



**HAL**  
open science

# Logistique inverse et collecte des produits techniques en fin de vie. Tournées de véhicules avec contraintes

Antoine Landrieu

► **To cite this version:**

Antoine Landrieu. Logistique inverse et collecte des produits techniques en fin de vie. Tournées de véhicules avec contraintes. Automatique / Robotique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2001. Français. NNT : . tel-00198400

**HAL Id: tel-00198400**

**<https://theses.hal.science/tel-00198400>**

Submitted on 17 Dec 2007

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

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

# Institut National Polytechnique de Grenoble



## THÈSE

pour obtenir le grade de

### **DOCTEUR DE L'I.N.P.G.**

**Discipline** : Automatique et Productique

présentée et soutenue publiquement

par

**Antoine LANDRIEU**

le 21 septembre 2001

---

## **Logistique inverse et collecte des produits techniques en fin de vie Tournées de véhicules avec contraintes**

---

**Directeurs de thèse** : M. Zdenek BINDER  
M. Bernard DESCOTES-GENON

### **JURY**

M. Pierre LADET	Président
M. Gilles CORMIER	Rapporteur
M. Alain GUINET	Rapporteur
M. Gerd FINKE	Examinateur
M. Rommert DEKKER	Examinateur
M. Bernard DESCOTES-GENON	Directeur de thèse
M. Zdenek BINDER	Directeur de thèse

Thèse préparée au Laboratoire d'Automatique de Grenoble



*A Kiara*

*A Florence*

*A toute ma famille*



# Remerciements

Le travail de recherche qui est présenté dans ce mémoire a pu voir le jour grâce au sujet initial proposé par Messieurs Z. Binder, Ingénieur de Recherche CNRS, et B. Descotes-Genon, Professeur à l'Université Joseph Fourier de Grenoble, sujet qui s'intégrait dans la problématique générale du recyclage des produits techniques encombrants étudiée au sein du projet RESTER PROPRE de la région Rhône-Alpes.

Je garderai un souvenir impérissable des quelques années passées à côtoyer Monsieur Z. Binder et à travailler avec lui. Je resterai toujours admiratif devant sa pugnacité et sa volonté d'atteindre les objectifs qu'il s'est fixés, ainsi que pour sa remise en cause perpétuelle du travail déjà réalisé afin de faire toujours mieux. Je ne peux d'ailleurs pas m'empêcher de sourire en imaginant l'expression de soulagement exprimée par ceux qui ont travaillé avec lui au sein du laboratoire. Pourtant, son foisonnement d'idées, ses talents d'orateur, sa gentillesse en toute occasion, en font à mes yeux un personnage plus qu'attachant, auprès de qui j'ai énormément appris.

Je tiens également à exprimer toute ma reconnaissance et ma sympathie à Monsieur B. Descotes-Genon, pour son soutien et son attention durant toute la préparation de cette thèse. Malgré ses nombreuses activités professionnelles, il a toujours su consacrer le temps nécessaire au déblocage des situations qui l'exigeaient. Il a de plus cette qualité rare du contact humain chaleureux et sincère qui rendent les rapports professionnels agréables. Je n'oublierai notamment pas son aide précieuse au moment où ma bourse de thèse s'est arrêtée et où j'ai dû me mettre en quête d'un emploi.

Je suis extrêmement honoré de compter Monsieur P. Ladet, Professeur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble, parmi les membres du jury de cette thèse, et pour avoir accepté d'en être le président.

Toute ma gratitude s'adresse à Messieurs G. Cormier, Professeur à l'Université de Moncton (Canada) et A. Guinet, Professeur à l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, rapporteurs, pour leur intérêt porté à ce travail et pour leurs remarques constructives et enrichissantes qui ont permis d'obtenir cette version finale du manuscrit.

Enfin, Messieurs R. Dekker, Professeur à l'Université Erasmus de Rotterdam (Pays-Bas) et G. Finke, Professeur à l'Université Joseph Fourier de Grenoble, méritent mon entière reconnaissance pour leur présence parmi les membres du jury en tant qu'examineurs, ainsi que pour l'étude approfondie du manuscrit afin d'en extraire la quintessence.

J'ai une pensée particulière pour toute l'équipe du secrétariat du laboratoire, qui effectue au quotidien le labeur qui permet à tous de travailler dans les meilleures conditions possibles : grosses bises à Florence, Marie-Thé, Marie-Rose, Isabelle, Marielle, Marie-France et Linda.

Je ne saurais oublier dans ces remerciements les moments inénarrables passés en compagnie des membres de l'équipe CSP et du LAG : les extravagances et la tchatche de Naoufel, avec qui ont été imaginés pendant plus d'un an les projets les plus fous d'une cafétéria du laboratoire enfin sûre, sans succès bien entendu, Amal et Stefan, la fine équipe du bureau B146, la virée à Cannes avec Moez et Florence qui s'est terminée dans un camping à deux heures du matin où nous nous sommes finalement endormis transis de froid, les cours de rock de Chadi en compagnie de Fouzia, les péripéties de Désirée avec sa méchante propriétaire, qui nous ont tout de même valu une interpellation au poste de police pour tapage nocturne, les discussions enrichissantes et pleines de vie de Fatah, Didier, Ahmad et Assia, les sorties ski avec Christian, Mourhad (attention au vertige !) et Tibi (« Comment ça va Tibi ? - Ca va toujours ! »), sont autant de tranches de vie et de bons souvenirs qui resteront gravés dans ma mémoire.

Je tiens également à rendre hommage à toute ma famille, et plus particulièrement à mes parents, qui m'ont accordé tout au long de mon séjour au LAG une entière attention. Cette thèse leur est entièrement dédiée. Mes pensées les plus profondes s'adressent aussi à ma sœur Suzanne, ainsi qu'à mes frères François et Victor.

Mais par dessus tout, mon passage au LAG restera marqué par ma rencontre avec Florence, muse magnifique et mystérieuse qui m'a fait découvrir l'amour, et qui m'a donné le plus beau des cadeaux qu'il puisse être possible d'imaginer, ce petit être adorable prénommé Kiara. Ensemble, nous nous savons être prêts à affronter l'avenir en toute sérénité. Je me dois de les remercier du plus profond de mon cœur pour leur soutien, leur attention et leur silence durant toute la période de finalisation de la thèse (qui fut longue !), car il est bien connu que le thésard en cours de rédaction est tout sauf facile à vivre. C'est grâce à elles que l'inspiration m'est venue et que ce travail de recherche a pu être mené à son terme, et c'est pourquoi je n'ai aucune crainte ni aucun regret de m'ôter de tous les mérites quant à la réalisation de ce mémoire pour les leur attribuer.

Enfin, je désirerais manifester, en toute honnêteté et sans aucun parti pris, mon soutien à toutes celles et ceux qui subissent l'injustice, le mépris et l'indifférence dans leur vie professionnelle, et qui n'ont ni le mérite ni la reconnaissance espérés au regard de critères uniquement objectifs.

# Table des matières

<b>Table des matières</b> .....	<b>7</b>
<b>Sigles et notations</b> .....	<b>11</b>
<b>Chapitre 1 Introduction générale</b> .....	<b>13</b>
1.1 Gestion intégrale de la chaîne .....	13
1.1.1 Le cycle de vie du produit .....	14
1.1.2 Estimation du cycle de vie du produit.....	15
1.1.3 Implémentation de l'ICM.....	15
1.1.3.1 La législation sur l'environnement .....	15
1.1.3.2 Les lois du marché.....	16
1.1.4 Résumé.....	17
1.2 Organisation de la récupération des produits.....	17
1.2.1 Technologie.....	18
1.2.2 Finance.....	19
1.2.3 Marketing.....	19
1.2.4 Information .....	20
1.2.5 Organisation.....	20
1.2.6 Logistique inverse.....	21
1.2.6.1 Niveau tactique .....	22
1.2.6.2 Niveau opérationnel.....	23
1.2.7 Résumé.....	24
1.3 Les stratégies de récupération .....	25
1.3.1 Options de récupération.....	25
1.3.1.1 Réparation.....	25
1.3.1.2 Remise à neuf.....	25
1.3.1.3 Re-production .....	26
1.3.1.4 Cannibalisation.....	26
1.3.1.5 Recyclage.....	26
1.3.2 Le désassemblage et la collecte.....	27
1.4 Plan de recherche.....	28
1.4.1 Ce que nous voulons faire... ..	28
1.4.2 ... Et comment nous allons y arriver .....	29
1.5 Conclusions .....	30

1.5.1	Ce qu'il faut retenir.....	30
1.5.2	Ce qui va suivre.....	31
<b>Chapitre 2</b>	<b>La collecte.....</b>	<b>33</b>
2.1	Introduction.....	33
2.1.1	Le cadre législatif.....	33
2.1.2	Les déchets.....	34
2.1.3	Les enjeux.....	35
2.2	Les systèmes de collecte existants.....	36
2.2.1	La collecte des ordures ménagères.....	37
2.2.1.1	Vers la collecte sélective.....	37
2.2.1.2	Les différents modes de tri et de collecte sélective.....	38
2.2.2	La collecte des déchets industriels banals et spéciaux.....	39
2.2.3	Évaluation de performances.....	40
2.2.3.1	Mesures de performance.....	40
2.2.3.2	Propriétés des systèmes de collecte.....	41
2.2.3.3	Relations entre propriétés et performances des systèmes de collecte.....	42
2.2.4	Conclusion.....	44
2.3	La collecte des produits électriques et électroniques des ménages.....	44
2.3.1	État des lieux.....	45
2.3.1.1	Caractérisation des produits.....	45
2.3.1.2	Quantification du gisement des produits (Région Rhône-Alpes).....	46
2.3.2	Objectifs de la collecte.....	47
2.3.2.1	Le contrôle et la conduite des flux de produits.....	47
2.3.2.2	Le filtre des déchets.....	47
2.3.2.3	L'augmentation du volume des déchets.....	47
2.3.2.4	La minimisation des coûts.....	48
2.3.2.5	La conservation de l'état des produits.....	48
2.3.2.6	Le pré-diagnostic des produits.....	48
2.3.2.7	La performance du service client.....	48
2.3.2.8	Résumé des objectifs.....	49
2.3.3	Spécificités de la collecte.....	49
2.3.3.1	Un potentiel de revalorisation unitaire élevé.....	49
2.3.3.2	Des caractéristiques physiques uniques.....	49
2.3.3.3	Une fréquence de retour unitaire faible.....	50
2.3.3.4	Une accessibilité des produits complexe.....	50
2.3.3.5	Résumé des spécificités.....	50
2.3.4	Les différents modes de collecte.....	50
2.3.4.1	La collecte par apport volontaire.....	51
2.3.4.2	La collecte par enlèvement.....	52
2.4	Discussion.....	53
2.5	Planification opérationnelle de la collecte.....	55
2.6	Conclusions.....	56
2.6.1	Ce qu'il faut retenir.....	56
2.6.2	Ce qui va suivre.....	56
<b>Chapitre 3</b>	<b>Planification opérationnelle pour un véhicule.....</b>	<b>57</b>
3.1	Introduction.....	57
3.2	Présentation du problème.....	57
3.2.1	Exemple.....	59
3.3	Modélisation.....	60
3.3.1	Notations.....	61

3.3.2	Variables.....	61
3.3.3	Fonction objectif .....	62
3.3.4	Modèle.....	62
3.4	Méthodes de résolution .....	63
3.4.1	Les méthodes exactes.....	64
3.4.2	Les méthodes approchées .....	64
3.4.3	Tableau chronologique .....	65
3.4.4	Constat .....	66
3.5	Méta heuristiques : comparatif.....	66
3.5.1	Recuit simulé.....	66
3.5.2	Algorithmes génétiques .....	67
3.5.3	Réseaux de neurones.....	67
3.5.4	Recherche tabou .....	67
3.5.5	Comparatif.....	68
3.6	La recherche tabou .....	69
3.6.1	Présentation générale .....	69
3.6.2	Structures de mémoire.....	69
3.6.3	Algorithme de descente.....	70
3.6.4	Principe de la recherche tabou .....	70
3.7	La recherche tabou : mise en œuvre .....	72
3.7.1	Initialisation.....	72
3.7.2	Recherche tabou .....	72
3.7.2.1	Structure du voisinage.....	73
3.7.2.2	Restriction tabou.....	74
3.7.2.3	Structure de la liste tabou .....	74
3.7.2.4	Taille de la liste tabou (tenure).....	75
3.7.2.5	Critère d'aspiration .....	76
3.7.2.6	Stratégie de diversification.....	76
3.7.2.7	Critères d'arrêt.....	77
3.8	Résultats expérimentaux .....	77
3.8.1	Instances (1-TSPTW).....	77
3.8.2	Instances (1-PDPTW) .....	78
3.8.3	Résultats numériques .....	78
3.8.3.1	Résultats sur les instances (1-TSPTW) .....	79
3.8.3.2	Résultats sur les instances (1-PDPTW) .....	80
3.8.4	Discussion .....	82
3.9	Conclusions .....	83
3.9.1	Ce qu'il faut retenir.....	83
3.9.2	Ce qui va suivre.....	83
<b>Chapitre 4 Planification opérationnelle pour plusieurs véhicules .....</b>		<b>85</b>
4.1	Introduction.....	85
4.2	Présentation du problème .....	85
4.2.1	Exemple.....	86
4.3	Méthodes de résolution .....	87
4.3.1	Revue de la littérature .....	87
4.3.2	Récapitulatif.....	89
4.3.3	Constat.....	90
4.4	Recherche tabou probabiliste.....	91
4.5	Résolution du (m-PDPTW) .....	91
4.5.1	Optimisation locale .....	92
4.5.2	Partition : construction de la solution initiale.....	92

4.5.3	Optimisation inter routes .....	93
4.5.3.1	Recherche tabou probabiliste.....	94
4.5.3.2	Algorithme général.....	98
4.6	Heuristiques de comparaison.....	99
4.6.1	Une heuristique d'insertion parallèle .....	99
4.6.2	Une heuristique de construction spatio-temporelle .....	101
4.6.3	Recherche tabou déterministe .....	101
4.7	Résultats expérimentaux .....	102
4.7.1	Instances (m-PDPTW).....	102
4.7.2	Résultats numériques .....	103
4.7.3	Discussion .....	108
4.8	Conclusions .....	109
4.8.1	Ce qu'il faut retenir.....	109
4.8.2	Ce qui va suivre.....	110
<b>Chapitre 5</b>	<b>Aide à la décision .....</b>	<b>111</b>
5.1	Introduction.....	111
5.2	Étude de cas : plate-forme de réparation et de désassemblage.....	112
5.2.1	Une plate-forme de réparation et de désassemblage.....	112
5.2.2	Un réseau de plates-formes de réparation et de désassemblage.....	113
5.3	Un langage de modélisation unifié : UML .....	115
5.3.1	Modèles et diagrammes .....	115
5.4	Intégration du module de collecte.....	116
5.4.1	Diagramme des cas d'utilisation.....	117
5.4.1.1	Structure physique et statique du réseau .....	117
5.4.1.2	Planification des transports.....	119
5.4.2	Diagrammes des classes.....	120
5.4.2.1	Création d'une requête de transport .....	120
5.4.2.2	Planification des transports.....	121
5.4.2.3	Caractéristiques des classes du modèle.....	122
5.4.3	Diagrammes d'interaction .....	127
5.4.3.1	Transport d'une pièce détachée pour la réparation d'un produit usagé .....	127
5.4.3.2	Planification temps réel d'une nouvelle requête de collecte.....	128
5.5	Conclusions .....	129
5.5.1	Ce qu'il faut retenir.....	129
5.5.2	Ce qui ne va pas suivre .....	130
<b>Conclusions et perspectives.....</b>	<b>133</b>	
Conclusions .....	133	
Perspectives .....	135	
<b>Bibliographie.....</b>	<b>137</b>	
Thèses et ouvrages.....	137	
Rapports et parties d'ouvrage .....	138	
Conférences et revues.....	140	
Autres .....	148	
Publications de l'auteur.....	148	
<b>Annexes .....</b>	<b>151</b>	

## Sigles et notations

DARP	Dial a Rial Problem (problème de transport de personnes)
ICM	Integral Chain Management (Gestion intégrale de la chaîne du produit)
LCA	Life Cycle Assessment (Estimation du cycle de vie)
PDPTW	Pickup and Delivery Problem with Time Windows
VRP	Vehicle Routing Problem
UML	Unified Modeling Language
$n$	nombre de clients dont les requêtes de transport sont à satisfaire
$m$	nombre de véhicules disponibles composant la flotte
$c_{i,j}$	coût du transport entre le sommet $i$ et le sommet $j$
$t_{i,j}$	durée du transport entre le sommet $i$ et le sommet $j$
$p_i$	temps de service au sommet $i$
$[e_i, l_i]$	fenêtre temporelle du sommet $i$ , pendant laquelle les véhicules sont autorisés à charger ou décharger



# Chapitre 1 Introduction générale

## 1.1 Gestion intégrale de la chaîne

Au cours des dernières décennies, notre société de consommation a pu observer la forte croissance de la production des déchets rejetés par les industries et la population. Devant l'abondance grandissante de ceux-ci, leur traitement visant à une planète plus propre devient un vrai problème de société. Alors que jusqu'à présent, nous nous contentions de les traiter sommairement, en récupérant de l'énergie par incinération ou en les stockant tels quels dans les décharges publiques, il est désormais de notre devoir de pallier à ces dysfonctionnements et de garantir aux générations futures que la société que nous leur proposons sera responsable devant les déchets qu'elle produit. C'est ainsi que ces dernières années ont vu l'apparition d'une problématique émergente de recherche : le recyclage des déchets.

Un déchet peut prendre des formes diverses. Ce peut être un déchet nucléaire, un déchet organique, une ordure ménagère, un déchet issu des industries, un produit manufacturé tel que l'automobile, l'électronique ou l'électroménager ... En ce qui nous concerne, nous nous intéressons particulièrement aux produits manufacturés complexes issus des ménages et arrivant en fin de vie, tels que les produits blancs (machines à laver, lave-linge, réfrigérateurs ...) ou bruns (fours, cuisinières, téléviseurs, ordinateurs ...). Un produit technique arrivé en fin de vie n'est plus destiné à être utilisé en l'état. Il présente à la fois une complexité interne intéressante à étudier, et des composants de base, la plupart du temps hétérogènes dans leur fonction, leur forme et leur matière, qui peuvent posséder une forte potentialité de revalorisation, mais dont certains peuvent être nocifs pour l'environnement. De multiples études à leur propos tendent à démontrer la possibilité de l'existence de marchés secondaires, économiquement viables et basés sur une manière intelligente de récupération de tels produits : le désassemblage ou démontage. Cependant, ces mêmes études notent le faible volume actuel des produits usagés en retour, et la demande minimale en produits ou pièces détachées revalorisés qui en résultent. Ainsi, une condition essentielle à la création des marchés secondaires repose sur la rationalisation globale du processus de recyclage, et notamment du système de collecte, générateur d'une part importante des coûts globaux du recyclage.

Notre travail s'inscrit donc dans cette logique de rentabilité économique du recyclage des produits manufacturés complexes, en nous focalisant principalement sur la collecte et le

ramassage, point d'entrée aux installations de traitement et de revalorisation des produits. Dans la suite de ce chapitre, nous allons dans un premier temps donner un aperçu général du concept de gestion de la chaîne intégrale du produit, concept proche de celui du cycle de vie. Puis nous nous attacherons à détailler les différentes composantes permettant d'organiser la récupération des produits, notamment la logistique inverse dans laquelle s'intègre la collecte. Enfin, nous étudierons les options de récupération et de revalorisation existantes, avant de présenter notre méthodologie de recherche et notre plan de travail.

### 1.1.1 Le cycle de vie du produit

Avec l'introduction de la notion de recyclage, les producteurs se voient aujourd'hui responsabilisés par le devenir de leurs produits manufacturés, de l'acquisition des matières premières jusqu'à leur phase ultime de fin de vie. Ils en viennent alors à étudier le cycle de vie global de leurs produits, et les différentes étapes rencontrées au cours de ce cycle. Le terme généralement rencontré pour décrire cette étude se nomme « *gestion intégrale de la chaîne* » du produit (« Integral Chain Management » ICM) (Krikke, 1998)<sup>[16]</sup>. La gestion intégrale de la chaîne est fortement liée au concept de cycle de vie.

Durant son cycle de vie, un produit traverse plusieurs phases, de la transformation des matières premières jusqu'à son utilisation. La gestion intégrale de la chaîne du produit considère également les étapes succédant à sa phase d'utilisation, c'est-à-dire sa mise au rebut, sa récupération sous diverses formes, et sa réutilisation. L'ensemble des matières premières et des pièces détachées constituant le produit sont donc prises en compte, et la possibilité de les réinjecter dans la chaîne de production est étudiée. Ainsi, la gestion intégrale du produit peut se définir comme fermant le cycle des flux de matières dans la chaîne logistique du produit, tout ceci dans le but de réduire les impacts néfastes dus à la production manufacturière, comme les émissions et les déchets résiduels.

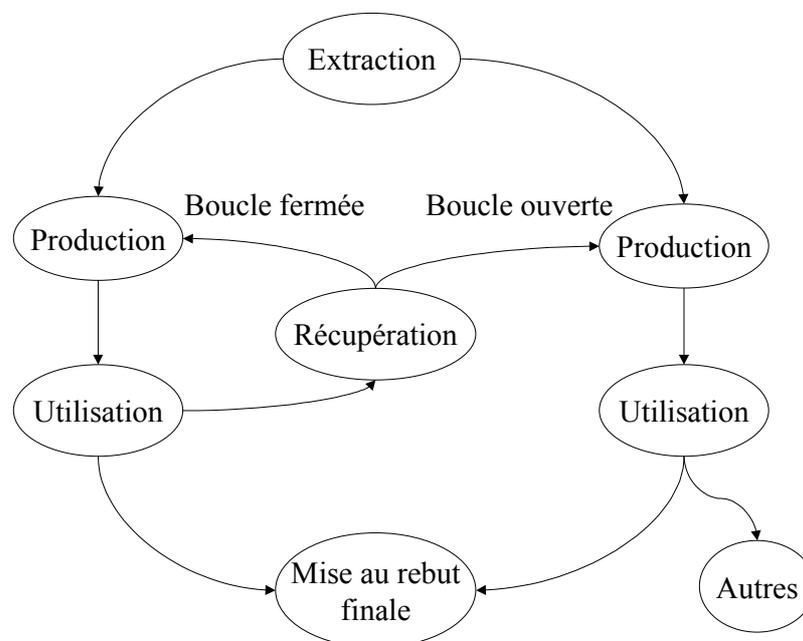


Figure 1.1 : Les flux de matière dans la gestion intégrale de la chaîne (ICM)

Il existe deux manières de réaliser la gestion intégrale d'un produit : par boucles ouvertes ou par boucles fermées (Figure 1.1). Dans les boucles ouvertes, les flux de matières intègrent des chaînes

logistiques alternatives après la phase d'utilisation du produit, alors que ces mêmes flux réintègrent la chaîne logistique du produit originel dans les boucles fermées. Cependant, en aucun cas il n'est possible que la totalité des flux soit réinjectée dans une quelconque chaîne logistique, de part la présence inévitable des déchets.

### 1.1.2 Estimation du cycle de vie du produit

Une analyse fine de la gestion de la chaîne intégrale passe par l'évaluation des impacts du produit sur l'environnement tout au long de son cycle de vie. L'une des techniques d'évaluation les plus prometteuses se nomme *l'estimation du cycle de vie* des produits (« Life Cycle Assessment »), qui a pour but d'estimer la charge environnementale d'un produit, de ses procédés ou de ses activités, en identifiant et en quantifiant l'énergie et les matières utilisées et les déchets rejetés dans l'environnement (Bloemhof-Ruwaard et al., 1995) <sup>[55]</sup>. Plusieurs raisons rendent cependant cette estimation encore assez difficile à réaliser. Nous pouvons relever, entre autres, la diversité et la complexité des études nécessaires à cette évaluation, ainsi que leurs coûts relativement conséquents. De plus, il existe encore aujourd'hui un manque criant de données pertinentes sur l'estimation écologique des produits, et le regroupement efficace de toutes ces données au sein d'un même modèle reste à faire. D'une manière pratique, les outils d'estimation du cycle de vie des produits peuvent être employés pour l'établissement d'un « label vert », reflétant le respect écologique des produits vis-à-vis de l'environnement.

*L'estimation du cycle de vie des produits est hors des considérations premières de cette thèse. Il ne s'agit pas ici de considérer le produit dans la globalité de son cycle de vie, de sa phase de conception jusqu'à celle de sa réutilisation. Il est par contre envisageable à terme de fournir des informations en retour sur la qualité logistique du produit, en estimant sa « transportabilité » et sa maniabilité par exemple.*

### 1.1.3 Implémentation de l'ICM

La gestion intégrale de la chaîne, bien qu'elle paraisse à première vue écologiquement attirante, ne représente pas la motivation principale des producteurs dans la prise en compte du recyclage et de la réutilisation des produits. Dans l'économie de marché qui est la notre, l'implémentation de la gestion intégrale serait plutôt guidée par deux forces importantes : la législation environnementale et les lois du marché.

#### 1.1.3.1 La législation sur l'environnement

La prise en charge du respect de l'environnement a pris une dimension européenne avec l'apparition de diverses politiques, menées par la Communauté Européenne et relayées par chaque pays concerné. Le but est de stimuler l'implémentation de la gestion intégrale de la chaîne logistique. Dans cette optique, les gouvernements peuvent faire appel à une régulation très stricte ou à des mesures plus libérales, mais toujours en prenant soin de laisser l'aspect opérationnel des solutions aux industries. Les instruments législatifs déjà existants prennent différentes formes (Krikke, 1998) <sup>[6]</sup> : des contrats ou accords entre états et entreprises, une législation préventive, une politique de taxes et tarifs, des règles de responsabilisation, la subsidiarité, l'information. Parmi tous ces instruments, les trois premiers ont une importance particulière. Les contrats, négociés entre les entreprises et les gouvernements, ont été initialement introduits pour inviter les entreprises à mieux respecter l'environnement, certaines jouant le jeu et s'imposant elles-mêmes certaines contraintes pour anticiper une législation future plus stricte. Dans certains pays, la législation sur l'environnement est déjà assez dure envers les entreprises, et a dépassé le stade de

l'incitation. Ainsi, en Allemagne, une loi a été votée, obligeant les entreprises à se responsabiliser vis-à-vis du retour et de la récupération de leurs produits après la phase d'utilisation (Chevron, 1999)<sup>[5]</sup>.

En tentant de définir les objectifs de la récupération des produits, la gestion de la chaîne intégrale peut se représenter par une échelle de récupération, dont les échelons sont successivement :

- la prévention quantitative des déchets ;
- la prévention qualitative des déchets ;
- la réutilisation des produits ;
- la réutilisation des composants et des pièces détachées ;
- le recyclage des matières premières ;
- la récupération de l'énergie ;
- l'incinération ;
- la mise en décharge ou la mise en dépôt des déchets résiduels.

Bien que situé sur une échelle, l'ordre présenté ci-dessus ne constitue pas un ordre figé. Il est en effet tout à fait possible d'invertir certains échelons, si par exemple les processus de recyclage des matières premières s'avèrent nocifs pour l'environnement, car consommateurs d'énergie et émetteurs de déchets toxiques (voir par exemple les tubes cathodiques). De plus, un système de recyclage qui ne serait pas économiquement viable semble avoir peu de chances de survivre. De ce fait, des concessions du point de vue écologique de certaines options de récupération seront inévitablement nécessaires. Nous nous dirigeons donc vers une approche globale flexible dans le choix des options de recyclage et de gestion des déchets, qui seront détaillées plus bas.

*Les options de récupération des produits, fixées par les gouvernements, vont jouer un rôle non négligeable dans notre travail. Les aspects législatifs des priorités de recyclage influent sur le réseau logistique du recyclage des produits, dans l'application des processus de récupération, de réutilisation et de mise au rebut. D'une manière générale, toutes les contraintes législatives imposées par les gouvernements sont pour nous supposées connues et prises en compte.*

### 1.1.3.2 Les lois du marché

Les motivations commerciales qui peuvent pousser les producteurs à réfléchir sur le recyclage et la réutilisation de leurs produits sont au nombre de deux (vanderMerwe and Oliff, 1991)<sup>[176]</sup>. La première consiste à dire que la demande des consommateurs et des clients pour des produits plus « verts » et plus respectueux de l'environnement existe, et que cette demande risque de croître dans les années à venir. Le consommateur se dit en effet être prêt à payer ses achats un prix plus élevé si ceux-ci offrent des garanties écologiques accrues. Deuxièmement, certaines entreprises voient déjà leurs produits leur revenir, lorsque celles-ci offrent leurs produits par location (exemple des photocopieurs) ou dans le cadre des services de réparation. Pour faire face à ce flux de retour incontournable, la solution de recyclage permet à la société d'obtenir des pièces détachées à moindre prix et de rentrer dans les normes environnementales. Cependant, à l'instar de (Krikke, 1998)<sup>[16]</sup>, nous pensons que les conditions actuelles du marché ne sont pas suffisantes pour, seules, forcer les entreprises à entreprendre une démarche de gestion intégrale de la chaîne logistique de leurs produits. Elles viendraient en juxtaposition de la législation gouvernementale sur l'environnement, et pourraient par contre servir de stimulant pour l'implémentation de l'ICM.

*Les motivations commerciales ne sont donc pas ici considérées comme essentielles dans la gestion intégrale de la chaîne, mais plutôt comme un argument supplémentaire vers l'implémentation de l'ICM. La*

*demande des consommateurs n'est vue que comme une conséquence des mesures gouvernementales sur l'environnement. La responsabilisation des entreprises vis-à-vis de leurs produits découle donc des contraintes législatives : si l'entreprise respecte les lois, alors l'entreprise ira vers la satisfaction de la demande des consommateurs. Enfin, nous voyons l'ICM comme le meilleur moyen d'obtenir les meilleurs résultats économiques et écologiques pour tous les membres de la chaîne logistique du produit.*

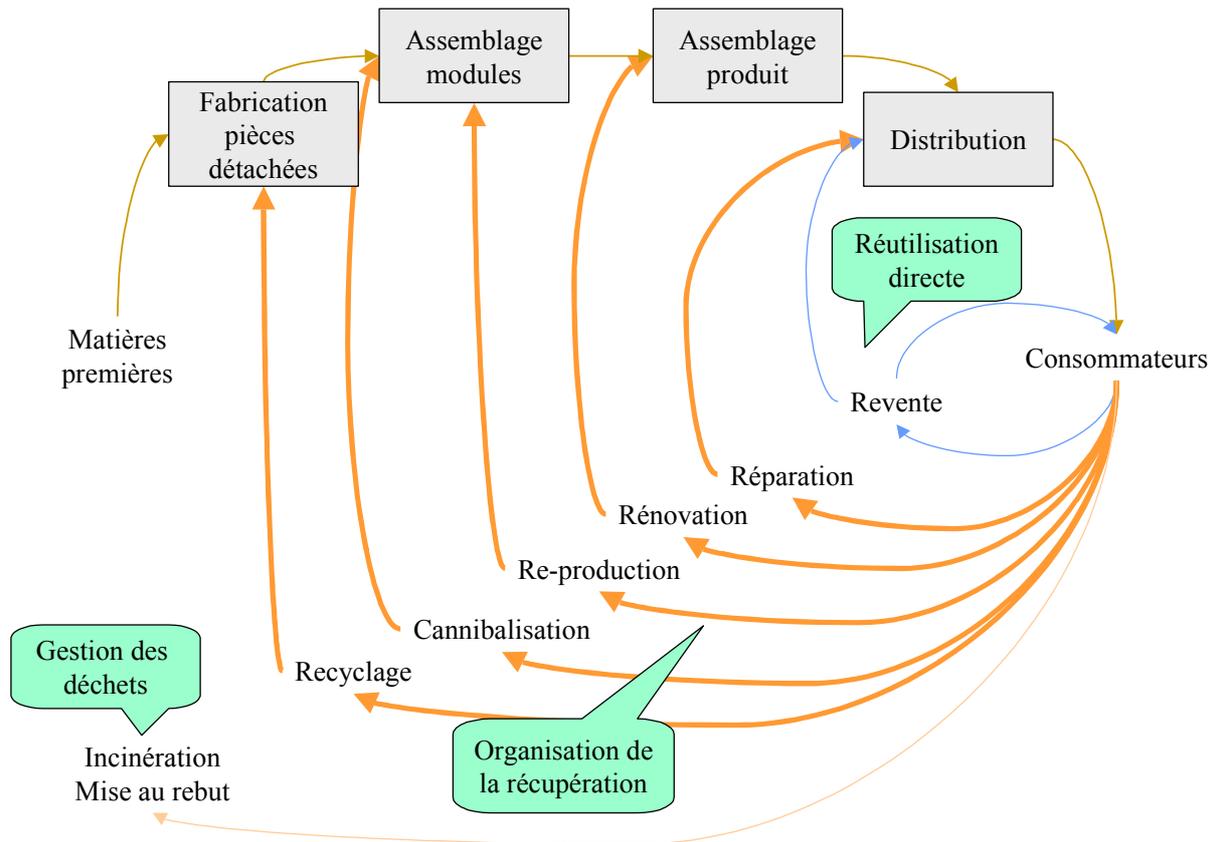
#### 1.1.4 Résumé

Nous venons de dresser dans ce premier paragraphe un résumé du concept de chaîne intégrale du produit. Ce concept présente une multitude d'aspects intéressants, qu'il serait osé de prétendre vouloir aborder globalement et en profondeur dans ce mémoire. Nous allons donc nous consacrer plus précisément à l'organisation de la récupération des produits. Il s'agit d'étudier la partie organisationnelle de la gestion des déchets rencontrée par les producteurs lorsqu'ils doivent traiter les produits rejetés par les consommateurs. Cette organisation passe par différents aspects, comme la technologie, le marketing, l'information, l'organisation, la finance, et la logistique inverse. Nous allons étudier plus avant ces différents aspects dans la section suivante.

## 1.2 Organisation de la récupération des produits

Avec le retour de plus en plus important des produits en fin de vie dans notre société, les entreprises vont désormais être confrontées à des problèmes croissants de récupération des produits, et doivent s'adapter. Même si certaines peuvent encore hésiter dans la voie du recyclage, des opportunités intéressantes peuvent apparaître, sous la condition d'adhérer à la vision de la gestion intégrale de la chaîne du produit. Dans la plupart des cas, cette approche nécessite une complète réorganisation des processus industriels et de la manière de concevoir, produire et utiliser les produits. Dans cette optique, une nouvelle branche du « management » émerge, qui prend le nom de récupération du produit (« Product Recovery Management »). Selon (Thierry et al., 1995)<sup>[175]</sup>, l'organisation de la récupération du produit se définit comme « le traitement de tous les produits usés et abandonnés par le consommateur, les composants et matières dont une entreprise est légalement, contractuellement ou d'une autre manière tenue responsable ». Son objectif, clamé par (van der Laan, 1997)<sup>[128]</sup>, est de récupérer cette quantité de produits en retour, d'une manière satisfaisante tant du point de vue économique qu'écologique, et tout en respectant les contraintes législatives en vigueur.

L'organisation de la récupération des déchets passe par la fusion et la fermeture des différentes boucles constituant le cycle de vie du produit. (vanderMerwe and Oliff, 1991)<sup>[176]</sup> distinguent quatre manières de fermer ces boucles : (i) une utilisation plus poussée des produits, par exemple grâce à la réparation, (ii) une durée de vie accrue des emballages, (iii) un recyclage et une réutilisation des produits en conservant leur identité, et (iv) un recyclage et une réutilisation avec une altération de l'identité. (Thierry et al., 1995)<sup>[175]</sup> affinent cette vision, en introduisant cinq options de récupération des déchets, qu'il faut considérer à un niveau plutôt conceptuel : la réparation, la rénovation, la re-production, la cannibalisation et le recyclage (Figure 1.2). Ces options se différencient principalement dans la méthode de traitement utilisé et dans la conservation de l'identité du produit. Elles font toutes appel à des processus de collecte des matières usagées, de re-production et de redistribution, et sont un moyen d'étendre le cycle de vie des produits. Elles sont sélectionnées selon des critères de faisabilité technique et économique, d'approvisionnement en matières et de demandes des marchés secondaires. Nous en détaillerons le contenu dans un des paragraphes suivants.



**Figure 1.2 : Boucles du cycle de vie**

L'organisation de la récupération des produits passe par la prise en compte de problèmes divers, faisant appel à des connaissances variées, et situés dans des secteurs de l'industrie complémentaires, mais qui peuvent être différents, comme la technologie, la finance, le marketing, l'information, le transport. Le but de ce mémoire n'est pas de dresser une analyse fine et exhaustive de chaque secteur industriel concerné par la récupération des produits. Cependant, pour fixer les idées et cibler nos objectifs de travail, nous allons étudier les grands axes qui composent cette partie de la gestion de la chaîne intégrale du produit.

### 1.2.1 Technologie

L'axe technologique de l'organisation de la récupération des produits porte sur la conception vers le recyclage, les technologies de récupération et les processus de récupération. La conception vers le recyclage représente l'un des thèmes de recherche qui a mobilisé le plus de chercheurs depuis le début des années 1990. Les principales questions qui ont été mises en avant concernent la manière de concevoir un produit de façon à faciliter sa récupération une fois sa phase d'utilisation achevée. En d'autres termes, il s'agit d'optimiser le désassemblage, la constitution du produit, le choix des matières premières, les modes d'assemblage des constituants et des pièces détachées, de manière à permettre ensuite la récupération la plus économique et la plus respectueuse de l'environnement. Ce thème est à mettre en relation avec l'estimation du cycle de vie des produits (§1.1.2 - Estimation du cycle de vie du produit), puisque les diverses stratégies de conception sont étroitement liées à l'impact environnemental résultant. Pour un aperçu général sur les travaux existants, le lecteur intéressé pourra se référer à (Jovane et al. 1993)<sup>[120]</sup> et (Alting and Legarth, 1995)<sup>[48]</sup>.

