). A travers ces sites potentiels, plusieurs liens de flux inverse sont considérés dans le modèle et montrés dans la figure II-1. L'objectif des auteurs est de chercher à minimiser les *coûts fixes et variables* : (de localisation des cinq sites potentiels, de transport, de la matière, d'enfouissement, de recyclage, de désassemblage, de manufacture, de réparation [nouveau produit], de remanufacture [produit usagé], de stockage au centre de distribution [par minimisation de la capacité non utilisée dans les usines], d'inventaire et finalement d'achat d'un ancien produit) pour *un maximum de profit total* (balance de revient de l'utilisation d'anciens(es) produits et/ou matières par rapport à de nouveaux(elles) produits et/ou matières). En vue de donner à l'étude un aspect stochastique plusieurs analyses par scénario (variation du taux des retours) ont été menées, et ce dans le but de mieux percevoir l'allure du profit total (coût d'investissement en fonction du taux de retours). Bien que le formalisme mathématique soit assez lourd, l'exécution du modèle s'est pratiquée via le logiciel Xpress 2006a sur une structure de petite taille.



**Figure II-1** : la structure de la chaîne directe et inverse ainsi que les deux flux proposés par (El-sayed *et al.*, 2008)

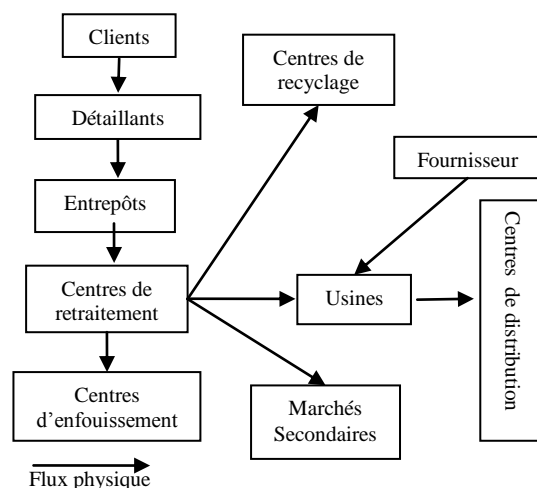
Nous distinguons également les travaux de Demirel et Gökçen, (2008) par leurs intérêts portés à la conception d'une chaîne globale, avec la prise en considération du problème de récupération d'un produit ou/et composant, puis son intégration de nouveau dans la chaîne. A partir d'un modèle mathématique formulé en entier mixte non linéaire, ils ont cherché à localiser les positions optimales des sites intermédiaires entre usine et client (centre de distribution, centre de collection et centre de désassemblage), en tenant compte de plusieurs liens physiques entre les entités de la chaîne. Quant à voir la balance entre le *coût total d'investissement* (d'installation des trois potentiels intermédiaires, de transport, de production, de collection, de désassemblage, d'achats des parties de composants du fournisseur y compris le transport du fournisseur vers l'usine et d'enfouissement) et *le taux des retours*, les auteurs ont exploité une analyse de sensibilité par scénario. Pour cause de limitation du support d'optimisation utilisé, à savoir le **GAMS-CPLEX Solver**, les auteurs se sont heurtés à la limitation de la taille de leur système (250 clients, 30 produits, 30 centres de distributions, 30 centres de désassemblage, 30 usines et 30 centres de collectes avec un taux de retours de 60%).

Salema *et al*, (2007) ont proposé un travail original cité par plusieurs auteurs traitant l'optimisation de localisation-allocation d'un réseau logistique globale dans un environnement incertain de capacités limitées des sites. Le modèle proposé représente une extension du modèle de Feischamann (2001) dit **RNM** (Recovery Network Model). En plus de la localisation des sites d'entrepôts, l'extension de ce travail se remarque au niveau de la localisation d'autres sites potentiels (usines, centres d'entrepôt et centres de désassemblage). Le flux direct passe de l'usine vers le client par l'intermédiaire du centre d'entrepôt, tandis que le flux inverse se fait du client vers l'usine via le centre de désassemblage. L'analyse du modèle proposé en **MILP** (MultintegerLinearProblem) est résolue par le logiciel **GAMS/CPLEX 8.1**. Pour entamer les cas aléatoires, des capacités minimales et maximales ont été supposées pour différentes configurations sélectionnées. Afin de voir la fiabilité de la demande directe et de retour (satisfaction, non satisfaction), des procédures d'analyse probabiliste par scénario ont été appliquées.

Egalement, nous parlons d'un autre cas distinctif de conception du réseau logistique global dans le cas stochastique à plusieurs niveaux développé par, Lee *et al*. (2010). Afin de concevoir une chaîne plus durable, le travail a été étendu par Lee et Don (2009), pour discuter sur le cas de l'approche dynamique. Pour offrir plus de flexibilité à la chaîne bouclée, les auteurs ont implémenté dans la structure de leur chaîne une nouvelle entité dite **Hybrid Processing Facility**, dont le rôle est de muter, selon le besoin et la période de la demande, d'un centre de distribution vers un centre de collection ou l'inverse. Quant à la prise des décisions liées aux choix de configuration du réseau,

les capacités des trois centres intermédiaires de dépôt (distribution, collection et HPF) doivent intervenir astucieusement pour une réponse optimale à la commande. De plus, dans le cas stochastique, le recours à la représentation vectorielle du modèle devient inévitable où une fonction probabiliste a été ajoutée, définissant ainsi les scénarios possibles dépendant des paramètres incertains. L'approche de la résolution utilisée dans les deux cas est l'approximation *S.A.A* (*Sample Average Approximation*) hybridée par des techniques de simulation à base d'algorithmes *SA* (*Simulated Annealing*) : qui sert à faire le codage du domaine de faisabilité de la région de localisation).

Les produits *OEM* (Original Equipment Manufacturing) tiennent une grande part des produits à être récupérés au niveau de la chaîne logistique inverse. Dans une inspiration que tous les partenaires doivent contribuer au problème de retour *EPR* (Extended Producer Responsibility), (Mutha et al, 2008) ont développé un modèle mathématique qui cherche un équilibre entre le volume des produits retournés et les différentes demandes (remanufacture, réutilisation et recyclage) (voir figure3). Quant aux destinations inverses des articles, ils se collectent dans un entrepôt, puis seront amenés vers le centre *RPC* (*Reprocessing Center*) pour être démantelés en module puis inspectés. Selon l'état du module obtenu, le choix des affectations des flux sera plus clairs ; c.à.d du *RPC* : vers les usines de manufacture, ou le marché secondaire (réutilisation sans valeur ajoutée), ou le centre de recyclages ou finalement vers les sites d'enfouissement. Partant d'un objectif de minimiser *les coûts* (de transport, d'opération, d'installation des sites [usine, centre de distribution et *RPC*] et d'inventaire) *avec la prise en considération des capacités des sites* (entrepôt, *RPC*, centre de recyclage, centre d'enfouissement), les auteurs ont utilisé le logiciel *GAMS* pour l'optimisation du problème en combinaison d'une analyse par scénario concernant le choix de la capacité des *RPC*.



**Figure 3** : Structure de conception de la chaîne logistique inverse selon (Mutha et al., 2008).

Egalement, la conception d'une chaîne logistique avec minimisation des risques liés à la gestion du flux comme le choix des fournisseurs représente une rude contrainte. Néanmoins, (Yong et al, 2007) ont abordé ce problème au cas de la logistique inverse. Dans un premier niveau et afin de distinguer les meilleurs fournisseurs qui acceptent l'accueil du flux inverse ; c'est suivant la base historique de tous les fournisseurs que les auteurs ont pu faire leur choix à l'aide d'une programmation linéaire de logique floue validé par le logiciel **LINDO**. Quant au problème de localisation-allocation supposé dans une approche déterministe à multi produits, les auteurs se sont servis des algorithmes génétiques avec considération des capacités limitées des fournisseurs. Pour les flux physiques inverses, ils se permettent du client (marché de retours) vers le fournisseur (choisi à partir de son historique) via l'usine. Tandis que les flux directs passent de l'usine vers le marché de la demande

Pour considérer proportionnellement le caractère incertain (temps, quantité et place) d'un type de produit récupéré, Mao et al, (2007) ont proposé un modèle de traitement d'un seul type de produit pendant plusieurs périodes dans un réseau de chaîne logistique bouclée. Leur chaîne se construit de centres de retour, de désassemblage, d'usines de traitement (remanufacture) et de centres de distribution. Sous les critères de la robustesse de la structure du réseau à localiser, ils ont cherché à minimiser le coût total d'investissement (stockage, transport, infrastructure, ouverture) en respectant la stabilité de la production dans des enveloppes de temps de durée aléatoire. Pour se permettre de résoudre l'optimisation du problème de localisation, ils ont développé des algorithmes intelligents hybridés à l'aide de logiciels **Matlab** et **RaLc**.

Aussi, pour une chaîne logistique bouclée composée de trois échelons dans le sens direct (groupant les entités classiques : fournisseurs, usines, centres de distribution et client) et deux échelons dans le sens inverse (client, centre de collecte et centre d'élimination), le groupe iranien de Ramzani et al (2012), ont investigué une analyse multi-objective par un support de modélisation mathématique. La particularité de leurs travaux était d'atteindre un maximum de profit avec de multiples tentatives sur les choix de configuration. Le modèle mathématique est de type MILP comprenant trois fonctions objectives. La principale fonction objectif a pour intérêt économique de minimiser le coût avec un maximum de profit envers l'environnement pour un ensemble de résultats optimaux de localisation-allocation sur plusieurs scénarios. Leur étude est classée parmi les plus récentes qui traite la conception et la planification simultanément avec une certaine robustesse marquée par l'addition de deux autres fonctions objectives dont une stipule l'amélioration du service client dans le sens direct et inverse (par l'introduction d'un facteur de responsabilisation). Pour la troisième fonction objective, elle a pour but de réduire le nombre de la matière première

défectueuse provenant des fournisseurs afin de faire croître le niveau de qualité. Par ailleurs plusieurs améliorations sur le plan technique sont ajoutées malgré la complexité du problème de modélisation mathématique comme par exemple la diversité de possibilités des flux physiques entre sept entités dont certains cas le centre de distribution peut devenir aussi un centre de collecte. Pour un tel type de travail : matière première, multi-produit, capacité limitée des entités, localisation de cinq différentes entités, avec objectifs de maximiser le profit, améliorer la qualité et responsabiliser les clients par un meilleur service pour ceux qui respectent l'environnement ; l'approche d'optimisation utilisée est la méthode de e-contraintes de telle sorte que les deux dernières fonctions objectif se glissent comme des contraintes dans la fonction objectif principale avec des barrières d'extremum pour l'ensemble de solutions de Pareto pour une telle configuration.

Entre autre, parmi les travaux dédiés au problème de conception et planification des chaînes logistiques bouclées, on distingue un cas d'application pratique dans le secteur d'industrie du verre au Portugal. En effet le groupe de Zeballos et *al.* (2012) ont cherché à relever un défi dans la résolution du problème majeur de l'incertain au niveau de la qualité et la quantité en vue de synchroniser les deux flux physiques opposés dans une entreprise à l'échelle d'un pays et pour divers types de produit en interaction entrant dans la composition d'un produit final. La particularité dans leur travail, c'est que, simultanément, les deux niveaux de décisions stratégiques et tactiques sont intégrés dans la modélisation mathématique *M.I.L.P* et décernés respectivement par des paramètres de temps macro et micro. Sur le plan stratégique, l'ouverture et l'utilisation des différentes entités (usines, entrepôt, centre de désassemblage avec option d'élimination) doit gérer les demandes et les retours de et vers les clients de plusieurs produits. Bien que les capacités d'entités citées y compris celle des fournisseurs soient limitées, les coûts de pénalité liés à l'insatisfaction du client en demande et en retour sont aussi considérés. Par ailleurs pour gérer l'incertain en qualité et en quantité, la simulation du problème est éminente sur un ensemble de scénarios avec une classification par fraction de la qualité du produit retourné par les clients sur des sub-périodes. Pour un tel problème doté de plusieurs scénarios, les configurations finales de l'ouverture et l'utilisation des entités citées sont simulées par le solveur CPLEX sur une CPU I7.

Par ailleurs, pour la même entreprise, on distingue un travail de Salema et *al.* (2010). Comme avantage par rapport au travail précédent, le modèle mathématique proposé considère aussi l'effet de stockage au niveau des trois entités en plus de l'assignement des clients. De même pour donner un ordonnancement plus flexible par rapport au facteur du temps à l'échelle tactique (les temps : de voyage entre deux entités, de traitement et usage d'un produit sont considérés). Bien que l'étude soit déterministe, leur travail représente une référence pour la description d'une chaîne



logistique au niveau de la représentation algébrique G.A.B.C.C.N.A (**graph approach based on conventional concepts of nodes and arcs**) qui s'avère plus adéquat dans la formulation mathématique de problème de grande structure. Pour exprimer le problème de l'incertain, une analyse de sensibilité par scénarios est réalisée dont certains paramètres sont susceptibles d'être variables à l'horizon du temps. De même le solveur GAMS/CPLEX est utilisé au cours de l'optimisation.

D'autre part Pishvae et al (2011), ont examiné le facteur de la robustesse d'une autre manière afin de soulever le retour aléatoire en quantité d'un type de produit sur la configuration définitive d'une chaîne. Partant d'un but de localiser trois entités intermédiaires, en vue de connecter le client initial en amont par un client secondaire en aval, les installations des centres de collecte/inspection, de récupération puis de redistribution doivent être fixées sur les meilleurs sites. Bien que le problème est formulé en *M.I.L.P.*, l'analyse de la robustesse sur le dimensionnement de l'incertain en quantité (coût et/ou nombre) est visualisée par le changement de plusieurs paramètres suivant des lois de distribution uniforme avec des moyennes associées à des bornes extrêmes dépendant de probabilités d'incertain. Sur le plan d'optimisation, les résultats sont simulés par le solveur **CPLEX 10.0**.

Dans l'industrie de métallurgie telle que celle du fer et de l'acier, les déchets des produits que ce soit dans la phase de modelage ou dans la phase de récupération sont importants et doivent être recyclés. C'est dans ce contexte que Vahdani et al (2012) ont apporté une connexion harmonieuse entre les deux chaînes opposées. Plusieurs nouveaux concepts sont introduits dans leur étude de conception et pilotage pour une planification plus robuste. Pour le centre de recyclage on distingue des considérations comme : le facteur de file d'attente pour un produit avec probabilité de changement de sa longueur au centre de recyclage ainsi que la variation du taux et de nombre de serveurs de recyclage pour un produit. Par ailleurs, pour une satisfaction totale des zones de la clientèle et sachant que la cadence des retours d'un ou des produits sature parfois les centres de collectes installés allant jusqu'à leur blocage, l'option d'ajouter un centre de collecte d'urgence est réalisable. Pour une meilleure localisation de centres de collections et de recyclages, l'analyse de la robustesse par la variation des données avec probabilité accommode les décisions finales binaires et variables. Autrement, dit pour un affinement plus intelligent des données, la théorie de logique floue multi-objective de Torabi et Hassine (2008) est appliquée. L'optimisation et la simulation du problème est résolue à l'aide du solveur GAMS.

### **II-3-4 Analyses et critiques**

Par le fait que la structure d'une chaîne globale contient plus de trois entités, l'étude du problème de conception et pilotage se complique de plus en plus. Selon les objectifs tracés par les auteurs et afin de répondre aux maximums de profits, plusieurs propositions de conception ont été décrites. Pour l'ensemble des articles cités nous signalons dès le départ que des complications surgissent au niveau de la formulation mathématique de leurs modèles, surtout quand il s'agit de traiter un problème à plusieurs objectifs et contraintes. Certains auteurs et dans la limite de la possibilité, ont décomposé leurs modèles en sous modèles. Par contre d'autres, ont validé leurs modèles sur des cas très complexes mais sur de petites tailles du système en se justifiant, que l'outil de calcul utilisé est limité et la décomposition du modèle est difficile. Mais en général, ces études ont apporté beaucoup d'intérêt au problème de récupération, toutes en donnant au lecteur une vision plus large, sur les différents mécanismes de conception dans un environnement global permettant ainsi de distinguer les méthodes d'optimisations les plus puissantes qui lui convient. En fin, nous devons signaler que pour la plupart de travaux relatés, les données d'entrée sont connues auparavant et dans le cas stochastique, l'analyse par scénario fait varier proportionnellement quelques données. Ce qui justifie qu'à l'horizon, la nécessité de la disposition des simulateurs puissants d'optimisation et simulation qui peuvent performer l'étude du problème de conception et pilotage à tous les niveaux (stratégique, tactique et opérationnel), devient indispensable.

### **II-4 Ensemble de tableaux résumant les indices descriptifs des travaux dédiés aux problèmes de Conception et pilotage des chaînes logistiques inverses et globales**

Les tableaux ci dessous résumant les indices descriptifs des travaux dédiés au problème de conception et pilotage des chaînes logistiques inverses et globales étudiés dans l'état de l'art. La colonne numéro 1 représente la nomenclature du modèle, le nombre de niveaux, la considération de la capacité des entités impliquées dans la configuration de la chaîne, l'état du régime d'étude ainsi que le nombre de produit. La colonne deux décrit les sites impliqués dans la formation du réseau de récupération et le cadre d'application du modèle s'il existe. Respectivement, l'objectivité et l'approche de résolution sont indiquées dans les colonnes quatre et cinq.

Auteurs	Modèles	Sites/Application	Objectif	Approche de résolution
Cruz-Revera et Ertel, 2009	<i>UFCFLP</i> 1 niveau	Point de retour Centre de collecte La collecte de véhicule en fin de vie	Minimisation de la distance Localisation de centre de collecte Maximisation du taux de récupération Un pronostic sur les sites et le nombre des centres de collecte à localiser jusqu'à 2025	Solveur Station Daskin (2006)
Si-bo et Wei-Lai 2008	<i>MILP</i> 2 niveaux	Point de collecte Centre de collecte Centre de retours centralisés	Maximisation des revenus des retournés Minimisation des coûts d'installation de centres de collectes et de retours centralisés	Algorithme génétique
Lu et al, 2008	<i>MILP</i> 2 niveaux	Points de retour Centres de transit Centres de retraitement	Les localisations optimales des centres de transit et de retraitement Considération de l'impact de l'environnement au cours du retraitement	Algorithme génétique
Hang et Chen, 2008	<i>MIRLP</i> Plusieurs niveaux	Centre de collecte Usine de traitement Usine (matière première) Usine (produit utilisé)	Optimisation du problème de localisation et allocation en considérant les capacités limitées des centres de collecte et traitement	Relaxation Lagrangienne
Yin et Wang, 2008	<i>FMOLP</i> 1 niveau	Point de collecte centre indésirables Récupération des batteries en chine	Localisation des centres de retraitement (réduction de l'impact du retraitement sur l'environnement)	Hybridation logique floue et Lagrangian .R
He et al, 2007	<i>FMOLP</i> 1 niveau	Aires de la collecte centres de reprocessus Déchets municipaux (chine)	Localisation des centres de reprocessus	Hybridation algorithme génétique et Logique Floue
Wang et Yang, 2007	Plusieurs niveaux Plusieurs classes de produit Capacité limitée des fournisseurs	Point de collecte Centre de stockage Usine de traitement usine de recyclage Electroniques (izo 14000)	Choix de fournisseurs (Logique Floue) Optimisation du problème de localisation et allocation	Hybridation algorithme génétique et Logique Floue

Tableau II-1: Indices descriptifs des travaux dédiés aux problèmes de Conception et pilotage des chaînes logistiques inverse: Cas Déterministe

Auteurs	Modèles	Sites/ Application	Objectif	Approche de résolution
<b>Pourmohammadiet al, 2003</b>	<b>Dynamique MILP</b> multi niveaux Capacité de 3 usines potentials (pour le flux inverse)	Centre de collection VAPC (Value added process center) Centre d'élimination Usine (matière première) <i>Déchets industriels d'Aluminium (los Angles)</i>	<b>Protection de l'environnement (CO2 + H2O + energie)</b>  <b>Localisation des centres VAPC</b>	<b>Algorithme génétique</b>
<b>Kim et al, 2008</b>	<b>Stochastique MILP</b> multi niveaux multi production Capacité limitée	<b>Point collecte</b> <b>Centre de collecte</b> <b>Centre de désassemblage</b> <b>Center de retraitement</b> <b>Sous-traitant</b> <b>Centre d'élimination</b>	<b>Planification au niveau opérationnel (maximisation du processus de récupération)</b> <b>Minimisation du coût du sous-traitants au lieu de l'élimination</b>	<b>OPL Studio</b>
<b>Meng, 2008</b>	<b>Stochastique MILP</b> <b>Plusieurs classes de produits</b> <b>Paramètres de probabilité</b> multi niveaux Capacité limitée	<b>Point de collection</b> <b>Entrepôt</b> <b>Centre de recyclage</b> <b>Centre de remanufacture</b>  <i>WEEE (chine)</i>	<b>Minimisation de la distance</b>	<b>Lingo 08</b>
<b>Kara et Onut, 2010</b>	<b>Stochastique MILP</b> 1 niveau multi production Capacité (min et max)	<b>Client</b> <b>Centre de recyclage</b>  <i>Recyclage du papier (Turkie)</i>	Localisation du centre de recyclage sous considération de l'incertain par l'analyse par scenario	<b>Analyse par scenario</b> <b>GAMS/CPLEX</b>

**Tableau II-2: Indices descriptifs des travaux dédiés aux problèmes de Conception et pilotage des chaînes logistiques inverse: *Cas dynamique et stochastique***

Auteurs	Modèles	Sites/ Application	objectif	Approche de résolution
<b>Zhaohua et Jianhua, 2008</b>	<b>MILP</b> Multi niveau	Usine ou centre de processus vers le clien (directe) Clien – C.C- cntre de processus –centre d'élimination (inverse)  <i>Computers (Tai'an à Shandong-China)</i>	Optimizationdu problem de localisation d'allocation	<b>Lagrangian. R</b>
<b>Zhou et al,2008</b>	<b>MILP</b> Multi niveau	Usine ou centre de recuperation-DC-Client (directe)  Client- DC- centre de récupération (inverse)	Localisation allocation avec une couverture complète de la demande  Maximisation de la fraction de produits récupérables	<b>Lingo 8.0</b>
<b>Luaet al, 2008</b>	<b>MILP (UNRM)</b> Multi niveau	Usine ou centre de retraitement-client (directe)  Client- C de collecte – C de retraitement (inverse)	Minimisation des coûts opérationnels, de transport et d'élimination (sous le critère de la minimisation de nombre de sites)	Hybridation Lagrangian. R et LP-ToolKit 4.15
<b>Lee et al, 2008</b>	<b>m-RLNP (MILP)</b> Multi niveaux Multi produits	Centre de retraitement- centre de recyclage -usine (directe)  Centre de retours- centre de désassemblage- centre de retraitement (inverse)	Minimisation des coûts des distributions et des ouvertures	<b>Algorithme génétique</b>

**Tableau II-3: Indices descriptifs des travaux dédiés aux problèmes de Conception et pilotage des chaînes logistiques directes et inverses: Cas déterministe**

Auteurs	Modèles	Sites/ Application	objectif	Approche de résolution
<b>Tang et Xie, 2007</b>	<b>MILP</b> Dynamique multi niveaux multi produits Capacité limitée	Clients- centre de collecte- centre de réparation - Usine	Optimisation du problème de localisation et d'allocation  Ouverture ou fermeture périodique de centres de réparation et de collecte	<b>Algorithme génétique</b>
<b>Min et al, 2008b</b>	<b>MILP</b> Dynamique multi niveaux multi produits Capacité limitée	Usine- DC- Client (directe) Centre de Réparation (inverse)	Intégration de centre réparation (pour couvrir la garantie) Optimisation d'entités à localiser (DC et centre de réparation)	<b>Algorithme génétique</b>
<b>Liu et Ni, 2007</b>	<b>MILP</b> Dynamique Multi Produits Capacité limitée	Usine - Entrepôt - Client (directe) Client – centre de récupération- Usine (inverse)	Performance du service client Location de deux centres dans un environnement dynamique	<b>Immune GeneticAlgorithm (Biologie)</b>
<b>Demirel et Gökçen, 2008</b>	<b>MILP</b> stochastique multi-produits multi niveau capacité limitée	250 clients- 30 DC.- 30 centre de désassemblage- 30 plants- 30 centres de collecte 3 produits	Recupération des produits avec optimization du coût total d'investissement	<b>Analyse par scenario scenario GAMS-CPLEX Solver avec un taux de récupération de 60%</b>
<b>Salema et al, 2007</b>	<b>MILP</b> stochastique multi-produits multi niveau capacité limitée (min et max)	Usine – Entrepôt – Client (directe) Client-centre de désassemblage–usine (inverse)	Localisation- allocation	<b>Analyse par scenario scenario GAMS/CPLEX 8.1</b>
<b>Lee et Dong., 2009</b>	<b>MILP</b> Dynamique + stochastique multi niveaux multi produits Capacité (mini & et max) de 3 centres intermédiaires	<b>Mutation périodique de centre 'HybridProcessingFacility (HPF)</b> <b>Usine-DC et/ou HPF- Client (directe)</b> <b>Client – Centre de collecte et/ou HPF- Usine (inverse)</b>	<b>Choix de la configuration</b> <b>Taux de satisfaction maximale de la demande</b>	<b>Function probabiliste (scénario)</b> <b>Réduit Simulé</b>

**Tableau II-4: Indices descriptifs des travaux dédiés aux problèmes de Conception et pilotage des chaînes logistiques directes et inverses: Cas dynamique et stochastique**

Auteurs	Modèles	Sites/ Application	objectif	Approche de résolution
Mutha et al, 2008	<p><b>MILP</b></p> <p>Stochastique</p> <p>multi - produits</p> <p>multi - niveaux</p> <p>Capacité limitée (Entrepôt, RPC, centre de recyclage, centre d'élimination)</p>	<p>Désassemblage en modules</p> <p>Plusieurs sites</p> <p>OEM (Original Equipment Manufacturing)</p>	<p><b>Choise of the configuration with takin into account the capacity of al centers of traitement.</b></p> <p>Choix de configurations en tenant en compte les capacités de tous les centres intermédiaires</p>	<p><i>Analyse par scénario</i></p> <p><b>GAMS</b></p>
Ramzani et al, 2012	<p><b>Multi – objective</b></p> <p>Stochastique</p> <p>Multi niveau</p> <p>multi – produits</p> <p>capacité limitée</p>	<p>Fournisseur-Usine - DC - Client (directe)</p> <p>Client - centre collecte - centre d'élimination (inverse)</p>	<p>Maximisation du profit de récupération pour des localisations et allocation optimale</p> <p>Amélioration de la qualité de la matière première</p> <p>Responsabilisation du client par un meilleur service</p>	<p><i>Analyse par scénario</i></p> <p><b>E- contraintes</b></p> <p><b>GAMS/CPLEX</b></p>
Zeballos et al, 2012	<p><b>MILP</b></p> <p>Stochastique</p> <p><i>Dynamique</i></p> <p><i>Macro periode (stratégique)</i></p> <p><i>Micro période (tactique)</i></p> <p>Multi niveau</p> <p>multi – produits</p> <p>capacité limitée</p>	<p>Localisation de : usines, entrepôt, centre de désassemblage avec option d'élimination</p> <p>Entités fixes Client – fournisseurs</p> <p>INDUSTRIE DU VERRE (PORTUGAL)</p>	<p>Gestion de l'incertain sur la qualité et la quantité</p> <p>Conception et planification robuste d'une chaîne logistique bouclée</p> <p>Choix de meilleurs configurations</p>	<p><i>Analyse par scénario</i></p> <p><b>GAMS/CPLEX</b></p>
Salema et al, 2010	<p><b>MILP</b></p> <p><b>Formulation en G.A.B.C.C.N.A</b></p> <p>Stochastique</p> <p>Multi niveau</p> <p>multi – produits</p> <p>capacité limitée</p>	<p>Localisation de : usines, entrepôt, centre de désassemblage (avec option d'élimination) insertion des coûts de stockage</p> <p>Entités fixes Client – fournisseurs</p> <p>INDUSTRIE DU VERRE (PORTUGAL)</p>	<p>Gestion de l'incertain sur la qualité et la quantité</p> <p>Conception et planification robuste d'une chaîne logistique bouclée</p> <p>Choix de meilleures configurations</p>	<p><i>Analyse par scénario</i></p> <p><b>GAMS/CPLEX</b></p>

**Tableau II-5 : Indices descriptifs des travaux dédiés aux problèmes de Conception et pilotage des chaînes logistiques directes et inverses: Cas dynamique et stochastique (suite)**

Auteurs	Modèles	Sites/ Application	objectif	Approche de résolution
Hassanzadah et al, 2013	<b>MILP</b> <b>Dynamique</b> Multi niveau multi – produits capacité limitée	Fournisseur – Centre de désassemblage – Centre de remise à neuf	Choix de fournisseurs par une analyse multicritères  <i>Localisation de Centres de désassemblage et de remise à neuf</i>  Allocation de différents flux avec possibilité de reconfiguration des entités pour accueillir un produit	Hybridation choix multicritère AHP + logique floue  <i>Analyse par scénario</i>  CPM  GAMS
Pishvae et al, 2011	<b>MILP</b> Stochastique Multi niveau Mono-produit capacité limitée	Client initiale - centre de collecte/inspection - centre de récupération – centre d'élimination – centre de redistribution – Client secondaire	Robuste Optimisation du problème de localisation et d'allocation	<i>Analyse par scénario</i>  CPLEX 10.0
Vahdani et al, 2012	<b>MILP</b> Stochastique multi niveaux multi produits Capacité limitée	Fournisseur- usine1(fer et acier)- usine2(produits finis) centre de distribution- client  Client- centre de collecte- centre de reprocessus- usine1  <b>INDUSTRIE DE FER ET D'ACIER</b>	Satisfaction des clients  Robuste Optimisation du problème de localisation et d'allocation	<i>Analyse par scénario</i>  <i>logique floue</i>  GAMS

**Tableau II-6 : Indices descriptifs des travaux dédiés aux problèmes de Conception et pilotage des chaînes logistiques directes et inverses: Cas dynamique et stochastique (suite)**

## Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté quelques travaux abordant les problématiques de conception et pilotages des réseaux logistiques inverses et globaux (directe et inverse). En détail, dans une première partie, nous avons présenté un état de l'art riche qui regroupe une sélection de travaux antérieurs dédiés aux problèmes de conception et pilotage des réseaux logistiques directs.



Ci après des modèles de natures différentes (déterministes, dynamiques et stochastiques) et des méthodes de résolution concernant les réseaux inverses ainsi que les réseaux logistiques bouclés (directs et inverses) ont été rapportées et critiquées.

Pour ce type de problématique, les perspectives sont multiples. Rien que pour le cas du réseau inverse à deux échelons, il est possible d'utiliser des approches d'optimisation robustes à travers la simulation introduisant l'incertitude des retournés en quantité et en qualité. En plus, la vision globale de ce type de réseau dans une approche prenant en compte à la fois les niveaux stratégique, tactique et opérationnel et l'aspect stochastique (flux aléatoires) dans des variations dynamiques et séquentielles pourra apporter plus d'informations pour de meilleurs prises de décision. Pour exprimer ce problème, dont l'aspect environnemental et social présentent des éléments fondamentaux au cours de la réalisation d'un tel réseau, nous discutons dans le chapitre suivant sur notre contribution ajoutée au travaux cités.

# Chapitre III

## Présentation d'approches de modélisation mathématique en entier mixte pour la conception et le pilotage de chaînes logistiques inverses et fermées

### **Introduction :**

Dans les deux chapitres précédents, on a montré que l'art de la présentation scientifique des problèmes de conception et pilotage des chaînes logistiques inverses et intégrales représente un challenge pour toutes les entreprises du 21<sup>ème</sup> siècle. Les approches de modélisation mathématique en entier mixte ont montré leurs fruits d'utilisation dans beaucoup de cas génériques ainsi que pratiques. Une analyse structurelle et technique des travaux cités dans la revue de la littérature, nous a donné plusieurs directives de recherche dans l'étude des problèmes de conception et pilotage des chaînes logistiques. Rien que pour une chaîne à deux échelons et en essayant de s'approcher à la réalité, on a pu présenter deux cas d'étude de conception notées *CPCL11* et *CPCL12* (respectivement problème de conception et pilotage d'une chaîne logistique inverse 1 et 2). Aussi, dans une tentative de faire une liaison entre la chaîne directe et inverse, on est arrivé à concevoir un modèle de trois échelons portant la nomenclature *CPCLB* (problème de conception et pilotage d'une chaîne logistique bouclée). Pour les trois problèmes, l'étape de la collecte se manifeste en flux poussé tandis que les étapes de récupération s'acheminent vers les différentes entités se trouvant en aval de la collecte en flux tendu. En effet, ces deux considérations sont respectées pour avoir plus de reflexe et ainsi de coordination au niveau des planifications à court, moyen et long termes. De plus, si on réfère dans le cas d'étude du problème de récupération où l'intervention de la main d'œuvre humaine qualifiée est importante et indispensable, le travail *CPCL11* fait l'objet de

cette pratique qui peut servir la récupération d'articles d'électroménager, de bureautique, de mécanique etc. Entre autres, et dans le cas où le traitement semi automatique est beaucoup plus important que la main d'œuvre humaine, des instances de temps d'arrêt au profit de réarrangement du centre de traitement pour le passage d'un produit à l'autre sont obligatoires. C'est ainsi que le problème *CPCLI2* tient compte de cette politique de récupération. Pour les applications de cette approche, leur validité est plutôt visible dans l'étude de chaîne de grande taille avec peu de classes de produits. En dernier lieu, le modèle *CPCLB* fait l'objet d'une démarche de récupération d'un produit lorsqu'il est largement abandonné ou son désassemblage en module a plus de valeur et de visibilité. Les cas d'application sont si nombreux à l'égard des bateaux, avions, camions et tout article non homogène en grande quantité et ayant beaucoup de valeurs de récupération après son désassemblage.

Notons de plus, plusieurs perspectives socioprofessionnelle, environnementale et durable sont présentées dans ces approches dans un contexte dynamique, stochastique à capacité limitée.

### **III-1 Problème de conception et pilotage d'une chaîne inverse CPCLI1 :**

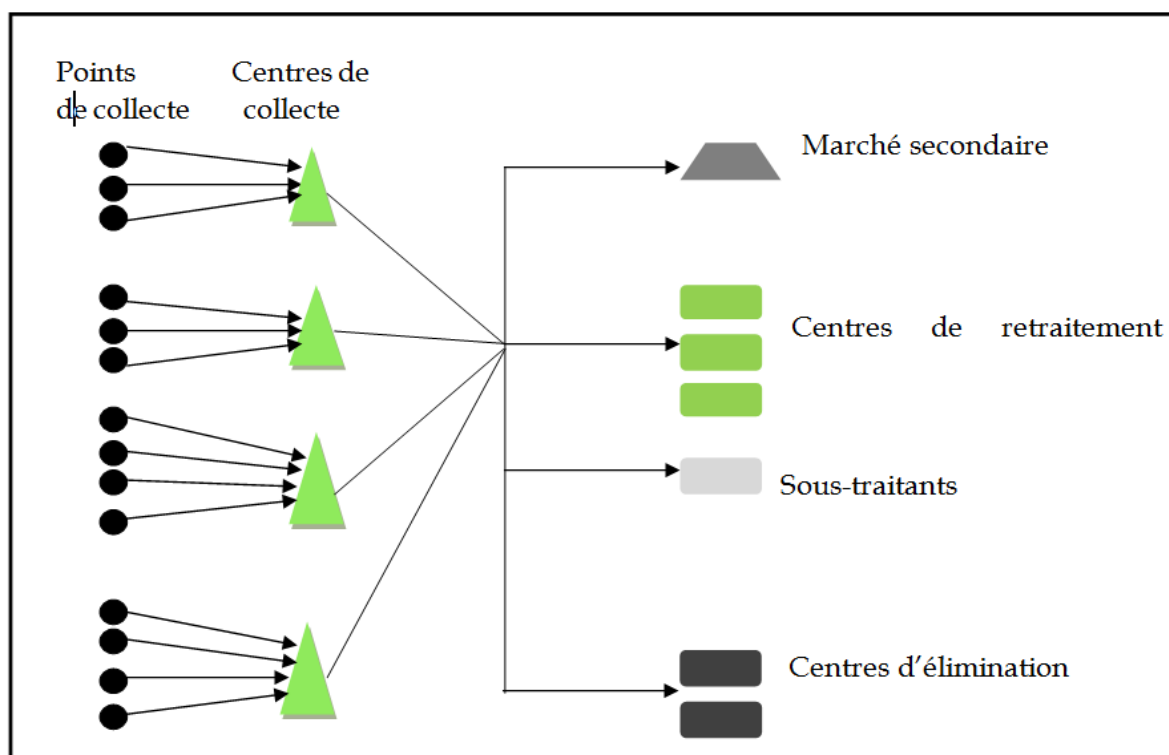
#### **III-1-1 Description du problème CPCLI1 :**

Le problème étudié est de type générique qui peut être appliqué à plusieurs cas de récupération de déchets de valeur (Bennekrouf et *al.*, 2011a, Bennekrouf et *al.*, 2011b). La chaîne inverse proposée regroupe 6 entités spécifiques. Les entités prédéfinies à l'avance sont : points de collecte (centre de retours), marchés secondaires, sous traitants et centres d'élimination. Pour une meilleure synergie entre ces différentes entités, nous présentons notre contribution à l'étude de l'optimisation de la localisation des centres principaux dans la chaîne de retour pour les meilleurs assignements des flux physiques. Contrairement à plusieurs travaux antérieurs, nous avons considéré le critère socioprofessionnel dans notre étude. Ceci exige que si un centre de collecte ou de retraitement est ouvert, il ne serait jamais fermé dans les périodes qui suivent. Sachant qu'une grande partie des tâches opérationnels dans ces types de centres sont manuelles ou semi automatiques, l'avantage de maintenir l'effectif du personnel permet l'amélioration de leurs performances ainsi que leur qualité. En conséquence, contrairement à la vision traditionnelle dans le monde business pour business : il est mieux de garder le personnel qui devient de plus en plus qualifié que de le changer. Evidemment ceci donnera plus d'évitement des accidents de travail associé avec un rendement fixe pendant toutes les périodes. Par ailleurs, si on prend les retours aléatoires des produits par rapport à leurs quantités par périodes, comme on a cité précédemment, il est mieux de travailler sur une taille de chaînes inverses plus petites de sortes que

l'approvisionnement de plusieurs classes de produits permettra le fonctionnement continu de l'usine, que d'installer une usine dédiée à un seul type de classe de produits. Notons que plusieurs contraintes de lois restent un obstacle.

Sur le plan technique et afin de voir l'effet de l'investissement progressif par rapport au nombre de centre de retraitement à installer sur les résultats tel que le taux de récupération, le coût d'investissement et le coût de revient du produit, nous avons considéré le modèle *P median*.

En effet, cet investissement est supposé progressif afin d'apaiser le conflit entre les autorités et les firmes originales (responsables de la production des classes de produits après leurs fins de vie), en vu de faire une collaboration durable entre ces deux ensembles ordonnateurs pour un profit mutuelle et un environnement plus propre.



**Figure I-1:** structure de la chaîne inverse étudiée

La chaîne d'approvisionnement inverse se compose de trois couches principales composées de points de collecte (qui peuvent être soit des clients ou des détaillants), les centres de collecte et des centres de retraitement. Plus précisément, les produits à la fin de leur cycle de vie sont repris à partir de points de collecte par les centres de collectes. Ensuite, si les produits retournés aux normes de qualité en dépit de leur obsolescence, ils peuvent être vendus sur un marché secondaire. Sinon, les produits sont traités dans un centre de retraitement ou repris par un sous-traitant, en fonction de la capacité disponible dans les

installations des centres de retraitement. Le manque de capacité oblige également de grandes quantités de produits à aller aux centres d'élimination. Le but du modèle est donc d'optimiser le réseau et le flux inverse de produits, d'une manière à minimiser la quantité de produits qui sont forcément dédiées au centre d'élimination. D'autre part, pour éviter le surdimensionnement ou bien le sous dimensionnement des capacités des usines, des heures supplémentaires de travail sont ajoutées pour avoir l'équilibre de la charge de travail aux centres de retraitement en fonction de la quantité de produits retournés pendant différentes périodes. La figure 1.1 illustre la structure de la chaîne proposée.

### **III-1-2 Formulation mathématique du problème CPCLII :**

Le formalisme utilisé dans la modélisation et l'optimisation est celui de la programmation en entier mixte linéaire avec des variables de décisions binaires qui représentent les décisions d'ouverture ou de fermeture, ainsi que des variables de décisions entières représentant les volumes des classes de produits à distribuer de l'amont vers l'aval. Dans le modèle proposé nous avons essayé d'être plus proche de la réalité par le fait d'intégrer : le retour incertain des produits, les capacités des centres, le taux de qualité des produits avant leurs traitements et l'insertion d'un coût de motivation ou de pénalité et ceci afin de favoriser le traitement vert au lieu de l'élimination brutale. L'étude du problème a été établie dans le contexte d'une approche dynamique associée à un horizon temporel de planification.

Dans une approche de multi-produits avec une unification de l'unité temporaire de travail, la présentation mathématique du modèle est issue de l'extension du problème de localisation des usines à charges fixes sous contraintes de capacité **CFCFL** (Capacitated Fixed Charge Facility Location) (Daskin, 2003), tout en ayant comme objectif de minimiser des coûts relatifs au perfectionnement des perspectives de la logistique inverse. De nombreux coûts fixes et variables sont considérés au niveau de l'investissement de la localisation, la collection, de différents types de traitement pour une meilleure gestion des flux physiques entre les différentes entités concevant la chaîne inverse.

Avant d'entamer la partie de présentation mathématique, certaines hypothèses proposées sont respectées :

- ✓ Les coûts fixes des installations sont déterministes.
- ✓ Les coûts variables de transport, opérationnels et de profit sont fixes sur toutes les variables.

- ✓ Les quantités et qualités des produits récupérées aux points de collecte et aux centres de collectes sont aléatoires
- ✓ La distance entre le cite  $i$  et le site  $j$  est euclidienne.
- ✓ Les capacités des centres de collecte, de sous-traitants et de centres d'élimination sont fixes durant l'horizon de planification.
- ✓ Les périodes de planification sont équidistantes.
- ✓ Les coûts de traitement et de profit d'un produit sont supposés être calculés à base de la moyenne sur un nombre (bien que la classification par classe soit proposée pour montrer la dégénérescence est donc minimiser l'écart d'estimation de la valeur par rapport au coût moyen)

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

$p$ : indice des classes de produits  $p \in P$ ,

$i$ : indice des points de collecte, (qui peuvent être les consommateurs ou les détaillants),  $i \in I$ ,

$j$ : indice des sites potentiels des centres de collecte  $j \in J$ ,

$k$ : indice des marchés secondaires  $k \in K$ ,

$l$ : indice des sites potentiels des centres de refabrication  $l \in L$ ,

$m$ : indice des sous-traitants  $m \in M$ ,

$n$ : indice des centres d'élimination  $n \in N$

$t$ : indice des périodes de temps  $t \in T$ .

Les paramètres du problème sont présentés dans ce qui suit

### ***Problème de localisation et d'allocation du premier niveau***

#### ***Paramètres du premier niveau***

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

$S_p$  : volume moyen des produits de la classes  $p$  en  $m^3$ ,

$W_p$ : poids moyen d'un produit de classe  $p$  en  $kg$ ,

$F \cos^t_j$ : coûts fixes d'installation d'un centre de collecte au site  $j$ ,

$Fop^t_j$ : coûts fixes pour le fonctionnement d'un centre de collecte  $j$ ,

$Cap_j^{\min}$  : capacité minimale du centre de collecte  $j$ ,

$Cap_j^{\max}$  : capacité maximale du centre de collecte  $j$ ,

$Q_{pi}^t$  : quantité réelle de produits de la classes  $p$  disponible au point de collecte  $i$  durant la période  $t$ ,

$Q_{\max,pi}^t$  : quantité maximale de produits de classes  $p$  pouvant être collectés au point de collecte  $i$  en période  $t$ .

$d_{ij}$  : distance euclidienne entre le point de collecte  $i$  et le centre de collecte  $j$  en km,

$\alpha_1$  : coût de transport par  $km$  et par  $kg$  dans le premier niveau.

### **Modèle de location-allocation du premier niveau**

Les variables de décision du modèle sont comme suit :

$X_j := 1$ , si un centre de collecte est mis en place au site  $j$  de façon permanente pour toutes les périodes  $t$ , 0, si non,

$Y_{ij} = 1$ , si le point de collecte  $i$  est assigné de façon permanente au centre de collecte  $j$  pour toutes les périodes  $t$ , 0, si non,

La fonction objectif  $Z_1$  minimise les coûts fixes d'investissement en regardant les meilleurs liens de transport entre les points de collecte et les centres de collecte sous la contrainte de capacité :

$$Z_1 = \sum_j (F \cos t_j + Fop_j^t) X_j + \sum_p \sum_i \sum_j \alpha_1 W_p d_{ij} Y_{ij} Q \max_{pi}^t \quad (I-1)$$

**sous les contraintes :**

$$\sum_j Y_{ij} = 1, \forall i \in I \quad (I-2)$$

$$Y_{ij} \leq X_j, \forall i \in I \ \& \ \forall j \in J \quad (I-3)$$

$$\sum_p \sum_i Q \max_{pi}^t S_p Y_{ij} \leq cap_j^{\max} X_j, \forall j \in J \ \& \ \forall t \in T \quad (I-4)$$

$$\sum_p \sum_i Q \max_{pi}^t S_p Y_{ij} \geq cap_j^{\min} X_j, \forall j \in J \ \& \ \forall t \in T \quad (I-5)$$

$$X_j \in \{0,1\}, \forall j \in J \quad (I-6)$$

$$Y_{ij} \in \{0,1\}, \forall i \in I \ \& \ \forall j \in J \quad (I-7)$$

La fonction objectif  $Z_1$  minimise les coûts fixes d'ouverture, de fonctionnement des usines et de transport liés à la collection des produits retournés. L'ensemble des contraintes (I-2)

assurent que chaque point  $i$  de collecte est connecté à un seul centre de collecte  $j$ . Les contraintes (I-3) assignent la connexion du point de collecte  $i$  au centre de collecte  $j$  au cas où ce dernier est ouvert. Les inégalités (I-4,I-5) sont des contraintes de capacité. Les contraintes (I-6,I-7) imposent des conditions de binarité.

Par ailleurs, afin d'éviter le problème de sous dimensionnement lié à la capacité globale de stockage en fonction des nombres de centres de collecte à ouvrir, au court du calcul, le maximum sur toutes les périodes de la quantité  $\sum_p \sum_i Q \max_{pi}^t S_p$  est utilisé. De ce fait, si la variable de décision  $X_j$  doit être égale à 1, le centre de collecte  $j$  restera ouvert sur tout l'horizon de la planification.

Aussi pour passer au deuxième niveau, on définit le résultat dans l'équation (I-8). La quantité  $V_j^t$  est le volume réel de la classe des produits  $p$  collectées à partir des points de collecte  $i$  et groupées dans le centre de collecte  $j$  à la fin de la période  $t$ .

$$\sum_i Q_{pi}^t Y_{ij} = V_{pj}^t, \forall j \in J \& \forall t \in T \quad (I-8)$$

Après que la phase de collection intervient, une seconde phase durant laquelle les centres de refabrication doivent être localisés pour passer au retraitement. Cela correspond à la période  $t'=t+1$ .

### ***Modèle de localisation et d'allocation p-median du second niveau***

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

- a- *Données et variables correspondantes au lien entre un centre de collecte localisé  $j$  et un marché secondaire  $k$ :*

$d_{jk}$  : distance entre un centre de collecte localisé  $j$  et un marché secondaire  $k$ ,

$Dem_{pk}^{t'}$  : demande du produit  $p$  au marché secondaire  $k$  pendant la période  $t'$ ,

$\beta_{pj}^{t'}$  : pourcentage du produit  $p$  de bonne qualité pendant la période  $t'$  susceptible éventuellement d'être vendu au marché secondaire pour la prochaine période  $t'$ .

$U \cos_{pk}^{t'}$  : coût unitaire pour vendre un produit  $p$  au marché secondaire  $k$  pendant la période  $t'$ ,

$V \cos_{pj}^{t'}$  : volume du produit  $p$  expédié du centre de collecte  $j$  vers le marché secondaire  $k$  pendant  $t'$ ,

- b- *Données et variables correspondantes au lien entre un centre de collecte localisé  $j$  et un centre de refabrication  $l$ :*

$d_{jl}$  : distance entre un centre de collecte localisé  $j$  et un centre de refabrication  $l$ ,



$F_{\text{cost}_l}$  : coût fixe d'ouverture d'un centre de refabrication  $l$ ,

$Tot\_time_l$  : capacité totale du centre de retraitement  $l$  en unité de temps.