Les technologies de récupération peuvent, tout comme la conception orientée recyclage, avoir un impact non négligeable sur les gains économiques et écologiques liés à la récupération des produits. De nouvelles technologies innovantes, sur le désassemblage, sur les méthodes d'incinération, moins dépensières en énergie, devraient être privilégiées. Enfin, les processus de production peuvent également jouer un rôle sur la protection de l'environnement, par la réduction de la consommation d'énergie ou la réorganisation des flux internes. Cet aspect n'a pas été étudié outre mesure dans la littérature, mais les liens avec les outils LCA existent et ne doivent pas être négligés.

*Dans la suite de notre travail, nous considérerons les données technologiques acquises et établies. Il est clair que les caractéristiques de conception du produit et les technologies disponibles ont un rôle majeur dans les stratégies de récupération du produit. Elles seront détaillées plus loin.*

### 1.2.2 Finance

Bien évidemment, le financement des activités de la chaîne intégrale du produit influe sur la viabilité de la récupération du produit, car cette chaîne ne peut exister que si elle est économiquement viable. Selon (Krikke, 1998) <sup>[16]</sup>, trois conditions sont essentielles : (i) que les coûts de mise au rebut des composants issus du recyclage soient peu élevés (en comparaison avec la mise en décharge classique), (ii) que les revenus issus de la récupération du produit puissent compenser les coûts nécessaires à la re-production de ce produit, et (iii) que le produit secondaire final soit apte à rentrer en compétition avec le produit neuf correspondant. Un autre aspect financier concerne l'évaluation de la valeur des flux de retour des produits, matières et composants, car cette évaluation influe sur les coûts et les revenus de récupération. Bien que ce sujet nous semble décisif dans l'établissement des stratégies de récupération, aucune référence bibliographique n'a pu être mise en avant.

*En ce qui nous concerne, tous les aspects financiers de l'organisation de la chaîne intégrale du produit sont considérés comme admis, et ne font pas partie de l'objet de ce travail. Si un déficit général subsiste dans la chaîne intégrale, ce problème devra être soumis à discussions ultérieures.*

### 1.2.3 Marketing

L'aspect dominant dans le secteur marketing est la mise en place des conditions de marché les plus favorables, à la fois pour les marchés secondaires et pour la mise au rebut. Les marchés secondaires peuvent se définir comme étant les lieux où les consommateurs réutilisent les produits, pièces ou matières obtenues à partir de la récupération des produits originels. Ils peuvent être approvisionnés grâce par exemple à des reventes ou rachats d'appareils, des apports volontaires des ménages, des retours de locations... En ce qui concerne les acteurs de la mise au rebut, ceux-ci doivent bénéficier de quantités de flux en retour suffisants pour continuer à exister et rendre viable économiquement le système de logistique inverse. Les systèmes de collecte jouent donc un rôle déterminant.

Il faut noter qu'en pratique, il existe souvent un décalage entre l'approvisionnement et la demande, notamment à cause d'un trop grand effort porté sur la collecte en comparaison du développement des marchés secondaires (Krikke, 1998) <sup>[16]</sup>. La croissance de l'offre des matières premières secondaires répond encore aujourd'hui à des facteurs institutionnels (taxes, normes plus contraignantes, ...) et à la saturation des filières classiques d'utilisation des déchets (Gelosi, 1994) <sup>[10]</sup>. En outre, la demande, quoi qu'on en dise, reste à ce jour encore instable (même pour les matières à gros volume, comme le verre, le carton, le plastique ...) et soumise à la concurrence

externe, ce qui ne facilite pas la tâche de réinsertion des matières recyclées dans d'autres cycles de production. À titre d'exemple, en 1994, le groupe TESTA s'approvisionnait en plastiques usagés en Allemagne, car le plastique y était gratuit et le transport était offert. En France, TESTA aurait du acheter les matières plastiques usagées aux récupérateurs. Enfin, (Flapper, 1993)<sup>[31]</sup> a mis en évidence que la récupération de produits effectivement demandés procure souvent des pièces ou des sous-produits, qui eux sont déclarés indésirables (exemple des tubes cathodiques des téléviseurs). Il est alors également nécessaire de trouver des issues secondaires pour de tels rebuts indésirables.

*La manière et la méthode de créer les conditions de marché les plus favorables pour la viabilité du système de récupération ne constituent pas nos centres d'intérêt. Au niveau de la collecte, nous nous attacherons simplement à supposer que la demande existe et doit être satisfaite, à charge pour nous de trouver ensuite les moyens de collecter efficacement les produits et des matières demandées.*

### 1.2.4 Information

L'information occupe une place prépondérante dans le système de récupération des produits, essentiellement au niveau des prévisions sur l'approvisionnement et la demande. Collecter, récupérer et recycler un produit manufacturé exige aujourd'hui de travailler avec des prévisions et des incertitudes, car l'environnement de travail n'est pas entièrement connu. Il est en effet difficile de prévoir précisément l'amplitude, la date, le lieu et la qualité des flux de retour des produits. De plus, comme le souligne (Chevron, 1999)<sup>[5]</sup>, une fois les produits collectés, il n'est pas toujours évident d'obtenir les informations relatives à leur état interne, leur composition (présence de matières dangereuses, qualité des constituants...). De ce point de vue, les acteurs de la récupération pourraient se satisfaire des données des services de Recherche et Développement des producteurs, mais même parfois ces données apparaissent caduques. Et que dire quand il n'est même plus possible d'identifier le producteur ou la gamme du produit en retour ? Pour pallier ce manque d'information, (Kobeissi, 2001)<sup>[15]</sup> propose un système d'évaluation des produits techniques en fin de vie, afin de déterminer leur état interne avant et pendant le processus de désassemblage. L'évaluation se base sur une série de tests sur le produit et sur les réponses obtenues par rapport aux stimuli provoqués.

A l'autre extrémité de la chaîne, la connaissance des marchés secondaires n'est pas encore bien établie, de part un manque de savoir-faire, de prise de conscience des producteurs, et l'absence de systèmes d'information pour attirer les acheteurs potentiels. (Krikke, 1998)<sup>[16]</sup> donne quelques indications permettant de mieux coordonner l'approvisionnement et la demande. Parmi elles, nous retiendrons la restructuration des systèmes d'information pour intégrer la récupération des produits (provenance des pièces détachées) et les marchés secondaires, et garder la trace de l'histoire des produits au cours de leur vie.

*Les informations sur la demande et l'approvisionnement des systèmes de récupération nous sont supposées accessibles, ne constituant donc pas un frein à notre travail. Nous supposons de plus que ces prévisions ne sont pas de nature à contredire nos hypothèses quant aux systèmes de collecte élaborées dans la suite de notre travail.*

### 1.2.5 Organisation

Il s'agit dans cette partie de traiter les tâches opérationnelles des membres de la chaîne, ainsi que leurs stratégies commerciales. Selon (Pohlen and Farris, 1992)<sup>[148]</sup> et (Krikke, 1998)<sup>[16]</sup>, dix

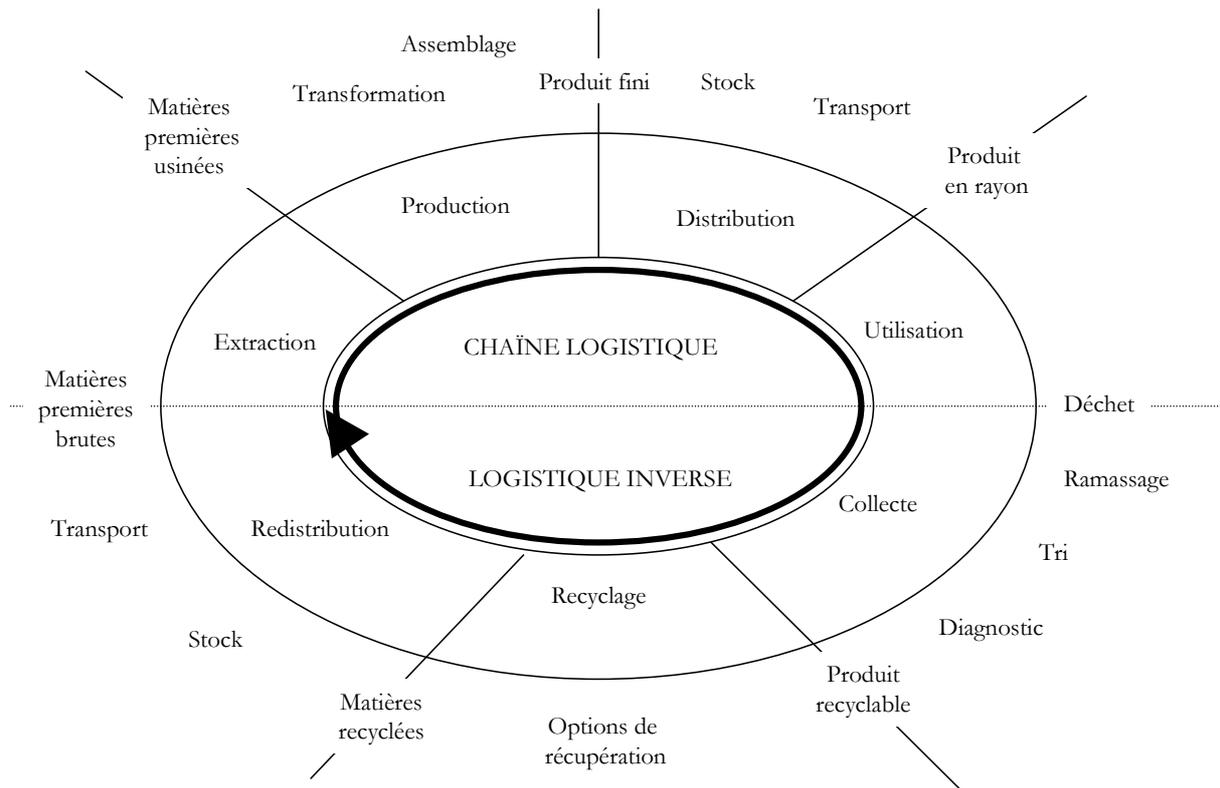
membres types se dégagent de la chaîne intégrale : (i) les municipalités, chargées en général de la collecte de l'ensemble des déchets, (ii) les usines de récupération, qui ont la fonction de rénover les produits usagés en leur rajoutant de la valeur, (iii) les négociants, qui mettent en relation les acheteurs et les vendeurs de matières recyclables, (iv) les producteurs intermédiaires, sous-traitants qui se procurent des matières recyclées déjà séparées, les usinent pour les revendre pour une re-production, (v) les utilisateurs finaux, entreprises chargées de la re-production avant la mise sur les marchés secondaires, (vi) les conglomérats d'entreprises (« joint venture »), sociétés travaillant ensemble de manière coordonnée afin de réduire les coûts, (vii) les gouvernements chargés de voter et appliquer les lois sur l'environnement, (viii) les entreprises spécialisées dans la collecte, (ix) les membres de la chaîne logistique classique, comme les sous-traitants, les grossistes ou les détaillants, et enfin (x) les acteurs de la mise au rebut. Nous ajoutons à cette liste (xi) la distribution sur les marchés secondaires, (xii) le tri, l'inspection et l'évaluation des produits en fin de vie, (xiii) la réparation des produits quand ceux-ci ne sont pas démontés pour une récupération de composants, (xiv) le désassemblage.

En ce qui concerne les stratégies commerciales des entreprises, celles-ci peuvent avoir intérêt à collaborer avec d'autres sociétés afin de réduire les coûts, que ce soit dans les échanges d'information, dans les domaines de la conception des produits ou dans des tâches plus opérationnelles. En outre, une question capitale que doit se poser le producteur consiste à choisir la stratégie de fabrication de ses produits et d'obtention des composants nécessaires, c'est-à-dire par re-fabrication ou par achat de nouvelles pièces (« make-or-buy decision »). (Krikke, 1998) <sup>[16]</sup> postule que ces décisions, situées dans la chaîne logistique inverse, ne sont pas très éloignées de celles prises dans les chaînes logistiques classiques.

*Dans notre recherche, nous considérerons tout ou partie des membres de la chaîne intégrale cités ci-dessus, en nous attachant à définir des structures relationnelles entre les membres pour accomplir la fonction de collecte la plus pertinente. Que ce soit au niveau des membres ou des stratégies commerciales, la rentabilité globale du système doit être notre premier objectif.*

### 1.2.6 Logistique inverse

Selon (Pohlen and Farris, 1992) <sup>[148]</sup>, la logistique inverse peut se définir comme « le mouvement des produits du consommateur vers le producteur à travers une chaîne de distribution ». (Eymery, 1997) <sup>[7]</sup> en donne une définition plus précise, qui correspond plus à une vision logistique : « la logistique inverse répond à la nécessité de retirer du service les produits après usage et de les traiter en les détruisant, en les transformant ou en les recyclant, dans le but de réduire les coûts en valorisant les produits récupérés et, de plus en plus, dans le but de répondre aux exigences du respect de l'environnement ». Cinq problématiques y sont distinguées : la collecte et les transports, l'identification des produits et le tri, les opérations de traitement, le basculement du flux poussé au flux tiré, et enfin la détermination d'une dotation globale. Certaines sont d'ordre tactique, d'autres du niveau opérationnel. Attachons-nous d'abord au niveau tactique de la logistique inverse, avant de descendre vers le secteur opérationnel.



**Figure 1.3 : Logistique inverse et chaîne logistique**

### 1.2.6.1 Niveau tactique

Le niveau tactique de la logistique inverse se concentre principalement sur deux problèmes : la détermination des meilleures stratégies de récupération, et la conception du réseau logistique inverse global. Une stratégie de récupération d'un produit tend à trouver par anticipation la meilleure manière de récupérer ce produit, qui se trouve dans un état de fonctionnement indéterminé, avant qu'il n'apparaisse d'une manière effective dans les flux de retour. L'établissement de diverses stratégies, sous la condition que les technologies associées soient disponibles, permet donc de disposer d'une batterie de solutions de récupération pour ce produit. Choisir la meilleure revalorisation du produit, que ce soit par destruction, re-production etc..., implique la connaissance et la maîtrise de nombreux procédés de récupération, qui peuvent différer selon la gamme des produits étudiés. Des outils d'évaluation et de simulation de telles stratégies existent, et se doivent d'être économes en temps de calcul, afin de pouvoir proposer des solutions rapidement à un utilisateur potentiel (Krikke, 1998) <sup>[16]</sup>.

Le deuxième aspect tactique concerne la conception du réseau logistique inverse. La conception logistique telle que la définit (Krikke, 1998) <sup>[16]</sup> comprend l'optimisation des localisations et des capacités des diverses installations du réseau, ainsi que les flux de produits transitant entre ces installations. Bien entendu, la conception d'un tel réseau ne peut être réalisée sans avoir préalablement analysé précisément la situation du recyclage et de la récupération au sein du réseau, et également sans être sûr de posséder des données prévisionnelles fiables sur l'évolution des produits usagés arrivant en fin de vie. Abondamment traité dans la littérature de l'Optimisation Combinatoire, ce problème de conception se modélise comme un problème de localisation et d'affectation : un compromis doit être trouvé entre les investissements sur les installations et les coûts des opérations (particulièrement de transport et de gestion des stocks). Une méthodologie de conception du réseau logistique inverse pourrait être celle de (Krikke,

1998)<sup>[16]</sup> : celui-ci détermine dans un premier temps diverses stratégies de récupération pour un certain type de produits, puis utilise ces stratégies comme données pour concevoir le réseau logistique de manière à pouvoir implémenter et appliquer les stratégies trouvées. Dans le cadre du recyclage des déchets, ce domaine de recherche a fait l'objet de nombreuses études, notamment sur la localisation des installations de traitement des déchets produits par un processus de production : (Anandalingam and Westfall, 1988)<sup>[49]</sup> pour les déchets toxiques dangereux pour la population, (Caruso et al., 1993)<sup>[66]</sup> pour la planification du système de gestion des déchets solides urbains, (Bloemhof-Ruwaard et al., 1996)<sup>[56]</sup>, pour combiner les sites de production et de recyclage dans un même modèle, et (Barros et al., 1998)<sup>[50]</sup> sur le recyclage du sable, en sont des exemples.

L'une des limitations de la définition donnée ci-dessus de ce qu'est un réseau logistique porte sur les entrées et sorties du système, qui ne sont pas prises en compte dans l'étape de conception. Plus précisément, (Krikke, 1998)<sup>[16]</sup> restreint son modèle à l'hypothèse que la quantité de produits usagés existe et est suffisante pour construire un réseau logistique inverse visant à recycler ces produits. Dans cette approche, la collecte des produits est considérée comme une fonction annexe au réseau logistique, et uniquement une source d'approvisionnement aux installations de recyclage. Hors, dans une vision systémique globale, et dans un secteur – le recyclage - où plus que partout ailleurs la réduction des coûts doit être maximale pour rendre le système économiquement viable, il nous semble que le rôle de la collecte dans la logistique inverse est primordial, et peut considérablement conditionner le fonctionnement du réseau. En se positionnant à un niveau tactique, nous pensons que l'étude des politiques de collecte envisageables, selon la nature et la quantité des produits en retour ainsi que du milieu géographique dans lequel la collecte s'insère, doit faire partie des préoccupations des concepteurs d'une logistique inverse efficace.

### 1.2.6.2 Niveau opérationnel

Au niveau opérationnel de la logistique inverse se retrouvent plusieurs aspects logistiques classiques, comme le transport, la gestion des stocks, la planification des opérations de production / re-production, et un aspect plus spécifique au recyclage, qui concerne l'identification et le tri des produits (Fleischmann et al., 1997)<sup>[32]</sup>.

La fonction transport représente une partie extrêmement concrète du système logistique inverse, puisque c'est elle qui matérialise les échanges de flux entre les différentes entités du réseau. Les opérations de transport existent notamment dans le secteur de la 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)<sup>[25]</sup>. Dans un processus de recyclage où l'ajout de valeur est largement dépendant de la maîtrise des coûts (avant de générer du profit sur les produits recyclés, il s'agit avant tout de ne pas être déficitaire), il devient essentiel de rationaliser l'ensemble des phases de la chaîne inverse. En ce qui concerne plus particulièrement la collecte, et du ramassage des produits disséminés sur un territoire donné en passant par des étapes de regroupement successifs, la question se pose des différents modes de collecte qui sont disponibles et pertinents selon les types de produits à traiter. Cet aspect nous semble de première importance, et sera discuté plus avant dans la suite de ce mémoire.

Une fois qu'un produit usagé est collecté se pose la problématique de déterminer son mode de récupération le plus approprié, afin de garantir la viabilité économique du système. Il est pour cela nécessaire de connaître l'état interne du produit, en réduisant au maximum les actions de démontage visant à étudier ses composants de base. En d'autres termes, il doit être possible d'établir son diagnostic et son tri afin de fournir l'information qui permettra d'orienter le produit

vers les traitements de récupération adéquats (Eymery, 1997)<sup>[7]</sup>. Cette phase cruciale du diagnostic correspond à une nouvelle problématique de recherche encore peu abordée dans la littérature, sur laquelle nous pouvons néanmoins citer les travaux de (Kobeissi, 2001)<sup>[15]</sup> pour la définition d'un système expert à base de règles et son application au cas de la machine à laver.

Le produit usagé qui vient d'être diagnostiqué, et pour lequel une stratégie de récupération a été établie, ne subit peut-être pas immédiatement l'application de cette stratégie, mais est dirigé vers les stocks pour une mise en attente. La gestion des stocks dans les situations de récupération des produits est un domaine qui diffère des systèmes logistiques classiques, principalement dans le cas des boucles fermées (Figure 1.2) qui voient se rejoindre les flux avant et inverse. Dans la logique de marché de l'offre et de la demande, les stocks représentent l'endroit où le basculement entre les politiques de flux poussé et de flux tiré peut être le mieux maîtrisé. La gestion des stocks avec la possibilité de re-production des produits a été abordée par (Cohen et al., 1980)<sup>[69]</sup>, (Nahmias, 1981)<sup>[142]</sup>, (Tagaras, 1992)<sup>[171]</sup>, (van der Laan, 1997)<sup>[17][128]</sup>, (Inderfurth, 1997)<sup>[114]</sup>, (Tagaras, 1999)<sup>[172]</sup>.

Lorsqu'arrive le moment de mettre en pratique les stratégies de récupération des produits qui ont été définies, nous entrons dans une phase de production / re-production pour satisfaire une demande donnée. Le cas où un produit peut être réutilisé directement est assez simple, et des outils de planification de production classiques peuvent être employés. La situation se complexifie lors de la prise en compte du désassemblage comme opération de production, car nous sommes alors capables de fournir des pièces détachées. Comment, et dans quelle mesure ces pièces détachées doivent-elles être intégrées dans la production de nouveaux produits ? Quels produits désassembler, lesquels conserver pour une revente ? Comment gérer l'incertitude sur la qualité des produits usagés et sur leur disponibilité ? Toutes ces nouvelles questions rendent les méthodes de planification et de gestion des opérations de re-production difficiles à mettre en œuvre, et même les méthodes classiques, type MRP, ne permettent pas de répondre entièrement à toutes les contraintes propres à un système de re-production (Thierry, 1997)<sup>[24]</sup>. Le lecteur pourra se référer entre autres à (Gupta and Taleb, 1994)<sup>[105]</sup>, (Guide et al., 1997a<sup>[99]</sup>, 1997b<sup>[100]</sup>), (Gerner, 2001)<sup>[11]</sup> pour des travaux d'ordonnancement de tâches et de planification propres au recyclage.

### 1.2.7 Résumé

Avec les différentes facettes qui viennent d'être évoquées dans les pages précédentes, nous pourrions dire de l'organisation de la récupération des produits que ce terme définit le cadre général des opérations de traitement des flux de retour des produits que doit intégrer un producteur dans la gestion de sa chaîne intégrale. Dans ce contexte, la logistique inverse n'est qu'un des nombreux éléments de management qui permet au producteur d'accomplir une récupération efficace. La logistique inverse s'intègre dans une vision autant tactique qu'opérationnelle, de part les problématiques de détermination de stratégies de récupération et de conception du réseau logistique, ainsi que par la réalisation des tâches de transport, de gestion des stocks ou de planification de la production.

En ce qui nous concerne, nous nous intéressons dans la suite de ce mémoire à la collecte des produits manufacturés encombrants, car cet aspect de la logistique inverse du recyclage n'a à notre connaissance pas encore fait l'objet d'études approfondies, alors que nous allons voir que son rôle d'approvisionnement du système de récupération et ses caractéristiques propres en font un sujet d'études passionnant :

- sur le plan stratégique, quelles sont les différentes politiques de collecte envisageables, et comment coordonner ces politiques de ramassage avec les fonctionnalités proposées par les installations de recyclage ?

- sur le plan opérationnel, quelles sont les données et les contraintes inhérentes à la collecte, et comment mettre en œuvre une méthodologie de résolution adéquate ?

Telles sont les deux principales questions qui vont désormais nous tenir l'esprit. Mais avant tout, parce que la collecte est un acteur de la récupération des produits qui doit s'intégrer dans un système global, nous allons dans la section suivante présenter les différentes stratégies de récupération des produits existantes, car celles-ci doivent être prises en considération lors la planification de la collecte et du bon acheminement des produits ramassés vers les installations de récupération appropriées.

### 1.3 Les stratégies de récupération

Nous nous basons sur les travaux de (Thierry, 1997)<sup>[24]</sup>, (Krikke, 1998)<sup>[16]</sup> et (Chevron, 1999)<sup>[5]</sup> pour la description qui va suivre. Les deux premiers auteurs introduisent les options de récupération en fonction de la conservation de l'identité et de la fonctionnalité des produits usagés. Le dernier auteur apporte une touche plus pratique et mécanique, en décrivant plus précisément les mécanismes intervenant dans chacune des solutions proposées. Chaque option fait préalablement intervenir une étape de dépollution de l'appareil, consistant à identifier et neutraliser les éléments polluants d'un produit (exemple des CFC des appareils frigorifiques ou des tubes cathodiques)

#### 1.3.1 Options de récupération

Les produits en fin de vie peuvent être récupérés de diverses manières. Les plus courantes, répertoriées par (Thierry, 1997)<sup>[24]</sup>, sont au nombre de cinq : la réparation, la remise à neuf, la re-production, la cannibalisation, et le recyclage. Chaque option dépend fortement des processus de récupération utilisés, du degré de désassemblage atteint, et de la revalorisation des matières, pièces ou produits obtenus. Ces cinq options sont détaillées ci-dessous (Tableau 1.1).

##### 1.3.1.1 Réparation

Le but de la réparation est de ramener un produit usagé à son état de marche normale. D'une manière générale, les produits réparés sont d'une qualité légèrement inférieure à celle des produits neufs. Comme la réparation exige simplement le remplacement ou la réparation des pièces défectueuses, cette option nécessite un désassemblage et un ré-assemblage relativement limité.

##### 1.3.1.2 Remise à neuf

La remise à neuf consiste à ramener un produit usagé à un état de marche avec une qualité fixée, souvent plus faible que celle d'un produit neuf. Un tel produit est divisé en modules, et chaque module est minutieusement démonté et inspecté. Ceux qui ne répondent pas aux critères de qualité visés sont remplacés par d'autres modules. Puis tous les modules sont remontés, et le produit est testé en fonction de la qualité visée.

### 1.3.1.3 Re-production

La re-production vise à transformer le produit usagé de telle manière qu'il satisfait aux exigences de qualité des produits neufs correspondants sur le marché. Un produit usé est complètement démonté, toutes ses pièces et modules inspectés et remplacés si nécessaire.

### 1.3.1.4 Cannibalisation

La cannibalisation a pour but la récupération de certaines pièces ou modules du produit usagé. Ainsi, à l'inverse de la réparation, de la remise à neuf et de la re-production qui se placent au niveau de la récupération du produit dans sa globalité, la cannibalisation se concentre sur un ensemble prédéfini de pièces ou modules, qui peuvent à l'occasion être réutilisés dans la re-production par exemple. De ce fait, la cannibalisation nécessite un désassemblage sélectif du produit et un diagnostic précis des modules potentiellement réutilisables. Le niveau de qualité exigé dépend des procédés de récupération utilisés.

### 1.3.1.5 Recyclage

Le recyclage n'a pas pour but de garder la fonctionnalité première des produits ou des composants, ni même de conserver l'identité du produit. Le but du recyclage est de réutiliser les matières constituant le produit usé. Celui-ci est donc démonté et séparé en diverses catégories de composants selon les matières employées. Puis, selon la qualité de ces matières, celles-ci peuvent être réutilisées dans leur application d'origine ou dans d'autres alternatives. Nous parlons de recyclage par revalorisation des matériaux lorsque les matières sont dirigées vers des procédés de broyage ou de refonte. Nous parlons de recyclage par revalorisation énergétique si les matières peuvent être transformées en énergie, par des processus d'incinération par exemple.

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 des modules	Modules réparés ou remplacés
Re-production	Au niveau des pièces	Inspecter et remettre à jour pièces et 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 mises au rebut ou recyclées
Recyclage	Au niveau matière	Dépend de l'utilisation dans la re-production	Matières dans des produits neufs Energie

**Tableau 1.1 : Options de récupération des produits (Krikke, 1998) <sup>[16]</sup>**

Toutes les options de récupération citées ci-dessus diffèrent dans la conservation ou non de l'identité et de la fonctionnalité du produit, ainsi que dans les techniques de récupération utilisées. Néanmoins, toutes se rassemblent sur le démontage ou le désassemblage, préalable à une exploitation ultérieure. Nous présentons donc ci-dessous cette technique incontournable à toute option de récupération, en adoptant un discours réaliste et pragmatique se référant aux conclusions de (Chevron, 1999) <sup>[5]</sup> sur le sujet.

### 1.3.2 Le désassemblage et la collecte

Toutes les options de récupération que nous avons abordées précédemment sont basées sur une inspection des pièces et des modules situés à l'intérieur du produit. Dans un premier temps, il est donc nécessaire de procéder à une opération de démontage ou de désassemblage du produit afin d'extraire les composants visés. Pour nous, les termes démontage et désassemblage représentent la même fonction de séparation de pièces et modules du produit en conservant plus ou moins l'identité du produit. Le désassemblage d'un produit peut être réalisé selon plusieurs niveaux de destruction ; nous distinguons les degrés de destruction totale, de destruction partielle, et de non destruction. Ces modes dépendent fortement de la technique de démontage utilisée, qui peut être manuelle, semi-automatique ou entièrement automatisée. Chacune des techniques de désassemblage qui sont citées fait l'objet d'études approfondies dans des laboratoires de recherche ou dans des instituts en liaison avec l'industrie, en Europe (Allemagne, Suède, Italie, Pays-Bas, et récemment en France) et aux USA. Le lecteur intéressé pourra se référer à (Chevron, 1999) <sup>[5]</sup>.

Le démontage manuel est celui actuellement en vigueur dans la plupart des sites industriels spécialisés dans la récupération des produits usagés complexes en provenance de l'industrie manufacturière, de type blanc (machines à laver, lave-linge ...) ou brun (four, cuisinière, ordinateurs). La raison en est simple : le volume de ces produits est pour l'instant encore trop faible par rapport aux coûts d'investissement et d'utilisation des techniques plus automatisées. Ainsi la société ENVIE DAUPHINÉ<sup>1</sup> <sup>[186]</sup>, spécialisée dans la récupération et la revente des produits venant de l'électroménager encombrant, traite annuellement 4000 produits alors que la mise au rebut de tels appareils au niveau national est estimée en volume à 10 millions d'unités (Chevron, 1999) <sup>[5]</sup>. Le démontage manuel, procédé non destructeur, garantit la fonctionnalité résiduelle du constituant extrait. L'opération a un coût important, et le succès de l'opération n'est pas toujours certain du fait de la présence humaine.

Parmi les techniques de démontage qui intègrent une automatisation totale ou partielle et qui sont peu destructives, certaines font appel à des processus chimiques (bains chimiques), d'autres à des processus thermiques (chocs thermiques pour casser les liaisons) ou mécaniques (vibrations par micro-ondes). Une technique de démontage est à mettre en relation avec le mode d'assemblage du produit (clipsage, soudage, etc.). En général, le coût d'une telle opération est réduite et le succès assuré, même si le fonctionnement du composant extrait n'est plus garanti, du fait des incertitudes sur l'état initial du produit et sur la détérioration due au processus. Parmi les techniques avec un haut degré d'automatisation, et par conséquent plus destructrices, les découpes au jet d'eau abrasif, à la torche au plasma, au laser, permettent un accès rapide aux organes internes par une découpe de l'enveloppe externe du produit.

Comme nous l'avons constaté, seules les techniques manuelles de désassemblage sont actuellement en vigueur à l'échelle industrielle. En effet, les bénéfices du démontage ne s'expriment pas encore sous la forme de profits financiers, mais elles se manifestent plutôt par leur influence sur les marchés de l'occasion, celui des pièces détachées (marchés secondaires) et celui des matières premières. Dans des études menées sur les quantités de déchets rejetés par notre société et les moyens de les collecter et de les recycler, le démontage apparaît comme première étape indispensable au recyclage, et se justifie par les nouvelles contraintes légales, et les conséquences économiques, sanitaires et sociales (Desgeorges, 1994) <sup>[28]</sup>, (FIEE, 1997) <sup>[30]</sup>. De plus, les volumes de déchets actuellement traités ne justifient pas encore la rationalisation et l'automatisation des procédés de récupération, ce qui ne sera sûrement plus le cas à terme.

---

<sup>1</sup> ENVIE : Entreprise Nouvelle Vers l'Insertion par l'Économie. En 1997, le réseau ENVIE était constitué de 27 sites disséminés en France, certains traitant les produits blancs, d'autres les produits bruns.

D'autre part, l'automatisation complète du démontage paraît peu probable au regard des coûts de conception, de réalisation et d'entretien de structures appropriées, très élevés en comparaison de l'utilisation d'opérateurs humains. Il semble donc que notre société se dirige vers une automatisation partielle du désassemblage avec l'intervention de l'homme au sein du processus. La difficulté réside alors dans la liaison entre les performances de la machine et celles de l'homme, et fait l'objet d'étude du projet interdisciplinaire (Rester Prsopre, 2000)<sup>[43]</sup>, auquel notre travail de thèse est rattaché.

Il nous reste cependant à justifier la corrélation entre le désassemblage et la collecte des produits usagés, sujet de notre présente étude. Rassemblons donc toutes nos connaissances et données sur le sujet de la récupération. D'une part, nous avons un ensemble de produits électroménagers encombrants arrivant en fin de vie, qu'il s'agit de récupérer d'une manière telle qu'elle soit économiquement viable et que les contraintes législatives et écologiques soient respectées. L'objectif économique se traduit par une rationalisation et une optimisation de l'ensemble des coûts de la chaîne de récupération, ou logistique inverse des produits, et en particulier des fonctions de collecte et de démontage. D'autre part, nous prévoyons une automatisation croissante des techniques de désassemblage, afin de traiter des volumes de déchets de plus en plus conséquents. Cette automatisation implique des structures adaptées, centrées autour du désassemblage, générant par là même des coûts d'installation d'équipement, d'entretien importants. Le rôle de la collecte étant d'acheminer les produits usagés vers ces centres de désassemblage, il existe donc un lien évident entre la fonction collecte et la fonction désassemblage, qu'il convient d'étudier et de modéliser, toujours dans le but de rationalisation des coûts associés. Cette analyse constitue l'un des points de départ de nos travaux, et sera abordée plus en détail dans le chapitre 2.

### 1.4 Plan de recherche

Nous avons établi dans les paragraphes précédents le cadre général de nos travaux, en présentant un aperçu de la gestion intégrale de la chaîne des produits manufacturés et en introduisant le concept de gestion de la récupération des produits. Nous avons fait ressortir une liste non exhaustive des différents problèmes qu'implique la récupération des produits, et notamment celui de la logistique inverse des produits manufacturés usagés. Nous avons tenté tout au long de ce premier exposé de cibler nos objectifs, en émettant diverses hypothèses de travail que nous considérons réalistes et auxquelles nous allons nous rattacher pour la suite de notre travail. Détaillons désormais nos objectifs de travail, ce que nous voulons aborder dans le domaine de la logistique inverse, et la manière de nous y prendre, qui va nous guider durant ce rapport.

#### 1.4.1 Ce que nous voulons faire...

Selon (Eymery, 1997)<sup>[7]</sup>, la logistique inverse répond à la nécessité de retirer du service les produits après usage et de les traiter [...] dans le but de réduire les coûts [...], et de plus en plus dans le but de répondre aux exigences du respect de l'environnement. Dans cette définition apparaît la notion d'extraction des produits usagés du marché, qui correspond à la fonction de collecte de ces produits. Parmi l'ensemble des déchets rejetés par notre société, une attention particulière doit être portée sur les produits manufacturés complexes, de type blanc ou brun, de part leur complexité d'assemblage, les dommages sur l'environnement qui découleraient de leur non-traitement, ainsi que les potentialités de revalorisation sous toute forme que ce soit.

Dans les études et les travaux les plus significatifs sur la récupération que nous avons recensés dans la littérature, les aspects stratégiques et opérationnels ont été abordés, que ce soit dans la conception de stratégies de récupération et de réseau logistique inverse (Krikke, 1998)<sup>[16]</sup>, l'étude des systèmes de production les plus appropriés au recyclage (Thierry, 1997)<sup>[24]</sup>, la conception et la supervision d'une cellule de désassemblage (Chevron, 1999)<sup>[5]</sup>, une étude économique sur la récupération (Ferrer, 1997)<sup>[8]</sup>. Pourtant, la fonction de collecte n'a pour l'instant pas été traitée d'une manière rationnelle dans le but d'optimiser son fonctionnement. Il apparaît tout à fait nécessaire d'approfondir l'analyse de ce maillon essentiel de la logistique inverse et des relations sur les autres éléments de la chaîne logistique inverse.

Notre objectif est donc d'apporter des éléments de réponse aux questions suivantes :

- Quelles sont les possibilités de collecte des produits encombrants issus des ménages ?
- Quelles sont les solutions les plus efficaces ?
- Quelles sont les solutions les plus appropriées, selon les produits à collecter ?
- Quelles sont les solutions les plus appropriées, selon la zone géographique collectée ?

Après avoir analysé et répondu à ces premières questions, il s'agit ensuite de proposer des stratégies de collecte et des plans opérationnels de collecte. Pour cela, il s'agit également de répondre aux interrogations suivantes :

- Quelles stratégies de collecte sont les plus envisageables, du point de vue économique et du point de vue satisfaction du client ?
- Comment implémenter concrètement ces stratégies, afin d'obtenir des solutions de collecte opérationnelles ?

Enfin, n'oublions pas que la fonction collecte n'est que le premier maillon de la chaîne logistique inverse des produits en fin de vie. Notre souci global est la meilleure réalisation de la récupération des déchets, des points de vue économique et écologique. De ce fait, la collecte doit être intégrée dans la perspective plus globale de chaîne inverse. L'analyse des flux de matières et d'informations entre les différents maillons de la chaîne doivent donc être analysés. Nous avons vu également que l'aspect de conception vers le recyclage des produits manufacturés occupe une place importante de la recherche sur la récupération des déchets. Les questions qui en découlent sont donc :

- Quelles sont les informations coordonnant l'activité de collecte et l'ensemble de la chaîne logistique ?
- Comment relier les informations liées à la collecte au système global de récupération des produits ?
- Existe-t-il des informations venant de la collecte pouvant influencer son efficacité, et comment les intégrer dès la conception des produits ?