$AD\_Tot\_time_l^{t'}$  : capacité additionnelle totale du centre de retraitement  $l$  en unité de temps additonnal pendant la période  $t'$

$Time_{pl}$  : temps moyen nécessaire pour le traitement d'un produit de classe  $p$  au centre de refabrication  $l$  ( workload time of product  $p$ ),

$Op_{pl}$  : coût opérationnel pour le traitement d'un produit de classe  $p$  au centre de refabrication  $l$ ,

$Ad\_Op_{pl}$  : coût opérationnel additionnel pour le traitement d'un produit de classe  $p$  au centre de refabrication  $l$ ,

$U_{\text{cost}_{pl}^{t'}}$  : coût unitaire de profit pour la classe du produit  $p$  au centre de refabrication  $l$  dans la période  $t'$ ,

$V_{pjl}^{t'}$  : volume de la classe du produit  $p$  expédiée du centre de collecte  $j$  vers le centre de refabrication  $l$  durant la période  $t'$ ,

$Ad\_V_{pjl}^{t'}$  : volume additionnel de la classe du produit  $p$  expédiée du centre de collecte  $j$  vers le centre de refabrication  $l$  durant la période  $t'$ ,

$N_l^{t'}$  : nombre de centres de refabrication  $l$  premises pour une ouverture en fonction de l'investissement possible en niveau de la période  $t'$ ,

$$X_l^{t'} = \begin{cases} 1 & \text{si un centre de refabrication est localisé au site } l \text{ pour être ouvert} \\ & \text{dès la période } t' \text{ et aussi pour tous } t'' \geq t' \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad 2$$

Sachant que le processus de récupération au niveau du centre de refabrication ouvert est en général de nature manuelle ou semi automatique, une analyse de profit modulaire est utilisée pour la sélection du centre de refabrication le plus approprié. Sur le plan social, cette analyse a pour objectif d'assurer le fonctionnement permanent d'une partie importante du personnel à travers tous les périodes planifiées au niveau du centre de refabrication ouvert. Ce qui en résulte, est une réduction importante du facteur de risque liée aux accidents du travail par le faite du maintien du personnel expérimenté. Notre contribution sur l'évaluation des performances de la chaîne logistique inverse au niveau de la conception se situe dans un sens opposée par rapport à certains travaux antérieur de la logistique inverse où la fermeture périodique d'un site est possible (Kim et al, 2008). A première vue la politique de fermeture et d'ouverture d'un centre de retraitement d'une façon saisonnière donne une imagination que

le profit économique est nettement meilleur. Cependant, en réalité le personnel est susceptible d'être changé au cours de l'alternance de l'ouverture et la fermeture ce qui entraîne certainement la réduction du degré de qualification.

Pour cette raison l'hypothèse « si un centre de refabrication est localisé au site  $l$  pour être ouvert dès la période  $t'$  et aussi pour tous  $t'' \geq t'$  » est considérée.

*c- Données et variables correspondantes au lien entre un centre de collecte localisé  $j$  et un centre de sous-traitant  $m$ :*

$d_{jm}$  : distance entre un centre de collecte localisé  $j$  et un sous-traitant  $m$ ,

$Tot\_time_m^{t'}$  : capacité du sous traitant  $m$  en unité de temps pour la période  $t'$ ,

$Op_{pm}$  : coût opérationnel du traitement de la classe de produit  $p$  par le sous traitant  $m$ ,

$U\ cos\ t_{pm}^{t'}$  : coût de profit unitaire de la classe de produit  $p$  par le sous traitant  $m$  pendant la période  $t'$ ,

$Time_{pm}$  : temps moyen nécessaire pour le traitement du produit de classe  $p$  par le sous traitant  $m$ ,

$V_{pjm}^{t'}$  : volume de la classe du produit  $p$  expédiée du centre de collecte  $j$  vers le sous traitant  $l$  pendant la période  $t'$ ,

*d- Données et variables correspondantes au lien entre un centre de collecte localisé  $j$  et le centre d'élimination  $n$ :*

$d_{jn}$  : distance entre le centre de collecte localisé  $j$  et le centre d'élimination  $n$ ,

$Op_{pn}$  : coût opérationnel pour l'élimination d'un produit de classe  $p$  au centre d'élimination  $n$ ,

$Pen_{pn}$  : coût de pénalité relatif à l'élimination d'un produit de classe  $p$  au centre d'élimination  $n$ ,

$Eq\_env\_cost_{pn}$  : coût équivalent en matière première liée à l'élimination d'un produit de classe  $p$  au centre d'élimination  $n$ ,

$V_{pjn}^{t'}$  : volume de la classe du produit  $p$  expédiée du centre de collecte  $j$  vers le centre d'élimination  $n$  pendant la période  $t'$ .

$Cap_{pn}^{t'}$  : capacité du centre d'élimination  $n$  en nombre de produit de classe  $p$  pendant la période  $t'$ ,

La fonction objectif  $Z_2$  minimise les coûts fixes d'investissement et variables liées au problème de localisation et d'allocation entre le centre de collecte et les quatre centres de retraitement spécifiques.

$$Z_2 = \sum_p \sum_j \sum_k \sum_{t'} (\alpha_{jk} w_p D_{jk} - U_{pk}^{t'}) V_{pjk}^{t'} \text{ volumes des classes } p \text{ alloués du centre de collecte } j$$

vers le marché secondaire  $k$

$$+ \sum_l \sum_{t'} F \cos t_l X_l^{t'} \text{ localisation du centre de refabrication } l$$

$$+ \sum_p \sum_j \sum_l \sum_{t'} (\alpha_{jl} w_p D_{jl} + Op_{pl} - U \cos t_{pl}^{t'}) V_{pjl}^{t'}$$

$$+ \sum_p \sum_j \sum_l \sum_{t'} (\alpha_{jl} w_p D_{jl} + Ad_{-} Op_{pl} - U \cos t_{pl}^{t'}) Ad_{-} V_{pjl}^{t'} \text{ volumes des classes } p \text{ alloués du centre de}$$

collecte  $j$  vers le centre de refabrication  $l$

$$+ \sum_p \sum_j \sum_m \sum_{t'} (\alpha_{jm} w_p D_{jm} + Op_{pm} - U \cos t_{pm}^{t'}) V_{pjm}^{t'} \text{ volumes des classes } p \text{ alloués du centre de}$$

collecte  $j$  vers le centre de sous traitance  $l$ .

$$+ \sum_p \sum_j \sum_n \sum_{t'} (\alpha_{jn} w_p D_{jn} + Op_{pn} + Pen_{pn} + Eq_{-} env_{-} \cos t_{pn}^{t'}) V_{pjn}^{t'}$$

volumes des classes  $p$  alloués du

centre de collecte  $j$  vers le centre d'élimination  $n$

(I-9)

**sous les contraintes:**

$$\sum_k V_{pjk}^{t'} + \sum_l V_{pjl}^{t'} + Ad_{-} V_{pjl}^{t'} + \sum_m V_{pjm}^{t'} + \sum_n V_{pjn}^{t'} = V_{pj}^{t'} \quad \forall p \in P, \forall j \in J, \forall t \in T, t' = t + 1 \quad (I-10)$$

$$\sum_k V_{pjk}^{t'} \leq \beta_{pj}^{t'} V_{pj}^{t'} \quad \forall p \in P, \forall j \in J, \forall t \in T, t' = t + 1 \quad (I-11)$$

$$\sum_j V_{pjk}^{t'} \leq Dem_{pk}^{t'} \quad \forall p \in P, \forall k \in K, \forall t \in T, t' = t + 1 \quad (I-12)$$

$$\sum_j \sum_k V_{pjk}^{t'} = \min \left( \sum_k Dem_{pk}^{t'}, \sum_j \beta_{pj}^{t'} V_{pj}^{t'} \right) \quad \forall p \in P, \forall t \in T, t' = t + 1 \quad (I-13)$$

$$\sum_p \sum_j V_{pjl}^{t'} time_{pl} = (Tot_{-} time_l + AD_{-} Tot_{-} time_l^{t'}) X_l^{t'} \quad \forall l \in L, \forall t \in T, t' = t + 1 \quad (I-14)$$

$$\sum_p \sum_j V_{pjm}^{t'} = \gamma Time_{pm} Tot_{-} time_m^{t'} \quad \forall m \in M, \forall t \in T, t' = t + 1 \quad (I-15)$$

$$\sum_p \sum_j V_{pjn}^{t'} \leq \gamma Cap_{pn} \quad \forall n \in N, \forall t \in T, t' = t + 1 \quad (I-16)$$

$$\sum_l X_l^{t'} = N_l^{t'} \quad \forall t \in T, t' = t + 1 \quad (I-17)$$

$$X_l^{t'} \in \{0,1\} \quad \forall l \in L \quad (I-18)$$

$$V_{pjk}^{t'} \geq 0, V_{pjl}^{t'} \geq 0, V_{pjm}^{t'} \geq 0, V_{pjn}^{t'} \geq 0$$

$$\forall p \in P, \forall j \in J, \forall K \in K, \forall l \in L, \forall m \in M, \forall n \in N \forall t \in T, t' = t + 1 \quad (I-19)$$

La fonction objectif (I-9) minimise le coût total de profit en fonction d'investissement groupant les localisations des sites potentiels de récupération, les liens de transport et le profit du second niveau. Les égalités (I-10) assurent la balance des flux entrants du premier niveau vers le centre de collecte et sortants de ce dernier vers les quatre centres de récupération du deuxième niveau. Les conditions algébriques (I-11, I-12 et I-13) contrôlent la balance de flux de bon produit en termes de qualité selon l'offre et la demande entre les centres de collecte localisées et le marché secondaire. Les contraintes (I-14 et I-15) vérifient respectivement les flux d'assignement en premier lieu entre le centre de collecte et le centre de remanufacture. Puis suivant l'incapacité des centres de remanufacture ouvert, l'excédant sera acheminé vers le sous traitant. Les inégalités (I-16) assurent le flux d'approvisionnement entre le centre de collecte et le centre d'élimination. La contrainte (I-17) signifie que le nombre de centre de remanufacture susceptible d'être ouvert pour le problème  $P$  median. Enfin les contraintes (I-18) et (I-19) imposent les conditions de binarité et de non négativité.

**N.B:**

$\gamma^{t'} = 1$  si un lien est possible entre le centre de collecte et les entités sous-traitant ainsi que le centre d'élimination à la période  $t'$ .

Entre autre,  $\gamma^{t'} = 0$  et  $=^*$  devient  $\leq$  si les centre de remanufacture localisés suffisent pour les traitements des tous les classes des produits à la période  $t'$ .

**III-2 Problème de conception et pilotage d'une chaîne inverse CPCL12 :**

**III-2-1 Description du problème CPCL12 :**

Dans le cas d'une chaîne logistique inverse équipée par des processus de retraitement plus orientés vers le semi automatique que le manuel, les temps et les coûts de réarrangement sont plus importantes et ne peuvent être ignorés. En plus de l'approche dynamique, multi-classes de produits et sous contraintes de capacité, nous avons ajouté au modèle cité dans la partie précédente d'autres contraintes liée au réarrangement du centre de retraitement. De même pour avoir plus de flexibilité dans le centre de refabrication, cette l'étude est visée sur le multi-produits (Bennekrouf et al, 2012, Bennekrouf et al, 2013b). Cette approche est considéré afin d'être plus assurant face au problème des retours aléatoires de produits dont un fonctionnement continu de l'usine peut être interrompu. D'autre part sachant que si la durée

de vie d'un produit est courte et pour avoir le critère d'interactivité avec le système économique, l'insertion d'une variété de classe de produit dans le processus de traitement au niveau des décisions stratégiques, résulte indirectement comme un facteur de robustesse et d'agilité. Au niveau de la modélisation mathématique du problème et durant une période  $t$ , une variable de décision binaire  $XO_{p,l}^{t'}$  est insérée dans le modèle pour faire montrer : la réorganisation sélective au centre de retraitement  $l$  justifiant le passage au retraitement du produit  $p$ . Pour mesurer le temps d'arrêt liée à la nouvelle réorganisation, un coefficient  $WLO_{p,l}^{t'}$  est incéré dans la restriction de la capacité de travail. Aussi un pourcentage de capacité requise au centre de retraitement  $l$  est nécessaire pour choisir la refabrication d'une tel classe de produit  $P$ . Semblable au problème *CPCLII* schématisé dans la figure 1, les flux physiques des classes de produits sont transportés du point de collecte vers le centre de collecte, puis respectivement sont orientés en priorité de ce dernier vers le marché secondaire en premier lieu, le centre de retraitement en second lieu, le sous-traitant en troisième position et la déchetterie en quatrième position. Également, dans une hypothèse où le réseau d'application est étalé sur une zone d'échelle un peu grossier entre différents états fédéraux et uni, un coût de pénalité restreinte à l'émission de CO<sub>2</sub> est présenté dans la modélisation.

### **III-2-2 Formulation mathématique du problème *CPCLII2* :**

Pour une vision globale de la chaîne logistique inverse où des instances de planification pour le réarrangement des usines. Dans cette partie on présente une extension du modèle *CPCLII*. Pareil au problème *CPCLII*, l'approche d'étude est dynamique, multi produits avec capacité limitée de toutes les entités du réseau. L'aspect stochastique se manifeste au niveau des retours incertains en termes de quantité et qualité et qu'on aura l'occasion d'interpréter dans le chapitre suivant. Aussi l'extension des capacités est faite par saison ou à l'horizon de plusieurs saisons contrairement au problème *CPCLII* où des heures supplémentaires additionnelles de travail gèrent le problème de l'extension de capacité.

Au niveau de la modélisation mathématique et afin d'exploiter le temps de réarrangement, un ensemble de contraintes {II-15, II-16, II-18, II-22 et II-3} est ajouté et accompagné de la modification des inégalités {I-17}. Aussi, on souligne que le facteur  $WLO_{p,l}^{t'}$  est indépendant au passage d'une classe d'un produit à une autre classe pendant une période  $t'$ .

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

$p$ : indice des classes de produits  $p \in P$ , et  $n_p$  nombre de produit a traiter dans la chaîne

$i$ : indice des points de collecte, (qui peuvent être les consommateurs ou les détaillants),  $i \in I$ ,

$j$ : indice des sites potentiels des centres de collecte  $j \in J$ ,

$k$ : indice des marchés secondaires  $k \in K$ ,

$l$ : indice des sites potentiels des centres de refabrication  $l \in L$ ,

$m$ : indice des sous-traitants  $m \in M$ ,

$n$ : indice des centres d'élimination  $n \in N$

$t$ : indice des périodes de temps  $t \in T$ .

$v \in V$  : Indice de véhicules (les camions sont classés en fonction de leur poids total autorisé en charge).

The parameters of the problem are presented in what follows.

Les paramètres du problème sont présentés dans ce qui suit

### ***Problème de localisation et d'allocation du premier niveau***

#### ***Paramètres du premier niveau***

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

$S_p$  : volume moyen des produits de la classes  $p$  en  $m^3$ ,

$W_p$ : poids moyen d'un produit de classe  $p$  en  $kg$ ,

$F \cos^t_j$ : coûts fixes d'installation d'un centre de collecte au site  $j$ ,

$Fop^t_j$ : coûts fixes pour le fonctionnement d'un centre de collecte  $j$ ,

$Cap_j^{\min}$  : capacité minimale du centre de collecte  $j$ ,

$Cap_j^{\max}$  : capacité maximale du centre collecte  $j$ ,

$Q^t_{pi}$ : quantité réelle de produits de la classes  $p$  disponible au point de collecte  $i$  durant la période  $t$ ,

$Q^t_{\max,pi}$  : quantité maximale de produits de classes  $p$  pouvant être collectés au point de collecte  $i$  en période  $t$ .

$d_{ij}$  : distance euclidienne entre le point de collecte  $i$  et le centre de collecte  $j$  en km,

$c^v_{i,j}$  : coût de transport par unité de poids du point de collecte  $i$  au centre de collecte  $j$  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, la somme des coûts de la consommation de carburant lorsque le véhicule n'est pas chargé et les coûts de consommation de carburant par tonne transportée et les coûts environnementaux. Ces derniers sont expliqués dans le paragraphe suivant.

### **Coût environnementaux du transport**

Les coûts environnementaux du transport se calculent en deux étapes. Premièrement, un facteur d'émission par véhicule par ton.km,  $e^v$  est estimé par une méthode de quantification. qui est développée conjointement par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie) et EpE (Entreprise Pour l'Environnement) (ADEME, 2011, [www.epe-asso.org](http://www.epe-asso.org)). Par ailleurs, le coût des émissions de CO<sub>2</sub> en euro/ton.km par véhicule est calculé avec l'indice du prix européen pour le réchauffement climatique, à l'aide de la méthode de "shadow price" pour les émissions de dioxyde de carbone. Le facteur  $e^v$ , facteur d'émission par ton.km par véhicule  $v$  en CO<sub>2</sub>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 est calculé comme suit :

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

t.q:

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

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

$t^{dv}$  : 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,

### **Modèle de location-allocation du premier niveau**

Les variables de décision du modèle sont comme suit :

$X_j := 1$ , si un centre de collecte est mis en place au site  $j$  de façon permanente pour toutes les périodes  $t$ , 0, si non,

$Y_{ij} = 1$ , si le point de collecte  $i$  est assigné de façon permanente au centre de collecte  $j$  pour toutes les périodes  $t$ , 0, si non,

La fonction objectif  $Z_1$  minimise les coûts fixes d'investissement en regardant les meilleurs liens de transport entre les points de collecte et les centres de collecte sous la contrainte de capacité :

$$Z_1 = \sum_j (F \cos t_j + Fop_j^t) X_j + \sum_p \sum_i \sum_j \sum_v c_{ij}^v W_p d_{ij} Y_{ij} Q \max_{pi}^t \quad (II-1)$$

Sachant que :

$$\sum_j Y_{ij} = 1, \forall i \in I \quad (II-2)$$

$$Y_{ij} \leq X_j, \forall i \in I \ \& \ \forall j \in J \quad (II-3)$$

$$\sum_p \sum_i Q \max_{pi}^t S_p Y_{ij} \leq cap_j^{Max} X_j, \forall j \in J \ \& \ \forall t \in T \quad (II-4)$$

$$\sum_p \sum_i Q \max_{pi}^t S_p Y_{ij} \geq cap_j^{Min} X_j, \forall j \in J \ \& \ \forall t \in T \quad (II-5)$$

$$X_j \in \{0,1\}, \forall j \in J \quad (II-6)$$

$$Y_{ij} \in \{0,1\}, \forall i \in I \ \& \ \forall j \in J \quad (II-7)$$

La fonction objectif  $Z_1$  minimise les coûts fixes d'ouverture, de fonctionnement des usines et de transport liés à la collection des produits retournés. L'ensemble des contraintes (II-2) assurent que chaque point  $i$  de collecte est connecté à un seul centre de collecte  $j$ . Les contraintes (II-3) assignent la connexion du point de collecte  $i$  au centre de collecte  $j$  au cas où ce dernier est ouvert. Les inégalités (II-4, II-5) sont des contraintes de capacité. Les contraintes (II-6,II-7) imposent des conditions de binarité.

Par ailleurs, et afin d'éviter le problème de sous dimensionnement lié à la capacité globale de stockage en fonction des nombres de centres de collecte à ouvrir, au court du calcul, le maximum sur toutes les périodes de la quantité  $\sum_p \sum_i Q \max_{pi}^t S_p$  est utilisé. De ce fait, si la variable de décision  $X_j$  doit être égale à 1, le centre de collecte  $j$  restera ouvert sur tout l'horizon de la planification.

Aussi pour passer au deuxième niveau, on définit le résultat dans l'équation (II-8). A la fin de la période  $t$ , la quantité  $V_j^t$  est définie comme, le volume réel de la classe des produits  $p$  collectées à partir des points de collecte  $i$  puis groupées dans le centre de collecte  $j$ .

$$\sum_i Q_{pi}^t Y_{ij} = V_j^t, \forall j \in J \ \& \ \forall t \in T \quad (II-8)$$



Après que la phase de collection interviennent, une seconde phase durant laquelle les centres de refabrication doivent être localisés pour passer au retraitement. Cela correspond à la période  $t' = t + 1$ .

***Modèle de localisation et d'allocation p-median du second niveau***

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

$c_{j\alpha}^v$  : coût de transport par unité de poids du centre de collecte  $j$  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)

a- *Données et variables correspondantes au lien entre un centre de collecte localisé  $j$  et un marché secondaire  $k$ :*

$d_{jk}$  : distance entre un centre de collecte localisé  $j$  et un marché secondaire  $k$ ,

$Dem_{pk}^{t'}$  : demande du produit  $p$  au marché secondaire  $k$  pendant la période  $t'$ ,

$\beta_{pj}^{t'}$  : pourcentage du produit  $p$  de bonne qualité pendant la période  $t'$  susceptible éventuellement d'être vendu au marché secondaire pour la prochaine période  $t'$ .

$U \cos_{pk}^{t'}$  : coût unitaire pour vendre un produit  $p$  au marché secondaire  $k$  pendant la période  $t'$ ,

$V_{pj}^{t'}$  : volume du produit  $p$  expédié du centre de collecte  $j$  vers le marché secondaire  $k$  pendant la période  $t'$ ,

b- *Données et variables correspondantes au lien entre un centre de collecte localisé  $j$  et un centre de refabrication  $l$ :*

$d_{jl}$  : distance un centre de collecte localisé  $j$  et un centre de refabrication  $l$ ,

$F \cos_{l1}$  : coût fixe d'ouverture d'un centre de refabrication  $l$ ,

$F_{ad,l}^{t'}$  : coûts fixe additionnels correspondant à l'extension de la capacité du centre de préfabrication à la période  $t'$ ,

$FO_{p,l}^{t'}$  : coût correspondant à la réorganisation du centre de refabrication  $l$  pour traiter les produits de classes  $p$  durant la période  $t'$ ,

$U \cos_{pl}^{t'}$  : bénéfice unitaire pour un produit de classe  $p$  au centre de remanufacture  $l$  à la période  $t'$  (ces coûts incluent aussi bien les valeur unitaire du produit récupéré que les subventions des autorités),

$Op_{pl}$  : coût opérationnel pour le traitement d'un produit de classe  $p$  au centre de refabrication  $l$ ,

$Tot\_time_l^{t'}$  : charge de travail total disponible au centre de refabrication  $l$  pour la période  $t'$ ,

$AD\_Tot\_time'_i$  : charge de travail additionnel liée à l'extension du centre de retraitement  $l$  en unité de temps additonnel à l'extension pendant la période  $t'$

$Time_{pl}$  : charge moyenne de travail en unité de temps nécessaire pour le traitement d'un produit de classe  $p$  au centre de refabrication  $l$  ( workload time of product  $p$ ),

$WLO'_{pl}$  : charge de travail correspondant à la réorganisation du centre de refabrication  $l$  pour traiter les produits de classe  $p$  durant la période  $t'$ ,

$V'_{pjl}$  : volume du produits de classe  $p$  transportées du centre de collecte  $j$  vers le centre de refabrication  $l$  durant la période  $t'$ ,

$N'_l$  : nombre de centres de refabrication  $l$  qui devraient être ouvertes à la période  $t'$ ,

$\alpha'_{p,l}$  : pourcentage de capacité requise au centre de refabrication  $l$  pour traiter les produits de classes  $p$  à la période  $t'$ ,

$$X'_l = \begin{cases} 1 & \text{si un centre de refabrication est localisé au site } l \text{ pour être ouvert} \\ & \text{dès la période } t' \text{ et aussi pour tous } t'' \geq t' \\ 0 & \text{si non} \end{cases}$$

$$XO'_{p,l} = \begin{cases} 1 & \text{si un centre de refabrication est réorganisé afin} \\ & \text{de traiter un produit de classe } p \text{ à la période } t' \\ 0 & \text{si non} \end{cases}$$

c- Données et variables correspondantes au lien entre un centre de collecte localisé  $j$  et un centre de sous traitante  $m$ :

$d_{jm}$  : distance entre un centre de collecte localisé  $j$  et un sous-traitant  $m$ ,

$Tot\_time'_m$  : capacité du sous traitant  $m$  en unité de temps pour la période  $t'$ ,

$Op_{pm}$  : coût opérationnel du traitement de la classe de produit  $p$  par le sous traitant  $m$ ,

$U \cos t'_{pm}$  : coût de profit unitaire de la classe de produit  $p$  par le sous traitant  $m$  pendant la période  $t'$ ,

$Time_{pm}$  : temps moyen nécessaire pour le traitement du produit de classe  $p$  par le sous traitant  $m$ ,

$V'_{pjm}$  : volume de la classe du produit  $p$  expédiée du centre de collecte  $j$  vers le sous traitant  $l$  pendant la période  $t'$ ,

*d- Données et variables correspondantes au lien entre un centre de collecte localisé  $j$  et le centre d'élimination  $n$ :*

$d_{jn}$  : distance entre un centre de collecte localisé  $j$  et un centre d'élimination  $n$ ,

$Op_{pn}$ : coût opérationnel pour l'élimination d'un produit de classe  $p$  au centre d'élimination  $n$ ,

$Pen_{pn}$ : coût de pénalité relatif à l'élimination d'un produit de classe  $p$  au centre d'élimination  $n$ ,

$Eq\_env\_cost_{pn}$ : coût équivalent en matière première liée à l'élimination d'un produit de classe  $p$  au centre d'élimination  $n$ ,

$V_{pjn}^{t'}$ : volume de la classe du produit  $p$  expédiée du centre de collecte  $j$  vers le centre d'élimination  $n$  pendant la période  $t'$ ,

$Cap_{pn}^{t'}$ : capacité du centre d'élimination  $n$  en nombre de produit de classe  $p$  pendant la période  $t'$ ,