Nous pouvons donc nous rendre compte qu'un certain nombre de questions doivent être abordées. Précisons maintenant notre méthodologie pour y parvenir.

#### **1.4.2 ... Et comment nous allons y arriver**

Notre méthodologie de travail consiste à :

- récupérer les données concernant les transports, et plus précisément la collecte, des produits usagés, dans une optique de récupération ou de recyclage : notre premier objectif est de répertorier toutes les données existantes possibles sur la collecte et le traitement des déchets. Les données peuvent être matérialisées par des entretiens (société ENVIE<sup>[186]</sup>), des rapports de structures publiques ou privées engagées dans la gestion des déchets, ainsi que tous les travaux et publications de recherche sur le sujet ;
- déterminer et modéliser l'ensemble des stratégies de collecte pour les produits de l'électroménager encombrant : le travail de recherche de données doit nous amener à fixer les politiques de collecte des déchets encombrants. Les méthodes de collecte risquent d'être très hétérogènes dans leur comportement. Il est donc nécessaire de choisir un outil de modélisation unifiant tous les modes de collecte, indépendamment des caractéristiques propres à chaque mode. Chaque modèle doit représenter les fonctionnalités de la collecte et le mode d'intégration dans la chaîne logistique inverse (gestion des flux d'information et de matière) ;
- établir la liste des critères d'efficacité de la collecte : nous recherchons des modes de collecte qui soient viables économiquement. Ces choix se traduisent par une optimisation des coûts liés à la collecte et à ceux liés à l'interconnexion de la collecte avec les autres composants de la chaîne. Ces coûts doivent être calculés en tenant compte des environnements géographique, économique et écologique ;
- comparer et proposer un ensemble de stratégies de collecte : grâce à un outil de modélisation unique, chaque type de collecte peut être aisément comparé et évalué avec les autres types de collecte. L'évaluation se fait selon les critères d'efficacité déjà sélectionnés ;
- connecter le système de collecte avec les autres éléments de la chaîne inverse, en recensant les informations nécessaires en entrée du système et celles fournies par le système : il s'agit d'étudier les entrées et les sorties de la collecte, puis de coordonner ses actions avec les actions de ses éléments voisins, afin de contribuer à une optimisation globale de la chaîne logistique inverse ;
- justifier nos propositions en produisant des solutions opérationnelles à certaines situations de collecte : selon les types de collecte et les zones géographiques visées, il est possible de proposer des plans de collecte opérationnels. Nous nous attarderons en particulier sur un problème de collecte qui présente un intérêt scientifique évident, car pouvant être modélisé par un problème d'Optimisation Combinatoire.

## 1.5 Conclusions

### 1.5.1 Ce qu'il faut retenir

Notre société de consommation produit une quantité de plus en plus abondante de déchets de toute sorte, pour lesquels il devient urgent de trouver des solutions d'élimination ou de recyclage propres et non nuisibles pour l'environnement, bien meilleures que celles qui sont la référence aujourd'hui, comme la mise en décharge brute de tout déchet par exemple. La responsabilité du changement incombe à tous les acteurs de la vie sociale, des gouvernements par des messages

législatifs forts, aux industriels par une responsabilité accrue vis-à-vis de leurs produits en retour, en passant par les consommateurs qui doivent prendre conscience de l'importance du phénomène actuel. Dans le cycle de vie du produit, c'est donc la phase de retour du consommateur vers le producteur qui cadre notre étude, et que nous nommons organisation de la récupération.

Nous nous intéressons particulièrement aux produits manufacturés complexes issus des ménages arrivant en fin de vie (produits blancs ou bruns), pour lesquels le potentiel de revalorisation est réel, tant au niveau des pièces détachées secondaires à forte valeur ajoutée qui peuvent être extraites, qu'au niveau du produit lui-même qui peut approvisionner les marchés secondaires des produits d'occasion. Néanmoins, devant le faible volume actuel à la fois des produits usagés en retour et de la demande des marchés secondaires, la rationalisation de l'ensemble des activités devient indispensable pour garantir la pérennité du processus de récupération. En particulier, la phase de collecte des produits usagés encombrants dont les ménages désirent se séparer prend une place significative, à la fois parce que les coûts générés par le ramassage des produits sont importants, et parce que la collecte est l'acteur principal de l'approvisionnement du réseau logistique inverse, et à ce titre conditionne fortement le succès économique du système de récupération des produits.

### **1.5.2 Ce qui va suivre**

Après avoir établi le constat de la situation actuelle du recyclage et de la récupération des produits manufacturés complexes de l'électroménager, nous présentons maintenant la structure du mémoire qui va nous permettre d'aborder la problématique de la collecte, et d'en proposer des méthodes de résolution.

Le chapitre 2 est consacré à la présentation de la collecte des produits encombrants issus des ménages. L'état actuel de la collecte, les différentes politiques envisageables, en fonction de critères géographiques, économiques et écologiques, sont abordés. Puis un problème particulier de la collecte, préfiguration des systèmes futurs de ramassage des produits, est approfondi. Le parallèle est alors trouvé avec un problème d'Optimisation Combinatoire de routage de véhicules, le problème de chargement et de déchargement avec contraintes de fenêtres temporelles, capacité et précédence.

Les chapitres 3 et 4 traitent de la résolution du problème d'optimisation énoncé ci-dessus. Le chapitre 3 analyse le cas d'un seul véhicule, et le chapitre 4 étend les résultats du chapitre 3 au cas de plusieurs véhicules. La méthode de résolution retenue se base sur le principe de la recherche tabou.

Enfin, le chapitre 5 propose une intégration des résultats obtenus aux chapitres précédents dans le système logistique inverse global, en établissant les interconnexions avec les autres acteurs du système de récupération. Les conclusions finales terminent ce chapitre.



# Chapitre 2 La collecte

## 2.1 Introduction

Depuis quelques années, les législations française et européenne ont évolué vers une meilleure protection de l'homme et de l'environnement vis-à-vis des nuisances provoquées par la massification des déchets de notre société. À partir de 2002, la mise en décharge n'étant plus acceptée que pour les déchets dits « ultimes », des processus de traitement et de revalorisation des déchets actuels doivent être mis en place. L'impact sur les systèmes logistiques classiques de collecte et de transport des déchets est considérable, et conduit à repenser la globalité de l'organisation des transports. Cette restructuration prend toute son ampleur dans la collecte des produits de l'électroménager issus des ménages (Scheidt and Stadlbauer, 1995a<sup>[160]</sup>, 1995b<sup>[161]</sup>), produits à forte potentialité de revalorisation et pour lesquels de nouvelles techniques de revalorisation doivent être entérinées, notamment le désassemblage.

L'objet du présent chapitre est l'analyse des organisations logistiques de collecte et de transport des produits blancs et bruns des ménages. Dans un premier temps, les systèmes de ramassage existants des déchets ménagers et assimilés sont présentés par rapport à leur possible application aux produits encombrants. Les systèmes logistiques dédiés aux produits de l'étude sont ensuite analysés, puis les méthodes de collecte les plus pertinentes vis-à-vis de l'émergence des marchés secondaires des pièces détachées et produits d'occasion sont retenues. Mais avant tout, présentons un aperçu général du cadre législatif sur la gestion des déchets et des enjeux de la collecte.

### 2.1.1 Le cadre législatif

C'est à partir de la circulaire du 27 novembre 1969 que des schémas départementaux de collecte et de traitement des ordures ménagères sont mis en place, puis réactualisés, par la plupart des départements. Il s'agit alors simplement de réfléchir à des mécanismes de ramassage des déchets<sup>2</sup> et de concevoir le système logistique permettant d'y arriver. Les véritables plans de collecte sont

---

<sup>2</sup> Déchet : résidu de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement bien, meuble, que son détenteur abandonne ou destine à l'abandon. (Chevron, 1999)<sup>[5]</sup>

initiés à la demande de l'Union Européenne, la directive n° 75-442 du 15 juillet 1975 demandant aux états membres d'élaborer des plans territoriaux d'élimination des déchets. Suite à l'intégration officielle d'une politique européenne sur l'environnement, la directive n° 91/156/CEE du 8 mars 1991 modifie le contenu de la directive de 1975, en fixant comme priorités la récupération et le recyclage des déchets, ainsi que la valorisation, y compris sous forme thermique. La mise en décharge sans traitement préalable doit à terme disparaître. Cette obligation législative se traduit en France dans la loi n° 92-646 du 13 juillet 1992, relative à l'élimination des déchets ainsi qu'aux installations classées pour la protection de l'environnement, qui stipule qu'à partir du 1<sup>er</sup> juillet 2002, seuls les déchets ultimes<sup>3</sup> seront acceptés dans les centres d'enfouissement technique.

Jusqu'à présent, aucun texte législatif ne fait mention explicite de l'organisation pratique du transport des déchets. Le seul principe énoncé dans la directive européenne de 1975 porte sur la proximité du lieu de traitement des déchets par rapport à leur lieu de production, principe repris dans la loi française de 1992 sous la forme d'une limitation du transport « en distance et en volume ».

### 2.1.2 Les déchets

Un déchet peut avoir trois origines différentes : il peut être produit par la collectivité locale, par les ménages ou par les industriels. Ces provenances doivent être distinguées des termes couramment employés d'ordures ménagères, de déchets municipaux, ou de déchets ménagers et assimilés, dont une définition peut être trouvée dans le tableau (Tableau 2.1).

Déchets de la collectivité locale	Déchets des ménages		Déchets industriels			
	Boues de STEP, matières de vidange, espaces verts, marchés, ...	Déchets occasionnels des ménages : encombrants, jardinage, ...	Ordures ménagères (sens strict)		Déchets industriels banals DIB	
		Fraction collectée sélectivement	Fraction collectée en mélange	Déchets des artisans, commerçants, établissements divers, collectés en mélange avec les ordures ménagères	Déchets industriels banals collectés séparément	Autres déchets industriels, déchets contaminés
		Ordures ménagères (sens habituel)				
		Déchets municipaux				
		Déchets ménagers et assimilés				

**Tableau 2.1 : Les différents types de déchets (Ademe, 1998)<sup>[1]</sup>**

<sup>3</sup> Déchet ultime : déchet résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux. (Chevron, 1999) <sup>[5]</sup>

### 2.1.3 Les enjeux

Le cadre législatif, qui a progressivement été mis en place afin d'assurer la protection de l'homme et de l'environnement contre les effets néfastes de la production des déchets, a une conséquence sans précédent sur l'organisation des collectes et des transports des déchets ménagers et assimilés. De manière traditionnelle, la logistique des transports de déchets ne concernait que la collecte et l'acheminement vers une décharge (Figure 2.1). De par la loi du 13 juillet 1992, seuls les déchets ultimes pourront désormais y être acceptés.

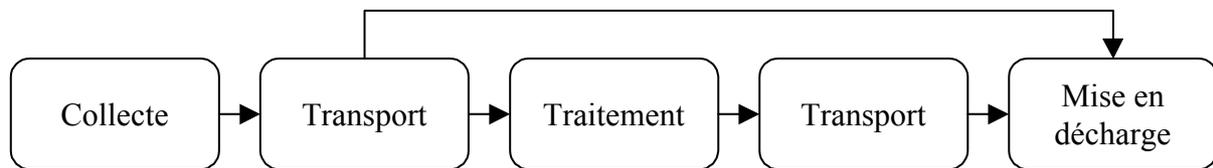


Figure 2.1 : Systèmes traditionnels d'élimination des déchets

Cette mesure législative bouleverse considérablement les organisations de collecte traditionnelle, nécessitant une remise en cause de la structure générale du système logistique, et faisant intervenir de nouveaux chaînons (Figure 2.2) :

- des procédures de collecte, de groupage et de tri ;
- des transports vers les installations de traitement ;
- des transports des matières valorisées vers les centres de recyclage ;
- des transports des déchets ultimes vers les centres d'enfouissement technique.

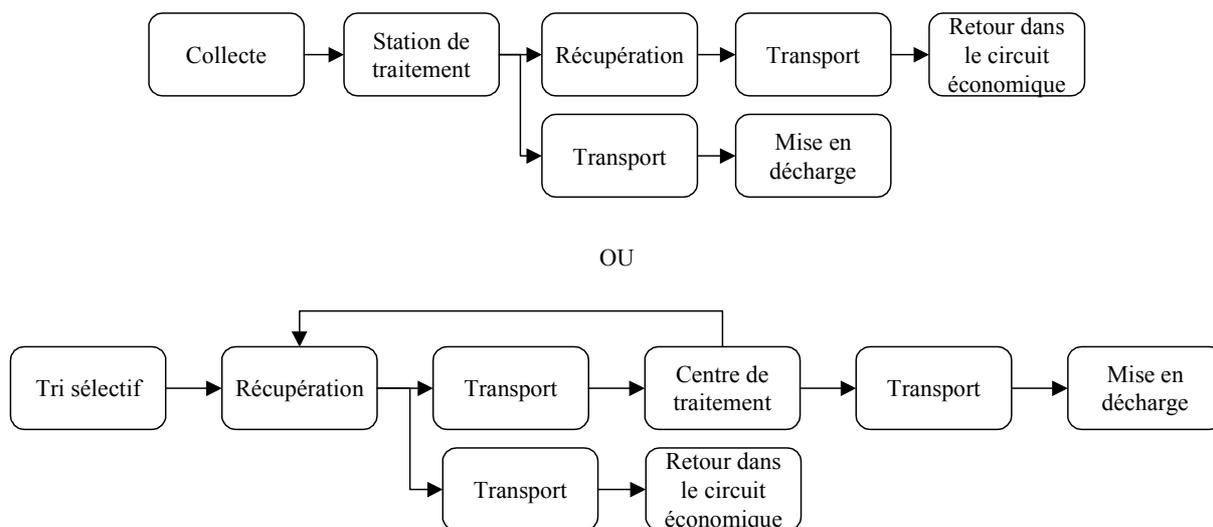


Figure 2.2 : Procédures modernes d'élimination des déchets

La nouvelle complexité de la chaîne logistique inverse, avec l'apparition de boucles de retour, a pour but de promouvoir autant que possible la réutilisation des matières premières qui ont servi de base à la fabrication des produits, sous forme énergétique ou sous forme de nouvelles matières premières et pièces détachées (Figure 2.3). L'enjeu économique de la collecte est important, puisque le coût des opérations de transport est comparable à celui des opérations de traitement (Ademe, 1998)<sup>[1]</sup>. Concevoir et gérer ces nouvelles organisations logistiques passe donc par des choix judicieux d'implantation géographique des centres de traitement, puis par une gestion rationnelle des transports afin de limiter les surcoûts liés par exemple à des retours à vide trop fréquents ou à un allongement inutile des distances parcourues.

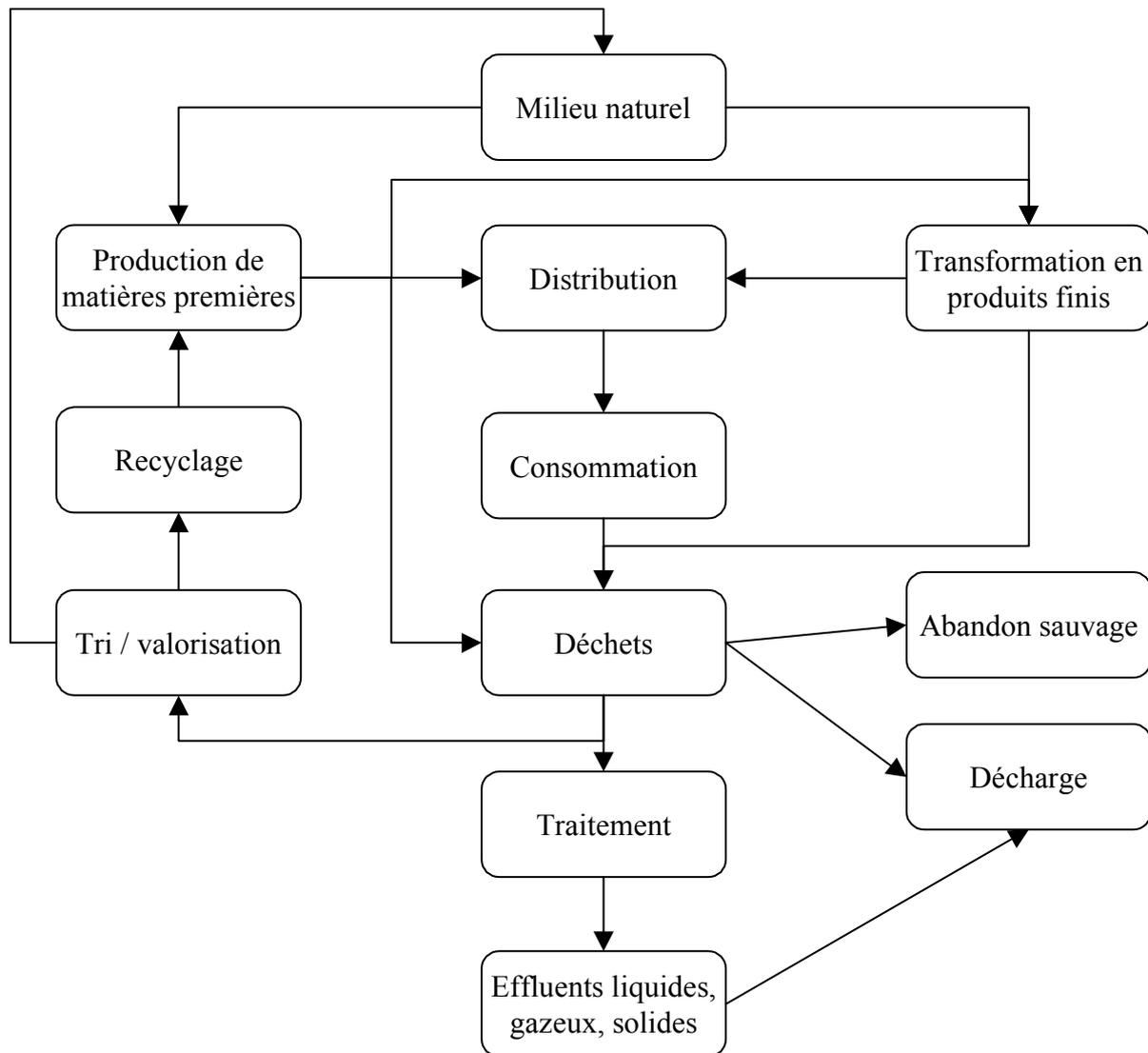


Figure 2.3 : Procédures de traitement et d'élimination des déchets (Ademe, 1998)<sup>[1]</sup>

## 2.2 Les systèmes de collecte existants

Les appareils qui font l'objet de notre étude sont les produits électriques et électroniques arrivant en fin de vie, issus des ménages, et qui sont classés comme encombrants, c'est-à-dire qu'ils vérifient le critère « produit qui ne rentre pas dans une poubelle ». Deux types de produits rentrent dans cette catégorie : les « produits blancs », comme le lave-linge, le sèche-linge, le lave-vaisselle, la cuisinière, la plaque de cuisson et le four encastrable, le micro-ondes, le réfrigérateur et le congélateur. Les « produits bruns », quant à eux, regroupent la télévision (noir et blanc ou couleur), le magnétoscope, la chaîne HI-FI, et le micro-ordinateur et ses périphériques.

Les produits encombrants diffèrent des déchets ménagers « classiques », solides ou liquides, tant par leur constitution et leur volume, que par les traitements appropriés qu'il est nécessaire de leur faire subir afin de les valoriser convenablement. Leur prise en compte au niveau de la récupération et du recyclage est une problématique relativement récente de notre société, en comparaison de ce qui se fait déjà pour les déchets ménagers et assimilés. En particulier, nous nous apercevons que la volonté de créer les conditions nécessaires à la pérennisation du recyclage

de ces produits passe par l'introduction d'une nouvelle technique de récupération, le désassemblage, inappliquée jusqu'à présent pour les autres types de déchets. Cette différence fondamentale oblige à adapter, voire restructurer le système logistique inverse déjà mis en place pour les autres types de déchets.

Notre objectif porte sur l'analyse du rôle de la collecte des produits manufacturés encombrants des ménages dans la chaîne inverse globale de ces produits. Nous ne partons pas de zéro, puisque la fonction de ramassage des déchets est une fonction accomplie depuis maintenant plusieurs dizaines d'années, même si pendant longtemps elle n'a été considérée que comme une facilité offerte aux habitants d'améliorer la qualité de leur vie quotidienne. Nous nous devons donc, avant de parler plus avant des produits électroménagers encombrants, étudier les différents modes de collecte déjà existants pour tous les types de déchets, pour pouvoir nous situer par rapport à eux.

Nous allons donc, dans la suite de ce paragraphe, présenter un aperçu rapide des différents modes de collecte des déchets ménagers et des déchets industriels banals (DIB) et spéciaux (DIS). Nous nous attacherons à nommer les acteurs de la collecte, leur rôle, comment sont gérés les flux de matières, quels types de valorisation ont été appliqués jusqu'à présent et pourquoi. Pour ce faire, nous nous baserons sur diverses études réalisées tant au niveau de la recherche scientifique (Jahre, 1995)<sup>[14]</sup>, que des publications de l'ADEME - Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (Ademe, 1998)<sup>[1]</sup>, de la FIEE - Fédération des Industries Électriques et Électroniques (Desgeorges, 1992)<sup>[27]</sup> (FIEE, 1997)<sup>[30]</sup>, du CREDOC - Centre de Recherche pour l'Étude et l'Observation des Conditions de Vie (Poquet, 1997)<sup>[40]</sup>, de la CSCV - Confédération Syndicale du Cadre de Vie (Gelosi, 1994)<sup>[10]</sup>.

## 2.2.1 La collecte des ordures ménagères

Commençons notre analyse des systèmes de collecte existants par celle des ordures ménagères, la plus vieille d'entre toutes, et celle qui de loin gère le plus grand volume de déchets. Elle est depuis longtemps déjà passée à l'ère industrielle, et de ce fait peut nous fournir d'amples indications de base sur la marche à suivre pour traiter notre problème.

### 2.2.1.1 Vers la collecte sélective

D'une manière générale, il apparaît que la gestion des déchets ménagers dans sa globalité traverse une crise importante, en grande partie due aux quantités de plus en plus importantes qu'il faut traiter. Ajoutons à cette situation l'apparition d'un nouveau syndrome, le « NIMBY » (« Not In My Back Yard » = pas de ça dans mon jardin) qui ne fait qu'accroître ce phénomène de crise : c'est le syndrome qui veut que les propriétaires cessent de s'intéresser à leurs déchets dès que ceux-ci ont franchi le seuil de leur porte.

Devant le contenu hétéroclite de nos poubelles, où des matériaux tels que le verre, le carton, les boîtes de conserve peuvent prétendre à un autre avenir que celui de la mise en décharge ou l'incinération, une collecte globale et non sélective réduit fortement les capacités de recyclage de ces déchets : l'humidité, la fermentation, la toxicité de certains déchets rendent pratiquement irrécupérables le contenu entier de la poubelle. Pour recycler, le tri et la collecte sélective des principaux matériaux apparaît donc comme une solution nécessaire.

En France, la collecte sélective est mise en place par les collectivités locales, qui en sont responsables, mais peuvent s'acquitter de cette tâche de la manière qui semble leur convenir le

mieux : aucune contrainte majeure ne leur est imposée sur la mise en œuvre de tels systèmes. Ainsi, les communes peuvent être prêtes à investir dans un mode particulier de collecte sélective, à condition qu'elles y trouvent leur compte. L'intérêt de la mise en place de la collecte sélective se manifeste surtout par (Gelosi, 1994)<sup>[10]</sup> :

- la diminution de la capacité des installations actuelles : la sélection et le tri réalisés en amont favorisent un volume de déchets plus faible ;
- l'allongement de la durée de vie des installations existantes, par une spécialisation des activités de traitement, qui sont alors de meilleure qualité ;
- l'amélioration de la qualité du compost (plus gros volume de matières organiques et dégradables) ;
- la diminution des pollutions et nuisances au sein des installations de traitement (fumées, eaux, bruits...) ;
- la réduction des tonnages de résidus à évacuer en décharge, grâce à des procédés de recyclage matière plus performants.

De plus, la volonté politique a permis d'intégrer la collecte sélective dans le processus global de récupération, en se basant sur une approche sectorielle qui fait intervenir les communes pour la production des déchets, les récupérateurs (de toute sorte), et les entreprises consommatrices de matières premières secondaires, sans oublier au centre du système les habitants des communes, chargés de trier leurs déchets. C'est sur ce grand principe qu'est née la société Eco-emballages en 1993, afin de favoriser la récupération des emballages produits par les industriels.

Aujourd'hui, après plusieurs années de mise en application dans la vie quotidienne, les apports de la collecte séparative des ordures ménagères sont indéniables et plus que positifs. Voyons maintenant de quelle manière cette collecte peut être réalisée.

### 2.2.1.2 Les différents modes de tri et de collecte sélective

#### • **Le tri sur ordures brutes**

Le tri sur ordures brutes consiste en la récupération sous forme brute de l'ensemble des ordures ménagères, puis en un tri en fonction des objectifs de récupération et des types de déchets rencontrés. Ce type de collecte et de tri a montré ses limites car les équipements sont coûteux et produisent des matériaux de qualité relativement passable : à l'heure actuelle, seuls les déchets combustibles et les déchets pour compostage peuvent raisonnablement être dégagés grâce à ce type de tri. Appliquer ce type de collecte pour les produits manufacturés aurait en revanche très peu de sens, et ne semble pas envisageable du point de vue rentabilité et efficacité.

#### • **Le tri magnétique**

La séparation magnétique des emballages en acier et l'application des courants de Foucault sur les matières en aluminium sont toujours en vigueur, car ils donnent des résultats satisfaisants. Ces techniques permettent d'extraire des pièces spécifiques, mais ne peuvent que très difficilement être adaptées au cas des produits manufacturés complexes, car les composants y sont généralement reliés les uns aux autres, et nécessiteraient préalablement une opération d'isolement.

#### • **Le tri à la source**

Le tri à la source consiste à sélectionner les déchets ménagers lorsque ceux-ci se situent encore à proximité du consommateur. Le tri peut être effectué directement devant la porte de l'habitant, ou en demandant à cet habitant un effort pour se déplacer jusqu'à des conteneurs spécifiquement prévus pour retenir les ordures ménagères. Avec l'expérience, la combinaison de ces deux modes de collecte s'avère offrir les meilleurs résultats.

La collecte sélective par apport volontaire implique pour les habitants qu'ils déposent leurs déchets dans des containers prévus à cet effet et placés dans des endroits stratégiques de la localité. Ce type de collecte s'est popularisé par la collecte du verre, puis s'est généralisé pour d'autres matériaux comme le carton ou le papier, et a été étendu à tous les types de matériaux grâce au phénomène des déchetteries au niveau local... Cependant, même si les déchets récupérés s'avèrent de bonne qualité, la rentabilité escomptée ne peut être satisfaisante car les contraintes de déplacement des habitants rendent cette collecte trop peu volumineuse, en particulier lorsque les déchets sont encombrants. Il est donc nécessaire de l'allier avec d'autres modes de collecte.

La collecte sélective en porte-à-porte est susceptible d'offrir un service de meilleure qualité que la collecte par apport volontaire, que ce soit au niveau de la desserte ou de la proximité dans l'espace. Le tri proposé peut être facilement classé en deux ou plusieurs catégories, selon la politique de la collectivité locale. La collecte en porte-à-porte multi matériaux mélangés (effort limité des habitants, mais mauvaise cohabitation des déchets entre eux) se distingue de la collecte multi matériaux non mélangés (effort plus poussé des habitants, mais un meilleur résultat).

La mise en place d'un système de collecte et de tri à la source ne pose pas de gros problèmes fondamentaux au niveau de sa faisabilité technique, mais sa survie repose essentiellement sur l'information des habitants et leur comportement vis-à-vis de ces nouvelles contraintes dans la vie quotidienne. Une fois surmontées ces étapes, diverses solutions peuvent être mises en place pour le tri et la revalorisation des déchets ménagers. En effet, selon (Gelosi, 1994)<sup>[10]</sup>, « il n'existe pas une, mais des possibilités de collecte, qui doivent être examinées en fonction des caractéristiques des collectivités : type d'habitation, situation géographique, densité de population, contenu de la poubelle ». L'argumentation pour la mise en place d'une collecte sélective et du tri à la source peut être synthétisée dans le tableau suivant (Tableau 2.2).

Justifications	Types de déchets	Mode de collecte
Extraire un matériau des flux de déchets à éliminer pour le valoriser Niveau matière	- matériaux recyclables - ordures ménagères	Collecte mono matériau recyclable, avec peu d'impact sur la collecte traditionnelle
Réduction des flux de déchets pour éliminer la mise en décharge et réaliser des économies de traitement	- matériaux recyclables - restant des ordures ménagères	Collecte sélective multi matériaux
Améliorer le flux des déchets via une séparation pertinente par filières	- déchets toxiques - matériaux recyclables - déchets fermentescibles - restant des ordures ménagères	Collecte séparative : modification de la collecte traditionnelle et diversité des traitements et valorisation

**Tableau 2.2 : Justificatifs du tri à la source (Gelosi, 1994)<sup>[10]</sup>**

### 2.2.2 La collecte des déchets industriels banals et spéciaux

Les déchets industriels banals (DIB) correspondent à des déchets générés par l'industrie, qui ne présentent pas de danger pour l'homme ou pour l'environnement. À l'inverse, les déchets industriels spéciaux (DIS) ont une nature polluante potentiellement nocive pour l'environnement.

Il s'avère que les industriels maîtrisent déjà plus que correctement la collecte de leurs déchets, tant par une obligation législative que par le bénéfice potentiel qui peut en être retiré. En effet, à l'inverse du consommateur « ordinaire » qui voit le produit électrique ou électronique en fin de vie comme une nuisance dont il faut se débarrasser, l'industriel considère son produit comme un bien économique et cherche donc à en obtenir le meilleur prix (Desgeorges, 1992)<sup>[27]</sup>. Pour ce faire, les filières de collecte se sont déjà bien développées. De plus, le cheminement des DIB / DIS suit une trajectoire parallèle distincte de celle des déchets ménagers encombrants, car le nombre d'intermédiaires concernés est plus faible : les circuits de collecte et de valorisation sont courts et composés de professionnels du métier, le souci de rentabilité ayant été présent dès la conception des systèmes de collecte. Il semble donc difficile de se baser sur la filière de collecte des DIB / DIS pour la collecte des produits électriques et électroniques encombrants des ménages.

### 2.2.3 Évaluation de performances

Le rôle primordial tenu par la collecte dans le processus global de la chaîne inverse a déjà été mis en évidence auparavant. Devant la disparité des options de collecte possibles et les contextes divers dans lesquels le ramassage s'effectue, l'évaluation des systèmes de collecte existants pour les déchets ménagers doit permettre de nous guider dans notre réflexion sur la mise en œuvre de la collecte des déchets de l'électroménager encombrant. Mais pour évaluer un système de ramassage des déchets, il est avant tout nécessaire de déterminer les mesures de performances retenues, puis de présenter les propriétés de la collecte qui sont évaluées. Ces deux points sont maintenant discutés ci-dessous, en s'appuyant sur les résultats de (Jahre, 1995)<sup>[14]</sup> obtenus à partir d'une analyse statistique sur les matières d'emballage d'origine diverse collectées à travers cinquante systèmes de collecte différents.

#### 2.2.3.1 Mesures de performance

Les mesures de performance des systèmes logistiques inverses pour la récupération des déchets ménagers peuvent être multiples. (Jahre, 1995)<sup>[14]</sup> en dresse une liste exhaustive, qui peut être divisée en cinq groupes de mesures :

- (i) **le service vers les marchés finaux** englobe la « recyclabilité », la flexibilité et la stabilité du système de revalorisation, ainsi que les prix et la qualité des produits proposés ;
- (ii) **le service vers les ménages** se mesure par la densité des points de collecte, le nombre de tris à effectuer, la fréquence et la qualité des collectes ;
- (iii) **les coûts** regroupent les coûts de production, de collecte, de stockage, et se mesurent en unités par tonne collectée, par tonne produite, par tonne récupérée ... ;
- (iv) **les conséquences environnementales** prennent en compte le niveau de la pollution engendrée et l'utilisation des ressources ;
- (v) **le ratio entrées / sorties** du programme de récupération considère les quantités de déchets collectées, celles qui sont récupérées et entrent sur les marchés secondaires, et celles qui sont mises au rebut.

Cependant, (Jahre, 1995)<sup>[14]</sup> suggère que l'utilisation des quatre mesures essentielles suivantes suffit à l'évaluation générale des performances du système de collecte :

- le nombre de véhicules en action ;
- la distance de transport parcourue par la flotte ;
- les coûts des processus de collecte ;
- les coûts totaux par ménage et par tonne récupérée.

Enfin, deux facteurs importants liés à l'environnement et au contexte de la collecte sont identifiés, qui portent sur la densité de la population et le nombre des matières collectées dans le système inverse. Nous verrons que ces deux facteurs jouent un rôle déterminant dans le fonctionnement de la collecte.

### 2.2.3.2 Propriétés des systèmes de collecte

Rentrons maintenant dans l'analyse des systèmes de collecte, en mettant en évidence leurs propriétés et leurs caractéristiques. Nous en dénombrons principalement trois : le compromis inévitable à établir entre le degré de collecte et le degré de tri, la collecte combinée de matières de natures hétérogènes, et les différents réseaux de distribution impliqués dans la structure du système.

#### 2.2.3.2.1 Compromis collecte / tri

La collecte et le tri des déchets ménagers sont deux opérations fortement imbriquées l'une dans l'autre, car nous avons déjà vu précédemment que la collecte sélective semblait la solution la plus efficace pour favoriser une récupération optimale. Cependant, ces deux actions ne s'effectuent pas toujours au même moment : la séparation des matières peut être réalisée à la source (lors de la collecte), ou elle peut être « ajournée<sup>4</sup> » (réalisée plus tard dans la chaîne inverse, dans une installation de traitement des déchets par exemple). L'équilibre à trouver entre la collecte et le tri doit être guidé par la gestion des coûts : selon (Jahre, 1995)<sup>[14]</sup>, la séparation à la source semble plus adéquate dans les petits programmes de collecte (milieux ruraux par exemple), alors que la séparation « ajournée » apparaît plus efficace dans de grosses installations de recyclage, où de gros volumes de déchets peuvent être traités de manière quasi-industrielle.

Cette caractéristique semble d'importance pour la collecte des produits électriques et électroniques de l'électroménager, car elle peut influencer la conception du réseau logistique inverse, notamment sur la nature des installations de recyclage : une unité de récupération doit-elle être capable d'opérer sur tous les types de produits blancs et bruns collectés (tri inutile), ou bien doit-elle être spécialisée sur quelques produits usagés (tri nécessaire pour approvisionner un ensemble d'unités de récupération) ?

#### 2.2.3.2.2 Collecte combinée ou co-collecte

La co-collecte, ou collecte combinée des déchets, consiste à collecter un ou plusieurs types de matières au même instant et par le même acteur de collecte. En ce sens, la co-collecte s'oppose à la ségrégation, où uniquement des matières de la même nature sont ramassées par le même acteur (le carton avec le carton, les plastiques avec les plastiques etc...). La collecte par ségrégation a pour avantage l'absence de tri à réaliser, et pour inconvénient le nombre d'acteurs en jeu ou de passages sur le même lieu de collecte. La co-collecte permet de réduire le nombre d'arrêts sur un endroit de collecte, mais pour garantir la bonne efficacité de la collecte sélective, des conteneurs spécifiques sont requis afin de ne pas mélanger les diverses matières ramassées (à moins que le tri ne soit réalisé de manière ajournée).

Sur les produits blancs et bruns encombrants, la question mérite également d'être posée : les véhicules doivent-ils oui ou non être spécialisés sur un certain type de produits ? La réponse,

---

<sup>4</sup> Dans la suite de notre étude, les expressions "séparation ajournée" et "ajournement" sont utilisées indifféremment. Ces deux expressions découlent du même terme anglais : « Postponement theory » (théorie de l'ajournement).

comme pour le compromis entre collecte et tri, repose sur le contexte local et sur l'analyse des coûts engendrés par les deux options.

### 2.2.3.2.3 Réseaux de distribution

Le dernier point à aborder lors de la conception des systèmes logistiques de collecte concerne les réseaux de distribution, et peut être vu sous deux aspects différents : le nombre d'intermédiaires et de points de ramassage, et la nature de la collecte.

La structuration du réseau de la collecte et des différents intervenants est un facteur primordial dans le fonctionnement du processus inverse : combien d'intermédiaires est-il possible d'intégrer à la chaîne de récupération, depuis la source (le consommateur) jusqu'au centre de recyclage, et pour quel rôle ? Quelle doit être la répartition géographique des points de collecte pour que le ramassage des déchets sur cette zone soit réalisé efficacement ?

Déterminer la nature de la collecte revient à définir les acteurs qui déchargent les consommateurs de leurs déchets : sont-ce les habitants eux-mêmes qui se déplacent sur des centres de collecte pour se débarrasser de leurs déchets par apport volontaire ? Les déchets sont-ils abandonnés sur le trottoir, nécessitant un acteur supplémentaire pour l'acheminement vers un agrégat de déchets ? Les deux options se justifient, sont viables économiquement, et ne nécessitent pas les mêmes infrastructures... Le consensus semble désormais acquis que la « moins mauvaise » solution consiste à allier ces deux types de collecte, car c'est ainsi que la meilleure offre est fournie aux consommateurs sans trop grosse augmentation des coûts au niveau du réseau inverse.