Le problème p-médian consiste à minimiser :

$$\begin{aligned}
 Z_2 = & \sum_p \sum_j \sum_k \sum_{t'} \sum_v (c_{jk}^v w_p D_{jk} - U_{pk}^{t'}) V_{pjk}^{t'} \text{ volumes des classes } p \text{ alloués du centre de collecte} \\
 & j \text{ vers le marché secondaire } k \\
 & + \sum_l \sum_{t'} (F \cos t_l + F_{ad,l}^{t'}) X_l^{t'} \text{ localisation du centre de refabrication } l \\
 & + \sum_l \sum_p \sum_{t'} FO_{pl}^{t'} XO_{p,l}^{t'} \text{ fateur lié à la décision de réorganisation d'un centre de refabrication } l \\
 & + \sum_p \sum_j \sum_l \sum_{t'} \sum_v (c_{jl}^v w_p D_{jl} + Op_{pl} - U \cos t_{pl}^{t'}) V_{pjl}^{t'} \text{ volumes des classes } p \text{ alloués du centre de} \\
 & \text{ collecte } j \text{ vers le centre de refabrication } l \\
 & + \sum_p \sum_j \sum_m \sum_{t'} \sum_v (c_{jm}^v w_p D_{jm} + Op_{pm} - U \cos t_{pm}^{t'}) V_{pjm}^{t'} \text{ volumes des classes } p \text{ alloués du centre} \\
 & \text{ de collecte } j \text{ vers le centre de sous traitance } l \\
 & + \sum_p \sum_j \sum_n \sum_{t'} \sum_v (c_{jn}^v w_p D_{jn} + Op_{pn} + Pen_{pn} + Eq\_env\_cost_{pn}) V_{pjn}^{t'} \text{ volumes des classes} \\
 & p \text{ alloués du centre de collecte } j \text{ vers le centre d'élimination } n
 \end{aligned}
 \tag{II-9}$$

Sachant que :

$$\sum_l X_l^{t'} = N_l^{t'} \quad \forall t \in T, t' = t + 1 \tag{II-10}$$

$$\sum_k V'_{pjk} + \sum_l V'_{pjl} + \sum_m V'_{pjm} + \sum_n V'_{pjn} = V'_{pj} \quad \forall p \in P, \forall j \in J, \forall t \in T, t' = t + 1 \quad (II-11)$$

$$\sum_k V'_{pjk} \leq \beta'_{pj} V'_{pj} \quad \forall p \in P, \forall j \in J, \forall t \in T, t' = t + 1 \quad (II-12)$$

$$\sum_j V'_{pjk} \leq Dem'_{pk} \quad \forall p \in P, \forall k \in K, \forall t \in T, t' = t + 1 \quad (II-13)$$

$$\sum_j \sum_k V'_{pjk} = \min \left( \sum_k Dem'_{pk}, \sum_j \beta'_{pj} V'_{pj} \right) \quad \forall p \in P, \forall t \in T, t' = t + 1 \quad (II-14)$$

$$XO'_{p,l} \leq X'_l \quad \forall l \in L, \forall p \in P, \forall t \in T, t' = t + 1 \quad (II-15)$$

$$\sum_p XO'_{p,l} \leq n_p X'_l \quad \forall l \in L, \forall t \in T, t' = t + 1 \quad (II-16)$$

$$\sum_p \sum_j V'_{pjl} time_{pl} + \sum_p WLO'_{pl} XO'_{p,l} = (Tot\_time'_l + AD\_Tot\_time'_l) X'_l \quad \forall l \in L, \forall t \in T, t' = t + 1 \quad (II-17)$$

$$\sum_j V'_{pjl} time_{pl} \geq \alpha'_{p,l} (Tot\_time'_l + AD\_Tot\_time'_l) X'_l \quad \forall p \in P, \forall l \in L, \forall t \in T, t' = t + 1 \quad (II-18)$$

$$\sum_p \sum_j V'_{pjm} = \gamma' Time_{pm} Tot\_time'_m \quad \forall m \in M, \forall t \in T, t' = t + 1 \quad (II-19)$$

$$\sum_j V'_{pjn} \leq \gamma' Cap_{pn} \quad \forall n \in N, \forall t \in T, t' = t + 1 \quad (II-20)$$

$$X'_l \in \{0,1\} \quad \forall l \in L, \forall t \in T, t' = t + 1 \quad (II-21)$$

$$XO'_{p,l} \in \{0,1\} \quad \forall l \in L, \forall p \in P, \forall t \in T, t' = t + 1 \quad (II-22)$$

$$V'_{pjl} XO'_{p,l} = V'_{pjl} \quad \forall j \in J, \forall l \in L, \forall p \in P, \forall t \in T, t' = t + 1 \quad (II-23)$$

$$V'_{pjk} \geq 0, V'_{pjl} \geq 0, V'_{pjm} \geq 0, V'_{pjn} \geq 0 \\ \forall p \in P, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall l \in L, \forall m \in M, \forall n \in N \forall t \in T, t' = t + 1 \quad (II-24)$$

L'objectif du problème (II-9) est de minimiser la fonction coût composée des 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 produit 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 (II-10) donnent le nombre de centre de refabrication qui peuvent être ouvert. L'ensemble des égalités dans (II-11) sont des contraintes d'équilibre des flux. Les conditions

(II-12) à (II-14) définissent la quantité de produits qui sont envoyés des centres de collecte vers le marché secondaires suivant l'offre et la demande à condition que la qualité des produits soit suffisamment bonne. La contrainte (II-15) garantit que le traitement des produits de classes  $p$  est possible au centre de remanufacture  $l$  seulement si celui est ci ouvert avec vérification de la capacité de travail. La contraintes (II-16) vérifient le nombre de fois que le centre de refabrication est réorganisé pour traiter une classe de produit. Les inégalités (II-17) et (II-18) assurent que si la charge de travail est suffisante au centre de remanufacture, les produits y arrivent. Il est à noter que la condition (II-17) est une inégalité dans le cas où tous les produits peuvent êtres traités aux centres de remanufactures ouverts. Aussi les inégalités (II-18) donnent la capacité minimum requise au centre de refabrication  $l$  pour traiter le produit de classe  $p$  à la période  $t'$ . Les contraintes (II-19) définissent les restrictions de capacité chez les sous-traitants. Les contraintes de capacité aux centres d'élimination sont les inégalités (II-20). Les contraintes (II-21) et (II-22) imposent les conditions de binarité. La contrainte (II-23) signifie que l'affectation d'une classe de produit  $p$  au centre de remanufacture  $l$  n'est permise que si ce dernier est réorganisé pour recevoir cette classe de produit pendant la période  $t'$ . Les inégalités (II-24) garantissent la non négativité des variables de décisions.

N.B:

$\gamma^{t'} = 1$  si un lien est possible entre le centre de collecte et les entités sous-traitant ainsi que le centre d'élimination à la période  $t'$ .

Entre autre,  $\gamma^{t'} = 0$  et  $=^*$  devient  $\leq$  si les centres de remanufacture localisés suffisent pour les traitements de tous les classes de produits à la période  $t'$ .

### **III-3 Problème de conception et pilotage d'une chaîne logistique intégrale CPCLB :**

#### **III-3-1 Description du problème CPCLB :**

Cette partie est consacrée à l'étude de la conception et pilotage d'une chaîne logistique bouclée à plusieurs échelons impliquant les processus de recyclage, de retraitement et d'élimination dans une approche de logistique verte pour un seul type de classe de produits.

Le but de cette étude est de localiser les centres de collecte/désassemblage et de refabrication où les entités compléments de la chaîne fermée, sont déjà localisées. L'application de cette étude est dédiée à la récupération d'une classe de produit par module. Parmi ces modules, certains nécessitent un traitement plutôt technique au lieu de leurs éliminations brutales qui

peuvent aussi engendrer une pollution. Comme application, ceci est très favorable dans la chaîne logistique moderne où le processus de remanufacture tient une partie importante.

Au niveau de l'approvisionnement du produit, les liens de transport se manifestent dans la première étape des points de collecte vers les centres de collectes/désassemblages. Après le teste de qualité et selon la demande pour une offre fréquemment inférieure, les produits qui peuvent être encore utilisés sont vendus dans le marché secondaire. Une fois que le produit en entier est désassemblé en module, chaque module est destiné à son centre de traitement le plus approprié. Les modules recyclables sont expédiés vers les centres de recyclage. Pour les modules qui nécessitent de la remise à neuf ou un traitement technique, ils sont dépêchés vers les fournisseurs via les centres de retraitement. Et pour les modules sans valeurs, ils sont envoyés vers la déchèterie (enfouissement ou incinération). (Voir figure III-2)

Comme l'investissement des centres de remanufacture nécessite une volonté et une collaboration des trois partenaires responsables, ces installations sont progressives pendant plusieurs années. De ce fait, cela induit certainement des cas de l'incapacité de traiter tous les modules récupérables au centre de retraitement, et par conséquent, l'excédant des modules sera envoyé vers le centre d'élimination. Pour voir l'effet du coût de retraitement par module un coefficient d'évaluation de la qualité est inséré dans la modélisation et la simulation. D'autre part, pour évaluer le caractère incertain des quantités retournées au point de collection pendant les différents périodes, ces grandeurs sont variées aléatoirement entre une borne minimale et maximale au cours de la simulation dans le chapitre IV.

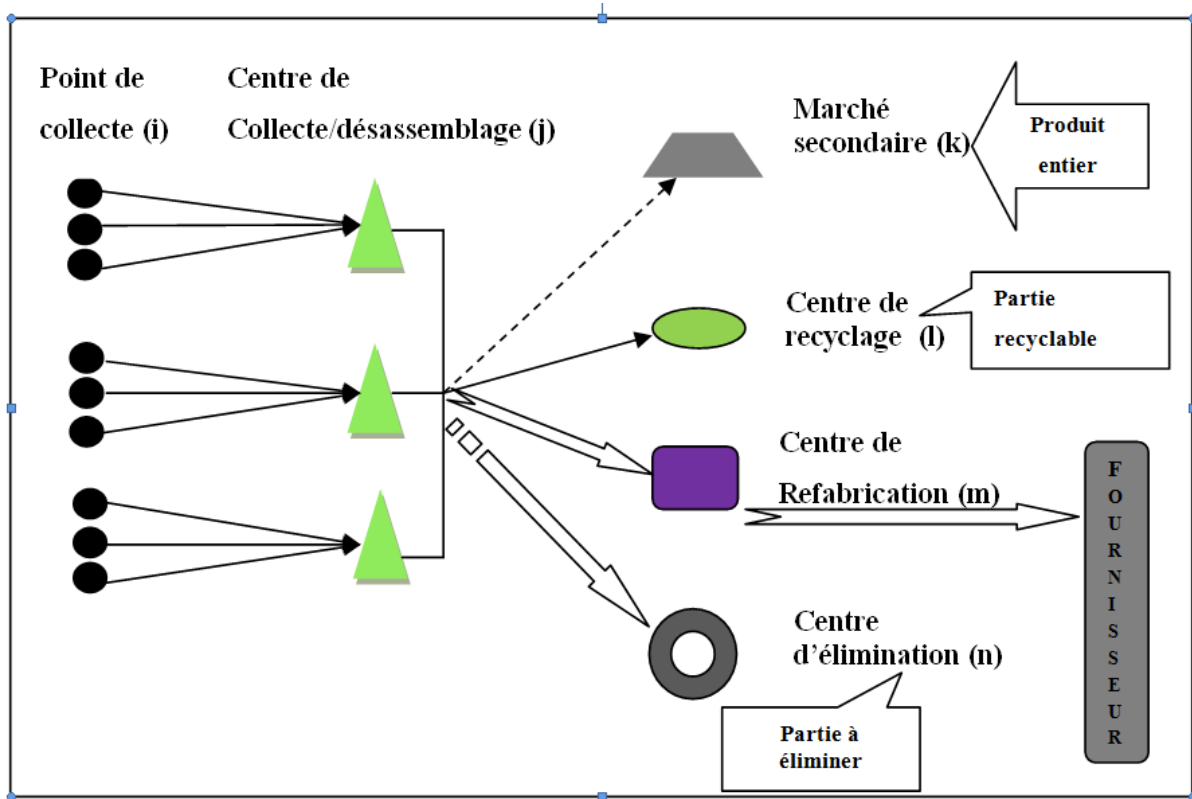


Figure III-2 : structure de la chaîne bouclée étudiée

Sur le plan technique, l'optimisation du problème subdivisé en deux modèles permet de définir respectivement les meilleures localisations des centres collection/désassemblage et de retraitement. Aussi pour approcher les deux décisions stratégique et tactique, en plus des modèles déjà cités, on a considéré deux types de charges de retraitement des modules. Le premier type est relatif à une charge totale en volume de temps de travail dédié à certains types de modules qui ont une charge élémentaire de retraitement. Cependant, le deuxième type de charge est restreint à une capacité typique de retraitement qui est spécifique à un seul module. En effet ceci reflète la réalité de l'ordonnancement dans les ateliers ou certains ateliers peuvent traiter plusieurs produits, alors que d'autres ne traitent qu'un seul module.

Au niveau de la modélisation mathématique, plusieurs nouvelles contraintes sont insérées afin de quantifier plusieurs paramètres souvent ignorés au cours de la prise de décision au niveau stratégique. En conclusion, on a essayé de réduire au maximum les écarts de non corrélation entre les trois niveaux de décision stratégique, tactique et opérationnel (Bennekrouf et Sari, 2013).

### **III-3-1 Formulation mathématique du problème CPCLB**

De même que les deux modèles précédents, celui-ci est divisé en deux sous-niveaux. Le premier niveau représente la première barrière de la collecte qui fait : la collecte, le contrôle de la qualité du produit en entier, le désassemblage en module, le test de modules destinés à la remanufacture. Après le désassemblage en module, les destinations des flux seront dédiées par type c.à.d soit pour le recyclage ou pour la refabrication ou bien pour l'élimination. Afin de voir l'effet de l'investissement progressif sur les taux de récupération des modules valables pour la refabrication (techniquement appelé remise à neuf), l'approche de modélisation proposée est de type  $P$  median.

Nombreux paramètres sont incérés dans le modèle CPCLB. Des coûts fixes liés à l'ouverture de centres de refabrication. Des coûts variables comprennent les frais de transport, frais d'exploitation et des bénéfices sur le marché secondaire, les centres de recyclage et les fournisseurs à travers des centres de remanufactures. Pour interpréter les effets néfastes de l'élimination des coûts de pénalité suite à l'élimination des modules irrécupérables et récupérables (mais que les usines installées ne couvrent pas la totalité des modules) sont considérés.

#### **Hypothèses prédéfinies du problème**

En effet certaines hypothèses de simplification et d'explication sont postulées :

- ✓ Les entités: point de collecte, centres de recyclage, centre d'élimination sont déjà localisés.
- ✓ Pour alléger la formulation mathématique du modèle, on décrit uniquement les modules de remanufacture.
- ✓ Les modules de recyclage sont présentés par une partie de recyclage dédiée aux amas de recyclage.
- ✓ La distance de lien entre deux entités est euclidienne.
- ✓ Le centre de remanufacture installé a la possibilité d'éliminer les modules de remise à neuf défectueux et irréparables.
- ✓ Les coûts fixes et opérationnels sont supposés invariables durant l'horizon de planification
- ✓ La demande des fournisseurs en module est inférieure à la quantité réparée de même module au centre de remanufacture.
- ✓ La fraction de la qualité d'un module dédié à la remanufacture est variée aléatoirement entre de bornes deux limite en moyenne.

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

$i \in I$ , indice des points de collecte, (qui peuvent être les consommateurs ou les détaillants),

$j \in J$ , indice des sites potentiels des centres de collecte et désassemblage,

$k \in K$ , indice des centres de gravité des amas des centres de recyclage,



$l \in L$ , indice des centres d'élimination,

$m \in M$ , indice des sites potentiels des centres de refabrication,

$n \in N$ , indice des sites potentiels des fournisseurs,

$o \in O$ , indice des marchés secondaires,

$r \in R$ , indice des modules dédiés à la refabrication,

$t \in T$ , indice des périodes de temps,

Les paramètres, les variables et la formulation mathématique du problème sont définis explicitement dans ce qui suit :

### **Problème de localisation et d'allocation du premier niveau**

#### ***Paramètres du premier niveau***

$S$  : volume moyen du produit en  $m^3$ ,

$W$ : poids moyen du produit en  $kg$ ,

$FS_j$  : coût fixe d'installation d'un centre de collecte au site  $j$ ,

$Fop_j^t$ : coûts fixes pour le fonctionnement d'un centre de collecte  $j$  pendant la période  $t$ ,

$Cap_j^{\min}$  : capacité minimale du centre de collecte  $j$ ,

$Cap_j^{\max}$  : capacité maximale du centre de collecte  $j$ ,

$Q_{pi}^t$  : quantité réelle de produits disponible au point de collecte/désassemblage  $i$  durant la période  $t$ ,

$Q_{\max,pi}^t$  : quantité maximale de produits pouvant être collectés et désassemblés au point de collecte/désassemblage  $i$  en période  $t$ ,

$d_{ij}$  : distance entre le point de collecte  $i$  et le centre de collecte/désassemblage  $j$  en  $km$ ,

$\alpha_1$  : coût de transport par  $km$  et par  $kg$  dans le premier niveau,

Opc: coût opérationnel associé au désassemblage du produit,

#### ***Modèle de location-allocation du premier niveau***

respectivement les variables représentant le choix de site  $j$  et les affectations formant le premier lien de la chaîne sont notées par :

$X_j := 1$ , si un centre de collecte est mis en place au site  $j$  de façon permanente pour toutes les périodes  $t$ , 0, si non,

$Y_{ij} = 1$ , si le point de collecte  $i$  est assigné de façon permanente au centre de collecte  $j$  pour toutes les périodes  $t$ , 0, si non,

L'objectif du sous problème 1 est de minimiser la fonction objectif  $Z_1$  tel que :

$$Z_1 = \sum_j (F \cos t_j + Fop_j^t) X_j + \sum_i \sum_j (Opc + \alpha_1 W d_{ij}) Y_{ij} Q_{\max,i}^t \quad (III-1)$$

Sous les contraintes:

$$\sum_j Y_{ij} = 1, \forall i \in I \quad (III-2)$$

$$Y_{ij} \leq X_j, \forall i \in I \ \& \ \forall j \in J \quad (III-3)$$

$$\sum_i Q_{\max,i}^t S Y_{ij} \leq Cap_j^{\max} X_j, \forall j \in J \ \& \ \forall t \in T \quad (III-4)$$

$$\sum_i Q_{\max,i}^t S Y_{ij} \geq Cap_j^{\min} X_j, \forall j \in J \ \& \ \forall t \in T \quad (III-5)$$

$$X_j \in \{0,1\}, \forall j \in J \quad (III-6)$$

$$Y_{ij} \in \{0,1\}, \forall i \in I \ \& \ \forall j \in J \quad (III-7)$$

La fonction objectif  $Z_1$  minimise les coûts fixes d'ouverture et de fonctionnement des centres de collectes et les coûts variables de transport, et de déssassemblage. L'ensemble des contraintes (III-2) assurent que chaque point  $i$  de collecte est connecté à un seul centre de collecte  $j$ . Les contraintes (III-3) assignent la connexion du point de collecte  $i$  au centre de collecte  $j$  au cas où ce dernier est ouvert. Les inégalités (III-4, III-5) sont des contraintes de capacité. Les contraintes (III-6, III-7) imposent des conditions de binarité.

Par ailleurs, afin d'éviter le problème de sous dimensionnement lié à la capacité globale de stockage en fonction du nombre de centres de collecte à ouvrir, au court de calcul le maximum sur toutes les périodes de la quantité  $\sum_p \sum_i Q_{\max,i}^t S$  est utilisé. De ce fait, si la variable de décision  $X_j$  doit être égale à 1, le centre de collecte  $j$  restera ouvert sur tout l'horizon de la planification. Aussi pour passer au deuxième niveau, on définit le résultat dans l'équation (8). La quantité  $V_j^t$  est le volume réel de la classe des produits  $p$  collectées à partir des points de collecte  $i$  et groupées dans le centre de collecte  $j$  à la fin de la période  $t$ .

$$\sum_i Q_i^t Y_{ij} = V_j^t, \forall j \in J \ \& \ \forall t \in T \quad (III-8)$$

Après que la phase de collection intervient, une seconde phase durant laquelle les centres de refabrication doivent être localisés pour passer au retraitement. Cela correspond à la période  $t=t+1$ .

### **Modèle de localisation et d'allocation $p$ -median du second niveau**

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

$d_{ab}$ : distance entre entité  $a$  et  $b$  en  $km$

$\beta$  : coût de transport par km par kg

a- Paramètres et variables de décisions liées aux centres de gravité d'amas de recyclage

$k$ :

$W_k$ : la masse moyenne de la partie du produit dédiée au recyclage,

$M_k$ : capacité du centre de gravité de l'amas de recyclage  $k$ ,

$Pcost_k$ : coût moyen de profit relatif à la partie recyclée du produit au centre de gravité de l'amas de recyclage  $k$ ,

$v_{jk}^{t+1}$ : volume de la partie de produit destiné au recyclage et transporté du centre de collecte/désassemblage  $j$  vers le centre d'amas de recyclage  $k$  pendant la période  $t' = t+1$

b- Paramètres et variables de décisions liées aux centres d'élimination  $l$ :

$W_l$ : la masse moyenne de la partie du produit sans valeur dédiée à l'élimination,

$M_l$ : capacité du centre d'élimination  $l$ .

$PNcost_l$ : coût de pénalité lié à l'élimination de la partie du produit sans valeur au centre d'élimination  $l$ ,

$v_{jl}^{t+1}$ : volume de la partie sans valeur dédiée à l'élimination transportée du centre de collecte/désassemblage  $j$  vers le centre d'élimination  $l$  pendant la période  $t' = t+1$ ,

c- Paramètres et variables de décisions liées aux centres de refabrication  $m$ :

Après le désassemblage soit une donnée d'entrée  $v_{rj}^t$  correspondant à la quantité de modules désassemblés au centre de collecte/désassemblage et valables pour la refabrication pendant la période  $t$ . Cette quantité est un multiple de  $(*) \times v_j^t$  avec  $*$  désignant le nombre de répétition du même module après le désassemblage entier du produit.

$W_r$ : la masse moyenne du module  $r$ ,

$f_r$ : la fraction moyenne du module  $r$  spécifié par sa bonne qualité et qui peut être vendu au fournisseur  $n$ ,

$wld_{rm}$ : charge de travail en unité de temps nécessaire pour le traitement du module  $r$  au centre de refabrication  $m$ ,

$OPcost_{rm}$ : coût opérationnel pour le traitement du module  $r$  au centre de refabrication  $m$ ,

$Wld_{tot,m}$ : charge de travail total en unité de temps disponible au centre de refabrication  $m$ ,

$FS_m$ : coût fixe d'installation d'un centre de refabrication au site  $m$ ,

$PNcost_{rm}$ : coût de pénalité lié à l'élimination d'un module de mauvaise qualité  $r$  au voisinage du centre de refabrication  $m$  (hypothèse d'existence d'un processus d'élimination qui concerne la fraction  $(1-f_r)$ ),

$VO_{rjm}^{t+1}$ : volume de modules  $r$  caractérisés par leur mauvaise qualité transportés du centre collect/désassemblage  $j$  vers le centre de refabrication  $m$  puis éliminés au voisinage de ce dernier pendant la période  $t+1$ ,

$N_m^{t+1}$ : nombre de centres de refabrication  $m$  ouvert en fonction de l'investissement possible au niveau de la période  $t'$ ,

$$X_l^{t'} = \begin{cases} 1 & \text{si un centre de refabrication est localisé au site } l \text{ pour être ouvert} \\ & \text{dès la période } t' \text{ et aussi pour tous } t'' \geq t' \\ 0 & \text{si non} \end{cases}$$

$Open_{a_{rm}}$ : variable binaire autorisant le traitement du module  $r$  au centre de refabrication  $m$  dont la charge de traitement du module  $r$  tiens une part de la charge totale  $Wld_{tot_m}$ ,

$Open_{b_{rm}}$ : variable binaire autorisant le traitement du module  $r$  au centre de refabrication  $m$  dont la charge de traitement est restreint au module  $r$  et tiens part de la capacité spécifique  $M_{rm}$ ,

$M_{rm}$ : charge totale de travail spécifique au traitement du module  $r$  au centre de refabrication  $m$ ,

d- Paramètres et variables de décisions liées aux fournisseurs  $n$ :

$Dem_{rn}^{t+1}$ : demande unitaire en module  $r$  par le fournisseur  $n$  pendant la période  $t'$ ,

$Pcost_{rn}$ : coût moyen de profit du module  $r$  par le fournisseur  $n$ ,

$VI_{rjmn}^{t+1}$ : volume de modules  $r$  expédiés du centre de collecte/désassemblage  $j$  vers le fournisseur  $n$  via le centre de refabrication  $m$  pendant la période  $t'$ ,

e- Paramètres et variables de décisions liées à l'élimination des modules  $r$  au centre d'élimination  $l$  suite à la surcharge des centres de refabrication installés:

$Wld_{tot_l}$ : charge de travail total en unité de temps disponible au centre d'élimination  $l$  dédiée pour l'élimination de l'ensemble de module de refabrication  $r$ ,

$wld_{rl}$ : charge de travail en unité de temps nécessaire pour l'élimination du module  $r$  au centre d'élimination  $l$ ,

$PNcost_{rl}$ : coût de pénalité lié à l'élimination d'un module  $r$  au centre d'élimination  $l$ ,

$V_{rjl}^{t+1}$  : volume de modules  $r$  expédié du centre de collecte/désassemblage  $j$  pour être éliminés au centre d'élimination  $l$  pendant la période  $t'$ ,

*f- Paramètres et variables de décisions liées au marché secondaire  $o$*

$Dem_o^{t+1}$  : demande du marché secondaire  $o$  du produit en entier pendant la période  $t'$ .

$Pcost_o$ : coût moyen unitaire de profit revenant à la vente du produit en entier au marché secondaire  $o$ , (pour le produit en entier le coût de désassemblage est introduit dans cette valeur)

$V_{jo}^{t+1}$  : volume du produit de bonne qualité expédié du centre de collecte/désassemblage  $j$  vers le marché secondaire  $o$ ,

$fgood_j^{t+1}$  : fraction du bon produit testé au centre collecte/désassemblage  $j$  durant la période de la collecte  $t$ .

Ainsi dans le seconde niveau, le p-médian de localisation allocation consiste à la minimisation d'une variété de coûts insérés dans la fonction objective  $Z_2$  :

$$\begin{aligned}
 Z_2 = & \sum_t \sum_j \sum_k (\beta W_k d_{jk} + p \cos t_k) V_{jk}^t + \sum_t \sum_j \sum_l (\beta W_l d_{jl} + PN \cos t_l) V_{jl}^t + \sum_t \sum_m FS_m X_m^t + \\
 & \sum_t \sum_j \sum_m \sum_r (\beta W_r d_{jm} + PN \cos t_{rm}) V_{rjm}^t + \\
 & \sum_t \sum_j \sum_m \sum_n \sum_r (\beta W_r (d_{jm} + d_{nm}) + OP \cos t_{rm} + P \cos t_{rm}) V_{rjmn}^t + \\
 & \sum_t \sum_j \sum_l \sum_r (\beta W_r d_{jl} + PN \cos t_{rl}) V_{rjl}^t + \sum_t \sum_j \sum_o (\beta W d_{jo} + p \cos t_o) V_{jo}^t
 \end{aligned} \tag{III-9}$$

s.t

$$\sum_k V_{jk}^t = (1 - fgood_j^t) V_j^t, \forall j \in J, \forall t \in T \tag{III-10}$$

$$\sum_j V_{jk}^t \leq M_k, \forall k \in K, \forall t \in T \tag{III-11}$$

$$\sum_l V_{jl}^t = (1 - fgood_j^t) V_j^t, \forall j \in J, \forall t \in T \tag{III-12}$$

$$\sum_j V_{jl}^t \leq M_l, \forall l \in L, \forall t \in T \tag{III-13}$$

$$\sum_o V_{jo}^t = fgood_j^t V_j^t, \forall j \in J, \forall t \in T \tag{III-14}$$

$$\sum_j V_{jo}^t \leq Dem_o^t, \forall o \in O, \forall t \in T \tag{III-15}$$

$$\sum_m V_{rjm}^t + \sum_{mn} V_{rjmn}^t + \sum_l V_{rjl}^t = (1 - fgood_j^t) V_j^t, \forall j \in J, \forall r \in R, \forall t \in T \tag{III-16}$$

$$\sum_m V0_{rjm}^t + \sum_m \frac{(1-f_r)}{f_r} V0_{rjm}^t + \sum_l V_{rjl}^t = (1-f_{good}_j) V_{rj}^t, \forall j \in J, \forall r \in R, \forall t \in T \quad (III-17)$$

$$\sum_{mn} V1_{rjmn}^t + \sum_{mn} \frac{f_r}{(1-f_r)} V1_{rjmn}^t + \sum_l V_{rjl}^t = (1-f_{good}_j) V_{rj}^t, \forall j \in J, \forall r \in R, \forall t \in T \quad (III-18)$$

$$\sum_{rj} open\_a_{rm} wld_{rm} V0_{rjm}^t + \sum_{rjn} open\_a_{rm} wld_{rm} V1_{rjmn}^t = *Wld\_tot_m X_m^t, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (III-19)$$

$$\sum_j open\_b_{rm} wld_{rm} V0_{rjm}^t + \sum_{jn} open\_b_{rm} wld_{rm} V1_{rjmn}^t = *M_{rm} X_m^t, \forall r \in R, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (III-20)$$

$$\sum_{jm} V1_{rjmn}^t \leq Dem_{rm}^t, \forall r \in R, \forall n \in N \quad (III-21)$$

$$\sum_{rj} wld_{rl} V_{rjl}^t \leq \delta Wld\_tot_l, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (III-22)$$

$$X_m^t \in \{0,1\}, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (III-23)$$

$$\sum_m X_m^t = N_m^t, \forall t \in T \quad (III-24)$$

$$V_{jk}^t \geq 0, V_{jl}^t \geq 0, V_{jmn}^t \geq 0, V_{jmo}^t \geq 0, V_{jo}^t \geq 0 \\ \forall j \in J, \forall K \in K, \forall l \in L, \forall m \in M, \forall n \in N, \forall o \in O, \forall t \in T, t' = t+1 \quad (III-25)$$

Les égalités (III-10, III-12) permettent de comptabiliser respectivement le volume en parties de produits dédiés au recyclage et à l'élimination. En complément, les équations (III-11, III-13) assurent les conditions de capacité liées respectivement à l'approvisionnement des flux physiques vers: l'amas de recyclage pour les parties dédiées au recyclage et le centre d'élimination pour les parties sans valeurs et qui doivent être éliminées.

Par ailleurs, la contrainte (III-14) comptabilise le volume de bon produit existant dans le centre de collecte/désassemblage et la contrainte (III-15) manage le flux physique restreint au bon produit retournés vers le centre de collecte/désassemblage pour être vendu dans le marché secondaire en vérifiant la balance de la demande.

Au niveau de la logistique de refabrication, l'ensemble de contraintes (III-16, III-17, III-18) ajuste la quantité de modules dédiés à la refabrication (fraction de modules de bonne qualité, ou à l'élimination au centre de refabrication ( fraction de module de mauvaise qualité), ou bien à l'élimination au centre d'élimination (suite à l'insuffisance de capacité des centres de retraitement installés). Les inégalités dans les contraintes (III-19, III-20) vérifient les volumes en modules de refabrication tous en respectant les capacités des usines de refabrication installées par rapport à l'unité charge de travail modulaire et le degré d'autorisation de

traitement de chaque module. Comme le flux physique pour les modules de refabrication s'achemine des centres de collecte/désassemblage vers les fournisseurs à travers le centre de refabrication, où bien vers le centre d'élimination (suite à l'insuffisance de capacité des centres de retraitement installés), respectivement les équations (III-21,III-22) vérifient le non dépassement qui peut paraître soit au niveau de la demande des fournisseurs (pour les modules de bonne qualité) ou bien au niveau de la capacité des centres d'élimination (pour les modules non traités suite à l'incapacité des centres de refabrication installées). La contrainte (III-23) impose la condition de binarité et la contrainte (III-24) indique le nombre de centre de refabrication ouvert. Les inégalités (III-25) garantissent la non négativité des variables de décisions.

N.B:

$\gamma^t = 1$  si un lien est possible entre le centre de collecte/désassemblage et le centre d'élimination à la période  $t'$ .

Entre autre,  $\gamma^t = 0$  et  $=^*$  devient  $\leq$  si les centres de remanufacture localisés suffisent pour les traitements des tous les modules de valeurs à la période  $t'$ .

## **Conclusion :**

Dans cette partie, nous avons présenté une modélisation mathématique en entier mixte de trois modèles de conception et pilotage des chaînes logistiques, dédiés au problème de récupération des déchets de valeurs. Pour être proche de la réalité, de nombreux paramètres économiques sont considérées dans la modélisation. Les modèles *CPCLII* et *CPCLI2* abordent une chaîne logistique à deux échelons dans une approche dynamique, multi-produits et à capacité limitée avec la considération de contraintes socioprofessionnelles et environnementales à la fois.

Pour améliorer la vision micro dans la chaîne restreinte à une classe de produit non homogène, son étude en unité de module après son désassemblage et nettement plus claire lors de la conception de son réseau inverse. Nous avons fait une extension des modèles *CPCLI* et *CPCLI2* aboutissant au modèle *CPCLIB*. La particularité de ce dernier formalisme est que nous avons un autre échelon afin de fermer le réseau de récupération.

Ce qui est important dans ces études, c'est de traiter à la fois les trois décisions stratégiques, tactiques et opérationnelles au cours de la conception stratégique. Notons de plus, que des efforts ont été déployé dans la modélisation afin de présenter la réorganisation directes des usines et indirectes impliquées dans l'ordonnancement des ateliers. Aussi, pour

voir la dynamique du système logistique dans des variables stochastiques influent sur les décisions finales de conception et pilotage, le chapitre suivant présente des exemples numériques expliquant la sensibilité des résultats en fonction des scénarios possibles à travers la technique d'optimisation basée sur la simulation.



# Chapitre IV

## Exemples numériques pour la validation des modèles CPCL1, CPCL2 et CPCLB

### Introduction

Ce dernier chapitre est consacré à résoudre numériquement les trois modèles proposés dans le chapitre trois pour des systèmes de petite taille et sur des benchmarks fictifs. La structure du modèle est générée aléatoirement sur une zone de  $100 \times 100 \text{ km}^2$  avec l'option d'ajouter une capacité additionnelle en termes d'heures supplémentaires aux centres de remanufacture installés. Notons que le modèle *CPCL1* est destiné aux cas pratiques marqués par beaucoup d'intervention humaine, les temps supplémentaires de travail varient de 0% jusqu'à 25%. Dans le modèle *CPCL2*, la structure de la chaîne est répartie sur une surface carrée de 100 km de côté. Le fait d'exiger un seuil minimal pour arranger un tel centre de refabrication pour récupérer une telle classe de produit, nous donne l'occasion de voir l'effet de cette considération sur la variation des taux de récupération. Dans une situation où le processus de traitement des produits est plus orienté vers le semi automatique et l'automatique, les choix de l'investissement progressif concernant les installations des centres de refabrication est adopté d'une autre façon que le modèle *CPCL2*. Pour une meilleure vision de récupération d'une seule classe de produit, le troisième modèle celui, de *CPCLB*, prend en considération le facteur de désassemblage pour un traitement en module plutôt qu'un produit. Si les applications sont nombreuses surtout pour un traitement d'un produit non homogène avec beaucoup de valeur économique à gagner issus de son désassemblage, on a montré l'impact de la vente d'un produit en entier au marché secondaire par rapport à la récupération des modules réutilisables. Aussi dans ce cas le réseau de récupération est distribué sur une surface de  $1200 \times 1200 \text{ km}^2$ .

Pour des systèmes d'études de petite taille des trois modèles, l'outil d'optimisation utilisé est le logiciel *LINGO 10* (Linear Integer Global Optimization).

**IV-I Démarche de résolution du problème de conception et pilotage CPLII :**

Dans cette section, le modèle est évalué par la méthode de simplex basée sur Branch&Bound commercial solveur. La méthode est testée sur des ensembles des données inspirées des problèmes de la littérature (Thanh et *al.*, 2008)

**IV-1-1 Génération des données d'entrée**

Pour tester le modèle, une série numérique de tests a été performée. Le solveur commercial **LINGO 10** est utilisé dans le but de résoudre le problème et pour obtenir la solution exacte en utilisant la méthode par défaut de Branch&Bound. Certaines considérations sont considérées afin de refléter des scénarios plus réalistes. En vue de décrire l'investissement total décomposé en trois ans, le nombre de période  $T$  est un ensemble équidistant partagé sur 12 intervalles de trois mois. Les localisations possibles de tous les centres de récupération primaires sont distribuées uniformes dans un périmètre d'aire de  $[0,100] [0,100]$  km<sup>2</sup> comme le montre la figure IV-1-1. Dans un but initial de voir l'importance des résultats, l'exemple numérique est illustré sur une application virtuelle de petite taille relative à une échelle nationale. Mais cela n'empêche pas d'étaler le problème sur des systèmes de chaîne logistique de grande taille. Dans cette étude, trois classes de produits  $p$  sont considérées où, en premier temps, elles sont collectées à partir de 16 points de collecte fixe (ces points de collecte peuvent présenter un espace au niveau du client, centre de distribution, centre de récupération initial etc.). Selon le planning des retours aléatoires des produits  $P_1$ ,  $P_2$  et  $P_3$  des classifications multi-périodes réduisent l'intervalle d'erreur sur les quantités des retours par période. Le tableau IV-1-1 présente ces quantités de classes  $P_1$ ,  $P_2$  et  $P_3$  pour chaque point de collecte pendant la saison d'automne. Plus précisément, les quantités de ces produits sont générées aléatoirement suivant une loi de distribution uniforme entre deux bornes d'extremum. Aussi pour générer les quantités pour les autres saisons, des coefficients pour chaque produit et pour chaque saison sont choisis et multipliés par une variable générée aléatoirement pour un produit pendant l'automne comme il est présenté dans le tableau IV-1-1. Par exemple, la quantité du produit de classe  $P_1$  au point de collecte numéro 4 durant la saison de printemps sera générée aléatoirement entre deux bornes supérieures de deux fois par rapport aux bornes prédéfinies de l'automne. Ce qui donne une quantité minimal de 25000 et maximale de 40000 unités.

Par ailleurs, la première classe de produit regroupe les articles qui sont rapportés de plus en hiver et sont donc utilisés massivement avant. C'est 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 pour chaque saison. Le même

type de génération de données a été réalisé pour les classes P2 et P3. La classe de produit P<sub>2</sub> groupe des produits rendus le plus en été. Les produits P<sub>3</sub> sont supposés être retournés le plus en été et en hiver.

Deux marchés secondaires aussi bien que deux centres d'élimination (déchetterie) sont considérés. Le nombre de sous-traitants est de trois. Chacun de ces sous-traitants est supposé ne pouvoir traiter qu'une seule classe de produits à la fois pour toute la durée d'étude. Ainsi la classe de produit P<sub>1</sub> a été allouée au sous-traitant un, et les produits P<sub>2</sub> et P<sub>3</sub> respectivement aux sous-traitant deux et trois. L'allocation des classes de produits est permise vers le sous-traitant et la déchetterie si et seulement si les centres installés de récupération ne suffisent pas pour une couverture totale du processus de récupération. Les poids totaux autorisés à la charge pour les camions sont respectivement de 12 tonnes et 40 tonnes pour le transport du premier et second niveau. En effet, les quantités de produits collectées aux points de collectes ne présentent 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 collecte se calculent de la même manière que dans l'article (Thanh, 2008) et les quantités maximum et minimum sont données dans le tableau IV-1-2. L'ouverture d'un centre de refabrication est supposée coûter cent fois plus cher que l'ouverture d'un centre de collecte, et s'élève à 18056500. Cela engendre un total de 12794000 unités de temps pour traiter tous les produits au centre de remanufacture. Les capacités des sous-traitants sont de l'ordre de 150000 unités de temps. Cependant, celle de centre d'élimination sont illimitées.

<i>Point de collecte i</i>	<i>P<sub>1</sub> (Automne)</i>	<i>P<sub>2</sub> (automne)</i>	<i>P<sub>3</sub> (Automne)</i>
1	[60,80]	[25,30]	[35,40]
2	[75,90]	[65,75]	[45,55]
3	[55,60]	[35,50]	[25,30]
4	[25,40]	[15,25]	[65,75]
5	[65,85]	[95,105]	[85,95]
6	[65,85]	[65,80]	[95,105]
7	[25,35]	[30,40]	[55,70]
8	[15,25]	[45,55]	[25,35]
9	[35,45]	[65,70]	[35,40]
10	[10,20]	[85,90]	[40,50]
11	[45,55]	[20,35]	[60,65]
12	[75,90]	[25,30]	[75,85]
13	[45,55]	[50,60]	[85,100]
14	[35,45]	[60,65]	[90,100]
15	[25,30]	[85,95]	[15,20]
16	[40,50]	[65,75]	[20,25]
<i>Coefficients de multiplication pour calculer les quantités des produits aux points de collecte pour chaque saison</i>			
Hiver :W	$Q_{p_1}(W) = 3 Q_{p_1}(A)$	$Q_{p_2}(W) = 0.5 Q_{p_2}(A)$	$Q_{p_3}(W) = 2 Q_{p_3}(A)$
printemps :S	$Q_{p_1}(S) = 1.5 Q_{p_1}(A)$	$Q_{p_2}(S) = 2.5 Q_{p_2}(A)$	$Q_{p_3}(S) = 1 Q_{p_3}(A)$
Eté :SU	$Q_{p_1}(SU) = 2 Q_{p_1}(A)$	$Q_{p_2}(SU) = 3.5 Q_{p_2}(A)$	$Q_{p_3}(SU) = 2 Q_{p_3}(A)$

**Table IV-1-1:** Quantité possible des classes de produits P1, P2 and P3 au point de collecte pour la période d'Automne (chaque valeur est multiplié par 1000)

Masse de produit [kg] $W_p$	$W_1$ : 25	$W_2$ : 33	$W_3$ : 35
Taille du produit [ $m^3$ ] $S_p$	$S_1$ : 0.8	$S_2$ : 1.3	$S_3$ : 0.6
$Cap_j^{max}$ [ $m^3$ ]: $\frac{Max_{all\ period}(Q_{maxp1}*S1+ Q_{maxp2}*S2+ Q_{maxp3}*S3)}{\sqrt{numberofcandidatecollectecenter}}$			2499976.2
$Cap_j^{min}$ [ $m^3$ ]: $0.9 * Cap_j^{max}$			2249978.6
$Fcost_j$ [MU]: aléatoire[100,110]*sqrt( $Cap_j^{max}$ )			158131.306
$Fop_j^t$ [MU]: aléatoire[10,20]*sqrt( $Cap_j^{max,t}$ )			Automne :13371.05 Eté: 10505.82 printemps: 14326.12 Hiver 19101.50

**Table IV-1-2:**Données introduites dans le premier niveau

<u>Marché secondaire k</u>	
$\beta_{1j}^t$ : aléatoire[5,15] %	$U_{1k}^t$ : 30 [MU];
$\beta_{2j}^t$ : aléatoire [10,20] %	$U_{1k}^t$ : 25 [MU];
$\beta_{3j}^t$ : aléatoire [5,10] %	$U_{1k}^t$ : 35 [MU];
$Dem_{pk}^t$ : 6000 U quelque soit p,k,t'	
<u>Centre de remanufacture l</u>	
$Fcost_l$ [MU]: aléatoire[100,120]*sqrt( $Cap_j^{max}$ )	1805650
$Tot\_time_l$ [TU]: $80 * aléatoire[100,120]*sqrt(Cap_j^{max})$	12794000
$AD\_Tot\_time_l^t$ [TU] :10% or 20% or 25% du $Tot\_time_l$	
$Time_{1l}$ : 15 [TU]	$Op_{1l}$ : 7 [MU]
$Time_{2l}$ : 23 [TU]	$Op_{2l}$ : 8 [MU]
$Time_{3l}$ : 16 [TU]	$Op_{3l}$ : 9 [MU]
$Ad\_Op_{1l}$ : 10 [MU]	$Ucost_{1l}^t$ : 20 [MU]
$Ad\_Op_{2l}$ : 11 [MU]	$Ucost_{2l}^t$ : 25 [MU]
$Ad\_Op_{3l}$ : 12 [MU]	$Ucost_{3l}^t$ : 30 [MU]
<u>Subcontractor center m</u>	
<u>Chaque sous traitant traitent qu'une seule classe de produit</u>	
$Tot\_Time_m^t$ [TU]: 150000	
$Ucost_{pm}^t$ [MU]:0 supposé comme un service	
$Time_{pm}$ [TU]:	$Op_{pm}$ [MU]:
17 $\infty$ $\infty$	14.5 $\infty$ $\infty$
$\infty$ 25 $\infty$	$\infty$ 15 $\infty$
$\infty$ $\infty$ 18	$\infty$ $\infty$ 14.6
<u>Centered''élimination m</u>	
$Cap_{pn}^t$ [U]: $\infty$	$Op_{1n}$ [MU]:5 $Op_{2n}$ [MU]:3 $Op_{3n}$ [MU]:10
$Pen_{1n}$ [MU]:5 $Pen_{2n}$ [MU]:6 $Pen_{3n}$ [MU]:3	$Eq\_env\_cost_{1n}$ [MU]:5 $Eq\_env\_cost_{2n}$ [MU]:9 $Eq\_env\_cost_{3n}$ [MU]:7

**Table IV-1-3:** Données introduites dans le deuxième niveau

**IV-1-2 Analyse des résultats de variables de décisions binaires de localisation**

Par rapport au premier niveau et dans une hypothèse que l'ensemble des centres de collectes pourra accueillir le maximum en volume sur les quatre périodes en unité de stockage, la figure IV-1-1 illustre les liens de transport. Sur les six sites candidats valables pour la localisation d'éventuelles centre de collecte et en respectant le critère qu'un point de collecte n'est affecté qu'à un seul centre de collecte de façon permanente sur tout l'horizon de planification, les résultats de décisions binaires donnent trois unités.

Pour des considérations socio-économiques au profit du maintien de la main d'œuvre, les calculs de la variable de décision  $X_l'$  sont choisis suite à une série d'optimisation itérative. Sur l'ensemble des résultats obtenus, nous avons trouvé une complication au niveau du choix du site le plus approprié surtout quand il s'agit de décider sur une valeur stratégique dans un but plutôt orienté à respecter l'ensemble des variations périodiques. Afin de soulever ce problème de la programmation dynamique associé à des décisions floues certaines règles sont postulées.

- ✓ Pour la même période et en faisant varier les données d'entrée aléatoirement de quantité de classes de produits collectées et les demandes auprès des marchés secondaires, la variable de décision  $X_l'$  est égale à 1 pour le centre de refabrication  $l$  ayant la probabilité maximale d'être choisi sur l'ensemble des autres centres de remanufacture non choisis.
- ✓ Pour l'alternance entre les périodes de la même année,  $X_l'$  est égale à 1 pour le centre de refabrication  $l$  ayant la grandeur appelée moment de profit  $M_{PR}$  la plus important tel :

$$M_{PR} = \max (\text{taux moyen de récupération} \times \text{nombre de fois que le centre de refabrication est choisi}).$$

**IV-1-3 Résultats de localisation et allocation du modèle CPLII**

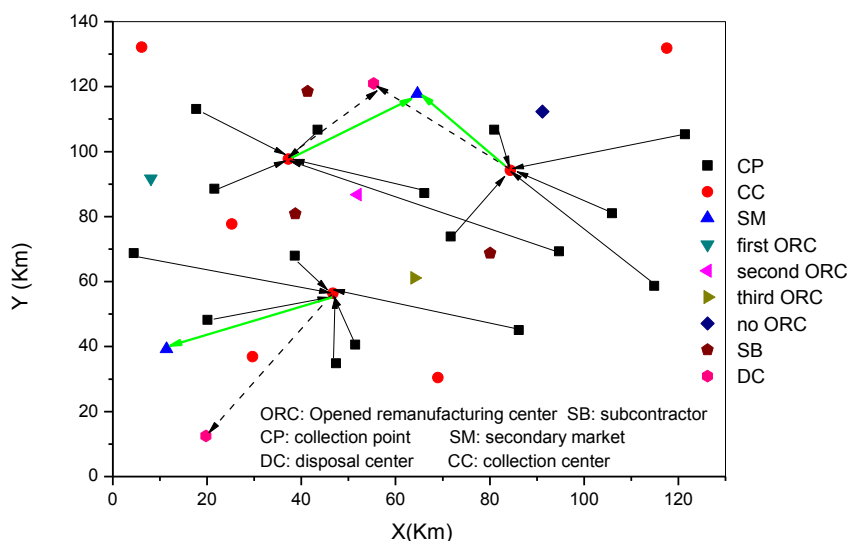


Figure IV-1-1: localisation des centres intermédiaires de récupération

Les orientations géographiques des résultats de simulation basée sur l'optimisation itératives, sont résumées dans la figure IV-1. Les flèches en couleur noire foncée montrent les affectations de chaque point de collecte à l'un des centres de collecte choisis. Pour tout l'horizon de la planification annuel, la solution de l'optimisation du problème de localisation-allocation du premier niveau trouve que l'ouverture de trois centres de collecte sur huit emplacements possibles, suffit pour une couverture totale de la collecte. Après un test rigoureux sur la qualité des produits collectés, la flèche en couleur verte indique les liens de vente de bonne classe de produit dans le marché secondaire. Pour décroître le flux de produits éliminés brutalement dans les déchetteries, en plus des sous-traitants existants déjà, trois centres de remise à neuf ont été ouvert sur quatre emplacements possibles à la fin des trois années étudiées. Les centres de retraitement installés chaque année sont respectivement ORC1, ORC2 et ORC3. Ils possèdent les capacités maximales en volume temporel de travail de 12794000 unités de temps. Pour un volume horaire additionnel issu des heures supplémentaires de travail équivalent à 25 %, la capacité totale du centre de refabrication atteindra 159925000 unités de temps.

Pour décrire la réalité de la chaîne logistique inverse de récupération, les retours des produits par classe sont supposés aléatoires. C'est ainsi que les quantités collectées auprès des points de collecte sont générées aléatoirement entre de bornes limites. Respectivement, les tableaux IV-1-1 et IV-1-3 partagent les intervalles d'évaluation des quantités retournés et les demandes de bons produits dans le marché secondaire.