De la même manière que pour les deux premières propriétés des systèmes de collecte, des sujets de réflexion proposés sur les réseaux de distribution doivent retenir notre attention dans la situation des produits encombrants. La présentation des systèmes de collecte envisagés sur ces produits va suivre dans la section suivante, mais avant tout un récapitulatif des données et conclusions récoltées dans le cas des ordures ménagères est donné ci-dessous, par l'analyse des relations entre les propriétés et les performances des systèmes de collecte.

### 2.2.3.3 Relations entre propriétés et performances des systèmes de collecte

Les conclusions de l'analyse des principales propriétés des systèmes logistiques de collecte des déchets ménagers, et leur implication dans la performance globale de la chaîne inverse, sont résumées dans la figure (Figure 2.4) ci-dessous. En réalité, en se référant à l'approche analytique et statistique réalisée par (Jahre, 1995)<sup>[14]</sup> sur les matières d'emballage, il s'avère que le facteur dominant dans l'élaboration de la collecte optimale se résume à la densité de la population de l'étude. Nous pouvons en effet constater que les régions à faible densité de population devraient collecter peu de matières, avec un haut degré de séparation à la source et un haut degré de co-collecte. À l'inverse, les régions avec une densité de population plus conséquente devraient collecter une quantité plus importante de matières, avec un petit degré de séparation à la source, mais plus d'ajournement. Deux raisons essentielles expliquent ce phénomène : l'exigence en terme de rentabilité et de flexibilité des installations de recyclage.

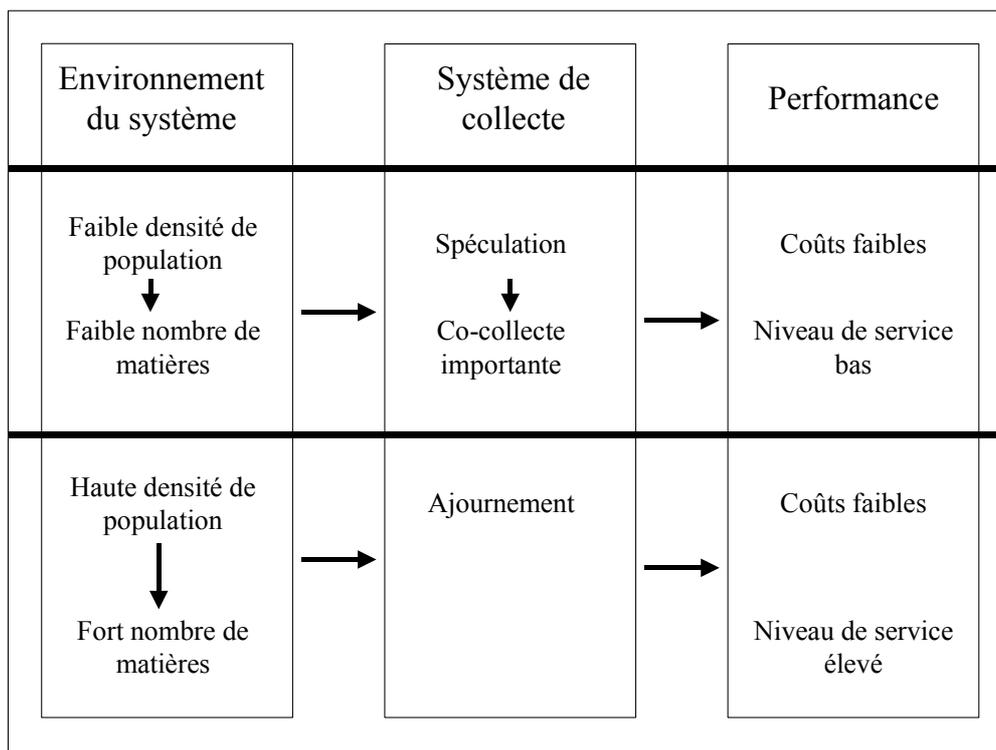


Figure 2.4 : Relations entre système de collecte et performance (Jahre, 1995) <sup>[14]</sup>

En effet, la rentabilité financière du système de collecte et de revalorisation est essentielle pour la pérennité du recyclage des déchets. Or, ce sont les communes qui ont l'obligation de collecte et d'élimination des ordures ménagères, et elles le font dans une logique de service public. Il n'est fait état d'aucune obligation, en revanche, sur la revalorisation des matières collectées, car la revalorisation fait appel à une logique de marché. Comme en outre la demande actuelle de matières premières secondaires est encore trop volumineuse sur les marchés de l'occasion, les bénéfices retirés de l'exploitation du système de collecte et de récupération ne permettent pas de générer des revenus suffisants. L'intérêt des communes est donc de concevoir et de gérer des systèmes de collecte où les coûts d'exploitation sont réduits au maximum. C'est de ce constat que découle notre première conclusion : la viabilité économique d'une installation de recyclage est favorisée dans les milieux à forte densité de population par la prise en compte de volumes importants et par des installations de traitement qui effectuent l'opération de tri et de sélection des déchets, et la collecte y est le plus longtemps possible ajournée. Dans les milieux à densité de population plus faible, les volumes sont réduits, et la collecte est réalisée de manière combinée afin de réduire les coûts de fonctionnement des installations.

Les réseaux sur les marchés secondaires sont amenés à se développer dans les années à venir. C'est un gage que nous prenons sur le futur. Comment savoir quel système actuel de collecte et de revalorisation saura le mieux anticiper les évolutions prochaines ? À défaut d'anticipation, peut-être suffit-il de rechercher la flexibilité ? Comme l'incertitude est encore sur les matières qui seront rejetées par les consommateurs, sur la législation adoptée par nos gouvernements, un système de récupération flexible a l'indéniable atout de pouvoir s'adapter à des quantités et des types divers de matières, de densités et de qualités différentes. Dans la chaîne inverse, ce sont les installations de recyclage qui semblent les mieux armées pour l'adaptation aux exigences du marché, car la prise en compte de nouvelles matières paraît mieux maîtrisée sans conséquences graves sur le système de collecte, et ces installations possèdent un potentiel de réactivité plus élevé et un potentiel de nouveaux équipements plus important (Jahre, 1995) <sup>[14]</sup>. Choisir de rendre les installations flexibles, plutôt que d'autres acteurs comme la collecte, a également l'avantage de

centraliser les lieux où les modifications et adaptations sont requises. De ce fait, la collecte ajournée semble plus à même que la collecte par spéculation de favoriser la flexibilité du processus de récupération.

Il nous reste maintenant à analyser le mécanisme que nous venons de décrire, qui s'applique parfaitement aux ordures ménagères et aux matières d'emballage, dans le cas des produits encombrants. Le processus de revalorisation de ces produits a-t-il des chances de suivre le même raisonnement ? Nous y répondrons dans la section suivante, mais nous pouvons déjà affirmer quelques différences de comportement, notamment dues aux caractéristiques physiques des produits usagés encombrants et à leur devenir dans le recyclage.

### 2.2.4 Conclusion

Nous venons de dresser, dans cette partie consacrée aux déchets ménagers classiques, un aperçu de ce qui se fait aujourd'hui dans la collecte, le tri et la revalorisation. La collecte sélective des déchets ressort comme la méthode la plus efficace, car elle garantit un niveau de recyclage et de récupération élevé par le tri réalisé sur les déchets. La question de savoir à quel moment le tri doit être réalisé par rapport à la collecte est plus ou moins résolue par l'analyse statistique présentée par (Jahre, 1995) <sup>[14]</sup> sur cinquante systèmes de collecte : la conclusion principale de cette étude préconise un tri ajourné dans les milieux à forte densité de population et étant réalisé proche des installations de traitement, et un tri proche des consommateurs dans les milieux à faible densité de population. Cette conclusion se base sur la quantité de déchets entrant en jeu dans les différents milieux, et sur la rentabilité financière du système global.

Cependant, tout en constatant que tous les différents modes de collecte présentés trouvent une application selon le contexte dans lequel ils prennent place, il est clair que ces systèmes ne sont pas directement transposables aux produits électriques et électroniques encombrants issus des ménages, car :

- les volumes unitaires sont complètement décalés, et par définition les produits électriques et électroniques encombrants ne peuvent rentrer dans une poubelle classique ;
- afin d'arriver à une revalorisation de ces produits, il est nécessaire de passer par une étape intermédiaire, pour pouvoir accéder aux éléments internes du produit : le désassemblage. Cette étape n'existe pas dans le cas des ordures ménagères, mais est essentielle dans le processus de récupération des produits encombrants (voir 1.3.2 - Le désassemblage et la collecte). C'est la deuxième différence fondamentale entre le recyclage des ordures ménagères et celui des produits manufacturés en fin de vie.

Nous avons jusqu'à présent étudié les systèmes de collecte existants des déchets ménagers classiques. Il nous faut désormais aborder le cas des produits qui nous concernent, c'est-à-dire les produits manufacturés complexes de l'électroménager arrivant en fin de vie.

## 2.3 La collecte des produits électriques et électroniques des ménages

Le consommateur qui se sépare de son produit électrique ou électronique arrivant en fin de vie ne le considère pas, à l'inverse de l'industriel, comme un bien économique dont il pourrait retirer de la valeur, qui pourrait receler un prix en soi. Il le voit plutôt comme une nuisance dont il faut se débarrasser au plus vite. De plus, un produit issu d'un seul ménage n'a pas la masse critique pour

rentrer sur le marché. Ce sont donc des stations de transit des produits, des grossistes, qui assurent la fonction de rassemblement d'une multitude de produits sans valeur unitaire véritable, dans le but d'obtenir un flux ajoutant de la valeur. Dans cette démarche d'ajout sur plusieurs niveaux, des pertes en ligne peuvent se produire, qu'il s'agit de limiter le plus possible : ce problème de la limitation et de la diminution des fuites doit faire l'objet de la plus haute attention.

Nous verrons que d'une manière générale, il existe deux grandes voies pour se débarrasser de son produit électrique ou électronique. L'enlèvement à domicile constitue la première solution, et peut être le fait des collectivités locales ou de la distribution. L'apport personnel du consommateur est une voie qui vient en complément de l'enlèvement à domicile. Nous allons détailler ces deux grandes méthodes dans la suite du rapport. Mais avant tout, analysons quels sont les objectifs visés par un système de collecte des produits électriques et électroniques, et quelles sont les contraintes qui doivent être prises en compte.

### 2.3.1 État des lieux

Nous allons dresser dans ce paragraphe un bilan du gisement des produits électriques et électroniques qui rentrent dans le cadre de notre étude. Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur le rapport (FIEE, 1997) <sup>[30]</sup> réalisé pour la région Rhône-Alpes. Nous n'avons pu trouver ni études faites au niveau national, ni rapports présentant des données plus récentes que celles de l'année 1997. Gageons que celles-ci reflètent plus ou moins la situation au jour d'aujourd'hui. Ce rapport permet de fournir une première base de données sérieuses sur lesquelles nous pouvons nous appuyer pour développer notre analyse.

#### 2.3.1.1 Caractérisation des produits

Comme nous l'avons déjà précisé au début de ce rapport, rappelons que les produits qui appartiennent au champ d'étude du rapport sont ceux qui vérifient les deux critères suivants : « ne rentre pas dans une poubelle », et « collecte et élimination à la charge de la collectivité ». Au niveau de la composition des produits, une différence notable apparaît entre les produits blancs et bruns au niveau de leur teneur en éléments ferreux. En effet, les produits blancs contiennent essentiellement des éléments ferreux, quel que soit le type d'appareil (55% à 75% du poids total), des matières plastiques en masse assez importante, peu de cartes électroniques, des éléments potentiellement polluants (CFC et condensateurs), mais pas d'amiante à caractère dangereux. Les produits blancs ne contiennent donc pas de matériaux nécessitant des traitements spécifiques.

Les produits bruns, quant à eux, contiennent des éléments ferreux (40% en moyenne) et des matières plastiques (30% du poids) en ordre dispersé. Les cartes électroniques représentent 4% du gisement. Les éléments sensibles sont les tubes cathodiques et les piles ou accumulateurs. Ils sont de nature plus complexe que les produits blancs au niveau des matériaux utilisés, et ne contiennent pas d'éléments polluants importants à part les tubes cathodiques.

Il est alors possible de regrouper les produits blancs et bruns selon leurs caractéristiques communes. Pour les produits blancs, constitués majoritairement d'éléments métalliques :

- le lave-linge, le lave-vaisselle, la cuisinière et le micro-ondes sont des produits ne contenant pas d'éléments polluants en quantité significative, donc ne nécessitant pas de dépollution ;
- le réfrigérateur et le congélateur contiennent (ou contenaient) des CFC, l'opération de dépollution peut être envisagée.

Pour les produits bruns, plus complexes (nombreux matériaux composites) :

- le magnétophone, la chaîne HI-FI, l'ordinateur et l'imprimante contiennent des cartes électroniques et des piles, qui peuvent nécessiter une dépollution et un démantèlement manuels ;
- le téléviseur et le moniteur sont composés de tubes cathodiques, de cartes électroniques et de piles, et doivent également subir une dépollution et un démantèlement manuels.

Des synoptiques présentent les schémas « idéaux » à appliquer lors du traitement de chaque classe décrite ci-dessus. Ils peuvent être repris dans le schéma suivant :

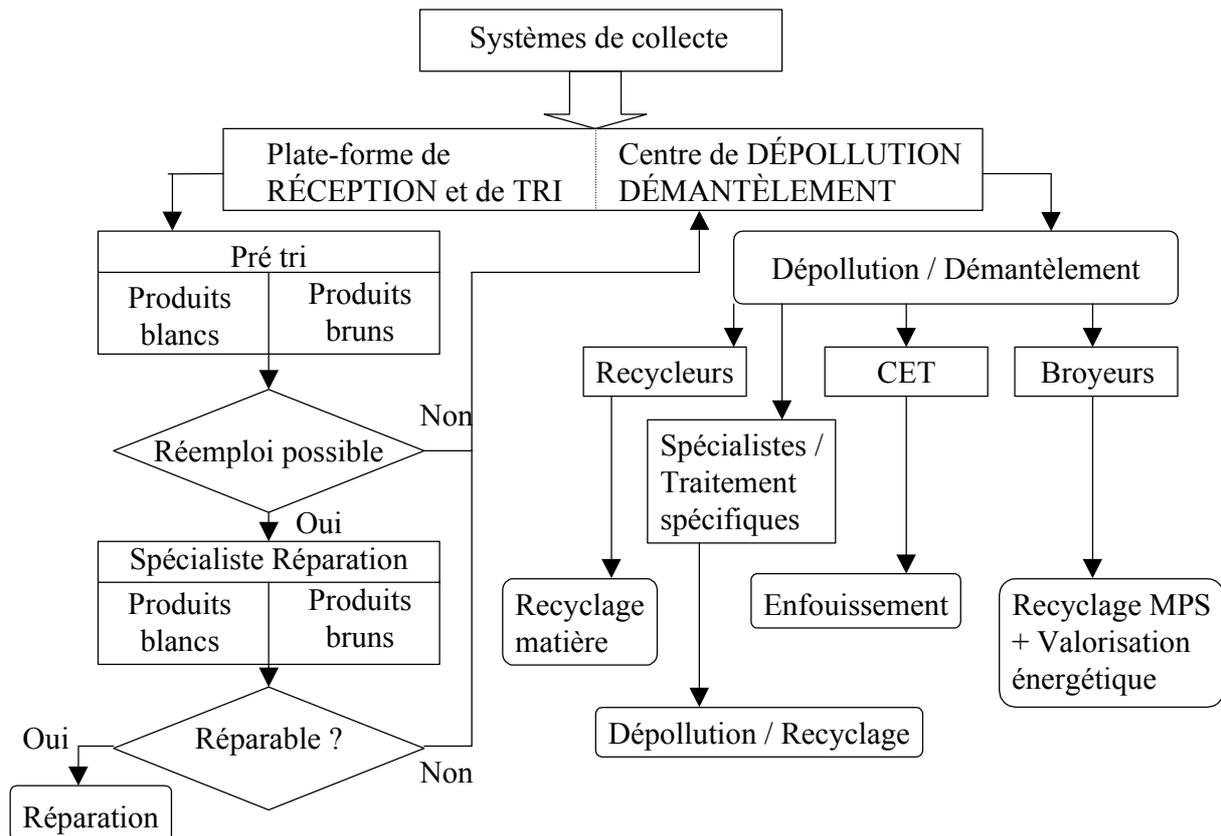


Figure 2.5 : Schéma de principe de traitement des produits électriques et électroniques (FIEE, 1997) <sup>[30]</sup>

### 2.3.1.2 Quantification du gisement des produits (Région Rhône-Alpes)

Précisons maintenant quelques chiffres qui permettent de fixer les idées du gisement des produits électriques et électroniques en fin de vie. Si nous prenons pour exemple la région Rhône-Alpes, sur l'année 1996, en nombre d'unités, les appareils non portables en « sortie » des ménages sont estimés à 432 000 produits blancs et 322 000 produits bruns, soit un total de 754 900 produits.

	Produits blancs	Produits bruns	Total
Nombre d'appareils	432 000	322 300	754 000
Nombre d'appareils ramené sur 1000 habitants	78	58	136

Tableau 2.3 : Gisement Rhône-Alpes sur l'année 1996

Au niveau du bilan matière, pour les produits blancs, 43 % du gisement des ferrailles proviennent des lave-linge, produit majoritaire avec 171 500 unités. Les ferrailles représentent 60% du poids total des produits blancs. Pour les produits bruns, les téléviseurs représentent 60% de la masse totale et 40% en nombre d'unités, les tubes cathodiques représentant à eux seuls 40% du gisement. Les matières plastiques représentent 30% du gisement, et proviennent des appareils frigorifiques.

En se basant uniquement sur les chiffres de la région Rhône-Alpes de l'année 1996, il est clairement visible qu'un gisement des produits issus de l'électroménager existe et ne demande qu'à être exploité. Voyons donc maintenant sous quels objectifs de collecte ces produits vont être collectés.

### **2.3.2 Objectifs de la collecte**

Un système de collecte des produits électriques et électroniques en fin de vie issus des ménages peut être vu comme le premier maillon de la chaîne inverse des déchets encombrants : il s'agit de récupérer le produit lorsqu'il sort de son état d'utilisation et de le transférer vers le système de recyclage pour pouvoir entamer le processus de revalorisation. La collecte a donc pour rôle d'acheminer les produits des ménages vers les systèmes de récupération, afin d'en retirer de la valeur. Cette fonction peut être réalisée en considérant plusieurs objectifs, que nous allons maintenant détailler.

#### **2.3.2.1 Le contrôle et la conduite des flux de produits**

La collecte des produits doit pouvoir tracer les informations relatives aux produits. L'objectif est de contrôler et de conduire les flux de produits qui partent de la source (les consommateurs) vers les centres de récupération : savoir d'où part le produit et déterminer le plus tôt possible sa destination dans la chaîne inverse (imaginons par exemple des centres de recyclage spécialisés sur les téléviseurs, d'autres sur les produits blancs).

#### **2.3.2.2 Le filtre des déchets**

La situation idéale qu'un système de recyclage doit viser est une situation dans laquelle tous les produits introduits dans les ménages, neufs ou d'occasion, intègrent la chaîne inverse pour être revalorisés. Dans cette situation, la collecte de tous les déchets effectue un filtre et permet d'orienter tel type de déchet vers le traitement approprié. Cet objectif de 0% de pertes de produits en fin de vie permet de résoudre le problème de la mise en décharge des déchets ultimes et d'augmenter le volume des déchets à recycler pour une meilleure rentabilité.

#### **2.3.2.3 L'augmentation du volume des déchets**

Un système de recyclage doit être rentable économiquement parlant. Devant la faible valeur ajoutée d'un seul produit, il est donc nécessaire d'avoir un volume suffisant de produits pour approvisionner le marché des produits ou des pièces d'occasion, comme celui des matières premières secondaires. Il s'agit donc pour la collecte de récupérer le maximum de produits d'origines les plus diverses. La chaîne inverse fonctionnant en flux poussé (du moins dans sa première portion), il est nécessaire d'aller chercher les produits là où ils se trouvent. Dans le cas inverse, le client est tenté de prendre la solution la plus simple, c'est-à-dire de se débarrasser au

plus vite de cette nuisance. L'objectif de rentabilité s'exprime également par des coûts de fonctionnement calculés au plus juste.

### **2.3.2.4 La minimisation des coûts**

La rentabilité du système de collecte pris indépendamment des autres constituants de la chaîne inverse n'a pas énormément de sens. D'une part, les acteurs actuels de la collecte sont souvent les collectivités locales, pour qui la priorité principale n'est pas le profit réalisé, mais plutôt le service proposé aux habitants de la commune. D'autre part, la collecte fait partie d'une chaîne logistique inverse globale, où le résultat économique du recyclage est évalué en fin de chaîne, lors de la revente des matières obtenues (produits, pièces, matières premières) sur les marchés secondaires. Dans cette optique, la collecte, qui représente le premier maillon de la chaîne par son rôle d'approvisionnement, est plutôt génératrice de coûts, liés entre autres à la gestion des transports, du stockage, du personnel etc. Les coûts de la collecte représentent une part importante des coûts globaux liés à la récupération des produits électriques et électroniques en fin de vie (Poquet, 1997)<sup>[40]</sup>, (Ademe, 1998)<sup>[1]</sup>.

Pourtant, il existe des situations où des modes de collecte peuvent générer des revenus (lors du ramassage à domicile par exemple). De même, les coûts globaux de la récupération des produits de l'étude ne prennent pas en compte l'apparition de nouvelles technologies liées au désassemblage ou au tri des produits et matières, technologies semi-automatisées ou complètement automatisées qui seront sûrement génératrices de coûts d'exploitation sans rapport avec les coûts actuels.

### **2.3.2.5 La conservation de l'état des produits**

Lors du traitement des produits, que ce soit au niveau du transport, du stockage, voire du diagnostic, il est nécessaire de conserver le produit dans le meilleur état possible. Il n'est jamais bon de détériorer inutilement un produit par une dégradation de son aspect extérieur par exemple, ou par une perte de fonctionnalité. Des options de récupération peuvent alors être malencontreusement écartées, et l'éventail des possibilités de recyclage se réduire. Pour la collecte, il ne s'agit donc pas seulement d'amener les produits vers les centres de recyclage, mais de les y amener dans le meilleur état possible.

### **2.3.2.6 Le pré-diagnostic des produits**

Dans l'hypothèse où, lors de la collecte, il est possible d'obtenir des informations sur les causes de la séparation entre le propriétaire et son produit (panne non réparable, produit démodé ...), ces informations permettent d'établir un pré-diagnostic sur le produit collecté. Ce pré-diagnostic peut ensuite être utilisé lors du diagnostic réel du produit et aider à la décision pour fixer l'option de récupération qui sera choisie pour ce produit.

### **2.3.2.7 La performance du service client**

Les produits encombrants en fin de vie se trouvent en général chez les habitants des communes. Faire en sorte que ces consommateurs se séparent de leurs produits pour les diriger vers une unité de récupération passe par un service client performant et agréable à utiliser. C'est le rôle de la collecte, qui est le contact privilégié entre les habitants et les installations de recyclage. Un véhicule qui se déplace jusqu'au domicile de l'habitant pour le débarrasser d'un produit

encombrant, suite à un rendez-vous par contact téléphonique par exemple, augmente la satisfaction du client. D'une manière générale, il faut rechercher la satisfaction des consommateurs (les ménages) vis-à-vis des services de collecte proposés pour les sensibiliser au problème du recyclage. Un service de collecte performant et satisfaisant au niveau de la source de la chaîne inverse permet d'accroître les flux de retour par une fidélisation des ménages à certains modes de collecte, donc d'accroître la rentabilité de la chaîne de valeur.

### 2.3.2.8 Résumé des objectifs

Les objectifs vers lesquels le système de collecte des produits électriques et électroniques encombrants devrait tendre sont résumés dans le tableau (Tableau 2.4).

Objectifs	Arguments
Contrôle et conduite des flux	Maîtrise du système de récupération
Filtre des déchets	Environnement : éviter le dépôt sauvage
Augmentation du volume des déchets	Rentabilité du système de récupération
Minimisation des coûts	Rentabilité du système de récupération
Conservation de l'état du produit	Qualité de la récupération
Pré-diagnostic des produits	Aide à la décision pour la stratégie de récupération
Performance du service client	Satisfaction et fidélisation des consommateurs

**Tableau 2.4 : Objectifs de la collecte des encombrants**

### 2.3.3 Spécificités de la collecte

Dans ce paragraphe, nous allons présenter les caractéristiques spécifiques liées à la récupération des produits électroniques arrivant en fin de vie, et nous allons démontrer que les systèmes de collecte « classiques » ne peuvent s'appliquer parfaitement à ces types de déchets. Tout au long de cette partie, un parallèle est donc établi avec la collecte des déchets ménagers classiques, dont une analyse se trouve dans les paragraphes ci-dessus.

#### 2.3.3.1 Un potentiel de revalorisation unitaire élevé

Les produits électriques et électroniques des ménages possèdent une forte potentialité de revalorisation unitaire, qui est due à leur composition en matières premières et pièces détachées (plastiques, matières ferreuses, cartes électroniques ...), à leur mode de fabrication (assemblage, soudage ...) qui autorise une récupération en fonction des techniques disponibles (désassemblage par exemple), à l'éclosion de marchés secondaires avec une demande conséquente sur ces produits et composants revalorisés.

#### 2.3.3.2 Des caractéristiques physiques uniques

En comparaison des déchets classiques (ordures ménagères), les produits blancs et bruns présentent des caractéristiques physiques uniques, que ce soit en volume ou en poids : une machine à laver est a priori plus encombrante qu'un emballage plastique, et ne peut être collectée

ni traitée de la même manière. Une déchetterie traite les ordures ménagères par un pré-tri souvent manuel, où les déchets sont disposés sur un tapis roulant et où des personnes sont chargées de classer les déchets suivant leur catégorie (matières ferreuses, plastiques etc..). Il est difficilement envisageable de faire subir ce même traitement à un téléviseur ou une machine à laver ! D'autant plus que la matière première, source de valeur ajoutée, n'a pas le même niveau d'accessibilité pour l'emballage plastique et la machine à laver. Le recyclage des produits techniques en fin de vie nécessite l'emploi de techniques spécifiques de démontage et de désassemblage, qui n'existent pas dans le recyclage des déchets ménagers classiques.

### 2.3.3.3 Une fréquence de retour unitaire faible

Les volumes de retour des déchets encombrants ne sont pas comparables avec ceux des déchets classiques. Si le tonnage n'est pas une mesure représentative, la fréquence de collecte semble un paramètre d'étude plus pertinent : alors que les déchets ménagers classiques nécessitent un ramassage journalier, les déchets encombrants n'apparaissent que plus rarement dans le réseau de la récupération. La plupart des communes n'ont-elles pas mis en place un système de tournée de collecte régulier, mais relativement espacé dans le temps (les « monstres ») ?

### 2.3.3.4 Une accessibilité des produits complexe

Enfin, les produits électroménagers encombrants, en plus d'être disséminés sur une zone géographique, possèdent des degrés d'accessibilité et de transportabilité plus complexes que ceux des déchets classiques. Par exemple, certaines classes de la population peuvent être obligées de faire intervenir une aide extérieure lors de la séparation d'objets encombrants : nous pensons ici particulièrement aux personnes à mobilité réduite et aux personnes âgées. Mais d'une manière plus générale, se débarrasser d'une machine à laver ou d'un réfrigérateur peut impliquer un investissement humain différent de celui demandé pour les ordures ménagères.

### 2.3.3.5 Résumé des spécificités

Nous venons donc de passer en revue un certain nombre d'arguments témoignant de la nécessité de systèmes de collecte adaptés aux produits encombrants des ménages (Tableau 2.5), en soulignant bien que les systèmes de collecte des déchets ménagers classiques ne pouvaient pas répondre entièrement à nos besoins. En réalité, il existe déjà des moyens de collecte spécifiquement orientés vers ce genre de produits, mis en place par les collectivités, et que nous allons présenter dans la section suivante.

Spécificités	Produits blancs et bruns	Ordures ménagères
Potentiel unitaire de revalorisation	Elevé	Très faible
Caractéristiques physiques	Gros volume, poids important	Petit volume, petit poids
Fréquence de retour unitaire	Faible	Élevée
Accessibilité	Complexe	Aisée

**Tableau 2.5 : Spécificités des systèmes de collecte**

## 2.3.4 Les différents modes de collecte

Deux grandes méthodes de collecte des produits électriques et électroniques encombrants se distinguent : celle par enlèvement, et celle par apport volontaire. La collecte par enlèvement

consiste en un déplacement d'un transporteur venant récupérer le produit usagé au domicile du particulier. On y retrouve dans cette catégorie la tournée périodique des « monstres », la collecte au porte-à-porte sur appel téléphonique, ainsi que l'échange à domicile lors de la livraison d'un nouvel appareil. La collecte par apport volontaire voit le consommateur apporter son produit usagé sur des lieux de centralisation et de stockage des produits usagés, comme les déchetteries par exemple, ou bien chez un grand distributeur. Détaillons maintenant chaque mode de collecte nommé, en précisant les acteurs principaux et les situations d'application les plus favorables.

### 2.3.4.1 La collecte par apport volontaire

La collecte par apport volontaire incite le consommateur à agir activement pour le recyclage, puisque celui-ci se déplace vers les lieux de collecte pour y laisser ses déchets. Quatre possibilités s'offrent à lui : la décharge municipale, la déchetterie, les associations, et la grande distribution.

#### 2.3.4.1.1 La décharge municipale

Il s'agit principalement de l'apport des produits usagés directement sur les décharges municipales. Ce mode de collecte ou d'abandon devra à terme être éliminé, car il ne permet pas de bénéficier rapidement du produit pour un diagnostic et une revalorisation. Rappelons que les décharges publiques seront interdites dès 2002 par des mesures législatives (Ademe, 1998)<sup>[1]</sup>.

#### 2.3.4.1.2 La déchetterie

La déchetterie est un équipement d'apport et de tri, et non de traitement des déchets. Elle est constituée par un espace aménagé, gardé et clôturé, dans lequel professionnels et particuliers peuvent se débarrasser de certains de leurs déchets en les déposant dans des bennes spécifiques. Les déchets acceptés sont les déchets encombrants (électroménager, meubles, literie ...), les produits recyclables (papiers, cartons, plastiques ...), et les déchets spéciaux des ménages (piles, batterie, huiles usagées ...). La tendance générale des moyens mis en œuvre par les collectivités locales vise à un développement rapide du nombre de déchetteries pour la collecte des encombrants. Ainsi, en région Rhône-Alpes, il y a en 1996 une déchetterie pour 25 000 habitants en moyenne (FIEE, 1997)<sup>[30]</sup>. Le développement de ce mode de collecte a des effets réducteurs sur les fréquences de collecte des encombrants en porte-à-porte ou en lieu fixe, voire même à la suppression de ces types de collecte dans certaines situations.

La déchetterie n'a pas pour objectif une revalorisation directe des produits électriques et électroniques en fin de vie. Initialement conçue comme une solution polyvalente et flexible dans son organisation pour diminuer les dépôts sauvages, elle s'avère indispensable car elle répond à des besoins autant de la part des consommateurs que des professionnels qui usent de sa potentialité. La déchetterie doit être vue comme un point d'ancrage pour la collecte : elle se trouve à la « croisée des chemins » et constitue une solution pérenne avec un rôle de structuration de solutions nouvelles. La déchetterie devrait être vue comme favorisant le réemploi des produits, grâce à un stockage séparé et une formalisation des relations avec les structures d'insertion. Le recyclage des produits devrait également être développé, par une meilleure orientation des produits bruns vers la benne ferraille – hors téléviseurs et écrans (comme les produits blancs actuellement), et en stockant de manière séparée les téléviseurs et les moniteurs.

### 2.3.4.1.3 Les associations

Depuis quelques années, à la faveur des pouvoirs publics, des associations telles que ENVIE<sup>[186]</sup>, EMAUS, UTILE voient le jour, et proposent des solutions de collecte des encombrants à la population. Elles sont un moyen de plus offert aux consommateurs de se débarrasser de leurs produits usagés. Notons que ces associations peuvent également jouer le rôle de collecteur par enlèvement dont nous parlerons ci-dessous.

### 2.3.4.1.4 La grande distribution

La collecte effectuée par la grande distribution est le moyen préconisé par le rapport (Desgeorges, 1994)<sup>[28]</sup>. Il consiste à dire que l'acheteur d'un produit neuf dans un magasin peut rapporter son appareil usagé au moment de l'achat sur le lieu de vente. Si ce mode de collecte est encore actuellement sous-développé au niveau national, certaines régions ont déjà porté l'accent sur la reprise par la grande distribution (320 000 appareils environ repris en Rhône-Alpes, soit 44% du gisement total de la région, (FIEE, 1997)<sup>[30]</sup>). Le consommateur peut également apporter son produit pour une réparation au Service Après-Vente de la société, et abandonner le produit devant un prix de réparation trop élevé. Il nécessite de la part de la grande distribution des infrastructures logistiques adaptées, que ce soit pour l'entreposage (stockage des produits à recycler) ou pour leur acheminement vers des lieux de diagnostic, de tri et de traitement.

En ce qui concerne le devenir des appareils collectés, la gestion des produits en fin de vie est étroitement liée à la taille et au niveau de spécialisation du distributeur, ainsi qu'à la quantité d'appareils récupérés et aux paramètres de l'offre en matière de gestion des déchets. De plus, les flux post-reprise des appareils récupérés semblent difficilement quantifiables, du fait de pratiques peu transparentes (réemploi en interne, revente ...), même si les services communaux de collecte sont relativement bien utilisés, principalement les déchetteries. De nombreuses grandes surfaces bénéficient d'une benne ferraille, et travaillent en collaboration avec les ferrailleurs (FIEE, 1997)<sup>[30]</sup>.

Selon (Desgeorges, 1992)<sup>[27]</sup>, l'apport par acheteur doit être un moyen de collecte à développer à une plus grande envergure que celle existant actuellement, car il présente deux gros avantages : la disparition de la collecte par des mécanismes d'incitation financière et environnementale ainsi qu'une plus grande espérance de retour des produits, et également le développement et la facilitation du tri. Cependant, deux inconvénients doivent être considérés : une gestion lourde des mécanismes d'enclenchement et de suivi liés à ce type d'échanges, ainsi que la présence d'endroits dédiés à la remise et au stockage des produits en fin de vie, qui peut provoquer une gêne pour les collecteurs. De plus, ce mode de collecte apparaît bien adapté pour les produits portables en fin de vie (transportables à la main, comme les magnétoscopes, les grille-pain ..). Hors, une des contraintes majeures des produits encombrants reste justement l'encombrement, et cette contrainte reste aujourd'hui encore un frein majeur pour la grande distribution.

### 2.3.4.2 La collecte par enlèvement

La collecte par enlèvement est un mode moins contraignant que l'apport volontaire, et rassemble trois options : la demande par téléphone, la collecte périodique, et l'enlèvement lors de la livraison d'un nouvel appareil.

#### 2.3.4.2.1 La collecte sur demande : le numéro de téléphone vert

La collecte sur demande d'un appareil usagé se manifeste lorsqu'un particulier demande à un tiers de venir ramasser son produit usagé à son domicile. La demande est en général faite par téléphone, et vise le plus souvent des services de ramassage de la collectivité. Ce mode de collecte existe principalement dans les grandes agglomérations, et est proposé par la commune. Il n'existe pas de tri en amont au niveau du particulier, il est donc nécessaire de trier en aval, au moment où le produit intègre un centre de recyclage. Ce tri n'est pas systématiquement réalisé aujourd'hui, et est préconisé par plusieurs rapports pour une meilleure revalorisation.

#### 2.3.4.2.2 La collecte périodique

La collecte périodique, couramment appelée « monstres », consiste à établir des tournées périodiques au sein de l'agglomération. Chaque tournée a des points d'arrêt plus ou moins déterminés et espacés d'une distance raisonnable. Les particuliers ont la charge d'amener leurs produits encombrants sur ces points de ramassage. Ce type de collecte présente certains avantages : la certitude de récupérer en un minimum de temps et d'efforts un gros volume de produits encombrants. Mais elle présente également plusieurs inconvénients : l'anonymat du propriétaire (aucune information n'est disponible sur la cause de l'abandon), le tri en aval nécessaire (il n'existe aucune certitude sur la nature des déchets collectés : matelas, machines à laver, chaises peuvent très bien cohabiter, et doivent être collectés), la sécurité du personnel (voir Annexe 1). Mais le principal inconvénient reste la cannibalisation des déchets. La tournée de ramassage passant en général le matin, les produits sont laissés sur les points de collecte la veille au soir. Il arrive fort souvent que ces produits se retrouvent le matin « pillés » de leur valeur principale, dépouillés de leurs pièces détachées facilement détachables et à valeur ajoutée. Le produit ainsi collecté ne possède alors plus de valeur suffisante pour être réintégré dans le marché d'une manière ou d'une autre : que faire d'un squelette de machine à laver ? Selon (Desgeorges, 1992) <sup>[27]</sup>, ce type de collecte, qui apparaît essentiellement dans les grandes agglomérations, est également sous-dimensionné par rapport aux enjeux nationaux du recyclage.