Après l'analyse statistique des résultats, on peut distinguer plusieurs grandeurs d'évaluation. Dans l'essentiel, on présente le coût moyen de récupération qui peut être associé à une taxe de pénalité ou de profit éco-environnemental. Afin d'avoir plus de possibilité de choix des décisions, les calculs ont été investigués et développés sur 48 scénarios, tel que chaque scénario, représente une configuration relative au nombre de centres de refabrication installé  $N_i^t$  pendant la période  $t'$  en fonction du pourcentage de la main d'œuvre additionnelle. Pour des raisons de prise en compte de l'impact du volume temporel sur la condition du travail souvent du genre semi-automatique ou manuel, le temps additionnel est supposé à la limite égale à 25%. Aussi, comme dans cette partie de travail, le paramètre de traitement au centre de refabrication n'est pas évoqué au niveau de la qualité et aussi au niveau du temps de retraitement, alors le temps et le coût de traitement d'une classe d'un produit sont estimés à la moyenne près.

Par ailleurs, l'analyse environnementale du problème est résumée dans les tableaux IV-1-4, ..., IV-1-7. Respectivement, les tableaux IV-1-4, IV-1-5, et IV-1-6 présentent les taux de récupération des trois classes de produits par scénario. Pour une meilleure synthèse des taux de récupération le tableau IV-1-7, récapitule le taux de récupération global sur les trois classes de produits par scénario.

$N_i^t$	Automne	Hiver	Printemps	Eté	$AD\_Tot\_time_i^t$
1	< 6E-04	0	< 3.1E-03	0	0%
	< 4E-04	0	0.069 ± 0.036	0	10%
	0.143 ± 0.034	0	0.147 ± 0.035	0	20 %
	0.196 ± 0.036	0	0.185 ± 0.036	0	25%
2	0.894 ± 0.031	0	0.762 ± 0.069	0	0%
	0.894 ± 0.031	0.048 ± 0.014	0.896 ± 0.063	0.067 ± 0.036	10%
	0.894 ± 0.031	0.125 ± 0.013	0.905 ± 0.025	0.183 ± 0.044	20 %
	0.894 ± 0.031	0.164 ± 0.013	0.905 ± 0.025	0.240 ± 0.048	25%
3	0.894 ± 0.031	0.357 ± 0.02	0.905 ± 0.025	0.240 ± 0.048	0%
	0.894 ± 0.031	0.474 ± 0.025	0.905 ± 0.025	0.528 ± 0.067	10%
	0.894 ± 0.031	0.590 ± 0.029	0.905 ± 0.025	0.701 ± 0.078	20 %
	0.894 ± 0.031	0.648 ± 0.031	0.905 ± 0.025	0.873 ± 0.081	25%

IV-1-4 Taux de récupération de la classe du produit  $P_j$  par scénario (moyenne + l'écart d'erreur maximale).

Comme il est indiqué dans le tableau A, pour le produit  $P_j$ ; le de taux de récupération (par rapport au nombre de centre de refabrication ouvert ainsi que le volume de temps de travail additionnel) prend différentes valeurs selon les saisons et le profit par rapport aux d'autres classes de produits. Toutefois, mise à part les périodes de l'hiver et de l'été favorisant la récupération de la classe de produit  $P_3$ , ce taux de récupération abouti un niveau optimal de

19.5% avec une erreur de 3.6% dans le cas d'installation d'une seule usine de récupération avec un volume de temps additionnel maximal (scénario 4). Par ailleurs, pour un extrême niveau d'investissement (scénario 48), ce taux de récupération atteint 87.3 de pourcentage avec une erreur de 8.1%.

$N'_i$	Automne	Hiver	Printemps	Eté	$AD\_Tot\_time'_i$
1	< 0.34E-03	0	0	0	0%
	0	0	0	0	10%
	0	0	0	0	20 %
	0	0	0	0	25%
2	0.061 ± 0.033	0	0	0	0%
	0.183 ± 0.033	0	0.896 ± 0.063	< 0.66E-02	10%
	0.305 ± 0.033	0	0.905 ± 0.025	0.054 ± 0.034	20 %
	0.366 ± 0.033	0	0.905 ± 0.025	0.08 ± 0.034	25%
3	0.672 ± 0.033	0	0.905 ± 0.025	0.208 ± 0.038	0%
	0.853 ± 0.032	0	0.905 ± 0.025	0.285 ± 0.039	10%
	0.873 ± 0.033	0	0.905 ± 0.025	0.361 ± 0.041	20 %
	0.873 ± 0.033	0	0.905 ± 0.025	0.400 ± 0.042	25%

IV-1-5 Taux de récupération de la classe du produit  $P_2$  par scenario (moyenne + l'écart d'erreur maximale).

Le traitement de la classe du produit  $P_2$  aura lieu qu'après l'ouverture de deux centres de refabrication (tableau IV-1-5). A ce niveau d'investissement, l'ensemble des taux de récupération prend un intervalle de valeurs entre 40% et 90%. Aussi le travail en plein temps et pleine capacité dans trois centres de retraitement, le processus de récupération de ce type de classe n'interviendra pas pendant la saison du printemps. En effet ceci reflète, la balance des coûts de transport de profit et opérationnel, qui est relativement moindre par rapport aux autres classes de produits.

$N'_i$	Automne	Hiver	Printemps	Eté	$AD\_Tot\_time'_i$
1	0.865 ± 0.02	0.449 ± 0.008	0.891 ± 0.019	0.448 ± 0.011	0%
	0.923 ± 0.014	0.494 ± 0.008	0.903 ± 0.03	0.493 ± 0.012	10%
	0.923 ± 0.014	0.539 ± 0.009	0.903 ± 0.03	0.537 ± 0.014	20 %
	0.923 ± 0.014	0.562 ± 0.01	0.903 ± 0.03	0.560 ± 0.014	25%
2	0.923 ± 0.014	0.899 ± 0.015	0.903 ± 0.03	0.896 ± 0.023	0%
	0.923 ± 0.014	0.933 ± 0.004	0.903 ± 0.03	0.933 ± 0.002	10%
	0.923 ± 0.014	0.933 ± 0.004	0.903 ± 0.03	0.933 ± 0.002	20 %
	0.923 ± 0.014	0.933 ± 0.004	0.903 ± 0.03	0.933 ± 0.002	25%
3	0.923 ± 0.014	0.933 ± 0.004	0.903 ± 0.03	0.933 ± 0.002	0%
	0.923 ± 0.014	0.933 ± 0.004	0.903 ± 0.03	0.933 ± 0.002	10%
	0.923 ± 0.014	0.933 ± 0.004	0.903 ± 0.03	0.933 ± 0.002	20 %
	0.923 ± 0.014	0.933 ± 0.004	0.903 ± 0.03	0.933 ± 0.002	25%

**Tableau IV-1-6 :** Taux de récupération de la classe du produit  $P_3$  par scenario (moyenne + l'écart d'erreur maximale).

En revenant à la classe de produit  $P_3$ , on remarque que sur tous les scénarios, le taux de récupération atteint des niveaux assez importants par rapport aux autres classes de produit. A partir de l'analyse du tableau IV-1-6, et en prenant en considération les ventes de ce produit



dans le marché secondaire, on distingue que les éliminations brutale chez la déchetterie disparaissent quand deux centres de refabrication sont opérationnels avec une valeur limitée du volume de travail additionnel.

Entre autre, pour voir l’impact des installations progressives des centres de refabrication sur l’environnement, des prévisions sur les variations des taux de récupération sur tout l’ensemble de classes de produit par scénario sont détaillées sur les deux tableaux suivants. En particulier à partir du tableau IV-1-8 exprimant la couverture des trois centres de récupération (centre de remanufacture, marché secondaire et sous-traitant), on observe que le taux de récupération varie de 18 à 54% en période d’été. Cependant la récupération globale est visible en période d’automne pour un investissement de trois centres de refabrication et moins de 20 % d’heure supplémentaire. Toutes fois l’écart est inférieur à 2 %.

$N'_i$	Automne	Hiver	Printemps	Eté	$AD\_Tot\_time'_i$
1	0.304± 0.005	0.181 ± 0.005	0.191± 0.007	0.127± 0.004	0%
	0.335± 0.006	0.199 ± 0.005	0.212 ± 0.008	0.140± 0.005	10%
	0.368± 0.006	0.217 ± 0.006	0.232 ± 0.010	0.152± 0.005	20 %
	0.384± 0.006	0.226 ± 0.006	0.242 ± 0.010	0.159± 0.005	25%
2	0.663± 0.056	0.362± 0.010	0.395 ± 0.015	0.254± 0.008	0%
	0.700± 0.010	0.400± 0.010	0.434 ± 0.016	0.281± 0.010	10%
	0.722± 0.010	0.439± 0.016	0.462 ± 0.012	0.308± 0.010	20 %
	0.827± 0.011	0.458± 0.012	0.475 ± 0.012	0.321± 0.011	25%
3	0.890± 0.011	0.554± 0.015	0.542± 0.015	0.389± 0.013	0%
	0.896± 0.010	0.612± 0.016	0.582± 0.017	0.430± 0.015	10%
	0.896± 0.010	0.670± 0.018	0.622± 0.018	0.470± 0.016	20 %
	-----	0.699± 0.018	0.642± 0.019	0.487± 0.013	25%

**Table IV-1-7 :** Taux de récupération globale par scenario (moyenne + l’écart d’erreur maximale).

$N'_i$	Automne	Hiver	Printemps	Eté	$AD\_Tot\_time'_i$
1	0.417± 0.010	0.251 ± 0.006	0.271± 0.013	0.188± 0.006	0%
	0.445± 0.012	0.269 ± 0.007	0.290 ± 0.015	0.200± 0.007	10%
	0.477± 0.012	0.287 ± 0.007	0.310 ± 0.016	0.213± 0.007	20 %
	0.494± 0.012	0.296 ± 0.007	0.320 ± 0.016	0.219± 0.007	25%
2	0.772± 0.010	0.432 ± 0.010	0.474 ± 0.021	0.315± 0.010	0%
	0.765± 0.010	0.468 ± 0.011	0.511 ± 0.018	0.340± 0.011	10%
	0.807± 0.010	0.506 ± 0.012	0.538 ± 0.015	0.367± 0.012	20 %
	0.828± 0.010	0.526 ± 0.013	0.551 ± 0.015	0.380± 0.013	25%
3	0.934± 0.012	0.622± 0.015	0.618± 0.018	0.448± 0.015	0%
	0.996± 0.009	0.680± 0.016	0.658± 0.019	0.489± 0.016	10%
	1	0.738± 0.018	0.698± 0.021	0.529± 0.018	20 %
	-----	0.767± 0.018	0.718± 0.022	0.545± 0.015	25%

**Table IV-1-8.** Taux de récupération globale par scenario (moyenne + l’écart d’erreur maximale) avec considération de :

Ouverture de centre de refabrication + marché secondaire+ sous\_traitant

Une analyse économique de cet exemple numérique, est valorisée par l'estimation du coût globale d'investissement par scenario montré dans le tableau IV-1-9. On remarque que le niveau d'investissement ne promet un net bénéfice qu'à partir de la mise en marche de trois centres de refabrication pour toutes les périodes. De même, si la période d'été révèle la saison à large retours, le profit net aura lieu au voisinage du volume additionnel de travail de l'ordre de 20%. Ceci n'exclut pas un net profit pour les périodes d'hiver et de printemps pour un nombre de centres de refabrication installés égale à deux.

Un autre point très important qu'on doit l'évoquer est le coût de revient d'un produit récupéré. A cette issue, et d'un point de vue coût, durée de vie et pollution de récupération, une taxe environnementale peut être estimée par le soutien de la mise en œuvre d'un coefficient de pondération exprimant l'impact de récupération d'un produit par rapport à l'autre. Mais comme ce cas d'étude est non pratique, en assumant que les trois classes de produit ont le même poids d'importance, le tableau IV-1-10 résume les prévisions du coût de revient des trois classes de produits par scenario et par année. Ceci certainement aidera mieux les décideurs, pour joindre le prix de revient d'un produit en fin de vie au prix d'un produit nouveau dans le marché mais équivalent au produit entrant dans le cycle de récupération. Comme on peut le remarquer, le coût de revient dans le premier scenario est un déficit de  $(6.55 \pm 3.756)$  U, pour atteindre un gain  $(-7.194 \pm 7.742E-01)$  U dans le scénario 47. Malgré que le scenario 48 offre plus de volume temporel de travail par rapport au scenario 47 mais les coûts d'investissement ou de revient d'un produit sont moins que ceux trouvés dans le scénario 48. Ceci en effet, revient à l'avantage d'insérer les classes de produit un et deux dans le processus de récupération qui ont des coûts de revient plus cher d'où une décroissance simultanée des coûts globaux d'investissement et revient du produit.

$N_i^t$	Automne	Hiver	Printemps	Eté	$AD\_Tot\_time_i^t$
1	4,026E+06 ± 1,354E+06	3,139E+07 ± 1,684E+07	2,953E+07 ± 3,370E+06	6,625E+07 ± 3,654E+06	0%
	1,319E+06 ± 1,352E+06	2,991E+07 ± 1,680E+06	2,728E+07 ± 3,160E+06	6,320E+07 ± 3,654E+06	10%
	-8,396E+05 ± 1,240E+06	2,686E+07 ± 1,680E+06	2,512E+07 ± 3,160E+06	6,015E+07 ± 3,654E+06	20 %
	-1,918E+06 ± 1,240E+06	2,534 E+07 ± 1,680E+06	2,404E+07 ± 3159635,84	5,862E+07 ± 3,654E+06	25%
2	-1,820E+07 ± 1,091E+06	1,944E+06 ± 1,681E+06	7,313E+06 ± 3,157E+06	1,786E+06 ± 4,550E+04	0%
	-2,177E+07 ± 1,091E+06	-3,005E+06 ± 1,542E+06	9,454E-01 ± 3,460E-02	3,523E+07 ± 3,655E+06	10%
	-2,534E+07 ± 1,091E+06	-7,318E+06 ± 1,542E+06	-5,147E+05 ± 2,801E+06	2,592E+07 ± 3,366E+06	20 %
	-2,713E+07 ± 1,091E+06	-9,474E+06 ± 1,542E+06	-2,300E+06 ± 2,800E+06	2,375E+07 ± 3,366E+06	25%
3	-3,587E+07 ± 1,091E+06	-2,077E+07 ± 1,541E+06	-1,117E+07 ± 2,729E+06	1,246E+07 ± 3,365E+06	0%
	-4,114E+07 ± 1,044E+06	-2,723E+07 ± 1,541E+06	-1,653E+07 ± 2,729E+06	6,000E+06 ± 3,365E+06	10%
	-4,162E+07 ± 9,578E+05	-3,369E+07 ± 1,541E+06	-2,188E+07 ± 2,729E+06	-4,517E+05 ± 3,365E+06	20 %
	-----	-8,363E+00 ± 5,458E-01	-2,455E+07 ± 2,729E+06	-3,400E+06 ± 3,135E+06	25%

**Tableau IV-1-9 : Coût global d'investissement par trimestre et par scenario**

$N_i'$	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Annuel	$AD\_Tot\_time_i'$
1	1,531E+00 ± 5,013E-01	7,105E+00 ± 3,756E+00	7,064E+00 ± 6,061 E-01	1,052E+01 ± 2,176E-01	6,556E+00 ± 3,756E+00	0%
	5,013E-01 ± 5,143E-01	6,773E+00 ± 2,748E-01	6,525E+00 ± 5,708E-01	1,004E+01 ± 2,337E-01	5,960E+00 ± 5,708E-01	10%
	-3,199E-01 ± 4,702E-01	6,502E-08 ± 3,046E-09	6,008E+00 ± 5,835E-01	9,555E+00 ± 2,497E-01	3,811E+00 ± 5,835E-01	20 %
	-7,300E-01 ± 4,728E-01	5,737E+00 ± 2,858E-01	5,750E+00 ± 5,898E-01	9,313E+00 ± 2,578E-01	5,017E+00 ± 5,898E-01	25%
2	-6,924E+00 ± 4,562E-01	4,386E-01 ± 3,666E-01	1,746E+00 ± 6,876E-01	5,595E+00 ± 3,810E-01	2,141E-01 ± 6,876E-01	0%
	-8,282E+00 ± 4,649E-01	-6,823E-01 ± 3,622E-01	2,263E-07 ± 1,668E-08	4,800E+00 ± 3,634E-01	-1,041E+00 ± 4,649E-01	10%
	-9,640E+00 ± 4,736E-01	-1,659E+00 ± 3,856E-01	-1,265E-01 ± 6,519E-01	4,116E+00 ± 3,861E-01	-1,827E+00 ± 6,519E-01	20 %
	-1,032E+01 ± 4,779E-01	-2,148E+00 ± 3,973E-01	-5,538E-01 ± 6,622E-01	3,772E+00 ± 3,975E-01	-2,312E+00 ± 6,622E-01	25%
3	-1,364E+01 ± 5,093E-01	-4,706E+00 ± 4,584E-01	-2,678E+00 ± 6,981E-01	1,977E+00 ± 4,568E-01	-4,762E+00 ± 6,981E-01	0%
	-1,565E+01 ± 4,770E-01	-6,169E+00 ± 4,934E-01	-3,958E+00 ± 7,316E-01	9,507E-01 ± 4,908E-01	-6,206E+00 ± 7,316E-01	10%
	-1,583E+01 ± 1,993E-01	-7,632E+00 ± 5,284E-01	-5,239E+00 ± 7,742E-01	-7,436E-02 ± 5,248E-01	-7,194E+00 ± 7,742E-01	20 %
	-----	-8,363E+00 ± 5,458E-01	-5,879E+00 ± 7,954E-01	-5,427E-01 ± 5,045E-01	-4,928E+00 ± 7,954E-01	25%

**Table IV-1-10 :** Coût unitaire d'un produit par scenario trimestriel et annuel

En fin de cette partie, on constate qu'on ne peut ignorer l'importance de la simulation itérative de l'optimisation sur le calcul des moyennes des résultats associées à leurs intervalles d'erreurs. Chaque résultat est considéré comme une petite fluctuation de la valeur moyenne par rapport à son écart d'erreur. Il est aussi possible de conclure que la quantité aléatoire retournée donne un résultat stable, alors que  $\Delta Q_{pi}^t$ , désignant la variation de la marge possible des variations des quantités retournées sur l'ensemble des trois classes, varie de 5000 jusqu'à 45000 unités de produits. De ce fait on peut dire que :

- ✓ Pour des cas similaires à cette étude, dans le problème de récupération des déchets de valeur avec l'incertain, la gestion de la chaîne peut être managée avec beaucoup moins de risque.
- ✓ Pour des systèmes de grandes tailles, les écarts des erreurs deviennent de plus en plus minimaux quand le nombre de paramètres augmente
- ✓ L'évaluation des prévisions sur les taux et les coûts de récupération peut être accomplie avec une bonne robustesse, surtout dans le cas d'une grande taille de chaîne même si l'écart de gap  $\Delta Q_{pi}^t$  sera grand.

**IV-2 Démarche de résolution du problème de conception et pilotage CPLI2 :**

Egalement, dans cette section le modèle est évalué par la méthode de simplex basée sur Branch&Bound du commercial solveur LINGO 12. L'ensemble des données sont inspirées de la revue de l'état de l'art (Thanh et al., 2008). Aussi, les centres intermédiaires de récupération (centre de collecte et centre de remanufacture) sont sélectionnés de la même façon que modèle précédent. Idem pour l'horizon d'étude et le nombre de centre de remanufacture à installer durant ce planning.

**IV-2-1 Génération des données d’entrés du modèle CPLI2**

La localisation de l’ensemble des entités formant la chaîne logistique inverse est géographiquement répartie sur une surface plus étendue que l’exemple précédent de l’ordre de 1000\*1000 km<sup>2</sup>. Ceci reflète en effet, la possibilité d’étudier des classes de produits dont notamment au cours de leurs traitements, les instances de réarrangement des usines sont importantes entraînant forcément la couverture de surfaces plus importantes. Du point de vue technique, cela implique l’introduction du caractère du traitement semi-automatique dans la chaîne de récupération négligé dans le modèle CPLII.

En général, les capacités des usines s’accroissent progressivement durant leurs horizons de planification et notamment pour les entités de refabrication. Les frais d’installation de ces derniers centres ne sont pas directement visibles et donc un large débat d’entente se manifeste entre les partenaires responsables (client, source productrice de l’article ou les autorités). Dans cette partie de travail on adopte la politique qu’à la fin de chaque année. L’extension de la capacité de l’usine installée est de 25%. Pour plus de détail sur le benchmark, les données utilisées sont groupées dans les tableaux IV-2-1, IV-2-2 et IV-2-3. Pour les coûts fixes respectivement d’ouverture de centres de collectes, de centres de refabrication ainsi que les coûts opérationnels au centres de collectes sont les mêmes que ceux du modèles CPLII tableau IV-1-1. Idem pour les capacités des sous-traitants et des centres d’élimination tableau IV-1-3.

Classe de produits	Volume en m <sup>3</sup>	Masse in kg	Quantity maximale au centre de collecte	Secondarymarket		Sous-traitant Coût (oper - benefice)	Centre-élimination coût (oper+penalité)
				demande	Prix unitaire		
P <sub>1</sub>	0.8	25	2671000	1000	30	45	10.2
P <sub>2</sub>	1.3	33	3430000	1000	25	50	12.3
P <sub>3</sub>	0.6	35	1980000	1000	30	46	14.4

**Table IV-2-1:** Données au marché secondaire, sous-triatant et centre d’élimination (oper = opérationnel)

Point de Collecte i	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>
1	[60,80]	[25,30]	[35,40]
2	[75,90]	[65,75]	[45,55]
3	[55,60]	[35,50]	[25,30]
4	[25,40]	[15,25]	[65,75]
5	[65,85]	[95,105]	[85,95]
6	[65,85]	[65,80]	[95,105]
7	[25,35]	[30,40]	[55,70]
8	[15,25]	[45,55]	[25,35]
9	[35,45]	[65,70]	[35,40]
10	[10,20]	[85,90]	[40,50]
11	[45,55]	[20,35]	[60,65]
12	[75,90]	[25,30]	[75,85]
13	[45,55]	[50,60]	[85,100]
14	[35,45]	[60,65]	[90,100]
15	[25,30]	[85,95]	[15,20]
16	[40,50]	[65,75]	[20,25]
<i>Coefficients de multiplication pour calculer les quantités des produits aux points de collecte pour chaque saison</i>			
Saison	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>
Hiver	3	0.5	2
Printemps	1.5	2.5	1
Été	2	2.5	2

**Table IV-2-2:** Quantité possible des classes de produits P1, P2 and P3 au point de collecte pour la période d'Automne (chaque valeurs est multiplier par 1000)

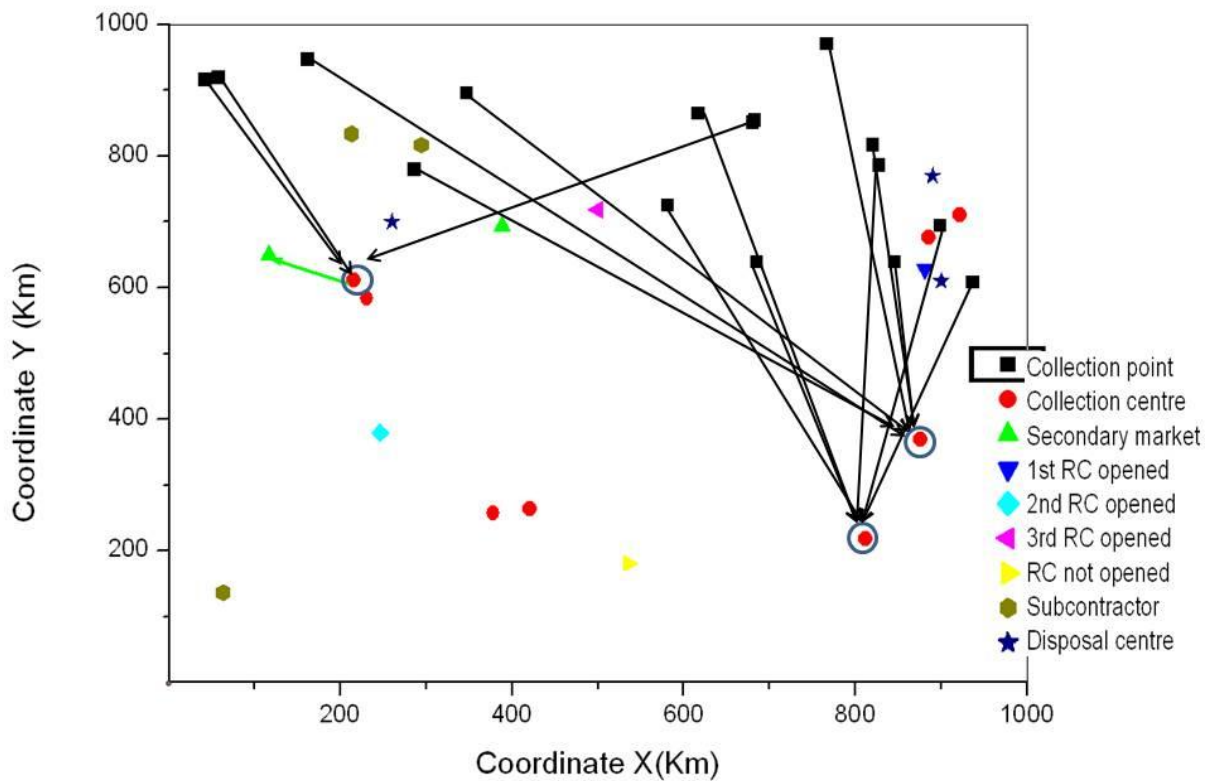
Classe de Produit	Oper costs	Profit costs	Oper time	Coût de réarrangement $FO'_{p,l}$	temps de réarrangement $WLO'_{pl}$
P <sub>1</sub>	7	-40	15	1200	1000
P <sub>2</sub>	8	-50	23	2000	1500
P <sub>3</sub>	9	-60	16	2500	2000

**Table IV-2-3:** Données au centre de remanufacture (Oper= opérationnelle)

**IV-2-1 Résultats de localisation et allocation du modèle CPLI2**

Les décisions de localisation des centres de récupération intermédiaires sont présentées dans la figure ci-dessous. Les flèches noires montrent l'allocation de chaque centre de collecte à l'un des centres de collecte choisi. A la fin de la durée d'étude trois centres de collectes sont installées sur huit emplacements possibles. Leur emplacement est entouré en bleu sur la figure

IV-2-1. La flèche grise représente un lien de transport entre un centre de collecte et un marché secondaire. Pour un choix robuste des centres de refabrication les tests de génération des données aléatoires des quantités de classes de produits aux points de collectes sont validées 20 fois en respectant les mêmes hypothèses citées dans l'étude précédente. Les ouvertures permanentes des trois centres de collecte sont montrées dans la figure IV-2-1 par ordre d'investissement progressive. Plus précisément, à la fin de trois ans d'études, trois centres de remanufactures ont été ouverts sur les quatre sites possibles. Respectivement, l'emplacement d'un centre de remanufacture est permis en première année (1st RC ouvert). Au début de la deuxième année, un second centre de refabrication est installée (le centre 2<sup>nd</sup> RC ouvert) tandis que la capacité du premier centre est étendue de 25 % par rapport à 12794000 pour atteindre 15992500 unités de temps. A la fin de la deuxième année, un troisième centre de refabrication est mis en place. Les deux autres centres ont alors des capacités respectives de 15992500 et 19191000 unités de temps pour retraiter les produits.