#### 2.3.4.2.3 L'enlèvement par livreur (échange « un pour un » à domicile)

Il intervient lorsqu'un consommateur achète un nouveau produit et désire se faire livrer à domicile. Le vendeur propose parfois l'échange à domicile entre l'ancien et le nouveau. Ce type de collecte est utilisé comme argument de vente des sociétés, et est souvent le fait de la grande distribution. Un produit récupéré de cette façon a trois destinations possibles : l'orientation vers un second marché ou vers l'exportation si l'état du produit le permet, le démontage pour avoir des pièces de rechange, ou enfin l'entrée sur un circuit de revalorisation ou de mise en décharge (Desgeorges, 1992) <sup>[27]</sup>. Le souci de la grande distribution reste de toute façon de garder un solde positif. Si ce mode de collecte est séduisant, il semble peu concevable qu'il puisse prendre en compte l'ensemble des demandes de la collecte, ceci pour deux raisons : il faudrait être sûr que toutes les sociétés livreuses proposent ce service, et il faudrait que tous les consommateurs utilisent ce service. Ces deux conditions sont difficiles à mettre en œuvre, et entravent la liberté d'action des deux acteurs de la récupération du déchet. C'est pourquoi nous voyons cette solution de collecte intéressante, mais venant en complément d'autres moyens.

## 2.4 Discussion

Dans les deux sections précédentes, nous avons successivement abordé les systèmes de collecte existants pour les déchets ménagers classiques, puis pour les produits électriques et électroniques

encombrants. L'idée est d'analyser les modes de fonctionnement actuellement en vigueur, et d'évaluer leur potentiel et leur limite par rapport à l'émergence des marchés secondaires et des nouveaux modes de récupération et de recyclage des produits encombrants.

Concernant le ramassage des produits blancs et bruns, des solutions existent déjà et peuvent être répertoriées en deux types distincts : la collecte par apport volontaire, et la collecte par enlèvement au domicile. Chaque type peut être réalisé de diverses manières, dont le détail est donné dans les pages précédentes. Citons néanmoins l'apport volontaire en décharge municipale, en déchetterie, vers des associations ou vers la grande distribution, et l'enlèvement à la demande, lors de tournées périodiques, enfin lors de la livraison d'un produit neuf.

La comparaison avec la collecte des ordures ménagères classiques fait ressortir quatre différences fondamentales, qui rendent caduque l'application des modes de ramassage correspondant au cas des produits encombrants : un potentiel unitaire de revalorisation élevé, allié à une fréquence de retour faible, ainsi que des spécificités physiques uniques et une accessibilité complexe aux composants de base possédant de la valeur, caractérisent les produits blancs et bruns. Tout juste les conclusions théoriques sur les performances des systèmes de collecte peuvent-elles s'appliquer à notre problématique. Cependant, l'étape de tri est quasi-inexistante dans le processus de récupération au niveau produit, même si le tri des matières premières extraites et pièces détachées issues du désassemblage n'est pas à exclure. Nous verrions plutôt l'étape de tri remplacée par l'étape de pré-diagnostic des produits, mais celle-ci serait toujours réalisée dès que possible, et non pas en fonction de la densité de la population locale.

Toutes les agglomérations, toutes les communes présentent au minimum l'un des modes de collecte des produits encombrants. Le plus souvent, ce sont deux, voire trois options qui sont en réalité proposées à la population, afin d'élargir l'éventail des possibilités, avec la combinaison entre l'apport volontaire et l'enlèvement à domicile. Cependant, nous gageons que certaines des manières de collecter précitées ne pourront survivre à l'explosion des volumes de déchets créée par le développement de nouvelles techniques de revalorisation. Si la mise en décharge municipale est amenée à disparaître en 2002, si la tournée périodique ne garantit aucunement la qualité des produits récupérés (cannibalisation), qu'en est-il des autres possibilités ? Nous avons vu que l'enlèvement lors de la livraison d'un produit neuf est une situation qui risque de survenir assez peu fréquemment. L'apport volontaire à des associations concerne un nombre limité de produits en fin de vie, comparé à l'apport volontaire en déchetterie, notamment à cause de la plus grande couverture géographique du réseau des déchetteries. La grande distribution, quant à elle, offre une couverture géographique au moins aussi importante que celle des déchetteries, mais le développement de ce mode de ramassage passe par de larges incitations financières, et un effort de réorganisation interne nécessaire pour l'accueil des produits en retour.

Au final, nous retenons donc trois options pour assurer la fonction de collecte : l'apport volontaire en déchetterie ou en grande distribution, et l'enlèvement à la demande. Cependant, devant la caractéristique physique principale des produits de l'étude, c'est-à-dire leur encombrement, notre avis est que la collecte par enlèvement à la demande du consommateur est le mode en devenir dans les systèmes de collecte. C'est donc lui qui va être à partir de maintenant le centre de nos travaux, et pour lequel nous allons présenter une solution de planification opérationnelle de collecte, basée sur la gestion d'une flotte de véhicules devant satisfaire les contraintes liées à la spécificité des produits tout en réalisant les objectifs annoncés par le système de ramassage. Notons tout de même que la présentation qui va suivre, qui se restreint à un seul type de collecte, peut facilement être étendu au périmètre des trois options de ramassage.

## 2.5 Planification opérationnelle de la collecte

La discussion ci-dessus nous permet de mieux définir le cadre de notre travail. Étant entendu que nous abordons précisément la collecte par enlèvement des produits en fin de vie à la demande du possesseur, il nous faut maintenant mettre en évidence les caractéristiques du problème et les moyens mis en œuvre pour le résoudre.

Nous pouvons sans prétention partir de l'hypothèse qu'un réseau d'installations de récupération des produits manufacturés existe et couvre la zone géographique sur laquelle s'applique la collecte. Nous nous basons pour ce faire sur les résultats des travaux de (Krikke, 1998)<sup>[16]</sup> pour la conception du réseau logistique inverse dans une vue tactique (voir 1.2.6.1 - Niveau tactique). Les installations de ce réseau sont spécialisées sur des types de produits de l'étude. Une flotte de véhicules de ramassage est à disposition pour satisfaire les demandes de collecte émises par la population. Il s'agit donc de définir périodiquement une planification de cette flotte pour répondre aux besoins des habitants, en prenant les aspects suivants en considération :

- la nature encombrante des produits usagés, qui génère des efforts de manipulation non négligeables dans le transport ;
- le respect horaire de passage des véhicules chez les consommateurs qui prennent rendez-vous pour le ramassage de leur produit ;
- les multiples destinations possibles prises par le produit en fin de vie une fois qu'il est collecté et diagnostiqué ;
- l'acheminement d'un produit de son lieu de chargement vers son lieu de déchargement par un seul et même véhicule ;
- le nécessaire effort de rentabilité financière, se traduisant par une gestion des coûts rigoureuse.

Vouloir planifier une flotte de véhicules en considérant l'ensemble des aspects cités impose de passer par une étape de modélisation, dans le triple objectif :

- de clarifier le problème et de poser les fondements et les notations qui vont nous servir pour atteindre notre but ;
- de mieux maîtriser la compréhension de notre travail et mieux présenter les idées qui vont nous suivre tout au long de ce rapport ;
- d'identifier notre problème par rapport à la communauté scientifique, pour une bonne divulgation des travaux et pour pouvoir utiliser des méthodes déjà existantes développées sur le même sujet.

Ainsi, le problème de planification opérationnelle de la collecte peut être modélisé par un problème d'Optimisation Combinatoire, qui consiste à router une flotte de véhicules sous les contraintes exprimées ci-dessus. Ce problème est une extension du bien connu problème du voyageur de commerce, et se nomme :

**« Le problème de chargement et de déchargement avec contraintes de :**

- **capacité sur les véhicules ;**
- **fenêtres temporelles à respecter lors du passage des véhicules sur les villes à visiter ;**
- **précédence entre les villes de chargement et de déchargement d'un même produit. »**

Il est connu en anglais sous le nom de « Pickup and Delivery Problem with Time Windows » (PDPTW). Les deux chapitres suivants sont consacrés à l'étude et la résolution de ce problème.

## 2.6 Conclusions

Il est maintenant temps d'aborder les conclusions de ce chapitre portant sur la collecte des produits manufacturés encombrants de l'électroménager.

### 2.6.1 Ce qu'il faut retenir

L'émergence de structures et de mécanismes dédiés à la récupération et au recyclage des produits manufacturés arrivant en fin de vie implique le développement des systèmes de collecte de ces produits pour garantir un flux de retour maximal. C'est la pérennité du processus global du recyclage qui est en jeu, car la collecte joue le rôle crucial d'approvisionnement unique du système inverse et est un des acteurs du recyclage générant une partie importante des coûts globaux.

Proposer de nouvelles solutions de ramassage passe obligatoirement par une analyse des méthodes existantes, afin d'en cerner les limites et leur potentialité future. Les systèmes de collecte dédiés successivement aux ordures ménagères classiques, puis spécifiquement aux produits encombrants, sont abordés. Il ressort de cette étude que les mécanismes de la collecte des ordures ménagères ne peuvent s'appliquer dans le cas des produits manufacturés encombrants, car ceux-ci se différencient fortement par un potentiel unitaire de revalorisation élevé, allié à une fréquence de retour faible, ainsi que des spécificités physiques uniques et une accessibilité complexe aux composants de base possédant de la valeur.

Les différents modes de collecte des produits blancs et bruns sont ensuite examinés. Ils peuvent être classés en deux types : la collecte par apport volontaire du consommateur vers des lieux de recueillement, et la collecte par enlèvement à domicile. Parmi ces deux types de collecte, trois options retiennent notre attention, car elles nous semblent les plus adaptées aux évolutions des marchés secondaires de la récupération : l'apport volontaire en déchetterie ou en grande distribution, et l'enlèvement à domicile à la demande de l'habitant.

Après avoir restreint notre champ d'action à la collecte par enlèvement à la demande, qui, par les caractéristiques physiques des produits encombrants, nous semble la méthode présentant le plus gros potentiel, nous mettons en évidence que la planification opérationnelle de la collecte passe par l'étude du problème de routage de véhicules suivant : le problème de chargement et de déchargement avec contraintes de précédence, de capacité et de fenêtres temporelles.

### 2.6.2 Ce qui va suivre

Les deux chapitres suivants vont traiter particulièrement du problème de routage de véhicule énoncé ci-dessus. Une modélisation mathématique est proposée dans le chapitre 3. Devant la complexité de ce problème, la méthodologie d'approche consiste à traiter dans un premier temps le cas d'un véhicule, et d'étendre ensuite les résultats obtenus au cas de plusieurs véhicules.

# Chapitre 3 Planification opérationnelle pour un véhicule

## 3.1 Introduction

L'analyse du problème de la collecte des produits électriques et électroniques encombrants de l'électroménager nous a conduit à considérer le problème de la gestion de la flotte de véhicules censée collecter les produits. Nous avons fait ressortir dans le chapitre précédent un mode particulier de collecte, le ramassage des produits usagés à domicile sur la demande de l'habitant, qui nous paraît être le mode qui présente le plus gros potentiel de développement. En nous concentrant sur ce type de collecte, nous nous apercevons que la flotte de véhicules est soumise à trois types de contraintes, qui ont été mises en évidence : la capacité des véhicules, la précedence entre les sites de chargement et de déchargement des produits, et les intervalles de temps lors de la visite des véhicules sur les sites.

L'étude et la résolution d'un problème aussi complexe que celui auquel nous faisons face ne peuvent se concevoir sans une étape préalable de modélisation, qui permet de faire ressortir les caractéristiques essentielles du problème et de poser les définitions et les notations indispensables à une bonne communication et une bonne compréhension. Nous allons voir que notre problème de collecte se rapproche d'un des problèmes les plus complexes de l'optimisation combinatoire, le problème de chargement et de déchargement avec contraintes de capacité, de fenêtres temporelles et de précedence (« Pickup and Delivery Problem with Time Windows » PDPTW). Après avoir redéfini nos hypothèses de travail, une modélisation mathématique du problème est énoncée, les méthodes de résolution existantes sont analysées, et une stratégie de résolution innovante est finalement présentée.

## 3.2 Présentation du problème

Le problème de chargement et de déchargement avec fenêtres temporelles et capacité peut être présenté comme suit. Supposons un ensemble de  $n$  clients, chaque client émettant une demande de transport sur une quantité devant être acheminée d'un point distinct à un autre point distinct.

Chaque arrêt du véhicule sur les points origine et destination caractérisant les demandes doit être fait à l'intérieur d'une fenêtre temporelle connue à l'avance.

Nous construisons alors un graphe  $G(S,E)$  non orienté complet où  $S=\{s_i / i = 0, \dots, 2n\}$  est l'ensemble des sommets, et  $E=\{(s_i, s_j) / i = 0, \dots, 2n, j = 0, \dots, 2n, i \neq j\}$  représente l'ensemble des arêtes du graphe. Dans ce graphe, le sommet  $s_0$  est un dépôt, les sommets restants représentent les villes de chargement et de déchargement des clients.

Chaque sommet  $s_i$  ( $i = 0, \dots, 2n$ ), est caractérisé par :

- une quantité fixe  $d_i$  positive à charger (resp. décharger) par le véhicule ( $d_0 = 0$  au sommet  $s_0$ ) ;
- un temps de service nécessaire au traitement de la demande du sommet : temps de chargement (resp. déchargement) de la demande si  $s_i$  est une ville de chargement (resp. déchargement) ;
- une fenêtre temporelle  $[e_i, l_i]$ , où  $e_i$  est la borne inférieure et  $l_i$  la borne supérieure de la fenêtre temporelle du sommet  $s_i$ , pendant laquelle le chargement (resp. déchargement) est autorisé (avec  $e_0$ , la date de début au plus tôt et  $l_0$  la date de fin au plus tard de chaque véhicule sur le dépôt).

A chaque arête  $(s_i, s_j)$  est associée une distance (coût)  $c_{ij}$  ainsi qu'un temps de transport  $t_{ij}$  (il est supposé dans le cas général que la matrice de distance  $D = (d_{ij})$  satisfait l'inégalité triangulaire, i.e.  $d_{ij} + d_{jk} \geq d_{ik}$ ,  $\forall i, j$  et  $k$ ).

Etant donnée une flotte de  $m$  véhicules (non nécessairement identiques), chacun de capacité  $q_v$  ( $v = 1, \dots, m$ ), l'objectif est de construire un ensemble de routes  $R = \{R_v, v = 1, \dots, m\}$ , de coût minimum, démarrant et finissant sur le même dépôt  $s_0$ , que doit emprunter la flotte de véhicules. Pour chaque véhicule  $v$ , la route  $R_v$  est un ordonnancement sur un sous-ensemble des sommets du graphe :  $R_v = (s_i, i = 0, \dots, 2n)$ .  $R$  est construit de telle manière que les contraintes suivantes sont satisfaites :

- **Couplage** : chaque route est servie par un seul véhicule ;
- **Circuit Hamiltonien** : chaque sommet  $s_i$  ( $i = 1, \dots, 2n$ ) est visité exactement une fois ;
- **Capacité** : la commande livrée sur une route ne doit pas dépasser la capacité du véhicule ;
- **Précédence** : la ville de chargement pour un client doit être visitée avant la ville de déchargement ;
- **Disponibilité** : la date de départ de chaque véhicule est supérieure ou égale à  $e_0$  ;
- **Retour** : la date de fin au plus tard du véhicule est inférieure ou égale à  $l_0$  ;
- **Fenêtres temporelles** : pour chaque sommet, le service doit être fait dans la fenêtre temporelle correspondante.

La définition de la fenêtre temporelle doit être affinée, car deux types de fenêtres temporelles sont rencontrés dans la littérature :

- **"Soft time windows"** : le véhicule peut arriver avant la borne inférieure ou après la borne supérieure. Si le véhicule arrive en avance, il doit attendre pour commencer le service. S'il est en retard, une pénalité est ajoutée à la fonction objectif ;
- **"Hard time windows"** : le véhicule doit arriver avant la borne supérieure de la fenêtre temporelle pour chaque client. Dans ce cas, la taille de la flotte de véhicule est une variable de décision, car la contrainte temporelle est ici une contrainte forte jouant sur la faisabilité de l'instance à résoudre.

Dans la suite de notre travail, nous nous consacrons uniquement à l'étude d'instances où les fenêtres temporelles sont du type « hard time windows ». Une fois la structure du processus de résolution mise en place, une phase supplémentaire permettra d'introduire la flexibilité temporelle induite par les fenêtres « soft ».

Il existe une variante particulière du (PDPTW) dans laquelle toutes les quantités des clients sont identiques : il est alors question de transport de personnes (« Dial A Ride Problem » DARP), notamment des personnes âgées et des personnes à mobilité réduite. Dans cette situation, les contraintes temporelles imposées par les clients prédominent les contraintes de capacité du véhicule, et le coût associé à une route est une combinaison du temps de transport et de l'insatisfaction du client.

### 3.2.1 Exemple

Considérons l'exemple suivant afin d'illustrer la présentation du problème traité. Pour une facilité de compréhension, nous nous contentons de prendre en compte les contraintes de capacité et de précedence. Les fenêtres temporelles sont donc définies de manière à ne pas contraindre la résolution. Cet exemple décrit une instance à dix clients et un véhicule. Le temps de service de chargement est considéré égal à deux fois le temps de service de déchargement. Le véhicule débute et finit sa route au dépôt D0. Sa capacité vaut  $q_1 = 100$ . Le temps de parcours entre deux nœuds est pris égal à 1.5 multiplié par la distance entre ces deux nœuds.

Client	Origine		Destination		Quantité
	Coordonnées	Fenêtre temporelle	Coordonnées	Fenêtre temporelle	
C1	(30, -20)	(0, 5000)	(-80, -20)	(0, 5000)	20
C2	(-20, 60)	(0, 5000)	(100, 100)	(0, 5000)	15
C3	(-10, -30)	(0, 5000)	(30, 100)	(0, 5000)	30
C4	(40, 50)	(0, 5000)	(70, 60)	(0, 5000)	20
C5	(40, 90)	(0, 5000)	(80, 20)	(0, 5000)	10
C6	(-70, 70)	(0, 5000)	(70, -70)	(0, 5000)	35
C7	(30, -50)	(0, 5000)	(-20, -70)	(0, 5000)	25
C8	(80, -40)	(0, 5000)	(-60, -30)	(0, 5000)	30
C9	(-50, -80)	(0, 5000)	(-90, 10)	(0, 5000)	10
C10	(-50, 30)	(0, 5000)	(20, -100)	(0, 5000)	15

**Tableau 3.1 : Description de l'exemple**

Une solution possible de l'exemple est présentée analytiquement dans le tableau (Tableau 3.2) et schématiquement par la figure (Figure 3.1) ci-dessous. Pour des facilités d'écriture, les sommets de chargement sont préfixés par le signe +, et les sommets de déchargement sont préfixés par le signe -. Le coût total pour cette route est 995.498118, et correspond à la distance totale parcourue par le véhicule.

Sommet	Date d'arrivée	Capacité arrivante	Opération
0	0	0	0
+3	47	0	30
+10	186	30	15
+6	268	45	35
+2	379	80	15

-3	490	95	-30
+5	526	65	10
+4	596	75	20
-4	664	95	-20
-2	749	75	-15
-5	880	60	-10
+8	975	50	30
-6	1052	80	-35
+1	1165	45	20
+7	1230	65	25
-10	1332	90	-15
-7	1414	75	-25
+9	1473	50	10
-8	1559	60	-30
-1	1608	30	-20
-9	1665	10	-10
0	1806	0	0

Tableau 3.2 : Solution de l'exemple (1-PDPTW)

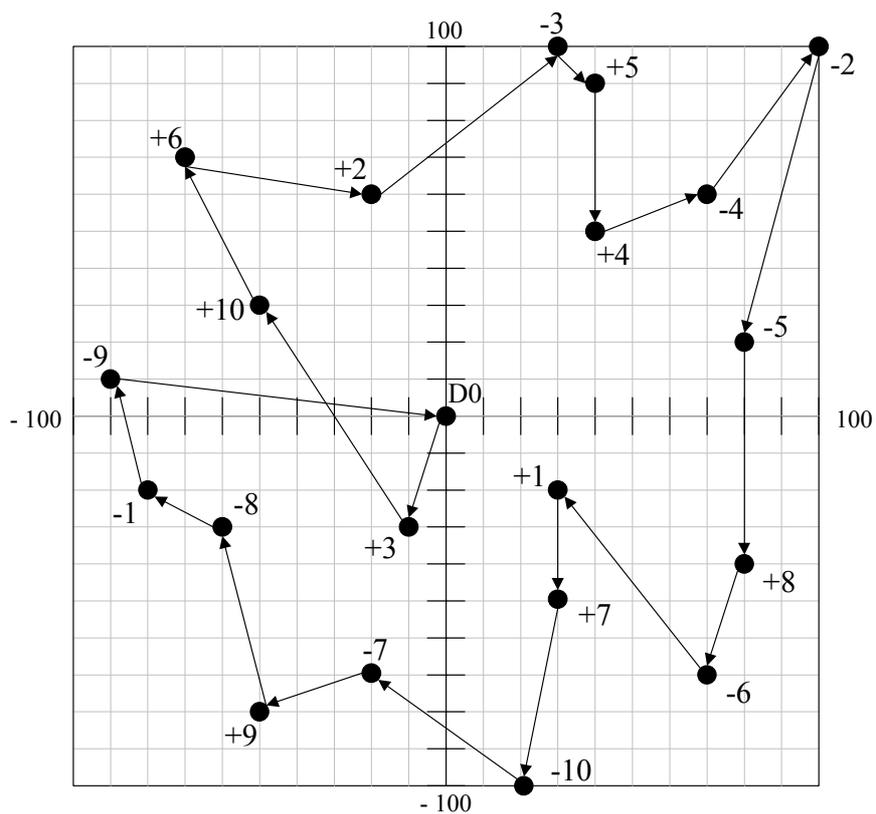


Figure 3.1 : Solution de l'exemple (1-PDPTW)

### 3.3 Modélisation

Nous présentons ci-dessous la modélisation mathématique du problème de chargement et de déchargement sous les contraintes de fenêtres temporelles et de capacité. Précisons que le modèle

proposé est un modèle global, dans le sens où il prend en compte une flotte de plusieurs véhicules, et non pas un seul véhicule comme le laisserait supposer le titre du chapitre. L'avantage du modèle "véhicules multiples" est qu'il est plus complet, qu'il n'est plus nécessaire de le représenter dans le chapitre suivant, et que la transition "véhicules multiples" – "véhicule simple" est aisée.

### 3.3.1 Notations

Soit  $n$  le nombre de clients, indexé par  $i$ . Chaque client émet une requête de transport  $r_i$ . À chaque requête de transport sont associés un nœud de chargement  $s_i$  et un nœud de déchargement  $s_{n+i}$ . Les nœuds  $s_0$  et  $s_{2n+1}$  sont associés au dépôt. Cette numérotation des nœuds clarifie l'ensemble des éléments du problème, à savoir les clients et les nœuds du réseau.

Soit  $N = \{0, 1, \dots, n, n+1, \dots, 2n, 2n+1\}$  l'ensemble des indices des nœuds du réseau,  $P^+ = \{1, \dots, n\}$  l'ensemble des indices des nœuds de chargement,  $P^- = \{n+1, \dots, 2n\}$  l'ensemble des indices des nœuds de déchargement. Soit  $P = P^+ \cup P^-$  l'ensemble des indices des nœuds autres que le nœud dépôt.

Soit  $d_i$  la demande du client  $i$  qui doit être transportée du nœud  $s_i$  au nœud  $s_{n+i}$ . L'intervalle de temps  $[e_i, l_i]$  est défini pour le chargement du client  $i$  et l'intervalle de temps  $[e_{n+i}, l_{n+i}]$  est défini pour le déchargement du client  $i$ . Pour tous les véhicules,  $[e_0, l_0]$  est l'intervalle de temps de départ du nœud dépôt alors que  $[e_{2n+1}, l_{2n+1}]$  est l'intervalle de temps de retour au nœud dépôt.

Soit  $V = \{1, 2, \dots, m\}$  l'ensemble des véhicules de la flotte qui sont utilisés pour l'affectation des produits et dirigés ensuite de façon à optimiser les routes. L'ensemble est indexé par  $v$ . Chaque véhicule possède une capacité  $D$ .

Pour tous indices  $i$  et  $j$  dans  $N$ ,  $t_{ij}$  et  $c_{ij}$  sont définis comme étant respectivement le temps de transport et le coût de transport entre les sommets  $s_i$  et  $s_j$ , tandis que  $p_i$  est le temps de service (« processing time ») au sommet  $s_i$ .

### 3.3.2 Variables

Trois types de variables sont introduites dans le modèle mathématique proposé.

#### Variables de flot

Pour tout  $v \in V$  ;  $i, j \in N$  ;  $i \neq j$ , la variable binaire  $X_{ij}^v$  est définie comme suit :

$$\begin{cases} X_{ij}^v = 1 & \text{si le véhicule } v \text{ voyage du nœud } s_i \text{ vers le nœud } s_j \\ X_{ij}^v = 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

#### Variables de temps

Pour chaque indice de nœud  $i \in P$ , la variable réelle  $T_i \in \mathfrak{R}^+$  indique la date à laquelle le service sur le nœud  $s_i$  commence. Pour tout véhicule  $v \in V$ ,  $T_0^v \in \mathfrak{R}^+$  représente la date à laquelle le véhicule  $v$  part du dépôt, et la variable  $T_{2n+1}^v \in \mathfrak{R}^+$  la date à laquelle le véhicule  $v$  retourne au dépôt.

### Variables de chargement

Pour chaque indice de nœud  $i \in P$ , la variable  $Y_i \in \mathfrak{R}^+$  correspond au poids total chargé sur le véhicule qui quitte le nœud  $s_i$ . Il est supposé que les véhicules quittent le dépôt avec un poids nul, c'est-à-dire  $Y_0=0$ .

### 3.3.3 Fonction objectif

Il existe plusieurs types de fonctions objectif dans la résolution des problèmes de tournées de véhicules. Citons pêle-mêle l'optimisation de la distance parcourue, de la durée globale de parcours, des coûts, du temps d'attente des véhicules, du taux de remplissage des véhicules, de la taille de la flotte...

Dans notre travail, nous avons choisi de nous restreindre dans un premier temps à la minimisation de la distance totale parcourue par la flotte. En effet, dans une perspective de résolution du problème (PDPTW) avec un objectif unique, ce critère nous a semblé être le plus pertinent et le plus représentatif des conditions réelles rencontrées dans la gestion d'une flotte de véhicules destinée à la collecte des produits encombrants de l'électroménager. Justifions notre choix.

De part la nature du problème traité, où les contraintes temporelles sont fortes, et sous l'hypothèse que les temps de transport et les coûts sont proportionnels aux distances de transport, les fonctions objectif visant à l'optimisation de la durée totale de transport ou à l'optimisation des coûts de la flotte n'auraient pas eu tout leur sens. En revanche, des fonctions objectif « secondaires », comme l'optimisation du temps d'attente des véhicules ou le taux de remplissage des véhicules, même si elles ne sont pas actuellement prises en compte dans notre travail, pourraient faire l'objet d'une étude plus approfondie, dans le but de proposer une variété de solutions répondant à des objectifs multicritères peut-être plus en accord avec les attentes des industriels. Ces fonctions objectif peuvent donc être vues comme une perspective de recherche intéressante.

### 3.3.4 Modèle

Fonction objectif :

$$\text{Min} \sum_{v \in V} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_{ij} \cdot X_{ij}^v$$

sous les contraintes :

$$\sum_{v \in V} \sum_{j \in N} X_{ij}^v = 1, \forall i \in P^+ \quad (\text{E3.1})$$

$$\sum_{j \in N} X_{ij}^v - \sum_{j \in N} X_{ji}^v = 0, \forall i \in P, \forall v \in V \quad (\text{E3.2})$$

$$\sum_{j \in P^+ \cup \{2n+1\}} X_{0j}^v = 1, \forall v \in V \quad (\text{E3.3})$$

$$\sum_{i \in \{0\} \cup P} X_{i,2n+1}^v = 1, \forall v \in V \quad (\text{E3.4})$$

$$\sum_{j \in N} X_{ij}^v - \sum_{j \in N} X_{j,n+i}^v = 0, \forall i \in P^+, \forall v \in V \quad (\text{E3.5})$$

$$T_i + p_i + t_{i,n+i} \leq T_{n+i}, \forall i \in P^+ \quad (\text{E3.6})$$

$$T_j - (T_i + p_i + t_{i,j}) \geq (1 - X_{ij}^v)G, \quad \forall i, j \in P, \forall v \in V, G \text{ grande valeur} \quad (\text{E3.7})$$

$$T_j - (T_0^v + t_{0j}) \geq (1 - X_{0j}^v)G, \quad \forall j \in P^+, \forall v \in V, G \text{ grande valeur} \quad (\text{E3.8})$$

$$T_{2n+1}^v - (T_i + p_i + T_{i,2n+1}) \geq (1 - X_{i,2n+1}^v)G, \quad \forall i \in P^-, \forall v \in V, G \text{ grande valeur} \quad (\text{E3.9})$$

$$e_i \leq T_i \leq l_i, \quad \forall i \in P \quad (\text{E3.10})$$

$$e_0 \leq T_0^v \leq l_0, \quad \forall v \in V \quad (\text{E3.11})$$

$$e_{2n+1} \leq T_{2n+1}^v \leq l_{2n+1}, \quad \forall v \in V \quad (\text{E3.12})$$

$$Y_j - (Y_i + d_j) = (1 - X_{ij}^v)G, \quad \forall i \in P, \forall j \in P^+, \forall v \in V, G \text{ grande valeur} \quad (\text{E3.13})$$

$$Y_j - (Y_i - d_{j-n}) = (1 - X_{ij}^v)G, \quad \forall i \in P, \forall j \in P^-, \forall v \in V, G \text{ grande valeur} \quad (\text{E3.14})$$

$$Y_j - (Y_0 + d_j) = (1 - X_{0j}^v)G, \quad \forall i \in P^+, \forall v \in V, G \text{ grande valeur} \quad (\text{E3.15})$$

$$Y_0 = 0, d_i \leq Y_i \leq D, \quad \forall i \in P^+ \quad (\text{E3.16})$$

$$X_{ij}^v \text{ binaire, } i, j \in N, v \in V; T_i \in \mathfrak{R}^+; Y_i \in \mathfrak{R}^+ \quad (\text{E3.17})$$

Les contraintes (E3.1)-(E3.4) forment le problème du flot : (E3.1) spécifie que tout sommet est visité exactement une fois et par un seul véhicule, (E3.2) force les véhicules à terminer leur parcours sur le nœud dépôt, alors que (E3.3) et (E3.4) déterminent les nœuds de départ et d'arrivée des véhicules. La contrainte (E3.5) assure qu'un même véhicule visite les nœuds de chargement  $s_i$  et de déchargement  $s_{n+i}$ . La contrainte de précédence de visiter le nœud  $s_i$  avant le nœud  $s_{n+i}$  est exprimée par (E3.6). Les contraintes (E3.7)-(E3.9) assurent la compatibilité entre les routes et les ordonnancements, alors que les contraintes de temps sont considérées dans (E3.10)-(E3.12). Enfin, la compatibilité entre les routes et la charge des véhicules est représentée par (E3.13)-(E3.15) et les contraintes de capacité par (E3.16). Pour apprécier la complexité du modèle proposé, nous aurions, dans le cas de l'exemple proposé en début de chapitre avec 10 clients et un véhicule, un modèle contenant 11616 contraintes et 526 variables de décision.

### 3.4 Méthodes de résolution

D'une manière assez surprenante, peu de travaux relatifs à l'étude du problème de chargement et de déchargement avec contraintes de fenêtres temporelles et de capacité (PDPTW) ont été publiés dans la littérature. Nous allons dans ce paragraphe nous consacrer à un survol rapide des travaux existants sur le problème à un véhicule, en notant que le cas véhicules multiples sera abordé au chapitre suivant. Précisons tout de même que le lecteur intéressé trouvera dans (Bodin and al., 1983)<sup>[58]</sup> et (Desrochers et al., 1988)<sup>[29]</sup> d'excellents états de l'art sur les problèmes de routage de véhicules avec une attention particulière sur les problèmes de chargement et de déchargement. De même, (Savelsbergh and Sol, 1995)<sup>[156]</sup> ont présenté plus récemment un aperçu de différents types de problèmes et de leurs solutions associées concernant le problème général de chargement et de déchargement (GPDP - General Pickup and Delivery Problem). Il faut remarquer que les travaux réalisés pour le véhicule simple sont en général repris et intégrés dans le problème à plusieurs véhicules, dans une approche en deux phases : partition / optimisation.

La revue de la littérature sur le sujet peut être divisée en deux grandes parties : les méthodes exactes et les méthodes approchées.

### 3.4.1 Les méthodes exactes

Le premier travail de résolution du (1-PDPTW) est une méthode exacte publiée dans (Psaraftis, 1983a)<sup>[151]</sup>, utilisant la programmation dynamique en récursivité progressive. La base de la méthode est décrite dans (Psaraftis, 1980)<sup>[150]</sup>, qui traite le même problème sans les fenêtres temporelles. Dans ces deux méthodes, l'espace d'état est représenté par le vecteur  $(L, k_1, k_2, \dots, k_n)$ , où  $L$  représente le nœud actuellement visité, et  $k_i$  représente l'état du client  $i$  :  $k_i=3$  si la demande du client  $i$  n'a pas encore été chargée,  $k_i=2$  si la demande du client  $i$  est chargée mais n'est pas encore déchargée et  $k_i=1$  si la demande du client  $i$  a été chargée et déchargée. Avec une complexité algorithmique de  $O(n^2 3^n)$ , où  $n$  est le nombre de nœuds du graphe, des problèmes de 10 clients ont pu être résolus de manière optimale.

(Kalantari et al., 1985)<sup>[121]</sup> proposent un algorithme de séparation et évaluation pour le problème de chargement et déchargement sans fenêtres temporelles, mais avec des véhicules de capacité finie et/ou infinie. Leur algorithme permet de résoudre de manière optimale des instances de taille allant jusqu'à 18 clients.

(Desrosiers et al., 1986)<sup>[80]</sup> résolvent le problème de transport des personnes (1-DARP) grâce à un algorithme de programmation dynamique. En minimisant la distance totale, tout en considérant les deux dimensions (temps, coût) pour traiter le problème du plus court chemin avec fenêtres temporelles, des instances d'au plus 40 clients (80 nœuds) sont résolues. L'un des avantages de cet algorithme est qu'il peut aisément être implémenté pour une grande variété de problèmes de routage de véhicules, grâce à l'utilisation de critères d'élimination d'états, états rendus irréalisables par les contraintes du problème.

### 3.4.2 Les méthodes approchées

Parmi les méthodes approchées que nous avons rencontrées dans la littérature, la plupart utilisent des algorithmes d'insertion. La philosophie de cette méthode est d'insérer de nouveaux clients à visiter dans des routes déjà existantes, tout en conservant la faisabilité de la nouvelle solution, c'est-à-dire en respectant les différentes contraintes du problème sur la capacité des véhicules, les fenêtres temporelles et la précedence entre les nœuds.

(Sexton and Bodin, 1985a<sup>[164]</sup>, 1985b<sup>[165]</sup>) présentent dans deux articles le résultat de leurs travaux sur le DARP avec une flotte à plusieurs véhicules, mais où chaque véhicule est traité indépendamment des autres véhicules. Leur formulation ne prend pas en compte les fenêtres temporelles, mais chaque client émet une préférence sur les dates de chargement et de déchargement, et la fonction objectif est une minimisation des désagréments subis par l'ensemble des clients. La décomposition de Bender est appliquée sur une formulation non linéaire mixte du (1-PDPTW), qui permet de définir successivement les routes, puis les ordonnancements des routes. Chaque problème de routage est également résolu par une heuristique itérative d'amélioration. Des instances représentatives de cas réels et de taille moyenne, comprenant de 5 à 7 véhicules et où chaque route contient jusqu'à 20 clients, sont résolues, sans pour autant pouvoir être comparées avec les solutions optimales.

Dans une autre publication, les mêmes auteurs (Sexton and Bodin, 1983)<sup>[163]</sup> présentent un algorithme d'insertion pour le (1-PDPTW), utilisé dans la résolution du problème à plusieurs véhicules.

(Sexton and Choi, 1986)<sup>[166]</sup> considèrent le (1-PDPTW) où la fonction à minimiser est une combinaison linéaire entre le temps total de transport du véhicule et des pénalités de retard. Leur

approche se base sur la décomposition de Bender, et sur des travaux déjà réalisés dans (Sexton and Bodin, 1985a<sup>[165]</sup>, 1985b<sup>[165]</sup>). Le problème traité ici semble pourtant plus complexe, car les travaux précédents ne prenaient pas en compte les fenêtres temporelles. Une route initiale est construite par une heuristique d'insertion qui considère les clients par séparation spatio-temporelle croissante. Puis la décomposition de Bender permet de fixer l'ordre des sommets sur la route, puis de calculer l'ordonnancement afin de diminuer le retard. Des instances de 17 clients sont résolues efficacement.

(van der Bruggen et al., 1993)<sup>[63]</sup> proposent, quant à eux, une méthode de recherche locale en deux phases pour obtenir une solution admissible de bonne qualité lorsque la durée de la route est à minimiser. Leur méthode se base sur le travail de (Lin and Kernighan, 1973)<sup>[131]</sup>, une procédure d'échange d'arcs à profondeur variable, dont le principe consiste à chaque itération à déterminer dynamiquement le nombre d'arcs à échanger. Lorsque de mauvaises solutions, voire des solutions irréalisables, sont générées, l'algorithme est combiné avec le recuit simulé, qui autorise une flexibilité accrue. Ce principe a permis de trouver des solutions quasi-optimales sur des instances de 38 clients.