**Figure IV-2-1:** Localisation des centres de collectes puis de refabrication

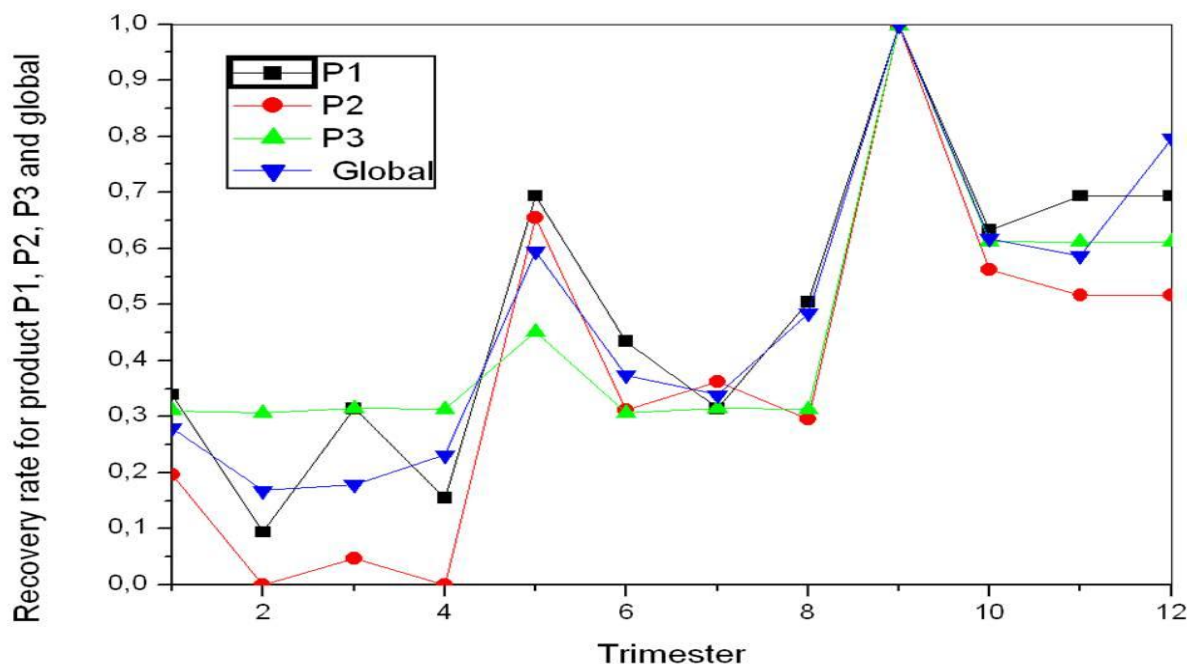


Figure IV-2-2: Taux de récupération de chaque classe de produit durant l’horizon de planification (centre de remanufacture + sous traitant + marché secondaire)

$N_t^f$	Produit	Automne	Hiver	Printemps	Eté
1	P <sub>1</sub>	0.340 ± 0.061	0.094 ± 0.009	0.314 ± 0.024	0.154 ± 0.031
	P <sub>2</sub>	0.196 ± 0.045	0	0.047 ± 0.011	0
	P <sub>3</sub>	0.316 ± 0.014	0.307 ± 0.009	0.314 ± 0.009	0.313 ± 0.008
	Global	0.279 ± 0.012	0.170 ± 0.006	0.178 ± 0.007	0.233 ± 0.011
2	P <sub>1</sub>	0.694 ± 0.034	0.434 ± 0.044	0.314 ± 0.064	0.504 ± 0.034
	P <sub>2</sub>	0.654 ± 0.035	0.312 ± 0.034	0.362 ± 0.066	0.295 ± 0.031
	P <sub>3</sub>	0.451 ± 0.029	0.307 ± 0.041	0.314 ± 0.067	0.313 ± 0.029
	Global	0.594 ± 0.071	0.374 ± 0.057	0.337 ± 0.064	0.485 ± 0.027
3	P <sub>1</sub>	0.997 ± 0.016	0.632 ± 0.052	0.693 ± 0.061	0.693 ± 0.034
	P <sub>2</sub>	0.997 ± 0.016	0.562 ± 0.058	0.517 ± 0.078	0.517 ± 0.041
	P <sub>3</sub>	0.997 ± 0.017	0.611 ± 0.071	0.611 ± 0.078	0.611 ± 0.078
	Global	0.995 ± 0.016	0.619 ± 0.072	0.5867 ± 0.077	0.798 ± 0.090

Tableau IV-2-4 Taux de récupération de chaque classe de produit durant l’horizon de planification (moyenne + l’écart d’erreur maximale) pour les trois entités de récupération (centre de remanufacture + sous traitant + marché secondaire).

Dans la figure IV-2-2 apparaît le taux moyen de récupération pour chacune des trois classes de produits pour toute la durée d’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 le consommateur. De même les incertitudes d’écart

maximale des taux de retours ne dépasse pas les 10%, comme le montre le tableau IV-2-2, ces résultats reflète, en effet la variation durant le calcul des quantités des classes produits. En première année, la classe du produit  $P_3$  a le taux maximum de récupération par rapport aux autres produits par le fait d'avoir un coût de profit important ainsi qu'un petit temps de traitement. Mais quand deux centres de remanufacture sont installés, le traitement de la classe du produit  $P_1$  devient le plus important par le faite de la contrainte de quantité minimale requise pour passer au réarrangement d'une classe de produit fixée à 30 % de la capacité du centre de refabrication. De même les coûts de transport et les autres coûts contribuent dans le choix d'affectation des produits. Afin de voir les possibilités de réarrangement de chaque centre de remanufacture installée pour traiter un produit durant l'horizon de planification par rapport aux variations saisonnières des quantités retournées pour chaque classes de produit, les décisions  $XO'_{p,1}$  sont présentées dans le tableau IV-2-1. Par exemple en première année

pour la période d'automne le centre de remanufacture (1St RC ouvert) est réarrangé trois fois par le faite de la quantité faible des trois classes de produits par rapport aux autres saisons. Tandis que pendant la saison d'été le centre traite uniquement le produit  $p_1$  du fait que la quantité retournée du produit  $P_1$  est doublée en plus que le bilan des coûts variables profit pénalité et transport favorise ce type de classes de produit. Notons de plus que le coût de réarrangement pour une classe de produit est nul au début de chaque saison, si à la fin de la saison précédente le centre de refabrication traite la même classe d'article.

Par ailleurs, pour voir l'interprétation économique des résultats, Tableau IV-2-4 vise à évaluer les valeurs moyennes obtenues pour les prix de revient d'un produit au cours de l'horizon de planification. Il montre également le coût total de la charge qui représente le coût d'investissement pour les quels les coûts de profit sont déduits. Si la valeur du prix de revient est négative, cela signifie que le décideur peut des bénéfices. Avec un taux de récupération élevé pour telle période, on a réussi à faire des profits. Cela montre que plus de bénéfices peuvent être générés si d'autres usines sont mises en place ou si la capacité de ceux existant est étendue.

Sinon, si on se place dans le contexte de l'environnement plus propre et quant à la durabilité de la matière vierge, la logistique inverse ne signifie souvent un avantage de gain, mais façon assez propre pour traiter une perte. En conclusion, ces coûts unitaires peuvent être ajoutés comme une taxe de récupération dans le prix d'un autre produit comme nouveau introduit dans le marché de consommation.



1 <sup>ère</sup> Année				Ouverture d'un seule centre de retraitement								
	Automne			Hiver			Printemps			Eté		
Produit	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_1$	$P_2$	$P_3$
$WLO'_{p1}$	1200	1500	2000	1200	1500	0	0	15000	2000	1000	1500	0
$XO'_{p,1}$	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0
2 <sup>ème</sup> Année				Ouverture de deux centres de retraitement								
	Automne			Hiver			Printemps			Eté		
Produit	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_1$	$P_2$	$P_3$
$WLO'_{p1}$	0	1500	2000	1200	1500	0	1200	1500	0	0	1500	2000
$XO'_{p,1}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
$WLO'_{p2}$	1200	1500	2000	0	1500	2000	1200	0	2000	1200	0	2000
$XO'_{p,2}$	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0
3 <sup>ème</sup> Année				Ouverture de trois centres de retraitement								
	Automne			Hiver			Printemps			Eté		
Produit	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_1$	$P_2$	$P_3$
$WLO'_{p1}$	1200	1500	0	1200	0	2000	0	1500	2000	1200	1500	0
$XO'_{p,1}$	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
$WLO'_{p2}$	0	1500	2000	1200	0	2000	0	1500	2000	1200	1500	0
$XO'_{p,2}$	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
$WLO'_{p3}$	1200	1500	2000	1200	0	2000	0	1500	2000	1200	1500	0
$XO'_{p,3}$	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0

**Tableau IV-2-5** configuration de réarrangement des centres de refabrication installés pour différentes classes de produits durant l'horizon de planification

En plus, de ce que nous avons déduit dans la partie précédente, nous pouvons constater deux remarques :

- ✓ Les configurations des usines de traitement pour des fractions minimales nécessaires pour une telle classe de produit, éliminent les risques pour un réarrangement juste pour la minimisation du coût globale d'investissement. Ceci peut être justifié dans le cas où la récupération des déchets n'apporte pas un gain mais plutôt juste une protection de l'environnement.
- ✓ L'exigence de ces fractions minimales permet de satisfaire les demandes des autres entités qui peuvent fermer la chaîne inverse.

<b>1<sup>ère</sup> année</b>					
	Automne	Hiver	Eté	printemps	<b>Année</b>
<b>Coût d'investissement</b>	33566600	78672540	74383200	74389100	261011440
<b>Coût moyen d'une classe d'un produit</b>	12,84108646	16,77810621	17,04863626	16,39609874	16,1088342
<b>2<sup>ème</sup> année</b>					
	Automne	Hiver	Eté	printemps	<b>Année</b>
<b>Coût moyen d'investissement</b>	404612,1	36991770	39972090	34205240	111573712
<b>Coût moyen d'une classe d'un produit</b>	0,154786572	7,889053103	9,161606693	7,539175667	6,885991
<b>3<sup>ème</sup> année</b>					
	Automne	Hiver	Eté	printemps	<b>Année</b>
<b>Coût moyen d'investissement</b>	-3563011	8658248	17847860	8883649	31826746
<b>Coût moyen d'une classe d'un produit</b>	-1,36304935	1,846502026	4,090731148	1,958044743	1,9642502

**Tableau IV-2-6 :** Coût moyen d'investissement et coût moyen d'un produit

**IV-3 Démarche de résolution du problème de conception et pilotage CPLIB :**

Dans cette dernière partie, on a étudié une seule classe de produit mais avec une vision plus détaillée puisque l'unité de traitement est en module. Pour le choix d'exemple numérique afin de voir l'intérêt économique et environnemental du modèle proposé, plusieurs données sont générées aléatoirement. En plus des quantités du produit récupéré auprès 20 points de collectes, d'autres variations aléatoires sont considérées au niveau des fractions de bon produit qui peut être revendu dans le marché secondaire en entier. Aussi les qualités des modules destinées à la remanufacture, varient aléatoirement entre des fractions limitées par une borne minimale et maximale. Pour alléger la modélisation et les calculs, les parcelles de produit destinées au recyclage sont vues comme un seul bloc. Pour les parcelles sans valeurs de récupération sont considérées comme un seul bloc aussi. Dans l'hypothèse que les centre de remanufacture installés ne suffisent pas pour traiter tous les modules, l'excès de module de remanufacture pourra être éliminé au centre d'élimination mais avec un coût de pénalité.

**IV-3-1 Génération des données d'entrée du problème CPCLB :**

De la même façon que les deux modèles précédents, le benchmark est choisit selon la référence (Thanh et al., 2008), et il est testé sur le solver d'optimisation **LINGO**. Aussi les centres intermédiaires de récupération (centre de collecte et centre de remanufacture) sont sélectionnés de la même façon que pour les modèles précédents. Idem pour l'horizon d'étude et le nombre de centre de remanufacture à installer durant ce planning.

Le réseau proposé regroupe 20 points de collecte, 6 centres de collecte/désassemblage candidat, 4 centres de remanufacture candidat, deux marchés secondaires, 3 centres de recyclage, 3 centres d'éliminations et deux fournisseurs. Les données d'entrées pour les deux niveaux sont groupées dans les tableaux ci-dessous.

Point de collecte i	Automne		hiver		Printemps		Eté	
	Q <sub>min</sub>	Q <sub>max</sub>	Q <sub>min</sub>	Q <sub>max</sub>	Q <sub>min</sub>	Q <sub>max</sub>	Q <sub>min</sub>	Q <sub>max</sub>
1	1000	1250	1500	1875	1750	2187,5	2000	2500
2	1500	1800	2250	2700	2625	3150	3000	3600
3	1300	1700	1950	2550	2275	2975	2600	3400
4	1800	2000	2700	3000	3150	3500	3600	4000
5	2000	2200	3000	3300	3500	3850	4000	4400
6	2200	2500	3300	3750	3850	4375	4400	5000
7	2100	2450	3150	3675	3675	4287,5	4200	4900
8	2800	3100	4200	4650	4900	5425	5600	6200
9	3300	3600	4950	5400	5775	6300	6600	7200
10	1200	1500	1800	2250	2100	2625	2400	3000
11	2800	3100	4200	4650	4900	5425	5600	6200
12	2600	3000	3900	4500	4550	5250	5200	6000
13	3000	3250	4500	4875	5250	5687,5	6000	6500
14	3400	3500	5100	5250	5950	6125	6800	7000
15	3600	3800	5400	5700	6300	6650	7200	7600
16	2900	3150	4350	4725	5075	5512,5	5800	6300
17	2700	2950	4050	4425	4725	5162,5	5400	5900
18	3300	3480	4950	5220	5775	6090	6600	6960
19	4000	4350	6000	6525	7000	7612,5	8000	8700
20	1100	1350	1650	2025	1925	2362,5	2200	2700

**Tableau IV-3-1:** Quantité possible des classes de produit P1 pour les quatre saisons de l'année

Masse de produit [kg] $W_p$	W: 25
Taille du produit [ $m^{+3}$ ] $S_p$	S: 0.8
Coût de désassemblage $U$	OPC: 3.5
$Cap_j^{max} [m^3]: \frac{\text{Max tous les period}(Q_{maxp} * S1)}{\sqrt{\text{number de centre de collectecandidat}}}$	35292.2482
$Cap_j^{min} [m^3]: 0.8 * Cap_j^{max}$	28233.798
$Fcost_j[MU]: \text{aléatoire}[100,110] * \sqrt{Cap_j^{max}}$	17659.05731
$Fop_j^t[MU]: \text{aléatoire}[10,20] * \sqrt{Cap_j^{max,t}}$	Automne :7722.95 Hiver: 6688.27 printemps: 7224.15 Eté:7722.95

**Tableau IV-3-2:**Données introduites dans le premier niveau

<u>Centre de remanufacturem</u>																																																					
$f_1$ : aléatoire[45,55] % $f_2$ : aléatoire [40,50] % $f_3$ : aléatoire [65,75] % $f_4$ : aléatoire [30,40] %		$W_1$ : 2 [MU] $W_2$ : 3 [MU] $W_3$ : 4.5 [MU] $W_4$ : 5 [MU]		$wld_{1m}$ :25 U $wld_{2m}$ :30 U $wld_{3m}$ :15 U $wld_{4m}$ :18 U																																																	
$Wld_{tot_m}$ : 1059500 pour tous m  $Open_{a_m}$ : <table style="margin-left: 40px;"> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	$OPcost_{1m} + Pcost_{1n}$ : -100 $OPcost_{2m} + Pcost_{2n}$ : -80 $OPcost_{3m} + Pcost_{3n}$ : -70 $OPcost_{4m} + Pcost_{4n}$ : -180 Pour tous m et n $M_{rm}$ : <table style="margin-left: 40px;"> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>319800</td><td>319800</td><td>319800</td><td>319800</td></tr> </table>		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	319800	319800	319800	319800	$FS_m$ : 601883.333 U  $PNcost_{rm} + OPcost_{rm}$ : 13 U pour tous r et m  $Open_{b_m}$ : <table style="margin-left: 40px;"> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
1	1	1	1																																																		
1	1	1	1																																																		
1	1	1	1																																																		
0	0	0	0																																																		
0	0	0	0																																																		
0	0	0	0																																																		
0	0	0	0																																																		
319800	319800	319800	319800																																																		
0	0	0	0																																																		
0	0	0	0																																																		
0	0	0	0																																																		
1	1	1	1																																																		
<u>Marché secondaire O</u>																																																					
$Dem'_o$ : 80000 U quelque soit o et t' $fgood_j^{t+1}$ : aléatoire[10,30] %quelque soit o et t' $Pcost_o$ : -23 U																																																					
<u>Centre de recyclage k</u>																																																					
$Wk$ : 8		$M_k$ : 60000		$Pcost_k$ : -6																																																	
<u>Centre d'élimination l</u>																																																					
$Wl$ :5 Pour tous l	$Wld_{tot_l}$ : 1200000 Pour tous l	$M_l$ : 60000 Pour tous l	$wld_{rl}$ :11 pour tous r et l	$PNcost_l$ : 7 Pour tous l	$PNcost_{rl}$ : 11 pour tous r et l																																																
<u>Fournisseur n</u>																																																					
$Dem_m^{t+1}$ : 250000 pour tous r et n																																																					

Tableau IV-3-3: Données introduites dans le deuxième niveau

IV-3-2 Résultats de localisation et allocation du modèle CPCLB

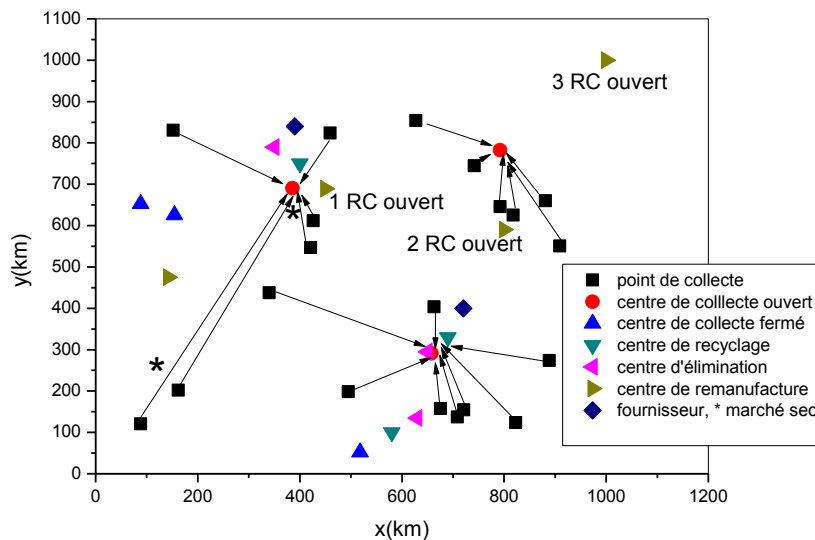


Figure IV-3-1:localisation des centres intermédiaires de récupération

Les décisions de localisation des centres de récupération intermédiaires sont présentées dans la figure ci-dessus. Les positions des entités sont générées aléatoirement sur une surface carrée de 1200 km de coté. La structure géographique de la chaîne logistique fermée regroupe huit différentes entités à savoir : 20 points de collecte, 6 centres de collectes, trois amas de recyclage (de grande capacité) présentés par leurs centres de gravité sur la figure, trois centres d'élimination (de grande capacité), deux marchés secondaires (la demande est supposée supérieure à l'offre pour toutes les périodes), deux fournisseurs (la demande est supposée supérieure à l'offre pour toutes les périodes) et quatre centre de refabrication avec une politique d'installer trois centres sur l'horizon de trois ans. Les flèches noires montrent les affectations permanentes des points de collecte aux centres de collecte. Parmi les 6 centres de collectes candidats, seulement trois sont ouverts sur tout le planning d'étude avec un taux d'occupation de plus de 80% pendant la période d'été. Respectivement, les ouvertures annuelles des centres de remanufacture sont 1RC en première année, puis 1RC et 2RC en deuxième année. Enfin en troisième année les centres 1RC, 2RC et 3RC sont en marche. Pour un choix robuste des centres de refabrication, des tests de génération des données aléatoires sont effectués pour trois variables entre deux bornes limites. Ceci est mentionné respectivement dans le tableau IV-3-1 pour les quantités collectées aux points de collecte et le tableau IV-3-1 pour les fractions de bon produit ainsi que les fractions de bons modules. Evidemment, les modules arrivant au centre de refabrication et évalués comme mauvais et non récupérables sont éliminés dans ce centre de retraitement. Pour un nombre de répétition de 20 fois dont les données instables citées sont introduites de façon aléatoire suivant une loi de distribution uniforme avec la même probabilité, des moyennes des taux de récupération de bons modules par rapport aux mauvais modules sont présentés dans le tableau IV-3-4. Suivant la balance du coût négatif de profit de chaque module par rapport à ces coûts positifs de transport et de fonctionnement, l'avantage est donné en priorité au module 4, puis au module 1, ensuite au module 2 et enfin au module 3 sur toutes les périodes. Mais comme la fraction du module 1 est faible par rapport à celle du module 4 en terme de bon module, la récupération totale du module 1 est atteinte quand deux centres de remanufacture sont ouverts pour toutes les périodes. Aussi comme le processus dédié au traitement du module 4 est indépendant d'autres modules (voir  $Open_{brm}$  et  $M_{rm}$  dans le tableau IV-3-3) les capacités disponibles  $M_{4m}$  ne suffisent pas pour une récupération totale de ce module durant les saisons (2-3-4). Enfin les modules 2 et 3 prennent une lenteur dans leur traitement aux centres de remanufactures du fait que leurs transports vers ces derniers centres sont quasiment faibles

durant les saisons (2-3-4) et pour tous les scénarios suite à l'occupation de chaque centre de refabrication dans le traitement du module 1.