(Healy and Moll, 1995)<sup>[108]</sup> introduisent un nouveau procédé de recherche locale, nommé sacrifice (« sacrificing »), et présentent une application au DARP. Leur méthode se base sur le constat que le voisinage d'une solution construit par des 2-opt échanges se constitue de  $O(n)$  à  $O(n^2)$  solutions voisines admissibles, et qu'entre deux solutions sous-optimales, celle dont le voisinage est le plus peuplé semble la plus attractive. Ces constatations amènent les auteurs à développer un algorithme qui alterne des phases d'optimisation locale et des phases de sacrifice. Une phase de sacrifice débute lorsqu'un optimum local est atteint. Choisir alors une solution « sacrifiée » consiste à choisir la solution dont le ratio coût / cardinalité du voisinage est le plus grand. Les tests, réalisés sur des instances dont les tailles vont jusqu'à 100 clients, permettent d'affirmer la supériorité de leur méthode sur les méthodes classiques 2-opt et 3-opt, sans dégradation sensible du temps de calcul.

### 3.4.3 Tableau chronologique

Nous résumons dans le tableau ci-dessous l'ensemble des travaux traitant de la résolution du (1-PDPTW) que nous avons rencontré dans la littérature. Ces travaux ont été recensés chronologiquement pour mettre en perspective l'évolution dans le temps du type des méthodes de résolution utilisées.

Article	Année	Méthode	Type	Taille
Psaraftis <sup>[151]</sup>	1983	Programmation dynamique	Exacte	10 clients
Sexton and Bodin <sup>[163]</sup>	1983	Insertion	Approchée	
Kalantari et al. <sup>[121]</sup>	1985	Séparation – Évaluation	Exacte	37 clients
Sexton and Bodin <sup>[165]</sup> <sup>[165]</sup>	1985	Décomposition de Bender	Approchée	20 clients
Sexton and Choi <sup>[166]</sup>	1986	Décomposition de Bender	Approchée	17 clients
Desrosiers et al. <sup>[80]</sup>	1986	Programmation dynamique	Exacte	40 clients
van der Bruggen et al. <sup>[63]</sup>	1993	2 phases – recuit simulé	Approchée	38 clients
Healy and Moll <sup>[108]</sup>	1995	Sacrifice	Approchée	100 clients

**Tableau 3.3 : État de l'art sur le (1-PDPTW)**

### 3.4.4 Constat

Depuis peu, de nouvelles techniques de résolution des problèmes combinatoires sont apparues, couramment appelées "**méta heuristiques**". Ces méthodes apparaissent comme un nouveau moyen d'aborder efficacement la complexité des problèmes, et ont prouvé par de multiples exemples leur fiabilité, et même dans certains cas leur supériorité sur les méthodes traditionnelles existantes. Parmi les plus connues, citons :

- la recherche tabou ("taboo search") ;
- le recuit simulé ("simulated annealing") ;
- les algorithmes génétiques ("genetic algorithms") ;
- les réseaux de neurones ("neural networks").

Ainsi, en se référant à (Osman and Kelly, 1996)<sup>[18]</sup>, (Gendreau et al., 1997)<sup>[35]</sup> pour une revue de la littérature des méta heuristiques et à (Golden et al., 1998)<sup>[37]</sup> pour leur application aux problèmes de routage de véhicules, il apparaît que des solutions quasi-optimales peuvent être obtenues très rapidement.

Or, à notre connaissance, il semble que ce type d'heuristiques soit encore très insuffisamment exploité dans la résolution du problème de chargement et de déchargement avec fenêtres temporelles, puisque nous recensons uniquement une application du recuit simulé, qui précisément est utilisée dans des situations bien particulières (van der Bruggen et al., 1993<sup>[63]</sup>). Ce constat est d'autant plus surprenant que des résultats très encourageants ont été obtenus sur des problèmes de routage de véhicules plus classiques, et que parmi les méta heuristiques les plus répandues, la recherche tabou est celle qui présente un intérêt réellement non négligeable, de part les travaux réalisés par (Gendreau et al., 1997)<sup>[35]</sup> et (Taillard et al., 1997)<sup>[174]</sup> sur le VRP.

## 3.5 Méta heuristiques : comparatif

Nous présentons succinctement dans cette partie la philosophie des heuristiques modernes citées ci-dessus, puis nous en dressons un comparatif et tirons les conclusions sur la méthode qui nous semble la plus adaptée à la résolution du problème de chargement et de déchargement avec contraintes de capacité et de fenêtres temporelles.

### 3.5.1 Recuit simulé

Afin de s'échapper de possibles optima locaux, le recuit simulé permet de retenir d'une manière contrôlée des solutions diminuant la valeur de la fonction objectif. La procédure générale du recuit simulé est la suivante.

Soit  $S$  la solution courante et  $N(S)$  le voisinage de  $S$ . Une solution  $S' \in N(S)$  est générée aléatoirement, et la différence des valeurs de la fonction objectif  $D = f(S') - f(S)$  est calculée. Si  $D < 0$ , alors  $S'$  est choisie comme nouvelle solution courante (les solutions meilleures sont toujours acceptées). Si  $D > 0$  et si  $e^{-D/T} > q$  (où  $0 < q < 1$  est une valeur générée aléatoirement par une loi uniforme de distribution), alors  $S'$  est la nouvelle solution courante. Ici  $T$ , appelé température, agit comme un simple paramètre de contrôle, et est en général décroissant durant le processus de recherche locale afin de diminuer la probabilité de choisir une solution moins bonne.

### 3.5.2 Algorithmes génétiques

Historiquement, les algorithmes génétiques furent conçus afin de résoudre des problèmes d'optimisation numérique, plutôt que des problèmes d'optimisation combinatoire (Gendreau et al., 1997)<sup>[35]</sup>. Ils ont pour principe de combiner des morceaux d'information venant de parents afin de produire une descendance (« offspring »). Une population de solutions est considérée à une itération donnée (une solution est vue comme un chromosome). Le passage à l'itération suivante se réalise en opérant une transformation sur chaque solution, tout en propageant les caractéristiques d'une bonne solution à la génération suivante de solutions dans l'espoir de converger vers des optima globaux. Quelques mutations aléatoires sont appliquées sur la descendance de manière à élargir l'espace de recherche.

Chaque chromosome (solution) doit suivre un certain codage sur une chaîne de bits afin de pouvoir être manipulé par l'algorithme. C'est dans ce codage que réside la grosse difficulté des problèmes d'optimisation combinatoire, particulièrement pour des problèmes à fortes contraintes. Quelques applications sur le problème de routage de véhicules avec fenêtres temporelles sont exposées dans (Gendreau et al., 1997)<sup>[35]</sup>.

### 3.5.3 Réseaux de neurones

Les réseaux de neurones sont des systèmes basés sur l'apprentissage, composés de simples unités (les neurones) richement interconnectés, similairement aux neurones du cerveau humain. Les connexions sont évaluées par des valeurs numériques (poids) qui capturent la connaissance du réseau. Un réseau de neurones débute sa recherche d'optimum avec des poids générés aléatoirement, et ajuste ces poids de manière incrémentale grâce à un algorithme d'apprentissage, dans le but d'améliorer sa capacité à traiter une tâche particulière.

Initialement, les réseaux de neurones avaient pour but des tâches d'apprentissage, une fonctionnalité éloignée de l'optimisation combinatoire. Des applications au problème du voyageur de commerce et au problème de routage de véhicules peuvent cependant être trouvées dans la littérature (Gendreau et al., 1997)<sup>[35]</sup>. Malgré tout, la difficulté rencontrée dans la modification du réseau de neurones pour prendre en compte des contraintes particulières inhérentes aux problèmes de tournée de véhicules avec fenêtres temporelles est telle qu'à notre connaissance, aucun travail de recherche n'a encore été publié sur l'application des réseaux de neurones au problème de routage de véhicules avec fenêtres temporelles.

### 3.5.4 Recherche tabou

La recherche tabou examine les solutions voisines de la solution courante, comme le recuit simulé, mais le mouvement déterminant la prochaine solution est fait vers la solution voisine la plus proche. Pour éviter un comportement cyclique de la méthode, les solutions qui ont été récemment examinées sont classées tabou, c'est-à-dire interdites pendant un certain nombre d'itérations. En pratique, ce sont des attributs d'une solution, plutôt que la solution entière, qui sont classés tabou, ceci dans un souci d'économie de mémoire et de temps de calcul. La recherche tabou peut en outre être améliorée par certains mécanismes, dont nous parlerons plus loin dans ce chapitre.

### 3.5.5 Comparatif

Il ressort de l'ensemble des applications des méthodes de recherche locale précitées aux problèmes de routage de véhicules le haut potentiel de ces méthodes dans la résolution des problèmes complexes d'Optimisation Combinatoire (Osman and Kelly, 1996)<sup>[18]</sup>, (Gendreau et al., 1997)<sup>[35]</sup>, (Golden et al., 1998)<sup>[37]</sup>. Cependant, une analyse plus fine permet de mettre en évidence la disparité du succès de ces méta heuristiques, prouvant ainsi qu'une connaissance approfondie de la spécificité des problèmes rencontrés et des méthodes de résolution est absolument nécessaire pour obtenir de bons résultats. Il n'y a qu'à observer l'évolution des méthodes basées sur le recuit simulé et la recherche tabou au cours de la dernière décennie pour se rendre compte de leur nouvelle sophistication : les résultats probants rencontrés sont en grande partie dus à leur toujours plus grande complexité de mécanismes de résolution, alors qu'une application simpliste d'une méta heuristique donnera des résultats qualifiés de médiocres. Les deux paramètres essentiels dans cette amélioration, et sur lesquels ont été réalisés la plupart des efforts, sont la structure du voisinage généré et la stratégie de recherche dans ce voisinage. Notons également que les meilleures implémentations de ces deux méta heuristiques sont celles dont le voisinage est le plus peuplé, autorisant par là même une diversité de choix de solutions accrue.

Dans ce contexte, il convient de constater que les réseaux de neurones paraissent en retrait dans la résolution des problèmes d'optimisation combinatoire. Ceci peut être compréhensible, dans la mesure où initialement ces systèmes n'ont pas été conçus pour répondre à ce type de problèmes, et par conséquent les principes de fonctionnement des réseaux de neurone semblent trop éloignés des contraintes inhérentes à l'optimisation combinatoire (Gendreau et al., 1997)<sup>[35]</sup>.

Les meilleures implémentations du recuit simulé ont donné des résultats relativement bons. Pourtant, elles donnent l'impression d'un manque de robustesse (Gendreau et al., 1997)<sup>[35]</sup>, et ne sont pas aussi performantes que les méthodes classiques. Les algorithmes génétiques n'ont été que très peu appliqués aux problèmes de routage de véhicules, sûrement à cause de l'ingéniosité dont il faut faire preuve pour dériver une instance du VRP dans la trame de cette méthode. Cependant, les quelques applications recensées dans la littérature fournissent des résultats remarquables, et le fait qu'un algorithme génétique travaille en parallèle sur une population de solutions potentielles (alors que les autres méthodes n'ont qu'une seule solution) n'y est pas étranger.

Méthode	Avantages	Inconvénients
Recherche tabou	Souplesse d'implémentation Robustesse	Plusieurs structures de mémoire à gérer
Algorithme génétique	Travaille en parallèle sur plusieurs solutions réalisables	Codage non intuitif d'une solution
Recuit simulé	Souplesse d'implémentation	Manque de robustesse
Réseau de neurones	Basé sur l'apprentissage	Mécanisme de résolution éloigné de l'optimisation combinatoire

**Tableau 3.4 : Comparatif des 4 méta heuristiques pour le (PDPTW)**

Parmi les quatre méta heuristiques que nous avons présentées, la recherche tabou est celle qui nous semble la plus adaptée et la plus prometteuse dans la résolution de notre problème. Contrairement aux algorithmes génétiques, la représentation d'une solution est relativement simple et intuitive. En outre, les comparaisons avec le recuit simulé sur le problème de routage de véhicules démontrent (déjà) la supériorité de la recherche tabou (Gendreau et al., 1997)<sup>[35]</sup>. Enfin,

d'excellents résultats, en parfaite concurrence avec les méthodes classiques d'optimisation ou d'approximation, ont déjà été obtenus sur des problèmes classiques de routage de véhicules. C'est dans cette continuité que nous désirons nous inscrire, en appliquant la recherche tabou à la résolution du (PDPTW), implémentation qui à notre connaissance n'a encore jamais été explorée dans la littérature.

### 3.6 La recherche tabou

Nous retenons donc la méta heuristique de recherche tabou comme support de résolution de notre problème de routage de véhicules visant à la planification opérationnelle de la collecte des produits encombrants de l'électroménager. Revenons maintenant plus précisément dans le fonctionnement de cette méthode de résolution.

#### 3.6.1 Présentation générale

Le mot Tabou (ou taboo) vient d'un langage polynésien, le Tongan, et indique une chose qui ne peut pas être touchée parce qu'elle est sacrée. Les principes de base de la recherche tabou ont été énoncés pour la première fois dans les années soixante-dix, d'une manière schématique, par (Glover, 1977)<sup>[92]</sup>. La recherche tabou telle qu'elle est utilisée aujourd'hui dérive de (Glover, 1986)<sup>[93]</sup>.

Une méta heuristique peut se définir comme un assemblage de plusieurs heuristiques simples. La recherche tabou est une méta heuristique qui guide des procédures de recherche locale lors de l'exploration de l'espace des solutions, en faisant attention à ne pas se contenter d'optima locaux. C'est une méthode qui procède par améliorations successives afin de converger vers l'optimum global du problème. C'est une stratégie de recherche locale.

#### 3.6.2 Structures de mémoire

Parmi les méta heuristiques utilisées pour les problèmes d'optimisation, la recherche tabou est la seule à utiliser un ensemble de mémoires (Glover, 1997)<sup>[92]</sup>. Les structures de mémoire de la recherche tabou se basent sur quatre principes : le passé récent, la fréquence, la qualité, et l'influence. La mémoire basée sur le passé récent (Recency based memory RBM) représente la manière d'identifier les attributs tabou d'une solution et de déterminer ainsi si une solution est tabou. La mémoire basée sur la fréquence complète l'information de la mémoire RBM, en enregistrant les fréquences d'apparition des mouvements utilisés pour évoluer dans l'espace des solutions. La mémoire basée sur la qualité, quant à elle, se réfère à la capacité de différencier les solutions visitées durant la recherche : la mémoire est utilisée pour identifier les éléments qui sont communs aux « bonnes » solutions. Ainsi, la mémoire qualitative peut être vue comme un moyen d'apprentissage de l'heuristique, où des incitations sont réalisées afin d'encourager des mouvements menant à des solutions meilleures - il est alors question de stratégie d'intensification - ou à des solutions plus mauvaises - stratégie de diversification. Enfin, la mémoire basée sur l'influence permet d'évaluer les choix effectués durant la recherche tabou et les résultats de ces choix, et offre de ce fait un deuxième niveau d'apprentissage de la méta heuristique.

En pratique, ces principes de structuration mémorielle sont utilisés selon deux types de mémoire : la mémoire à court terme (short term memory STM) et la mémoire à long terme (long term

memory LTM) (Glover, 1990)<sup>[94]</sup>. La mémoire à court terme est la plus usitée dans l'application de la recherche tabou : elle consiste à conserver la trace des attributs des solutions déjà visitées dans un passé récent. La mémoire à long terme, quant à elle, enregistre les mêmes informations que la mémoire à court terme, mais dans un passé plus lointain.

Deux principales composantes de la mémoire à long terme sont représentées par les stratégies d'intensification et de diversification, dont nous avons déjà parlé avec la structure de mémoire qualitative. Alors que la stratégie d'intensification joue sur les règles de choix afin d'encourager la combinaison des mouvements les meilleurs, la stratégie de diversification tente de générer des solutions qui se composent d'attributs remarquablement différents des précédentes solutions. La stratégie de diversification a donc pour but de guider la recherche locale vers des régions encore inexplorées par la méthode, et d'incorporer aux nouvelles solutions des attributs qui ne seraient sinon pas utilisés.

### 3.6.3 Algorithme de descente

La recherche tabou tire son origine de l'algorithme itératif de descente (Glover, 1977)<sup>[92]</sup>, qui peut être décrit comme suit (Figure 3.2). Soit  $f$  la fonction objectif à optimiser sur l'ensemble  $X$ . À chaque étape de l'algorithme de descente, un voisinage  $V(s)$  de la solution courante  $s \in X$  est défini. Si  $s^* \in V(s)$  est la meilleure solution du voisinage, alors le passage à l'itération suivante est réalisé seulement si  $f(s^*)$  est meilleure que  $f(s)$ . Dans le cas inverse, l'algorithme s'arrête avec comme meilleure solution  $s$ .

- |   |
|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Choisir une solution <math>s \in X</math></li> <li>2. Trouver <math>s' \in V(s)</math> telle que <math>f(s')</math> est meilleure que <math>f(s)</math></li> <li>3. Si <math>s'</math> n'existe pas, <math>s</math> est optimum local ; arrêt de l'algorithme</li> <li>4. Sinon, <math>s'</math> est la nouvelle solution courante ; aller à l'étape 2</li> </ol> |
|---|

**Figure 3.2 : Algorithme de descente**

Bien évidemment, cet algorithme de descente peut être considéré comme relativement peu évolué, car dans la résolution de problèmes complexes, la probabilité paraît grande d'être piégé par un optimum local éloigné de l'optimum global de l'instance. Pour éviter cette situation d'optimum local, la recherche tabou autorise dans certaines circonstances le choix d'une solution plus mauvaise que la solution courante, afin que le processus itératif puisse continuer. Cependant, pour éviter de revenir sur cet optimum local, et éviter un comportement cyclique de l'heuristique, la succession des mouvements qui nous y a mené la première fois est considérée tabou, c'est-à-dire que les derniers mouvements en question ne sont plus autorisés pendant un certain nombre d'itérations.

### 3.6.4 Principe de la recherche tabou

Ainsi, le principe général de la recherche tabou peut être énoncé de la manière suivante : étant donné une fonction  $f$  à optimiser sur l'ensemble  $X$ , la méthode de recherche tabou construit une solution initiale, puis procède itérativement d'une solution courante à une nouvelle solution courante, jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit satisfait. À chaque solution  $x \in X$  est associé un voisinage  $V(x) \subset X$  des nouvelles solutions potentielles, et chaque solution  $x' \in V(x)$  est atteinte à partir de  $x$  par une opération appelée mouvement.

La recherche tabou dépasse un optimum local  $x$ , lorsque celui-ci est identifié, en modifiant sa stratégie de recherche. Plus précisément, le voisinage d'un optimum local  $V^*(x)$  est construit en se restreignant aux solutions voisines qui ne sont pas tabou, c'est-à-dire qui ne dérivent pas de l'optimum local par des mouvements qui auraient déjà permis la construction de cet optimum.

La recherche tabou modifie localement une solution de manière itérative, tout en gardant une trace de ces modifications pendant un certain laps de temps afin d'éviter un comportement cyclique. Les modifications apportées à une solution courante deviennent donc tabou pour les solutions suivantes pendant une durée donnée, et sont enregistrées dans la liste des mouvements tabous. La liste des mouvements tabous est couramment nommée « Liste des tabous (TL) ». La durée pendant laquelle un mouvement reste dans l'état tabou, qui se mesure généralement en un nombre d'itérations à définir, prend le nom de « tenure ».

Nous avons dit plus haut que lorsqu'un optimum local est rencontré, son voisinage est construit en ne retenant que les solutions voisines non tabou. Cette façon de faire implique que l'état tabou d'une solution ou d'un mouvement est considéré comme absolu, et qu'aucune flexibilité n'est accordée. Pour éviter une trop grande rigidité de la méthode, et justement apporter de la flexibilité dans la construction du voisinage, le critère de « niveau d'aspiration » d'un mouvement tabou est introduit. Ainsi, supposons que lors de la construction du voisinage de l'optimum local de la solution  $s$ , la solution  $s'$  se trouve dans un état tabou. La solution  $s'$  ne devrait théoriquement donc pas être retenue. Avec la notion de « critère d'aspiration », il est cependant possible que  $s'$  soit la meilleure solution trouvée, si par exemple  $f(s')$  est meilleure que toutes les autres solutions du voisinage.

Les principes généraux de la recherche tabou peuvent être rassemblés dans la figure (Figure 3.3) ci-dessous.

- |   |
|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>0. Définir un critère d'arrêt de la recherche</li> <li>1. Choisir une solution <math>s \in X</math></li> <li>2. Tant que le critère d'arrêt n'est pas satisfait : <ul style="list-style-type: none"> <li>- trouver <math>s' \in V(s)</math> telle que <math>f(s')</math> est meilleure que <math>f(s)</math>.</li> <li>- si <math>s'</math> n'existe pas, aller en 3 ; sinon aller en 4</li> </ul> </li> <li>3. <math>s</math> est optimum local : <ul style="list-style-type: none"> <li>- construire <math>V^*(s)</math></li> <li>- trouver <math>s'' \in V^*(s)</math> telle que <math>f(s'')</math> est meilleure que <math>f(s')</math>, pour tout <math>s' \in V^*(s)</math></li> <li>- trouver <math>s''' \in V(s) \cup TL</math> telle que <math>f(s''')</math> est meilleure que <math>f(s')</math>, pour tout <math>s' \in V(s) \cup TL</math></li> <li>- choisir <math>s' \in \{s'', s'''\}</math> telle que <math>f(s')</math> soit la meilleure de <math>\{f(s''), f(s''')\}</math></li> <li>- aller en 4</li> </ul> </li> <li>4. <math>s'</math> est la nouvelle solution courante : <ul style="list-style-type: none"> <li>- enregistrer le mouvement de <math>s</math> à <math>s'</math> dans la liste des tabous TL</li> <li>- aller à l'étape 2</li> </ul> </li> </ol> |
|---|

**Figure 3.3 : Principe de la recherche tabou**

### 3.7 La recherche tabou : mise en œuvre

Nous allons dans cette partie présenter la mise en application de la méthode de recherche tabou à la résolution du problème de chargement et de déchargement à un véhicule avec contraintes de fenêtres temporelles et de capacité. Étant donné que cette technique de résolution n'a à notre connaissance pas encore été appliquée sur ce problème, nous considérons que ce qui suit constitue un travail de recherche innovant par rapport au domaine de l'Optimisation Combinatoire. Les grandes lignes de cette mise en œuvre sont les suivantes. Dans une phase d'initialisation, une solution est construite grâce à un simple algorithme d'insertion. Cette solution est admissible au regard des contraintes de capacité et de précédence, et les contraintes de fenêtres temporelles ne sont pas encore considérées. Puis le processus itératif de recherche tabou des nouvelles solutions admissibles commence, jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit satisfait.

#### 3.7.1 Initialisation

Devant la complexité du problème traité, sachant que pour certaines instances où l'ensemble des contraintes est serré, le simple fait de déterminer une solution admissible non nécessairement optimale peut demander de gros efforts de calcul, nous avons choisi de débiter le processus de recherche à partir d'une solution délibérément dégradée, gardant à l'esprit que la recherche tabou convergerait rapidement vers une solution satisfaisant l'ensemble des contraintes du problème.

La route initiale  $R_v$  empruntée par le véhicule  $v$  est donc construite à partir de deux règles de tri et d'insertion relativement simples, qui peuvent s'énoncer comme :

- « trier l'ensemble des sites de chargement des clients par borne inférieure croissante de la fenêtre temporelle du site de chargement »,
- « dans l'ordonnancement obtenu, pour chaque client, positionner chaque site de déchargement juste après le site de chargement ».

Mises sous forme d'équations mathématiques, et avec les notations déjà définies précédemment, ces règles s'expriment comme :

$$R'_v = \left\{ (s_i)_{i \in P^+ \cup \{0, 2n+1\}}, \quad e_i \leq e_{i+1}, \quad \forall i \in P^+ \cup \{0, 2n+1\} \right\} \quad (\text{E3.18})$$

$$R = \left\{ (s_i)_{i \in N}, \quad i+1 = n+i, \quad \forall s_i \in R'_v \right\} \quad (\text{E3.19})$$

L'application de ces deux règles conduit ainsi à une route initiale où les contraintes de précédence et de capacité sont respectées (à condition qu'il existe une solution réalisable au problème proposé !). En revanche, il est clair que l'ordonnancement obtenu peut ne pas satisfaire la contrainte temporelle, en particulier lorsque les fenêtres temporelles sont étroites. C'est pourquoi l'usage de la méthode de recherche tabou permet de corriger cet état de fait, et de converger vers une solution réalisable pour l'ensemble des contraintes.

#### 3.7.2 Recherche tabou

La trame de la recherche tabou suit le principe général qui a été décrit dans la partie (§3.6 - La recherche tabou). Il convient maintenant de décrire plus précisément les différentes composantes de la méthode. Ces paramètres portent sur la structure du voisinage, la restriction tabou, la taille de la liste tabou (tenure), le critère d'aspiration, la stratégie de diversification, et le critère d'arrêt.

### 3.7.2.1 Structure du voisinage

Il est clair que l'exploration d'un voisinage de grande dimension à chaque nouvelle itération du processus augmente à la fois les chances de converger vers l'optimum global et la complexité de la recherche. Afin d'obtenir un équilibre entre la qualité et la rapidité de la recherche, deux types de mouvements sont retenus dans la création du voisinage de la solution courante : le mouvement d'échange (« swap ») et le mouvement d'insertion.

Le mouvement d'échange se base sur l'opération classique «2-opt» définie par (Lin and Kernighan, 1973)<sup>[131]</sup> pour le problème du voyageur de commerce, puis améliorée par (Psaraftis, 1983a)<sup>[151]</sup> pour la résolution du problème de transport de personnes. Cette procédure est modifiée afin de prendre en considération la contrainte de précédence. Ainsi, notre procédure d'échange consiste à déterminer deux sommets du graphe qui vont être échangés, tout en respectant les contraintes de capacité et de précédence (Figure 3.6). De cette manière, au plus  $n.(2n-1)$  nouvelles solutions sont générées.

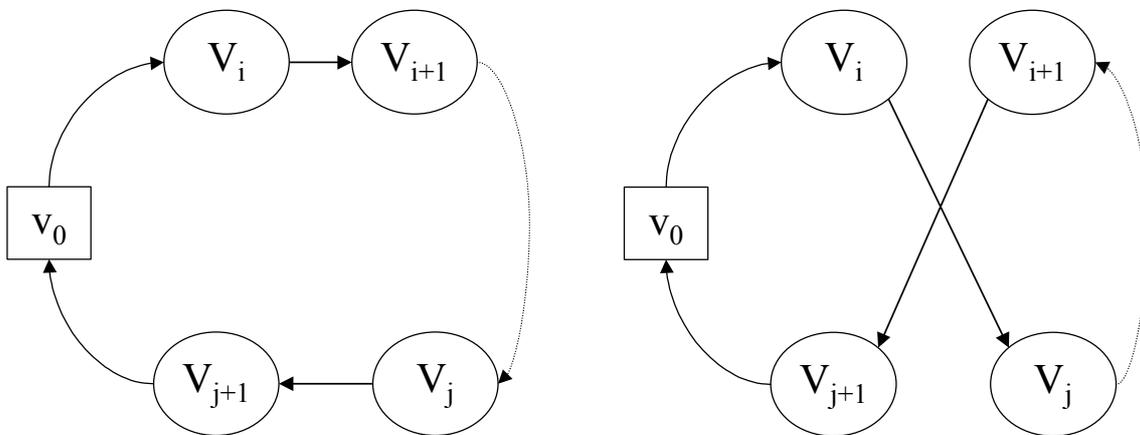


Figure 3.4 : Mouvement d'échange (i+1, j)

Le mouvement d'insertion sélectionne un sommet du graphe, ordonnancé en position  $i$ , et tente de l'insérer en position  $j$ , toujours avec le respect des contraintes de précédence et de capacité (Figure 3.5). Ainsi, le voisinage s'enrichit de  $(2n-1)^2$  nouvelles solutions potentielles.

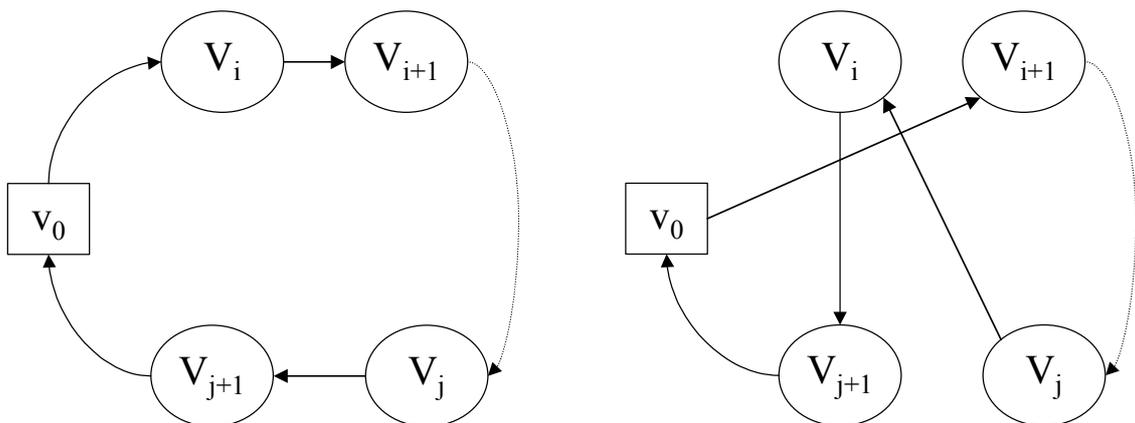


Figure 3.5 : Mouvement d'insertion (i, j)

En résumé, le voisinage permettant de choisir une nouvelle solution est constitué d'au plus  $n.(2n-1)^3$  solutions potentielles.

Il faut bien voir que l'utilisation de ces mouvements fournit un voisinage très peuplé, qui peut contenir des solutions non réalisables. Soit  $SP$  une solution générée qui ne respecte pas une contrainte du problème. Nous définissons trois types de pénalisation, qui sont fonction du nombre de sommets de  $SP$  sur lesquels les contraintes sont violées. Si nous appelons :

- $SP_{cap}$  le nombre de sommets où la capacité du véhicule est dépassée,
- $SP_{prec}$  le nombre de sommets ne respectant pas la contrainte de précédence,
- $SP_{temp}$  le nombre de sommets où le véhicule arrive en dehors de la fenêtre temporelle,

alors l'évaluation du coût de  $SP$  subit une pénalisation selon l'une des formules suivantes :

- Violation de la contrainte de capacité :

$$f(SP) = f(SP) + \lambda_{cap} \cdot SP_{cap} + \mu_{cap} \quad (E3.20)$$

- Violation de la contrainte de précédence :

$$f(SP) = f(SP) + \lambda_{prec} \cdot SP_{prec} + \mu_{prec} \quad (E3.21)$$

- Violation de la contrainte de temporalité :

$$f(SP) = f(SP) + \lambda_{temp} \cdot SP_{temp} + \mu_{temp} \quad (E3.22)$$

avec  $\lambda_{cap}$ ,  $\lambda_{prec}$ ,  $\lambda_{temp}$ ,  $\mu_{cap}$ ,  $\mu_{prec}$ ,  $\mu_{temp}$  des paramètres constants à définir avant l'exécution de l'heuristique.

L'utilisation de pénalisations lorsque des contraintes sont violées ajoute de la flexibilité et de la robustesse dans la détermination de la nouvelle solution. Il est ainsi également possible, en paramétrant correctement les valeurs des paramètres constants de pénalisation, de privilégier l'une ou l'autre des contraintes, ou de faire en sorte qu'une ou plusieurs contraintes soient scrupuleusement respectées. Une autre alternative aurait pu être de restreindre le voisinage à la population des solutions réalisables, réduisant d'autant la complexité de sa construction. Pourtant, ce n'est pas l'hypothèse que nous avons choisi de retenir, car nous avons privilégié la richesse du voisinage.

### 3.7.2.2 Restriction tabou

La restriction tabou que nous avons choisi d'utiliser est compatible avec la construction du voisinage que nous avons retenue. En effet, lorsque l'exécution d'un mouvement est réalisée à l'itération  $t$ , un sommet ne peut plus être soumis à un autre mouvement jusqu'à l'expiration de sa tenure, qui est implémentée par la fonctionnalité de mémoire à court terme. C'est donc comme attributs tabou d'une solution les sommets du graphe qui sont retenus pour composer la restriction tabou, et qui sont donc enregistrés dans la liste tabou.

### 3.7.2.3 Structure de la liste tabou

La détermination de la structure de la liste tabou est essentielle pour s'assurer de la bonne gestion de la restriction tabou. Nous utilisons la mémoire attributive pour représenter les mouvements tabous, grâce à deux structures de données indexées sur le nombre de sommets du graphe, chacune spécifique à un type de construction du voisinage d'une solution. Nous avons donc une structure de donnée liée au mouvement d'échange *tabou\_swap*, et une structure de donnée liée au

mouvement d'insertion *tabou\_insert*. Chaque sommet de la structure de donnée est associé à l'itération à laquelle le sommet perd son état tabou, donc à l'itération à laquelle ce sommet est susceptible de réintégrer des mouvements de construction du voisinage. De cette manière, l'utilisation du sommet  $v_i$  est considérée tabou si et seulement si :

$$\text{itération\_courante} \leq \text{tabou\_swap}[i] \text{ et } \text{itération\_courante} \leq \text{tabou\_insert}[i] \quad (\text{E3.23})$$

Par conséquent, le test de la condition tabou d'un mouvement peut être réalisé en un temps constant, en au plus deux comparaisons (selon le type du mouvement considéré).

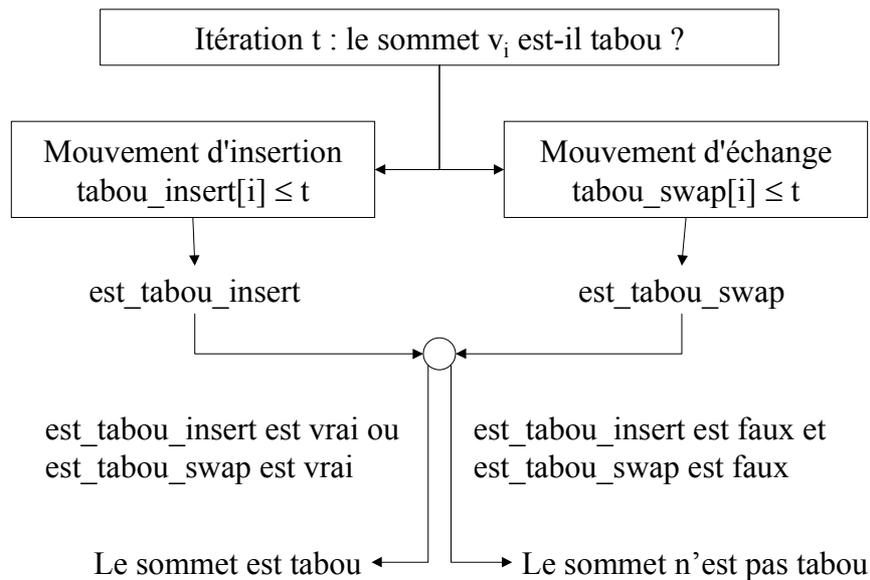


Figure 3.6 : Test de l'état tabou d'un mouvement

### 3.7.2.4 Taille de la liste tabou (tenure)

La définition de la taille  $T$  de la liste tabou est toujours un facteur critique de la méthode. Si cette taille est trop petite, la probabilité est grande d'avoir un comportement cyclique du processus de recherche (Skorin-Kapov, 1990) <sup>[168]</sup>. Si  $T$  est trop grande, le risque est important d'avoir de nombreux mouvements non évalués, rendant la recherche de l'optimum global excessivement coûteuse en temps de calcul.

Bien évidemment, ces règles comportementales de l'heuristique restent très générales. Malheureusement, à notre connaissance, il n'existe pas encore de recette permettant de déterminer la meilleure tenure en fonction du type de problème rencontré. Il apparaît que la tenure dépend étroitement des types de contraintes rencontrées.

Dans notre travail, nous nous sommes basés sur l'approche suivante, premièrement énoncée par (Taillard, 1991) <sup>[173]</sup> pour la résolution du problème d'affectation quadratique. L'idée est de ne pas fixer une fois pour toutes la valeur de la tenure, mais de la faire évoluer aléatoirement au fil du temps. Ainsi, en prenant une valeur dans un intervalle  $[\min T, \max T]$ ,  $\min T$  et  $\max T$  restant à définir, et en régénérant cette valeur périodiquement après un certain nombre d'itérations, le processus de recherche utilise différentes tenures et établit un équilibre entre des tenures faibles et des tenures fortes.

### 3.7.2.5 Critère d'aspiration

Toute mise en œuvre de la méthode de recherche tabou utilise un critère d'aspiration qui permet d'éliminer le statut tabou d'une solution. En ce qui nous concerne, nous avons choisi le critère dit d'aspiration globale, qui stipule que dès lors qu'une solution tabou est en fait la meilleure solution rencontrée depuis le début de la recherche, c'est cette solution qui constitue la solution suivante dans le processus itératif de recherche.

### 3.7.2.6 Stratégie de diversification

La stratégie de diversification vise à implémenter le principe de la mémoire à long terme, et son incorporation dans la méthode de recherche tabou diffère d'une implémentation à une autre, et d'un problème à un autre. Pour la résolution du (1-PDPTW), deux matrices de données à deux dimensions sont introduites, afin de conserver la trace des fréquences des mouvements employés dans la recherche. La première matrice, *Mat\_Freq\_Swap*, a ses lignes et colonnes indexées sur les sommets du graphe, et enregistre le nombre d'échanges entre les nœuds. La deuxième matrice, *Mat\_Freq\_Insert*, a ses lignes indexées sur les sommets du graphe, et ses colonnes indexées sur les positions des sommets dans l'ordonnancement, et enregistre le nombre d'insertions des sommets sur les différentes positions de l'ordonnancement de la route du véhicule.

D'une manière plus formelle, posons :

$$F = \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N} \tag{E3.24}$$

un ensemble de fonctions définies sur l'ensemble des nœuds du réseau et prenant leurs valeurs dans l'ensemble des nombres entiers. Soit *freq\_swap* ∈ F et *freq\_insert* ∈ F. Alors, pour tout *i* ∈ N et *j* ∈ N :

$$Mat\_Freq\_Swap(i, j) = freq\_swap(i, j) \tag{E3.25}$$

où *freq\_swap*(*i*, *j*) a pour valeur le nombre de fois qu'un échange entre les sommets *i* et *j* a fait l'objet du meilleur mouvement, et

$$Mat\_Freq\_Insert(i, j) = freq\_insert(i, j), \tag{E3.26}$$

où *freq\_insert*(*i*, *j*) a pour valeur le nombre de fois qu'une insertion du sommet *i* en position *j* dans l'ordonnancement a fait l'objet du meilleur mouvement.

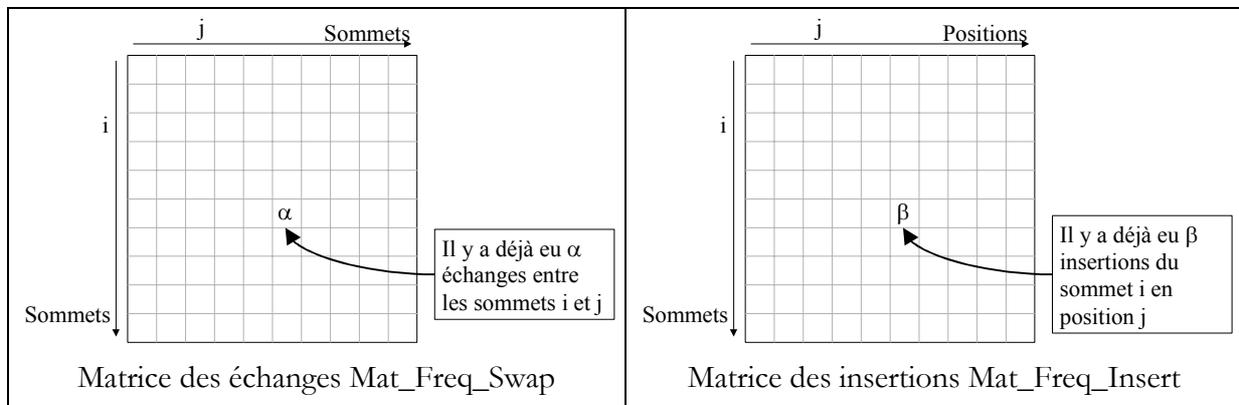


Figure 3.7 : Stratégie de diversification - structures de mémoire

La stratégie de diversification est introduite dans le processus de recherche à partir d'une certaine date donnée. Dès ce moment, l'évaluation des mouvements utilise ces fréquences pour pénaliser les mouvements qui sont fréquemment exécutés. Soit la fonction de pénalisation  $\mathcal{P}$ . Dans notre application,  $\mathcal{P}$  est une fonction linéaire croissante par rapport aux fréquences, dont la valeur est ajoutée à l'évaluation classique des mouvements :

$$\begin{aligned} \mathcal{P} : (\mathbf{N}, F) &\rightarrow F \\ (\lambda, f) &\rightarrow \mathcal{P}(\lambda, f) = \lambda \cdot f \end{aligned} \quad (\text{E3.27})$$

Les deux principaux paramètres de la stratégie de diversification sont donc la date d'introduction et la valeur de  $\lambda$ . Empiriquement, l'intuition permet de les déterminer, et il est supposé que la date d'introduction apparaît après  $W$  itérations sans amélioration de la meilleure solution obtenue.

### 3.7.2.7 Critères d'arrêt

Les critères d'arrêt que nous avons retenus sont relativement simples, et portent sur le nombre d'itérations. Ainsi, la méta heuristique de recherche tabou s'arrête si l'une des conditions suivantes est vérifiée :

- un nombre maximal d'itérations  $\text{Max\_Iter}$  est atteint ;
- aucune amélioration de la meilleure solution n'est recensée pendant  $\text{Max\_Best\_Iter}$  itérations.

## 3.8 Résultats expérimentaux

Nous présentons dans cette partie les résultats expérimentaux permettant de valider notre méthode de résolution du (1-PDPTW) basée sur la recherche tabou. Les résultats se divisent en deux sous-parties. La première concerne l'application de la recherche tabou à des instances du problème de voyageur de commerce avec fenêtres temporelles, où la solution optimale est connue. Dans ces instances, les contraintes de capacité et de précedence n'existent pas : nous cherchons ainsi à démontrer l'efficacité de la recherche tabou dans l'obtention de solutions optimales dans un temps raisonnable pour des problèmes où les contraintes temporelles sont fortes. La deuxième traite des instances du (1-PDPTW) générées aléatoirement, autorisant une analyse plus fine du comportement de la méthode.

### 3.8.1 Instances (1-TSPTW)

Les instances du voyageur de commerce avec fenêtres temporelles que nous utilisons sont tirées de (Ascheuer, 1995 <sup>[3]</sup><sup>[185]</sup>). 16 instances particulières sont sélectionnées et dérivent d'un cas réel, le problème de routage d'une grue de chargement dans un système de stockage automatisé (instances  $\text{rgb}^*.tw$ ). Les solutions optimales sont obtenues à partir d'une étude polyédrale du problème.

Le (1-TSPTW) est un cas particulier du (1-PDPTW), dans lequel les contraintes sur la capacité du véhicule et les précédences entre les villes à visiter sont absentes. En se référant à une formulation basée sur la théorie des graphes, une instance du (1-PDPTW) peut se transformer en une instance du (1-TSPTW) en supposant que le sommet dépôt  $s_0$  est la seule ville de chargement, et que tous les autres sommets ( $s_i, i \in P$ ) sont des villes de déchargement. La

quantité  $q_i$  à décharger sur chaque ville est supposée être nulle :  $q_i = 0$ . De ces faits, les contraintes de précédence et de capacité disparaissent, seules restent les contraintes liées aux fenêtres temporelles sur les sommets. La taille des instances varie de 19 à 92 sommets, et la fonction objectif consiste en la minimisation de la distance totale parcourue.

### 3.8.2 Instances (1-PDPTW)

Dans un second temps, l'évaluation de la recherche tabou est réalisée sur des instances spécifiques du (1-PDPTW). Le schéma utilisé dans la génération aléatoire d'une instance suit sensiblement celui proposé par (van der Bruggen et al., 1993) <sup>[63]</sup>. L'idée principale est de construire aléatoirement une instance pour le problème de chargement et de déchargement sans les fenêtres temporelles (1-PDP), car il n'est pas certain à la fois de générer des fenêtres temporelles et de garantir l'admissibilité d'une solution avec ces fenêtres temporelles. Puis, sur cette instance sans fenêtres temporelles, nous appliquons les méthodes de résolution locale déjà décrites afin de trouver une route qui se rapproche de la solution optimale. Sur cette route quasi-optimale sont enfin introduites les fenêtres temporelles selon le processus décrit ci-dessous. La solution correspondante  $S^*$  est considérée comme la meilleure solution connue pour l'instance du (1-PDPTW).

Quatre tailles d'instances sont prises en compte, de 10 à 40 clients (de 20 à 80 sommets). Les coordonnées des sommets sont générées aléatoirement dans l'espace euclidien  $[0, 200]^2$ . La distance euclidienne est retenue, l'inégalité triangulaire sur les distances inter sommets est ainsi vérifiée. La demande  $d_i$  de chaque ville de chargement est générée dans l'intervalle  $[1, 9]$ , puis multipliée par 10. Le temps de service  $p_i$  est fonction de la quantité à transporter : il est défini comme  $p_i = d_i / 2$ . Le temps de transport entre deux sommets est linéaire par rapport à la distance parcourue :  $t_{ij} = 1.5 * c_{ij}$ . La capacité du véhicule est une contrainte fortement dépendante des caractéristiques des problèmes : nous la définissons de telle manière qu'elle soit prépondérante dans le processus de résolution. Enfin, deux types de fenêtres temporelles sont introduits, soit plutôt larges, soit plutôt étroites, et les fenêtres sont affectées aléatoirement aux sommets à visiter. Les fenêtres temporelles sont définies de manière à ce que la solution initiale trouvée par la recherche tabou (§3.7.1 - Initialisation) soit suffisamment éloignée de la meilleure solution connue  $S^*$ .

### 3.8.3 Résultats numériques

Les résultats présentés dans cette partie ont été obtenus sur un PC 350 Mhz équipé d'un microprocesseur Pentium II. Nous présentons premièrement la résolution du (1-TSPTW), puis celle du (1-PDPTW). Dans les deux cas, les paramètres utilisés dans l'implémentation de la recherche tabou sont fixés par une première étude expérimentale, et sont décrits dans le tableau (Tableau 3.5).

Fonction objectif	Minimiser la distance totale parcourue
Critères d'arrêt	Max_Iter = 50000 (TSPTW) ; Max_Iter = 100000 (PDPTW) ; Max_Best_Iter = 10000
Voisinage	$\lambda_{cap} = \lambda_{prec} = \lambda_{temp} = 100$ ; $\mu_{cap} = \mu_{prec} = \mu_{temp} = 500$
Tenure	T varie entre $[n/4, n/2]$ et change toutes les $2n$ itérations
Stratégie de diversification	$W = 500$ ; $\lambda = 10$

**Tableau 3.5 : Paramètres de l'heuristique de recherche tabou**

### 3.8.3.1 Résultats sur les instances (1-TSPTW)

Les résultats sont décrits dans le tableau (Tableau 3.6). Chaque problème présente le nombre de sommets (taille), la solution optimale trouvée par (Ascheuer, 1995) <sup>[3] [185]</sup>, et la solution trouvée par la recherche tabou : le meilleur coût final, le nombre moyen d'itérations pour y arriver, et le temps moyen d'exécution (temps CPU en secondes) pour les exécutions du programme où l'optimum a été trouvé. Comme il existe des processus stochastiques dans notre implémentation de la recherche tabou (3.7.2.4 - Taille de la liste tabou (tenure)), il est nécessaire de procéder à plusieurs exécutions. Dans notre cas, la moyenne est calculée sur la base de 10 exécutions. Pour chaque instance, la solution optimale a été trouvée dans un nombre relativement restreint d'itérations. De plus, la borne supérieure de deux instances a été améliorée (Rgb049 et Rgb050b).

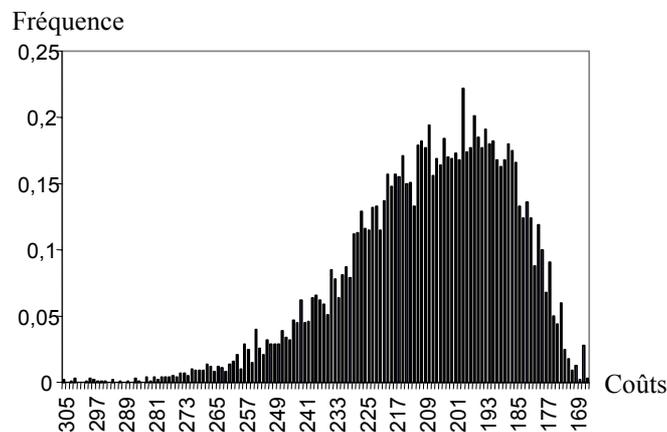
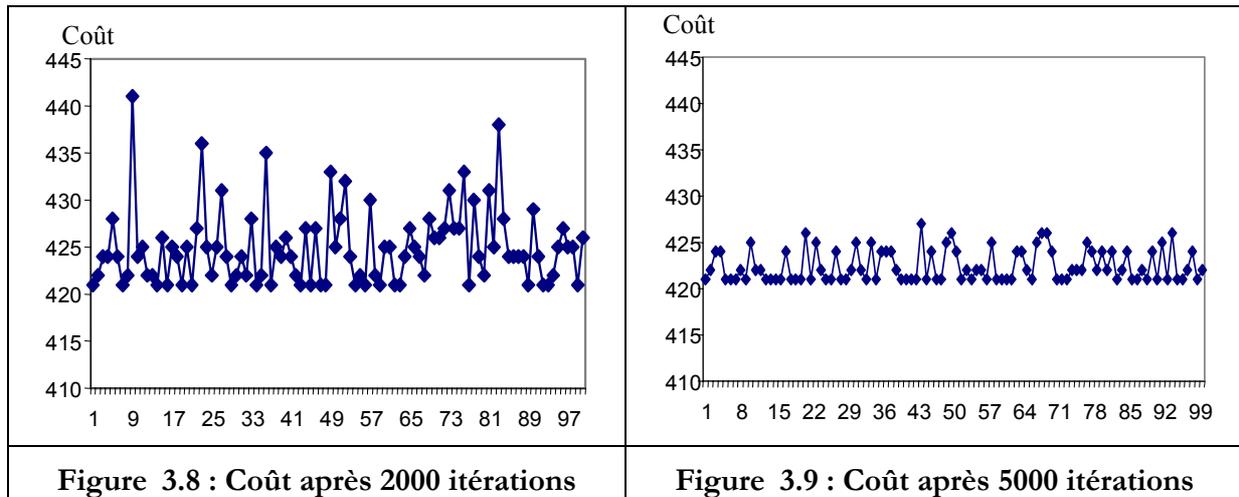
Instance	Taille	Optimum	Recherche tabou		
			Coût final	Itérations	Temps CPU
Rbg019b	19	182	182	368	2.61
Rbg020a	20	210	210	424	3.33
Rbg021_5	21	169	169	734	4.97
Rbg033a	33	433	433	1255	39.07
Rbg034a	34	403	403	10	0.32
Rbg035a	35	254	254	15	0.49
Rbg035a_2	35	166	166	2946	112.42
Rbg038a	38	466	466	111	8.31
Rbg049a	49	[420,486]	<b>421</b>	3276	327.99
Rbg050a	50	414	414	32977	3381.75
Rbg050b	50	[453,518]	<b>468</b>	22511	2346.07
Rbg055a	55	814	814	60	9.57
Rbg067a	67	1048	1048	213	96.32
Rbg086a	86	1051	1051	3219	1749.92
Rbg088a	88	1153	1153	5371	2973.59
Rbg092a	92	1093	1093	8221	4807.23

**Tableau 3.6 : Résultats pour le (1-TSPTW)**

Afin d'analyser l'homogénéité de notre méthode en termes de variation du coût entre la solution initiale et la solution finale, l'heuristique tabou est relancée 100 fois sur une instance spécifique (Rgb049). Les résultats des figures (Figure 3.8) et (Figure 3.9) représentent l'état des solutions après 2000 et 5000 itérations. Nous pouvons y voir que l'optimisation des solutions est relativement homogène et ne produit pas de solutions particulièrement mauvaises, puisqu'il n'y a pas de solutions avec une déviation du coût supérieure à 0,05% par rapport à la meilleure solution finale trouvée (de valeur 421). De plus, la valeur de la solution finale se stabilise autour de la valeur optimale au fur et à mesure que le nombre d'itérations augmente. Ces phénomènes prouvent le bon fonctionnement de la recherche tabou, par l'encouragement de l'exploration des régions caractérisées par l'optimum global.

Finalement, pour analyser la performance moyenne de la recherche tabou, nous étudions la fréquence des solutions obtenues durant le processus de recherche sur une exécution du programme. L'heuristique est ainsi appliquée sur l'instance Rgb035a\_2, dont la solution optimale est 166. Les résultats sont présentés sur la figure (Figure 3.10). À première vue, nous y voyons une répartition des fréquences relativement homogène, avec un pic autour de la valeur 195 (environ à 15% de l'optimum). Cette concentration autour d'une valeur proche de l'optimum nous conforte dans le bon comportement de l'heuristique, notamment dans le fait de générer des solutions dégradées lorsqu'un optimum local est atteint. L'heuristique oscille entre des optima locaux et des

solutions plus mauvaises. Il se trouve qu'ici l'optimum local est en réalité global. De ce fait, la recherche a toujours tendance à revenir dans cette région.



### 3.8.3.2 Résultats sur les instances (1-PDPTW)

Après avoir analysé les performances de notre heuristique de recherche tabou sur le (1-TSPTW), attaquons-nous maintenant à notre véritable problème, plus complexe : le problème de chargement et de déchargement à un véhicule avec contraintes de fenêtres temporelles, de précédence et de capacité. Chaque problème de taille donnée (les tailles variant de 10 clients à 40 clients) se décompose en deux instances, qui se différencient par la distribution des fenêtres temporelles sur les sommets du graphe. Les résultats obtenus sur la base de 10 exécutions sont présentés dans les tableaux (Tableau 3.7) et (Tableau 3.8).

Le tableau (Tableau 3.7) montre les solutions proposées par l'heuristique et leur évolution durant le processus de recherche. Chaque solution est comparée avec la meilleure solution connue  $S^*$ , celle construite dans l'étape de création d'instances réalisables pour le (1-PDPTW) (§3.8.2 - Instances (1-PDPTW)). Pour chaque instance, sur les 10 exécutions, la première solution réalisable trouvée est décrite en termes de valeur du coût moyen ainsi que du nombre moyen d'itérations et du temps moyen nécessaire (temps CPU en secondes) pour y parvenir. Les mêmes caractéristiques sont mises en évidence pour la meilleure solution rencontrée durant le processus de recherche. Le tableau (Tableau 3.8) représente l'erreur relative moyenne entre la première

solution réalisable et la solution finale. La solution finale est la meilleure solution obtenue après Max\_Iter itérations.

Instance	S*	Recherche tabou					
		Solution réalisable			Meilleure solution		
		Coût	Itérations	Temps CPU	Coût	Itérations	Temps CPU
A10	855.92	855.92	2082	15.45	855.92	2082	15.45
B10	808.40	808.40	6070	45.06	808.40	6070	45.06
A20	1261.54	1473.70	947	50.13	1261.54	8314	436.64
B20	1112.48	1375.08	81	4.88	1112.48	23026	1207.32
A30	1633.61	1885.62	75	14.78	1633.61	31697	5379.86
B30	1624.43	1932.16	104	19.91	1624.43	44398	7532.61
A40	1860.21	2429.59	8230	3281.84	1974.14	41386	15863.87
B40	2228.53	2594.90	19370	7417.14	2228.53	53260	20462.23

**Tableau 3.7 : Résultats pour le (1-PDPTW)**

À la vue de ces résultats, la première remarque est que la meilleure solution S\* est trouvée au moins une fois sur les 10 exécutions. Pour les plus petites instances A10 et B10, S\* est obtenue dès que la première solution réalisable est atteinte, alors qu'une phase d'optimisation est requise pour les problèmes de plus grande taille. Une attention particulière doit être portée sur les problèmes A40 et B40, où des solutions réalisables ne sont pas systématiquement trouvées (seulement 4 exécutions sur 10 permettent de générer une première solution réalisable). Ces instances peuvent donc être vues comme la limite supérieure de notre approche, et indiquent le chemin à suivre pour de nouveaux efforts de recherche. Cependant, pour les problèmes d'au plus 30 clients (60 sommets), les résultats sont relativement convaincants, car il semble aisé de trouver une solution réalisable au vu de la complexité du problème, bien que la meilleure solution finale soit créée après un temps d'exécution assez long.

Instance	Solution	
	Réalisable	Finale
A10	0.0	0.0
B10	0.0	0.0
A20	0.163	0.0
B20	0.236	0.0
A30	0.154	0.0
B30	0.189	0.017
A40 (*)	0.306	0.087
B40 (*)	0.164	0.0

(\*) Pour les exécutions où une solution réalisable est trouvée

**Tableau 3.8 : Erreur relative de la recherche tabou pour le (1-PDPTW)**

Enfin, le tableau (Tableau 3.8) présente l'erreur relative de la première solution réalisable et de la meilleure solution finale par rapport à S\*, sur la base des 10 exécutions. Une erreur relative de 0% signifie que les 10 exécutions ont fourni la meilleure solution connue S\*. Ce tableau permet de se

rendre compte de l'efficacité de la méthode, qui trouve pratiquement à chaque fois la meilleure solution connue, et lorsque ce n'est pas le cas, la solution obtenue est quasi-optimale, puisque pour les problèmes de 40 clients, la plus grosse erreur relative rencontrée est de 8%.

### 3.8.4 Discussion

Au vu des tests réalisés, il convient tout d'abord de souligner la qualité des résultats obtenus, car dans toutes les situations rencontrées, la solution optimale (ou la meilleure solution connue pour le (1-PDPTW)) a été atteinte par notre algorithme, et ce en un nombre restreint d'itérations. Pour le (1-TSPTW), la borne supérieure de deux problèmes de (Ascheuer, 1995)<sup>[3] [185]</sup> est améliorée. Pour le (1-PDPTW), l'erreur relative moyenne de la meilleure solution trouvée, quasi nulle, prouve l'efficacité de notre implémentation de la recherche tabou.

Grâce à l'évaluation sur les benchmarks proposés par (Ascheuer, 1995)<sup>[3] [185]</sup>, le bon comportement de la recherche locale a pu être mis en évidence. L'amélioration itérative fonctionne correctement, puisque des clichés à différents instants du processus de recherche démontre l'optimisation systématique des solutions. Nous avons également pu distinguer la concentration de toutes les solutions trouvées pendant la recherche autour d'une valeur proche de l'optimum global, ce qui tend à prouver que la recherche tabou sait trouver l'optimum global d'une instance et ne pas se contenter d'optima locaux, grâce en partie à la particularité des états tabous des mouvements dernièrement utilisés.

Malgré la qualité des résultats, le temps d'exécution peut paraître dans certaines situations légèrement dissuasif. Pourtant, le temps d'exécution ne doit pas être vu comme le facteur le plus significatif dans l'utilisation de processus de recherche locale comme la recherche tabou, car de nombreux facteurs peuvent favoriser une amélioration. De plus amples exécutions de l'heuristique permettraient d'affiner les paramètres de la méthode et de les adapter aux caractéristiques des problèmes rencontrés, accélérant sensiblement le temps d'exécution. Dans nos tests, les instances de départ sont générées aléatoirement. La possession d'instances représentatives de cas réels simplifieraient notablement notre étude. En outre, une analyse fine de la méthode démontre un trop grand nombre d'actions autour de la construction du voisinage et de l'évaluation de la nouvelle solution potentielle. Les solutions potentielles du voisinage sont entièrement réévaluées et les coûts totaux recalculés, augmentant considérablement le temps nécessaire à chaque itération pour trouver le meilleur candidat.

En ce qui concerne la détermination du voisinage, nous avons choisi d'y intégrer des solutions potentielles qui n'étaient pas forcément réalisables au vu des contraintes du problème, afin d'avoir le voisinage le plus riche possible. Mais nous avons également introduit une fonction de pénalisation sur ce type de solutions, pour favoriser le choix de solutions admissibles durant la recherche. En outre, le voisinage d'une solution courante est construit systématiquement à partir de deux mouvements, l'échange entre deux sommets et l'insertion d'un sommet sur une position de l'ordonnancement. Toutes ces opérations ont un coût, et influencent d'autant le temps d'exécution de l'heuristique tabou. Deux pistes peuvent être explorées pour réduire l'effort de calcul, dont nous évoquons les grandes lignes ci-dessous : la restriction du voisinage aux seules solutions admissibles, et une stratégie d'alternance sur l'utilisation des mouvements.

Restreindre le voisinage aux seules solutions admissibles a pour inconvénient de proposer un moins grand nombre de choix de solutions d'une itération à une autre, mais a l'avantage de réduire le coût de construction. Une méthode pour y arriver peut utiliser le principe énoncé par (Psaraftis, 1983b)<sup>[152]</sup>. Un tableau est introduit afin de tester la faisabilité des mouvements en temps constant. Ce tableau, FIRSTDEL (pour « first delivery »), est indexé sur les sommets

visités par le véhicule. FIRSTDEL[i] indique la position maximale autorisée que peut prendre le sommet  $i$  sans violer une contrainte de précédence. Ainsi, à la fois le test sur les sommets et la mise à jour du tableau FIRSTDEL se font en temps constant.

Alterner les mouvements de construction du voisinage au lieu de les employer ensemble a également l'inconvénient de proposer un voisinage moins riche, mais garantit une certaine diversité dans l'exploration de l'espace de recherche en n'employant pas de manière uniforme un unique mouvement. Une telle stratégie, dite stratégie d'oscillation, peut être trouvée dans (Glover, 1997)<sup>[95]</sup>.

### 3.9 Conclusions

Afin de traiter le problème de la collecte des produits encombrants de l'électroménager, nous introduisons un problème d'optimisation combinatoire pour la gestion de la flotte de véhicules, le problème de chargement et de déchargement avec contraintes de fenêtres temporelles, de capacité sur les véhicules et de précédence entre les lieux à visiter (PDPTW). Le présent chapitre est consacré à la résolution du problème lorsque les véhicules sont pris séparément et individuellement, c'est-à-dire que le problème peut être résolu dans le cas d'un véhicule (1-PDPTW).

#### 3.9.1 Ce qu'il faut retenir

Une modélisation mathématique du (PDPTW) est proposée, ainsi qu'une analyse des travaux existants visant à résoudre le problème pour un véhicule. Il ressort de cette analyse que très peu de travaux ont été recensés sur le sujet. Les méthodes de résolution sont classées en deux grandes classes, les méthodes exactes et les méthodes approchées. Parmi l'ensemble des travaux, aucun ne se base sur la recherche tabou, méta heuristique moderne de résolution des problèmes d'optimisation combinatoire qui a pourtant fait ses preuves sur des problèmes de routage de véhicules plus classiques.

Nous développons donc une stratégie d'optimisation du (1-PDPTW) basée sur la recherche tabou et expliquons les mécanismes de fonctionnement de notre méthode. Les performances de la méthode sont ensuite évaluées sur deux jeux de tests. Le premier jeu de tests se base sur le problème de voyageur de commerce avec fenêtres temporelles, où les solutions optimales des instances sont connues. Ce jeu de tests permet à la fois d'analyser le comportement de la recherche locale et de valider la qualité des solutions obtenues. Le deuxième jeu de tests considère des instances du (1-PDPTW) générées aléatoirement.

Les solutions obtenues pour l'ensemble des instances sont d'excellente qualité, puisque la solution optimale est toujours atteinte. Le comportement de notre implémentation de la recherche tabou est donc très satisfaisant. Un effort devra néanmoins être fait pour réduire le temps d'exécution, qui peut paraître dissuasif pour des instances de plus de 40 clients. Des pistes d'amélioration sont proposées.

#### 3.9.2 Ce qui va suivre

Les résultats qui sont obtenus dans ce chapitre concernent la résolution du problème de chargement et de déchargement pour un véhicule. Cette situation où uniquement un seul véhicule

## Chapitre 3

suffit à traiter l'ensemble des requêtes de collecte à planifier est une situation qui peut arriver, et c'est pourquoi ces premiers résultats sont intéressants en soi. Cependant, il est fort probable que ce cas ne soit pas le seul auquel le planificateur des opérations de collecte doit faire face, et que souvent l'utilisation de plusieurs véhicules soit nécessaire pour satisfaire les demandes de ramassage. C'est l'objet du chapitre suivant, qui porte sur l'extension des résultats obtenus dans la situation d'un véhicule au cas de plusieurs véhicules.

# Chapitre 4 Planification opérationnelle pour plusieurs véhicules

## 4.1 Introduction

Au sein de la logistique inverse des produits manufacturés arrivant en fin de vie, la collecte occupe un rôle prépondérant, par sa fonction d'approvisionnement des systèmes de traitement et de récupération, et par la nécessaire maîtrise des coûts relativement conséquents liés aux opérations de ramassage. La planification opérationnelle de l'activité de la collecte est donc de première importance. Après avoir mis en évidence la situation la plus générale de ramassage des produits encombrants de l'électroménager dans le Chapitre 2, et avoir modélisé cette situation comme un problème de routage de véhicules avec des contraintes de chargement et de déchargement, de fenêtres temporelles et de capacité dans le Chapitre 3, l'objet du chapitre présent est donc de proposer des éléments de résolution de ce problème NP-Complet d'Optimisation Combinatoire. Nous nous baserons pour cela sur les résultats du chapitre précédent, qui considère le cas d'un véhicule simple. Ces résultats seront ici étendus au cas de véhicules multiples.

Ce chapitre se structure de la manière suivante. Dans un premier temps, une revue de la littérature sur le (m-PDPTW) permet de recenser les méthodes existantes, et de conclure quant à l'inexistence de la méthode Tabou comme base de résolution pour ce problème. Ce constat amène à développer un mécanisme de recherche Tabou probabiliste, qui est présenté en détail dans la partie suivante. Pour évaluer les performances de la méthode proposée, des heuristiques de comparaison sont ensuite introduites. Enfin, les résultats comparatifs et une discussion terminent cette partie.

## 4.2 Présentation du problème

Le problème de chargement et de déchargement avec contraintes de fenêtres temporelles, de capacité et de précédence (« Pickup and delivery problem with time windows m-PDPTW) considère un ensemble de  $n$  requêtes à satisfaire, chaque requête étant constituée d'une quantité

fixe à transporter d'une origine à une destination. L'action de charger ou de décharger la marchandise doit être réalisée à l'intérieur d'un intervalle de temps spécifique à chaque site. Pour ce faire, une flotte de  $m$  véhicules est à disposition.

La gestion optimale de la flotte vise à minimiser la distance totale parcourue par l'ensemble des véhicules. Un deuxième objectif consiste à minimiser la taille de la flotte, c'est-à-dire le nombre de véhicules employés pour répondre globalement à l'ensemble des requêtes.

#### 4.2.1 Exemple

Pour fixer les idées, reprenons l'exemple énoncé au chapitre précédent, et supposons maintenant que nous disposons d'une flotte de véhicules de taille illimitée (voir les données présentées dans §3.2.1 - Exemple). Afin de « casser » la route du véhicule unique, les fenêtres temporelles doivent être paramétrées correctement : nous les restreignons dans l'intervalle  $[0, 1700]$  pour l'ensemble des sommets du réseau. Dans ces conditions, une solution réalisable de l'exemple n'est plus possible avec un seul véhicule, mais pourrait être proposée par la figure (Figure 4.1) et le tableau (Tableau 4.1).

Route	Coût	Sommet	Date d'arrivée	Capacité arrivante	Opération
1	480.8	0	0	0	0
		3	47	0	30
		2	213	30	15
		4	320	45	20
		5	400	65	10
		-3	431	75	-30
		-2	551	45	-15
		-4	633	30	-20
		-5	705	10	-10
		0	833	0	0
2	695,8	0	0	0	0
		10	87	0	15
		6	170	15	35
		1	406	50	20
		8	507	70	30
		-6	585	100	-35
		7	669	65	25
		-10	770	90	-15
		-7	852	75	-25
		9	912	50	10
		-8	998	60	-30
		-1	1047	30	-20
		-9	1104	10	-10
		0	1245	0	0

**Tableau 4.1 : Solution de l'exemple (m-PDPTW)**

Comme il est possible de le constater, et sous les conditions de l'exemple (réduction de la longueur maximale autorisée par la route pour le (m-PDPTW)), l'emploi de plusieurs véhicules ne garantit pas systématiquement la réduction de la distance globale parcourue par la flotte. L'exemple à un seul véhicule fournit en effet un coût global de 995,4, alors que le cas de plusieurs

véhicules réduit ce coût à 1176,6. Bien sûr, cet exemple ne se veut pas représentatif de situations réelles, mais il permet de se rendre compte de l'impact d'une flotte de plusieurs véhicules sur la résolution du (m-PDPTW).

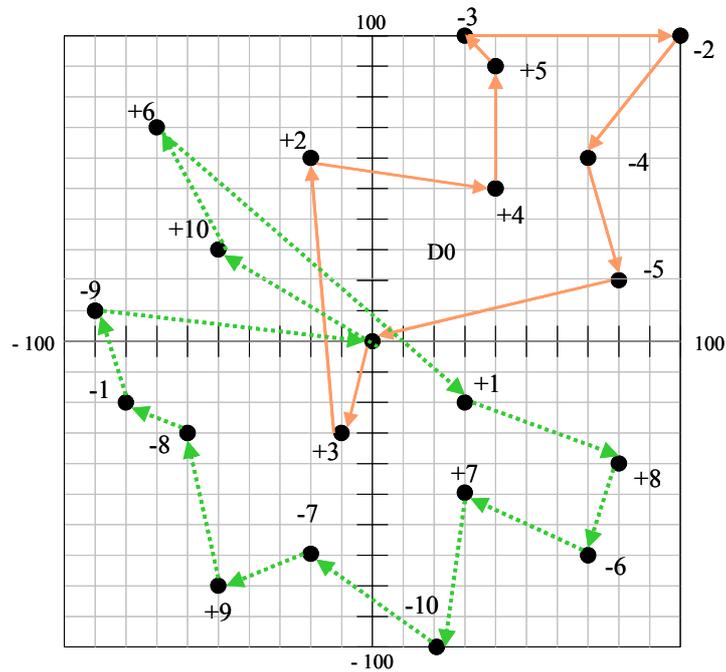


Figure 4.1 : Solution de l'exemple (m-PDPTW)

Abordons maintenant les méthodes de résolution recensées dans la littérature et traitant du (m-PDPTW).

### 4.3 Méthodes de résolution

Toutes les méthodes de résolution traitant du (m-PDPTW) rencontrées dans la littérature suivent sans exception une approche en deux phases, où la première phase est une partition des requêtes sur l'ensemble des véhicules, et où la seconde phase est une optimisation de la solution initiale. L'étape de partition consiste à scinder l'ensemble des requêtes en plusieurs sous-ensembles de requêtes, chaque sous-ensemble étant desservi par un seul véhicule. De ce fait, l'ordonnancement de la route de chaque véhicule peut être résolu localement, indépendamment des autres véhicules. Chaque ordonnancement considère une instance de taille modeste et plus simple à résoudre que le problème initial, ce qui permet de réduire considérablement la complexité. Il existe même des méthodes résolvant de manière optimale la route de chaque véhicule grâce à des techniques de séparation et évaluation ou de programmation dynamique (voir §3.4 - Méthodes de résolution). Cependant, les décisions les plus importantes dans le processus de résolution doivent déjà être prises en compte lors de l'étape de partition, et jusqu'à présent seules des méthodes heuristiques permettent d'accomplir cette tâche.

#### 4.3.1 Revue de la littérature

(Dumas et al., 1991)<sup>[82]</sup> regardent le (m-PDPTW) comme un problème de partition qui est résolu par une méthode de génération de colonnes et de séparation et évaluation appliquée à la relaxation linéaire de la formulation du problème de partition. Chaque colonne représente une

route réalisable empruntée par un véhicule, et est générée au besoin par l'application de la programmation dynamique, définie dans (Desrosiers et al., 1986)<sup>[80]</sup>, au problème de plus court chemin avec contraintes. Cette approche permet de traiter efficacement des instances d'au plus 55 clients et 22 véhicules.

(Ioachim et al., 1995)<sup>[115]</sup> reprennent les résultats de (Dumas et al., 1991)<sup>[82]</sup> et développent une approche novatrice de groupement des requêtes pour le (m-DARP). Un groupe de requêtes est défini comme étant un segment réalisable de requêtes servies par un unique véhicule, et à l'intérieur duquel le véhicule n'est jamais vide. Après l'obtention du groupement optimal, la résolution du (m-PDPTW) se résume alors à celle du (m-TSPTW). La méthode est étendue au cas de plusieurs types de contraintes de capacité, spécifiques au transport des personnes. Plusieurs instances de 250 clients sont résolues, ainsi qu'une « grande » instance de plus de 2500 clients.

(Jaw et al., 1986)<sup>[118]</sup> considèrent le problème de transport de personnes (m-DARP) dans lequel les contraintes temporelles varient de la formulation que nous avons énoncée : elles consistent d'une part en une borne supérieure de retard autorisée sur chaque sommet du graphe, et d'autre part en une durée maximale de transport pour chaque client. Un algorithme séquentiel d'insertion est utilisé pour l'affectation des clients sur les véhicules : pour chaque nouvelle requête, l'ensemble des insertions admissibles est identifié, puis la meilleure insertion est exécutée. Cette approche algorithmique, qui se veut simple mais réaliste par rapport aux problèmes industriels, donne de bons résultats sur des instances de grande taille (2500 clients et 20 véhicules) avec des efforts de calcul réduits.

(Madsen et al., 1995)<sup>[138]</sup> révisent l'algorithme de (Jaw et al., 1986)<sup>[118]</sup> au (m-DARP) pour prendre en compte une fonction objectif multicritères et plusieurs contraintes de capacité. La procédure d'insertion parallèle est améliorée au niveau de la rapidité d'exécution et de sa flexibilité, autorisant de ce fait un fonctionnement efficace dans un environnement dynamique, où les requêtes peuvent être traitées en temps réel, à partir d'une solution initiale comprenant 300 clients et 24 véhicules.

(Sharma and Paradkar, 1995)<sup>[167]</sup> présentent un problème de transport de personnes et de marchandises par voie ferroviaire et identifient un parallèle avec des problèmes de routage de véhicules sous fenêtres temporelles, notamment le (m-PDPTW). L'objectif est de minimiser une combinaison linéaire entre les coûts opérationnels du réseau ferroviaire et les retards dans le déchargement, et est atteint grâce à une heuristique qui distribue régulièrement les retards sur chaque point du réseau. Un exemple numérique est présenté pour illustrer leur méthode.

(van Hooijdonk, 1996)<sup>[11]</sup> propose un algorithme de résolution en deux phases du (m-PDPTW), avec l'objectif de minimiser la durée de transport de la flotte. L'auteur se concentre sur la phase de construction de la route initiale, par l'alternance entre une heuristique d'insertion parallèle et une heuristique d'insertion séquentielle. La phase d'optimisation est basée sur des échanges classiques de nœuds. Des instances d'au plus 400 requêtes sont résolues et comparées aux résultats obtenus à partir d'une implémentation du recuit simulé.