<i>Taux de récupération par module alloués au fournisseur en % (1 seule centre de refabrication ouvert)</i>				
	Automne	Hiver	printemps	Eté
Module 1	0,492 ± 0,030	0,353 ± 0,057	0,291 ± 0,064	0,262 ± 0,023
Module 2	0,029 ± 0,029	0,000 ± 0,000	0,000 ± 0,000	0,000 ± 0,000
Module 3	0,020 ± 0,020	0,000 ± 0,000	0,000 ± 0,000	0,000 ± 0,000
Module 4	0,297 ± 0,021	0,195 ± 0,023	0,167 ± 0,035	0,143 ± 0,007
<i>Taux de récupération par module alloués au fournisseur en % (2 centres de refabrication ouvert)</i>				
	Automne	Hiver	printemps	Eté
Module 1	0,492 ± 0,030	0,504 ± 0,055	0,484 ± 0,070	0,501 ± 0,045
Module 2	0,414 ± 0,195	0,122 ± 0,122	0,103 ± 0,103	0,022 ± 0,012
Module 3	0,160 ± 0,150	0,134 ± 0,132	0,140 ± 0,053	0,019 ± 0,019
Module 4	0,595 ± 0,041	0,389 ± 0,045	0,334 ± 0,070	0,286 ± 0,013
<i>Taux de récupération par module alloués au fournisseur en % (3 centres de refabrication ouvert)</i>				
	Automne	Hiver	Printemps	Eté
Module 1	0,492 ± 0,030	0,504 ± 0,055	0,484 ± 0,070	0,501 ± 0,045
Module 2	0,552 ± 0,040	0,341 ± 0,192	0,222 ± 0,339	0,151 ± 0,153
Module 3	0,294 ± 0,040	0,202 ± 0,175	0,165 ± 0,350	0,134 ± 0,174
Module 4	0,684 ± 0,065	0,584 ± 0,068	0,501 ± 0,104	0,430 ± 0,020

**Tableau IV-3-4:**Taux de récupération de bons modules alloués aux fournisseurs

<i>Coût globale d'investissement</i>					
	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Année
<i>1 C. refabricatoin</i>	-2035648 ± 284033	-1139177 ± 572048	-578764 ± 956972	-143473 ± 246379	-3897062 ± 956972
<i>2 C. refabricatoin</i>	-5497587 ± 578857	-4810776 ± 748298	-4289750 ± 1335598	-4015521 ± 467527	-18613634 ± 1335598
<i>3 C. refabricatoin</i>	-6728081 ± 783885	-8202529 ± 882755	-7640504 ± 1488219	-7391321 ± 396248	-29962436 ± 1488219
<i>Coût moyen unitaire d'un produit</i>					
<i>1 C. refabricatoin</i>	-39,556 ± 5,415	-14,800 ± 7,320	-6,434 ± 10,667	-1,396 ± 2,413	-17,228 ± 10,667
<i>2 C. refabricatoin</i>	-106,822 ± 10,993	-62,528 ± 9,288	-47,713 ± 14,796	-39,078 ± 4,552	-65,168 ± 14,796
<i>3 C. refabricatoin</i>	-130,738 ± 14,909	-106,618 ± 10,736	-84,987 ± 16,412	-71,935 ± 3,757	-132,456 ± 16,412

**Tableau IV-3-5:**Coût globale d'investissement +coût moyen unitaire d'un produit

Une analyse économique de cet exemple numérique, est valorisée pour l'estimation du coût globale d'investissement par scenario. Nous constatons qu'un net bénéfice apparait dès la première installation du centre de refabrication qui est associée au renforcement des liens entre la chaîne inverse et le marché secondaire. Puisque le coût de profit autant qu'un produit récupéré au marché secondaire ou bien qu'un module vendu au fournisseur, est important, l'évaluation de la valeur économique d'un produit est directement proportionnelle au nombre de centres de remanufacture ouverts. Aussi, nous remarquons que les écarts de fluctuations

des résultats sont importantes et peuvent atteindre 200 % dans le premier scénario pour diminuer jusqu'à moins de 20% dans le dernier scénario. En effet, cette diminution est expliquée par la fraction indirecte sur le nombre de centres de remanufacture ouverts aux niveaux des trois variables d'incertain considérées dans cet exemple à savoir : le nombre de bon produit, le nombre de bon module et le nombre de produit collectés au centre de collecte.

Aussi nous pouvons distinguer les observations suivantes:

- ✓ Le calcul des moyennes des résultats associées à leurs intervalles d'erreurs converge vers une certaine stabilité au niveau de la variation des résultats.
- ✓ Pour des cas similaires à cette étude, dans le problème de récupération des déchets de valeur avec l'incertain, la gestion de la chaîne peut être managée avec beaucoup moins de risque.
- ✓ Pour des systèmes de grandes tailles, les écarts des erreurs deviennent de plus en plus faibles quand le nombre de sites augmentent.
- ✓ L'évaluation des prévisions sur les taux et les coûts de récupération peut être accomplie avec une certaine robustesse, surtout dans le cas d'une grande taille de chaîne même si l'écart de la largeur des variations des grandeurs remarquées par leur incertitude est spacieux.

**Conclusion :**

Dans cette dernière partie de notre travail, nous avons présenté trois exemples numériques d'optimisation itérative pour atteindre de meilleures robustesses des résultats. Sachant que les quantités des produits retournées et les paramètres d'évaluation des qualités ne sont pas stables, nous avons réussi à estimer les prévisions d'évaluation des paramètres économiques et environnementaux en fonction des scénarios des investissements possibles. Le choix de la localisation permanente des sites intermédiaires de récupération, affecte indirectement leurs fonctionnements optimaux plutôt qu'économique non visible dans la modélisation. Même si ce choix nous ne semble pas optimal sur le plan de calcul mais indirectement les facteurs sociaux et de la qualification de la main d'œuvre sont respectés. Néanmoins pour un cas réel d'étude dotée d'un benchmark plus visible et structuré sur une zone de grande taille et groupant un nombre important d'entités apportera plus de stabilité des résultats. Du plus, la mise en place d'une plate forme de modélisation et optimisation dynamique d'un modèle fragmenté en sous modèle représente notre challenge. Enfin pour avoir plus de flexibilité sur la dynamique du système, nous prévoyons la mise en œuvre d'une heuristique pour l'hybridation de la simulation et l'optimisation.

# Conclusion et perspectives

En raison des réglementations gouvernementales et afin de sensibiliser les gens à protéger l'environnement et réduire les déchets ; la logistique inverse est classée comme l'un des plus importants axes de recherche pour lancer de façon durable la récupération des articles en fin de vie. En pratique la réalisation d'un tel réseau est assez complexe et nécessitant une volonté d'interaction et de collaboration entre les trois partenaires jugés comme responsables de production des déchets à savoir : client, entreprise et autorités. Par ailleurs, si on reflète l'incertitude qui est fréquemment présente aux niveaux de la quantité et la qualité des classes de produit se trouvant en rebus et qui doivent être récupérées. Sur un horizon de temps important et pour mettre en place un réseau de récupération des déchets de valeur stable, la conception et le pilotage du système doivent être conçus avec beaucoup d'agilité. Dans ce contexte et après avoir présenté un état de l'art sur les problèmes de conception et pilotage de chaînes logistiques directe, inverse et globale, nous avons réalisé trois modèles pour la gestion de réseau de récupération valables pour différents types de traitement des produits. Aussi afin de s'approcher de la réalité, le flux physique inverse est supposé dynamique et récupéré par les installations intermédiaires de capacité limitée. Durant un programme de planification, plusieurs tests d'optimisations par scénarios sont supposés pour voir l'impact des installations progressives des centres de remanufacture sur les taux et les coûts de récupération des classes de produits. Pour atteindre un cadre socioprofessionnel stable des ressources humaines, les ouvertures des installations de récupérations intermédiaires sont considérées comme permanentes. Au cours de la modélisation et l'optimisation, une variété de coûts de motivation et de pénalité est introduite pour une évaluer la moyenne des résultats.

Comme continuité de cette étude nous envisageons de l'enrichir prochainement par les perspectives suivantes par ordre de chronologie:

- ✓ Ajustement d'une approche d'optimisation à l'aide d'une heuristique sur des systèmes de grande taille sur les modèles proposés.



- ✓ Une contribution à la mise en place d'un simulateur de génération de l'incertitude au niveau des données et des qualités des articles suivant des lois de probabilité en le combinant avec la métaheuristique.
- ✓ Etaler le réseau de récupération dans un but de gérer le flux physique de produits entre plusieurs échelons dans une approche de modélisation mathématiques en sous modèles mais en interaction. Pour une meilleure planification agrégée, l'effet d'inventaire sur le stockage minimal sera aussi considéré pour éviter toute élimination brutale d'une telle classe de produit.

# REFERENCES

## BIBLIOGRAPHIQUES

[**Adebanjo. D et Xiao, 2006**], Managing reverse logistics in the Chinese automobile industry, *IEEE International Conference on Management of Innovation and Technology*, 21-23 June.

[**Aikens.C. H , 1985**].Facility location models for distribution planning. *European Journal of Operational Research*, Vol. 22(3), pp. 263-279.

[**ADEME, 2010**], Bilan Carbone Entreprise et Collectivités. *Guide des facteurs d'émissions version 6.1*, [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

[**Balinski.M.L, 1961**], Fixed cost transportation problem .*Naval Research Logistic Quarterly* 8, 41-54.

[**Bennekrouf. M, Benyoucef. L et Sari. Z, 2010**], Problème de conception et pilotage des chaînes logistiques inverses et globales : un état de l'art, *MOSIM'10, Hammamet – Tunisie, 10 au 12 mai 2010*.

[**Bennekrouf. M, Boudahri. F, Sari. Z, 2011**], Optimal design of two levels reverse logistic supply chain by considering the uncertain quantity of collected multi-products, *IEEE-2011, 4th International Conference on Logistics (LOGISTIQUA)*.

[**Bennekrouf. M, Mtalaa.W, Boudhari. F & Sari. Z, 2011**], A dynamic model for the design of green logistic networks,*41th conference on Computers & Industrial Engineering, Los Angeles CALIFORNIA, October, 23-26,2011*

[**Bennekrouf. M, Mtalaa.W, Boudahri. F, Sari. Z ,2012**], A generic model for network design including remanufacturing ctivities international workshop in green supply chain, *University of Artois Arras France 21-22 june 2012*.

[**Bennekrouf. M et Sari. Z , 2013**], Multi-Objective Multi-Level Closed Loop Supply Chain Design, *Journal management- Scientific & Academic Publishing. Vol 3(5), 266-272, 2013*.

[**Bennekrouf. M, Mtalaa .W et Sari .Z, 2013**], A generic model for network design including remanufacturing activities international workshop in green supply chain, *article accepté en Septembre 2013 dans Supply Chain Forum : An International Journal in Supply Chain. (BEM Bordeaux, France)*.

- [**Bloemhof-Ruwaard. J. M, Fleischmann, M, Van-Nunen, J.A.E.E., 1999**], Reviewing distribution issues in reverse logistics. In: Speranza, M.G., Stahly, P. (Eds.), *New Trends in Distribution Logistics*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 23–44.
- [**Carter, C. R et Ellram, L. M. 1998**], Reverse Logistics: A review of the literature and framework for future investigation. *Journal of Business Logistics*, *Council of Logistics Management* 198(1),85-102.
- [**Corbett. C et Kleindrofer. P. R, 2001**], Introduction to the Special Issue to the Environmental Management and Operation (Part 2: Integrating Management and Environmental Management Systems), *Journal of Production and Operations Management*, vol 10(3), p. 225-228.
- [**Corbett.C. J et Kleindorfer. P. R., 2003**], Environmental management and operations management: introduction to the third special issue. *Production and Operations Management*, 12: 287–289
- [**Cruz-Revera. R et Ertel. J, 2009**], Reverse Logistics Network Design for the Collection of End-of-Life Vehicles in Mexico, *European Journal of Operational Research*,vol 196, p. 930-939.
- [**Daskin. M, Coullard. C. et Shen.Z , 2001**], An Inventory-Location Model: Formulation, Solution Algorithms and Computational results.*Annals of Operations Research*, pp. 83-106.
- [**Daskin. M, Lawrence V. Snyder, Rosemary T. Berger, 2003**], Facility Location in Supply Chain Design, *Working Paper No. 03-010, Northwestern University, Evanston, Illinois 60208-3119, U.S.A.*
- [**Daskin. M, 2006**], Facility Location Softwar version5.7.0.12, *SITATION 2006Northwestern University, Evaston USA.*
- [**Dawe, R. L, 1995**]. Reengineer your returns. *Transportation and Distribution*36(8),78-80
- [**Demeril. N. O et Gökçen. H, 2008**], A mixed integer programming model for remanufacturing in reverse logistics environment, *International Journal of Manufacturing Technology*, vol3, p.1197-1206.
- [**Ding Si-bo et Huang , Wei-Lai, 2008**],Optimal design of multi-echelon reverse logisticsusinggeneticalgorithm, *IEEE*, 978-1-4244-2108.
- [**El-Sayed. M, Afia. N et Al-Kharbotly. H, 2008**], A stochastic model for forward-revere logistics Network design under risk, *Computers and Industrial Engineering*.
- [**Fleischmann, M, 2001**],The impact of product recovery on logistics network design, *Production and Operations Management*, vol 10, p.156–173.
- [**Fleischmann. M, Bloemhof-Ruwaard. J. M, Dekker, VanderLaan. E, Van Nunen. J et Van Wassenhove. L. N, 1997**], Quantitative models for reverse logistics: a review, *European Journal of Operational Research*, vol 103(1), p.1–17.
- [**Francis. R. L, Tansel. B. C, et Lowe.T. J, 1982**], A Biobjective Multifacility Minimax Location Problem on a Tree Network. *Transportation Science* 16, 407–429.

- [**Hakimi. L, 1964**],Optimum Locations of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph, *Operations Research*, 12, 450-459.
- [**Hakimi. S. L, 1965**], Optimum Distribution of Switching Centers in a Communication Network and Some Related Graph Theoretic Problems. *Operations Research* 13, 462–475.
- [**Hang. Z et Chen. Z, 2008**], Model of Used Product Reclaiming/Collecting for Third Party Reverse Logistics Based on Circle Economy, *IEEE International Conference on Service Operations and Informatics (12-15 Oct)*, p.1175-1180.
- [**He. B, Yang. C et Ren. M, 2007**], A Fuzzy Multi-objective Programming for Optimization of Reverse Logistics for Solid Waste through Genetic Algorithms, *IEEE Forth International Conference on Fuzzy System and Knowledge Discovery*.
- [**Kibum Kim, Iksoo Song, Juyong Kim et Bongju Jeong, 2006**],Supply planning model for remanufacturing system in reverse logistics environment, *Computers & Industrial Engineering*, 51 279-287.
- [**Kim. K, Song. I, Kim.J et Jeong. B, 2008**],Supply planning model for remanufacturing system in reverse logistic environment, *Computers and Industrial Engineering*, vol 51, p.279-287.
- [**Lambert, D. M. et Stock, J. R. 1981**], Strategic physical distribution management. *Irwin, Homewood, IL, USA*,p.19.
- [**Lambert.S. et Riopel.D, 2003**],Logistique Inverse : revue de littérature. *Les cahiers de Gérard, Ecole polytechnique de Montréal*.
- [**Lee. D et Dong. M, 2009**],Dynamic network design for reverse logistics operations under uncertainty,*Transportation Research Part E*, vol 45, p. 61-71.
- [**Lee. J-E, Gen. M et Rhee K-G, 2008**], Network model and optimization of reverse logistics by hybrid genetic algorithm, *Computers and Industrial Engineering*
- [**Liu. J et Ni. J, 2007**], A hybrid Immune Genetic Algorithm approach to optimize the integrated forward/reverse logistics network for 3 PLs, *IEEE Third International Conference on Natural Computation*.
- [**Lua. Z et Bostel. N, 2007**], A facility location model for logistics systems including reverse flows: the case of remanufacturing activities, *Computers & Operations Research*,vol34, p. 299-323.
- [**Luis J. Zeballos, M. Isabel Gomes, Ana P. Barbosa-Povoa et Augusto Q. Novais, 2012**], Addressing the uncertain quality and quantity of returns in closed-loop supply chains. *Computers & Chemical Engineering* Volume 47, 20 December 2012, Pages 237–247 *FOCAPO 2012*
- [**Lu. Y, LU. P et Liang. L, 2008**], Multi-objective Optimization of Reverse Logistics Network Based on Random Weight and Genetic Algorithm, *IEEE International Conference on Networking Sensing and Control (6-8 Avril)*, p. 1196-1200.
- [**Majid-Ramezani. M. B et Tavakkoli-Moghaddam. R, 2013**], A new multi-objective stochastic model for forward/reverse logitiquc network design with responsiveness and quality level, *Applied Mathematical Modelling*, Volume 37, Issues 1–2, January 2013, Pages 328–344.

- [**Mao. H, Ji. X, Lu. X, He. J, Rei. W et Qiao. X, 2007**], Research on Remanufacturing Reverse Logistics Network Facility Location Projects Simulation Evaluation, *IEEE 14<sup>th</sup> International Conference on Management Science & Engineering (China)*.
- [**Salema. M. I. G, Barbosa-Povoa A. P et Augusto Q. N, 2010**], Simultaneous design and planning of supply chain with reverse flows: A generic modelling framework, *European Journal of Operational Research, Volume 203, Issue 2, 1 June 2010, Pages 336–349*
- [**Martel. A, 2001**], Un modèle général pour l'optimisation de réseaux logistiques. *Actes du 4<sup>ième</sup> Congrès International de Génie Industriel, Aix-en-Provence, France, Juin 2001*.
- [**Meng.X, 2008**], Network design on reverse Logistic of Electronic Wastes Recycling, *IEEE International Conference on Automation and Logistics (1-3 Sep)*.
- [**Min. H et Ko. Y-J, 2008**], The dynamic design of a reverse logistics network from the perspective of third-party logistics service providers, *International Journal in Production and Economics, vol113, p. 176-192*.
- [**Min. H, Ko. H. J etKo. C. S, 2006**], A genetic Algorithm approach to developing the multi-echelon reverse logistics network for product returns, *The International Journal of Management Science, Omega, vol34, p. 56-69*.
- [**Minieka. E, 1970**], The m-Center Problem. *SIAM Review 12, 138–139*.
- [**Mir SamanPishvae, MasoudRabbanietSeyed Ali Torabi 2011**] A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty, *Applied Mathematical Modelling Volume 35, Issue 2, February 2011, Pages 637–649*
- [**Pokharel. S et Mutha. A, 2008**], Strategic design for reverse logistics and remanufacturing using new and old product modules, *Computers and Industrial Engineering*.
- [**Pochampally. K. K, Nukala. S et Gupta. S. M, 2009**]. Strategic Planning Models for Closed Loop and Reverse Logistics Supply Chain, *Taylor & Francis*.
- [**Pourmohammadi. H, Rahimi. M et Dessouky. M, 2008**], Sustainable reverse logistics for distribution of industrial waste by products : a joint optimization of operation and environmental cost, *Supply Chain Forum, vol9*.
- [**Rogers. D. S et Tibben-lemcke. R.S 1998**]. Going backwards: Reverse logistics trends and practices, *Reverse Logistics Executive Council, Reno, NV, USA*.
- [**Rogers, D. S., Tibben-lemcke. R. S , Banasiak. K, Brokmann. K et Johnson, t, 2001**] Reverse logistics challenges, *Rapport, Université du Nevada, Reno, NV, USA*.
- [**Salema. M. I. G, Barbosa-Povoa. A. P et Novais A. Q, 2007**], An optimization model for design of capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty, *European Journal of Operational Research, vol179, p.1063-1077*.
- [**SamanHassanzadeh Amin, Guoqing Zhang, 2012**] An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: Multi objective approach, *Expert Systems with Applications Volume 39, Issue 8, 15 June 2012, Pages 6782–6791*

- [Srivastava. S. K, 2007], Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review, *International Journal of Management Reviews* (2007),
- [Snyder. L.V, 2003], Supply chain robustness and reliability: Models and algorithms. *Ph.D. Dissertation, Northwestern University, Evanston. IL (USA)*.
- [Si-bo. D et Wei-Lai. H, 2008], Optimal design of multi-echelon reverse logistics using genetic algorithm, *IEEE Forth International Conference on Wireless Communication, Networking and Mobil Computing*(12-14 Oct).
- [Snyder. L.V, 2004], Facility location under uncertainty: A review. *Technical report#04T-015, Department of Industrial & System Engineering, Lehigh University, PA, USA*.
- [Simpson. D, 2008], Use of supply relationships to recycle secondary materials, *International Journal of Production Research*, p. 1-23.
- [Tang. Q et Xie. F, 2007], A Genetic Algorithm for Reverse Logistic Network Design, *IEEE Third International Conference on Naturel Computation*.
- [Thanh. P. N, Bostel. N et Peton. O, 2008], A dynamic model for facility location in the design of complex supply chains. *International Journal of Production Economics*, vol 113, p 678-693.
- [Torabi. S. A et Hassini. E, 2008], An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning, *Fuzzy set and systems*, vol(159), p.193-214.
- [Toregas. C, Swain. R, ReVelle. C et Bergman. L, 1971], The Location of Emergency Service Facilities, *Operations Research* 19, 1363–1373.
- [Vahdani.B, Tavakkoli-Moghaddam. R, Modarres. M, et Baboli. A], Reliable design of forward/reverse logistics network under uncertainty: A robust –M/M/c queuing model, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* Volume 48, Issue 6, November 2012, Pages 1152–1168
- [Wang. I. L et Yang. W. C, 2007], Fast Heuristics for Designing Integrated E-Waste Reverse Logistics Network, *Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, vol 30, No. 2
- [Wang Zhaohua et Yin Jianhua, 2007]. Modeling for Facility Location Optimization of Spent Computer's Reverse Logistics, 978-1-4244-2108-4/08, *IEEE*.
- [WITT, C. E. 1995]. What goes around just might come around, *Material Handling Engineering* 50(7), 22
- [Yanchao Lu, Pengchao LU et Litao Liang, 2008], Multi-objective Optimization of Reverse Logistics Network Based on Random Weight and Genetic Algorithm, *International Conference on Networking Sensing and Control*, 6-8 April (2008). p 1196-1200, *IEEE*.
- [Yin. J et Wang. Z, 2008], A Fuzzy Modeling for Facility Location Optimization of Spent Batteries Reverse Logistics, *IEEE International Conference on Service Operations and Logistics and Informatics* (12-15 Oct) 978-1-42442013-1/08,
- [Yong. Z, Xie. L. J, Li. X. H et Wang. S. F, 2007], Designing a Reverse logistic Network Considering Risk Management, *IEEE Third International Conference on Wireless Communication, Networking and Mobil Computing*(21-15 Oct).

**[Zhaohua.W et Jianhua. Y, 2008]**, Modeling for Facility Location Optimization of Spent Computer's Reverse Logistics,*IEEE Forth International Conference on Wireless Communication, Networking and Mobil Computing (12-14 Oct)*.

**[Zhou. Y et Wang. S, 2008]**, Generic model of reverse logistics network design, *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, vol8 (3), p.71-78.

**Résumé :** par définition la gestion de la chaîne logistique inverse consiste à appliquer un concept vert et durable afin de récupérer la matière mis au rebut. Bien que cela, est devenu un moyen d'accroître la compétitivité des entreprises e n particulier, la logistique inverse a pour but d'optimiser les flux inverses de produits afin de limiter les déchets de façon plus adéquate. Parmi les problèmes critiques dans le champ de la logistique inverse est la conception et le pilotage du réseau logistique dans un environnement vert. Le but de ce travail est donc de proposer des modèles génériques le plus complet possible qui puissent aider les preneurs de décision à concevoir de tels réseaux qui englobent des activités de refabrication. Ces modèles visent aussi 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, les activités de remanufacture, la conception écologique de la chaîne d'approvisionnement, multi-produits, retours incertains, installation des usines dans un environnement dynamique

**Abstract:** reverse supply chain management consists for companies in applying sustainable and green concepts when managing their supply chain. It is a new way to enhance their competitiveness. In particular, reverse logistics aims at optimizing reverse product flows to limit residual waste. One of the most critical problems in the reverse logistics field is the design of reverse logistic networks. The purpose of this work is then to propose comprehensive generic models which can help decision makers to design such networks that cover remanufacturing activities. Thus models aim also at helping devising strategies for the pricing of used and remanufactured products. More precisely a dynamic multi-commodity two level capacitated facility location three problems for the green design of reverse logistic networks is presented. Therefore, both economical and ecological costs of reverse logistic activities are taken into account to help minimizing the damages of the reverse supply chain on the environment. Last, in order to better reflect real cases, this model includes fundamental features of reverse logistics which are overlooked in the literature, namely uncertainty in the products return, time dependency of the decision variables, capacity constraints and the possibility to treat multiple classes of products at a time as soon as one class of product with disassembly consideration .

**Keywords:** Reverse Logistics, remanufacturing activities, green supply chain design, multi-commodity, uncertain returns, dynamic facility location

**ملخص** تعتبر سلاسل الامداد اللوجستية العكسية النموذج المثالي للاسترجاع النفايات ذاتا قمة بكيفية مستدامة حيث تحترم البيئة. في هذا الصدد ان اجاد منهجية قصد التسيير والتخطيط لسلاسل الامداد اللوجستية العكسية يعتبر كمجال تحدي معاصر في ميدان البحث العلمي. الهدف من هذا العمل هو اقتراح ثلاثة نماذج في التصميم والتخطيط لسلاسل الامداد اللوجستية العكسية, اين يأخذ بعين الاعتبار سعة المنشأة الموحدة و الاخرى التي ينتظر تعيينها عبر مراحل زمنية. للاقتراب من الحقيقة تم ايضا دراسة تغيرات المواد التي يجب معالجتها من الجهتين الكمية و النوعية. يمكن القول ان هاته الدراسة تعد كوسيلة لإرشاد اصحاب القرار في اخذ انجع الحلول على المدى البعيد بالنظر الى المدى المتوسط و القريب.

**الكلمات الرئيسية** سلاسل الامداد اللوجستية العكسية, أنشطة اعادة تصنيع النفايات, التصميم الاخضر لسلاسل الامداد, عشوائية المواد الواجب معالجتها من الناحية الكمية و النوعية, اقامة المصانع الوسطية في حالة دراسة ديناميكية.