(Bodin and Sexton, 1986)<sup>[59]</sup> étendent leurs travaux sur le DARP, présentés dans (Sexton and Bodin, 1985a<sup>[165]</sup>, 1985b<sup>[165]</sup>) (§3.4.2 - Les méthodes approchées), au cas de plusieurs véhicules, toujours avec l'objectif de minimiser le désagrément des clients, et où la contrainte temporelle s'exprime par une date désirée de déchargement. L'étape de partition est sommaire et sert juste à appliquer la décomposition de Bender sur chaque véhicule et à exécuter ensuite des opérations

d'échange entre les routes. Des instances de 85 requêtes, tirées d'une situation réelle de transport de personnes, sont traitées.

(Savelsbergh and Sol, 1998)<sup>[157]</sup> prouvent par leurs travaux que des heuristiques d'optimisation sophistiquées peuvent être impliquées dans la résolution de problèmes complexes dans un environnement temps réel. Les auteurs proposent en effet un outil de planification pour le problème général de chargement et de déchargement (« General Pickup and Delivery Problem » GPDP) basé sur un algorithme de séparation et coût et la technique de génération de colonnes, et où l'objectif multicritères est d'optimiser la taille de la flotte et la distance totale parcourue. Des instances de 30 clients et 15 véhicules sont abordées. Puis leur outil est adapté aux contraintes d'une société de transport routier pour répondre avec succès aux caractéristiques temps réel du problème.

### 4.3.2 Récapitulatif

Nous dressons un récapitulatif des méthodes de résolution recensées dans la littérature dans le tableau suivant (Tableau 4.2), en précisant bien les caractéristiques du problème résolu et la taille des instances traitées. Cependant, il n'est pas forcément évident d'établir un comparatif complet entre ces méthodes, notamment sur la vitesse d'exécution ou la qualité des solutions, car les problèmes de départ ne possèdent pas les mêmes caractéristiques entre eux. De nombreuses variantes et extensions du (m-PDPTW) sont rencontrées, prenant en compte plusieurs contraintes de capacité, des dates de déchargement souhaitées (plutôt que des fenêtres temporelles), des fonctions objectif mono ou multicritères. Notons en outre deux applications ((Madsen et al., 1995)<sup>[138]</sup> et (Savelsbergh and Sol, 1998)<sup>[157]</sup>) qui s'intègrent dans un environnement dynamique, où l'ensemble des requêtes n'est pas connu à l'avance, mais où des requêtes peuvent arriver en temps réel au cours du processus de résolution.

Nous pouvons faire ressortir de cette analyse deux tendances quand à l'objectif visé par la résolution du (m-PDPTW) ou de l'une de ses variantes, qui est fonction de la taille des instances. En effet, pour des problèmes de grande taille, la plupart des méthodes se basent sur des heuristiques d'insertion de requêtes dans des routes de véhicules, en définissant la meilleure insertion qui respecte l'ensemble des contraintes. L'insertion peut être séquentielle ou parallèle. Une insertion séquentielle considère les véhicules un par un, et un nouveau véhicule est introduit dans la flotte si la requête courante ne peut être insérée dans l'un des véhicules déjà en action. Une insertion parallèle considère initialement la flotte au complet, et pour chaque nouvelle requête la meilleure insertion est déterminée par rapport à l'ensemble des véhicules. Ce type d'approche a le mérite de limiter le temps de calcul grâce à une complexité d'exécution restreinte, et de favoriser son exploitation dans un environnement dynamique temps réel. Cependant, même lorsque ces méthodes sont couplées à une phase de post-optimisation, la qualité des solutions obtenues ne garantit en aucune façon la proximité de l'optimum global du problème.

La probabilité d'obtenir une solution quasi-optimale semble plus importante pour les méthodes basées sur la technique de génération de colonnes et de séparation et évaluation, avec au départ une formulation du (m-PDPTW) en problème de partition d'ensembles. La taille des instances considérée est pourtant moins importante, en général, que celle des méthodes d'insertion.

Deux exceptions échappent à cette première analyse. (Ioachim et al., 1995)<sup>[115]</sup> arrivent en effet à considérer des instances de 250 clients et une instance de plus de 2500 clients avec une approche dérivant de la génération de colonnes. En réalité, le cœur de leur méthode reste celui développé par (Dumas et al., 1991)<sup>[82]</sup>, et des améliorations sont apportées sur la construction du réseau et sur l'initialisation de la procédure de programmation dynamique. Leur approche novatrice de

groupement des requêtes permet d'obtenir une solution finale à valeur entière, mais le temps d'exécution des grandes instances semble encore prohibitif (plus de 3 heures pour 2500 clients sur station SUN avec l'utilisation d'une batterie de logiciels optimisés).

Article	Année	Caractéristiques	Méthode	Taille *
Jaw et al. <sup>[118]</sup>	1986	DARP ; minimisation du retard	Insertion séquentielle	2500 clients 20 véhicules
Bodin and Sexton <sup>[59]</sup>	1986	DARP ; minimisation du retard	Décomposition de Bender	85 clients
Dumas et al. <sup>[82]</sup>	1991	m-PDPTW	Sép. et éval. Génération de colonnes	55 clients 22 véhicules
Ioachim et al. <sup>[115]</sup>	1995	m-DARP ; contraintes multiples de capacité	Groupement des requêtes	250 clients
Sharma and Paradkar <sup>[167]</sup>	1995	Transport ferroviaire ; minimisation des coûts et du retard	Heuristique de répartition des retards	Exemple illustratif
Madsen et al. <sup>[138]</sup>	1995	DARP ; environnement dynamique Objectif multicritères Contraintes multiples de capacité	Insertion parallèle	300 clients 24 véhicules
van Hooijdonk <sup>[13]</sup>	1996	m-PDPTW ; minimisation de la durée de transport	Construction : insertion parallèle et séquentielle	400 clients
Savelsbergh and Sol <sup>[157]</sup>	1998	m-PDPTW ; environnement dynamique minimiser taille de la flotte et distance	Sép. et coût Génération de colonnes	30 clients 15 véhicules

\* Taille pour la version statique

**Tableau 4.2 : État de l'art pour le (m-PDPTW)**

De la même manière, (Savelsbergh and Sol, 1998) <sup>[157]</sup> développent leur méthode à partir de la technique de génération de colonnes et l'intègrent dans un environnement dynamique afin de traiter de nouvelles requêtes en temps réel. Cependant, les volumes des instances restent relativement modestes, et les nouvelles requêtes ne sont pas immédiatement prises en compte : leur heuristique de résolution est relancée périodiquement dans la journée afin de réactualiser le planning de la flotte.

### 4.3.3 Constat

De toutes les méthodes de résolution que nous venons de voir, nous pouvons dresser le même constat que celui qui nous a conduit à introduire la recherche tabou dans le traitement du (1-PDPTW) (voir 3.5.5 - Comparatif) : aucune méta heuristique n'est appliquée à la résolution du (m-PDPTW), malgré les résultats encourageants rencontrés sur des problèmes de routage de véhicules avec fenêtres temporelles plus classiques. Ainsi, suivant la démarche que nous avons initiée au chapitre précédent, nous allons nous consacrer à l'élaboration d'une recherche tabou pour la résolution du (m-PDPTW), basée sur l'heuristique présentée pour la résolution du (1-

PDPTW). Ceci constitue la suite de notre travail. Avant tout, la partie suivante présente succinctement la recherche tabou probabiliste, extension de la recherche tabou déjà présentée au chapitre 3, et qui constitue notre point de départ pour le (m-PDPTW).

#### 4.4 Recherche tabou probabiliste

Notre heuristique de résolution du (m-PDPTW) se base sur la recherche tabou probabiliste, pour explorer la piste défrichée par (Glover and Lokketangen, 1994)<sup>[36]</sup> sur les problèmes linéaires à variables bivalentes. Des résultats théoriques sur la convergence de la recherche tabou probabiliste sont présentés dans (Faigle and Kern, 1992)<sup>[84]</sup>.

La recherche tabou probabiliste étend le principe de la recherche tabou déterministe par l'ajout de probabilités. (Glover and Lokketangen, 1994)<sup>[36]</sup> argument du fait que les probabilités peuvent remplacer certaines fonctions de la mémoire dans le guidage du processus de recherche. À chaque itération, la méthode construit une liste PTLlist (« Probability Tabu List ») des candidats potentiels, la liste étant ordonnée du meilleur candidat au plus mauvais. PTLlist a une taille prédéfinie, que nous noterons Psize (« Probability list Tabu Size »). Elle est donc constituée par les Psize meilleures solutions non tabou.

Après avoir construit la liste des solutions potentielles, un mécanisme de choix de la prochaine solution débute, basé sur la probabilité  $p$ . Le premier candidat de la liste est sélectionné avec la probabilité  $p$ . S'il est rejeté, le deuxième candidat est choisi avec la probabilité  $p(1-p)$ . Le  $n^{\text{ième}}$  candidat a ainsi la probabilité  $p(1-p)^{n-1}$  d'être sélectionné.

Le processus de sélection s'arrête lorsque l'un des candidats de la liste est choisi, ou lorsque tous les candidats sont rejetés. Dans cette situation, deux possibilités sont envisageables :

- choisir la meilleure solution de la liste (la première) ;
- choisir aléatoirement l'une des solutions de la liste.

Passons maintenant à la description détaillée de notre proposition de résolution du (m-PDPTW).

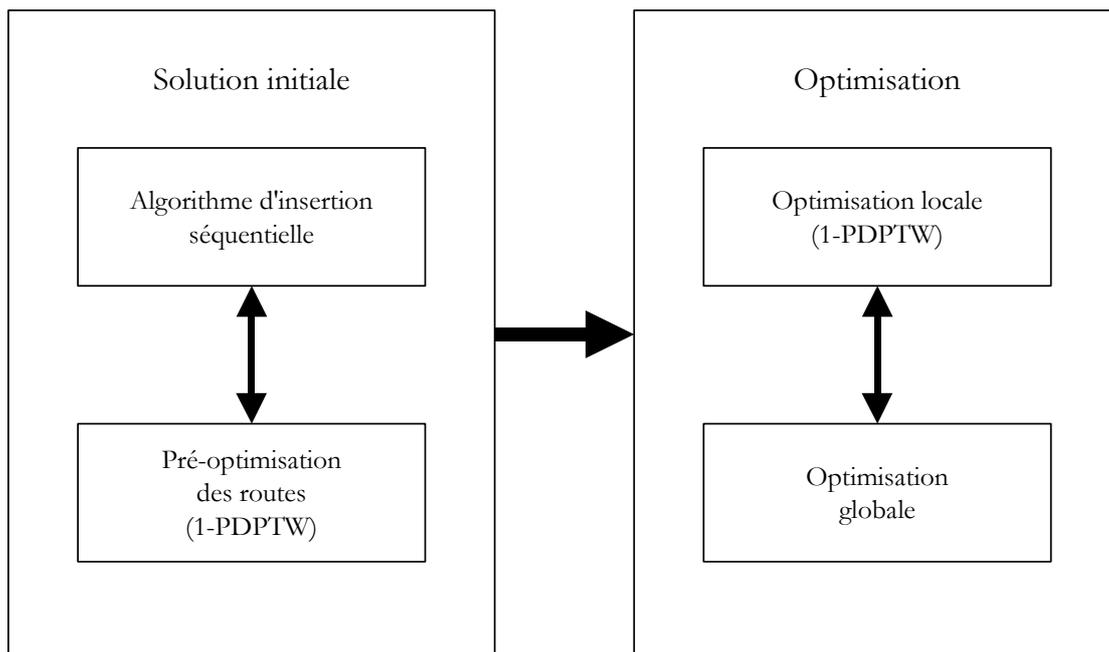
#### 4.5 Résolution du (m-PDPTW)

Devant la complexité du (m-PDPTW), toutes les approches rencontrées dans la littérature suivent le même fonctionnement général, basé sur une résolution en deux phases. La première phase est une partition de l'ensemble des requêtes sur les véhicules : elle construit ainsi une solution initiale. La deuxième phase optimise la solution initiale. Certaines approches privilégient la construction de la route initiale, et la phase d'optimisation est sommaire. D'autres, au contraire, privilégient la phase d'optimisation. Notre approche ne déroge pas au principe de la résolution en deux phases (Figure 4.2). Simplement, l'utilisation de la recherche tabou permet de trouver un équilibre entre l'étape de partition et l'étape d'optimisation.

Le principe général de l'affectation des requêtes aux véhicules est le suivant. Après avoir trié les requêtes suivant une règle de priorité et les véhicules selon leur capacité, nous développons un algorithme d'insertion séquentiel considérant successivement les requêtes. Chaque nouvelle requête à insérer est testée sur les routes existantes déjà calculées afin de répondre aux contraintes du problème. Dans le cas où une requête ne peut être affectée directement, avant l'allocation d'un nouveau véhicule, une étape d'optimisation est lancée sur les routes respectant la contrainte de

capacité avec cette nouvelle requête. Cette manière de faire a l'avantage de produire des routes déjà optimisées et de bénéficier d'une limitation du nombre de véhicules employés.

Une fois que les requêtes des clients sont affectées sur les véhicules, la phase d'optimisation de la solution du (m-PDPTW) débute. Cette phase d'optimisation est une alternance entre une optimisation locale, indépendante pour chaque véhicule, et une optimisation globale entre les routes. L'optimisation locale se base sur l'heuristique tabou décrite au chapitre 3 (voir 3.7 - La recherche tabou : mise en œuvre) pour l'ordonnancement de la route d'un véhicule. L'optimisation globale utilise la recherche tabou probabiliste et vise à réduire la longueur totale parcourue par la flotte et le nombre de véhicules utilisés, par l'utilisation d'échanges de sommets entre les routes.



**Figure 4.2 : Résolution en deux phases du (m-PDPTW)**

#### 4.5.1 Optimisation locale

La résolution en deux phases du (m-PDPTW) qui est proposée utilise le module d'optimisation d'une route prise indépendamment des routes voisines, qui fait l'objet du contenu du chapitre 3. Dans le contexte de la résolution globale du (m-PDPTW), nous appelons optimisation locale cette optimisation du (1-PDPTW), qui est appelée dans les deux étapes du processus de résolution.

Dans l'étape d'optimisation, le module d'optimisation locale est lancé sur les routes sur lesquelles un mouvement d'optimisation globale inter routes est appliqué, car il y a alors modification de la structure de ces routes.

#### 4.5.2 Partition : construction de la solution initiale

La première étape de notre méthode consiste à construire une solution initiale, prenant en compte l'ensemble des requêtes des clients et leur affectant un véhicule. Pour ce faire, un algorithme séquentiel d'insertion des requêtes est mis en place, considérant successivement les

requêtes et tentant de les insérer dans la route des véhicules ayant déjà des requêtes à traiter. L'insertion doit être faite de manière à respecter les contraintes du problème.

Il se peut qu'une requête ne puisse trouver directement sa place parmi les routes existantes. Dans cette situation, l'option naturelle pourrait consister à allouer un nouveau véhicule et à lui affecter comme première requête la requête non insérée. Cependant, avant d'en arriver à cette extrémité, une optimisation locale des routes pouvant potentiellement accueillir la requête est réalisée, afin de compléter l'algorithme d'insertion séquentielle. Cette optimisation locale a pour but de vérifier en un nombre restreint d'itérations  $Max\_Iter\_Partition$  que l'économie d'un véhicule ne peut pas être obtenue, tout en tentant d'améliorer la solution initiale avant la résolution entière du (m-PDPTW). L'optimisation permet également de s'échapper d'un possible optimum local pour les véhicules, lorsque l'insertion peut effectivement avoir lieu.

Traiter séquentiellement les requêtes des clients tout en favorisant une solution initiale déjà optimisée au niveau de la distance parcourue et du nombre de véhicules utilisés suppose que les données sont ordonnées selon une règle logique, qui facilite l'insertion et répond en partie aux contraintes du problème. Ainsi, les requêtes sont classées selon les règles (E3.18) et (E3.19) décrites au chapitre précédent (voir 3.7.1 - Initialisation) : il s'agit de trier l'ensemble des sites de chargement des clients par borne inférieure croissante de la fenêtre temporelle, et de placer chaque site de déchargement juste derrière le site de chargement correspondant. De plus, les véhicules sont répartis par ordre décroissant de leur capacité.

L'algorithme de construction de la solution initiale peut maintenant être présenté comme suit, dans la figure (Figure 4.3). À la lecture de cet algorithme, nous pouvons nous rendre compte qu'il n'existe aucune contrainte sur le nombre de véhicules. Nous supposons en effet que la taille de la flotte est illimitée au départ, et que donc une fois l'étape de partition terminée, toutes les requêtes des clients ont été affectées. Une autre hypothèse pourrait considérer une taille maximale autorisée pour la flotte, rajoutant par là même une contrainte supplémentaire à la construction de la solution initiale. Dans cette situation, les requêtes n'ayant pu être affectées seraient stockées, en attente d'une possible insertion dans l'une des routes de la flotte lors de l'étape d'optimisation globale, et le problème se verrait alors ajouté une caractéristique de type dynamique, que nous n'avons pas désiré considérer pour l'instant.

### 4.5.3 Optimisation inter routes

Pour tenter d'atteindre l'optimum global du (m-PDPTW), il n'est pas possible de se contenter des étapes de partition et d'optimisation locale, car le risque est grand de se retrouver sur un ensemble d'optima locaux lorsque les routes sont déterminées indépendamment les unes des autres. Pour éviter cette situation, une étape supplémentaire est introduite dans le processus de résolution, que nous appelons optimisation inter routes, ou optimisation globale. Le but est de rendre les routes communicantes et dépendantes les unes des autres, afin de tendre vers un meilleur optimum du problème. L'optimisation inter routes est basée sur la recherche tabou probabiliste, dont un aperçu a été présenté dans la partie (4.4 - Recherche tabou probabiliste), et dont nous détaillons la mise en œuvre ci-dessous.

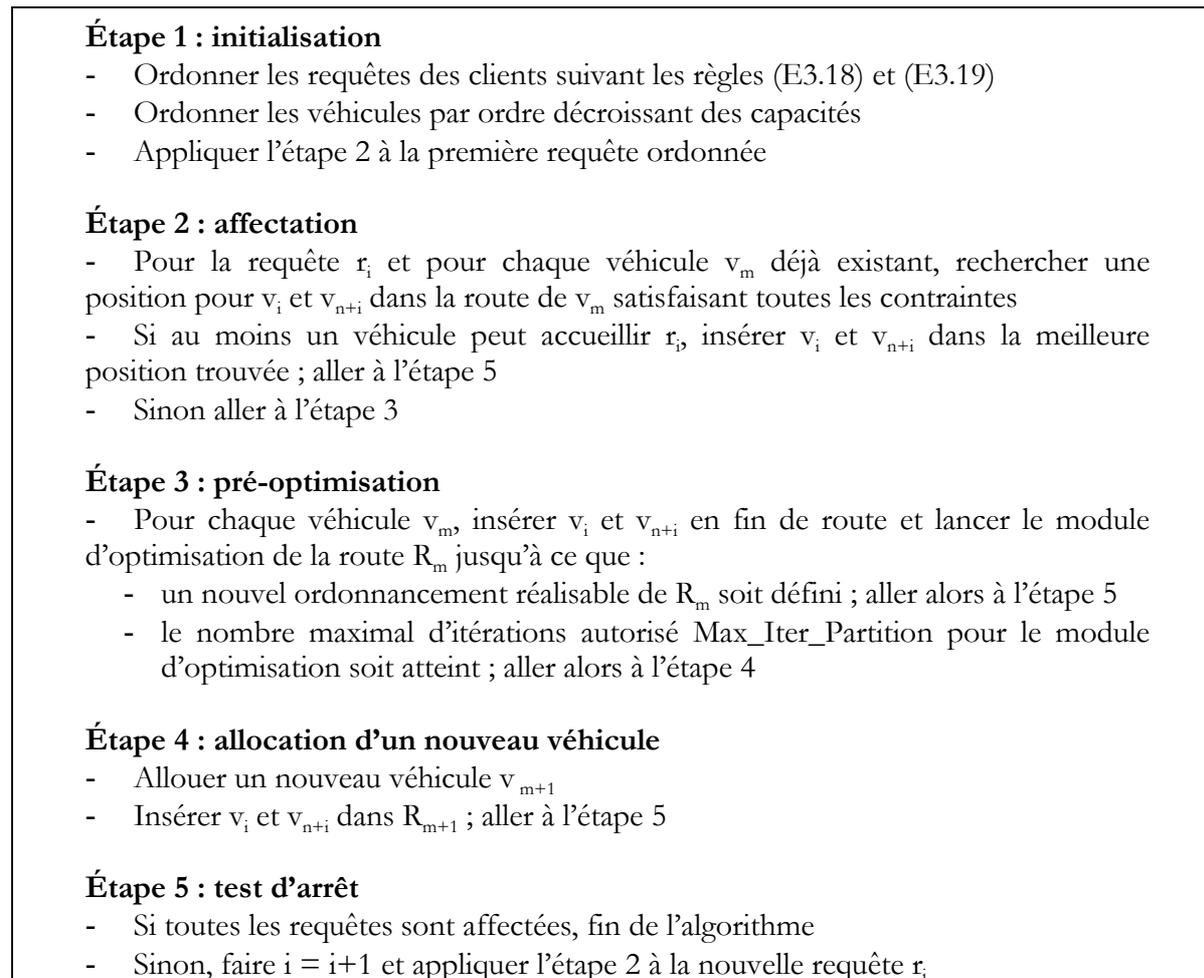


Figure 4.3 : Algorithme de partition pour le (m-PDPTW)

#### 4.5.3.1 Recherche tabou probabiliste

Cette application de la recherche tabou est basée sur des probabilités pour aider à la décision du meilleur mouvement du voisinage d'une solution courante. Dans ce contexte, deux paramètres sont à définir :

- la valeur de la probabilité  $p$  d'accepter un mouvement ;
- la taille  $Psize$  de la liste  $PList$  des mouvements candidats à la sélection du meilleur mouvement.

En ce qui concerne la probabilité  $p$ , une étude comparative menée par (Glover and Lokketangen, 1994)<sup>[36]</sup> sur le problème de programmation linéaire en variables bivalentes prouve que les valeurs de  $p$  proche de  $1/3$ , plus précisément dans l'intervalle  $[0.3, 0.4]$ , produisent le meilleur comportement de la recherche probabiliste. Prendre une valeur de  $p$  inférieure à 0.3 mène trop souvent à la sélection de mauvais mouvements, alors qu'une valeur supérieure à 0.4 provoque systématiquement la sélection des tous meilleurs mouvements, et ne garantit pas l'échappement d'un optimum local. Dans notre application, au lieu de fixer une fois pour toutes la valeur de  $p$ , l'astuce suivante est retenue afin d'accentuer les deux phases d'amélioration et de détérioration de la solution spécifiques à la recherche tabou :

- **Phase d'amélioration** : lorsque le processus de recherche locale améliore la valeur de la solution courante, la valeur de  $p$  est égale à 0.4 pour favoriser la sélection des bons mouvements.
- **Phase de détérioration** : lorsque le processus de recherche locale choisit une solution de coût plus élevé, la valeur de  $p$  est égale à 0.3 afin de diversifier la recherche et de provoquer la sélection des « mauvais » mouvements.

La taille  $Psize$  de la liste  $PList$ , quant à elle, est fixée à 10. Cette valeur est choisie arbitrairement de manière à avoir 98% de chances de choisir un mouvement de  $PList$  pendant la phase de détérioration. En effet, pour  $p=0.3$  :

$$\sum_{i=1}^{10} p(1-p)^{i-1} = 0.98 \quad (E4.1)$$

Il faut remarquer que l'alternance de la valeur de  $p$  dépend de la situation de la recherche locale à l'itération  $t$ , et que la détermination de ce que sont une phase d'amélioration et une phase de détérioration doit être affinée. Si à l'itération  $t$ , la liste  $PList$  comprend  $Psize$  mouvements potentiels, il se peut très bien qu'une partie de la liste soit composée par des mouvements améliorants, et l'autre partie par des mouvements dégradant la solution courante. Partant de ce constat, la liste  $PList$  est scindée en deux sous-listes : la liste  $PList_{improve}$  contient les mouvements améliorants, alors que la liste  $PList_{degrade}$  stocke les mouvements dégradants. Ces deux listes ont comme taille respective  $Psize_{improve}$  et  $Psize_{degrade}$ , telles que :

$$Psize_{improve} + Psize_{degrade} = Psize \quad (E4.2)$$

Les phases d'amélioration et de détérioration de la solution se définissent alors de la manière suivante :

- Si  $Psize_{improve} > 0$  : phase d'amélioration (au moins un mouvement améliorant)
- Sinon : phase de détérioration

Précisons maintenant les diverses composantes de la recherche tabou probabiliste : la structure du voisinage, la restriction tabou, la taille de la liste tabou (tenure), le critère d'aspiration, la stratégie de diversification, et le critère d'arrêt.

#### 4.5.3.1.1 Structure du voisinage

À chaque itération du processus de recherche locale, un voisinage de la solution courante est construit, suivant le même principe que celui énoncé au chapitre précédent (§3.7.2.1 - Structure du voisinage). Pour l'optimisation inter routes, deux types de mouvements sont employés : un mouvement d'échange de requêtes entre les routes (Figure 4.4), et un mouvement d'insertion d'une requête dans une autre route (Figure 4.5). Ces deux mouvements, que nous nommerons `inter_move_echange` et `inter_move_insert`, peuvent être vus comme une extension des mouvements d'échange et d'insertion déjà définis. Le mouvement `inter_move_echange` a pour rôle de diminuer la distance totale parcourue par la flotte de véhicules, en opérant des échanges de requêtes entre les routes. Le mouvement `inter_move_insert`, quant à lui, a également le rôle de diminuer la distance totale parcourue, mais également celui de réduire le nombre de véhicules utilisés, en opérant sur des déplacements de requêtes d'une route vers une autre route.

L'exécution des deux mouvements doit se faire avec le respect des contraintes du problème. Ainsi, contrairement à la génération du voisinage pour le (1-PDPTW), ne sont considérées ici que les solutions réalisables. Il n'y a donc pas lieu ici d'introduire de fonctions de pénalisation.

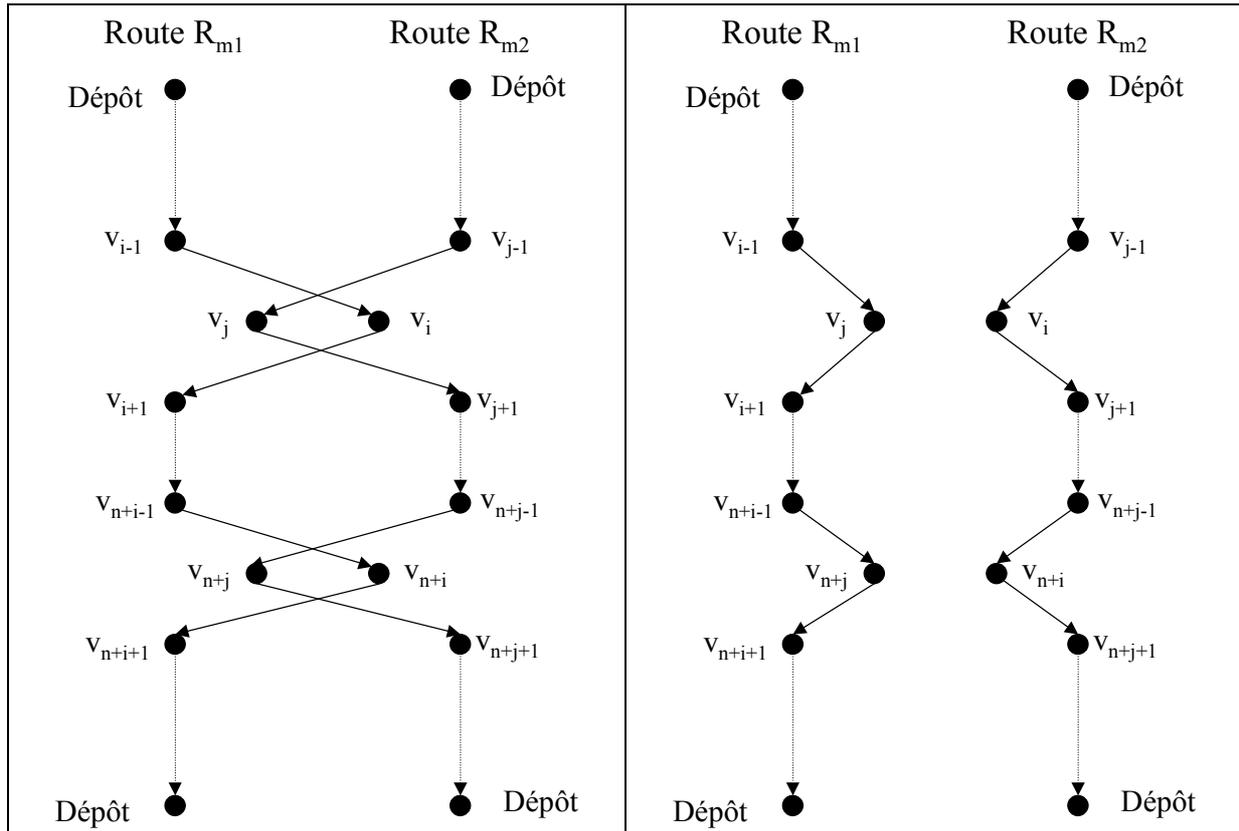


Figure 4.4 : Mouvement d'échange  $inter\_move\_echange(m1, m2, i, j)$

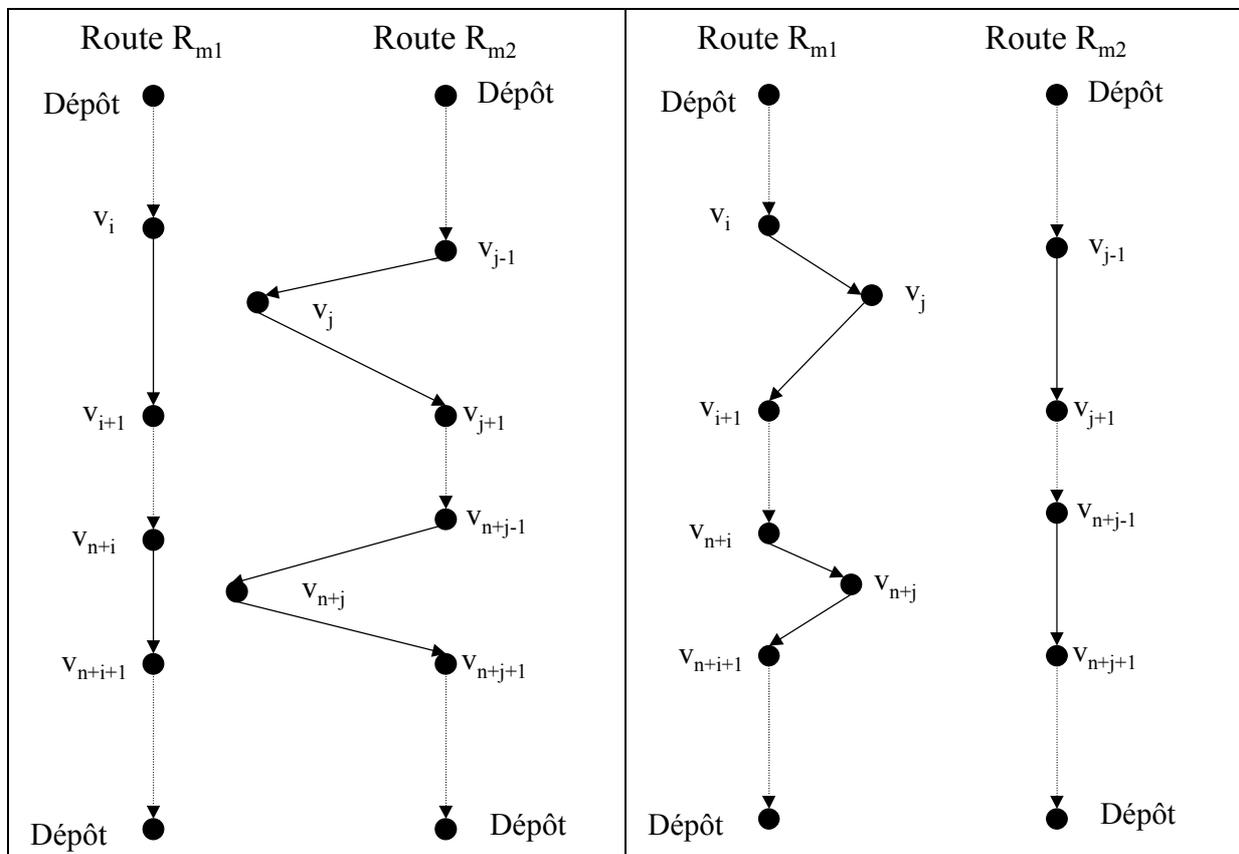


Figure 4.5 : Mouvement d'insertion  $inter\_move\_insert(m1, m2, i, j)$

## 4.5.3.1.2 Restriction tabou

Dans l'optimisation globale du (m-PDPTW), la restriction tabou utilisée considère les clients et les routes. Après un mouvement d'un client de sa route A vers une nouvelle route B (que ce soit un mouvement d'échange avec un autre client ou un mouvement d'insertion), le mouvement de retour de ce client vers sa route d'origine A est prohibé pendant les « tenure » itérations suivantes. Cette restriction est compatible avec la construction du voisinage, et permet d'utiliser une structure de la liste tabou unique pour la gestion des deux types de mouvements utilisés.

## 4.5.3.1.3 Structure de la liste tabou

De part la restriction tabou utilisée, deux types d'attributs tabou sont utilisés pour pouvoir rendre compte de l'état tabou d'une solution, les clients et les routes des véhicules. La structure de la liste tabou, de type mémoire attributive, se compose donc d'un tableau `tabou_routes` à deux dimensions, où les lignes représentent les clients et les colonnes représentent les routes des véhicules. Chaque case du tableau code l'itération à partir de laquelle un client est autorisé à se déplacer vers une route donnée. Ainsi, le déplacement d'un client  $i$  vers une route  $r$  est considéré tabou si et seulement si :

$$\text{itération\_courante} \leq \text{tabou\_routes}[i][r] \quad (\text{E4.3})$$

Le lecteur attentif pourra se rendre compte de l'abus de langage qui est fait ici. Le mot « liste » peut paraître en effet peu approprié pour parler d'une structure à deux dimensions. Néanmoins, conscient de cet abus, nous continuerons à utiliser l'expression « liste tabou » pour rester en accord avec la philosophie de la recherche tabou et ne pas déconcerter plus avant le lecteur. La structure de la liste tabou pour le (m-PDPTW) peut être représentée par la figure suivante (Figure 4.6).

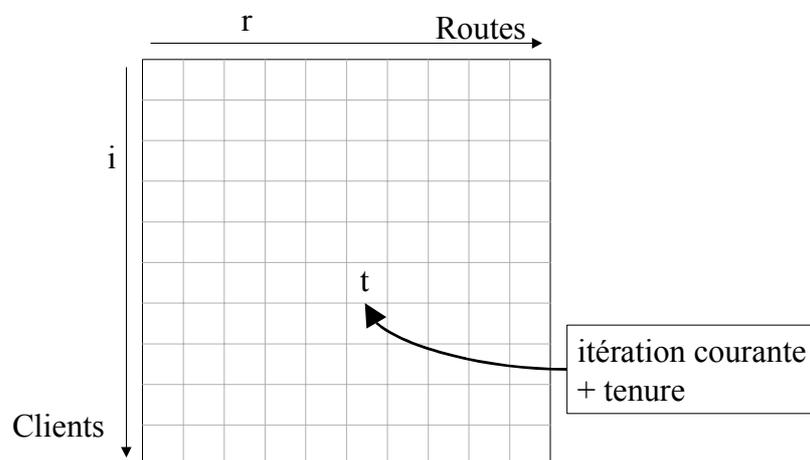


Figure 4.6 : Structure de la liste tabou pour le (m-PDPTW)

## 4.5.3.1.4 Taille de la liste tabou

Pour déterminer la taille  $T$  (tenure) de la liste tabou, le principe d'une liste tabou dynamique est adopté, identiquement à la partie (1-PDPTW) où la tenure varie au cours du processus de recherche locale. L'intervalle de variation retenu se définit comme  $[\text{minGlobal}T, \text{maxGlobal}T]$ ,  $\text{minGlobal}T$  et  $\text{maxGlobal}T$  restant à définir, et  $T$  est régénérée périodiquement après un certain nombre d'itérations.

4.5.3.1.5 Critère d’aspiration

Le critère d’aspiration globale est implémenté : un mouvement tabou peut définir le mouvement choisi pour le passage à l’itération suivante si la solution obtenue améliore la meilleure solution connue.

4.5.3.1.6 Stratégie de diversification

Une stratégie de diversification est également implémentée pour l’optimisation du (m-PDPTW), suivant le principe énoncé au chapitre 3 (§3.7.2.6 - Stratégie de diversification). Deux structures de mémoire sont introduites, enregistrant les fréquences des mouvements des clients par rapport aux routes des véhicules. Deux matrices sont nécessaires, l’une pour le mouvement d’échange, l’autre pour le mouvement d’insertion. Elles sont représentées par la figure (Figure 4.7). La stratégie de diversification débute après un nombre d’itérations  $W_{global}$ , et la fonction de pénalisation de paramètre  $\lambda_{global}$  est cumulée à la valeur de la solution courante.

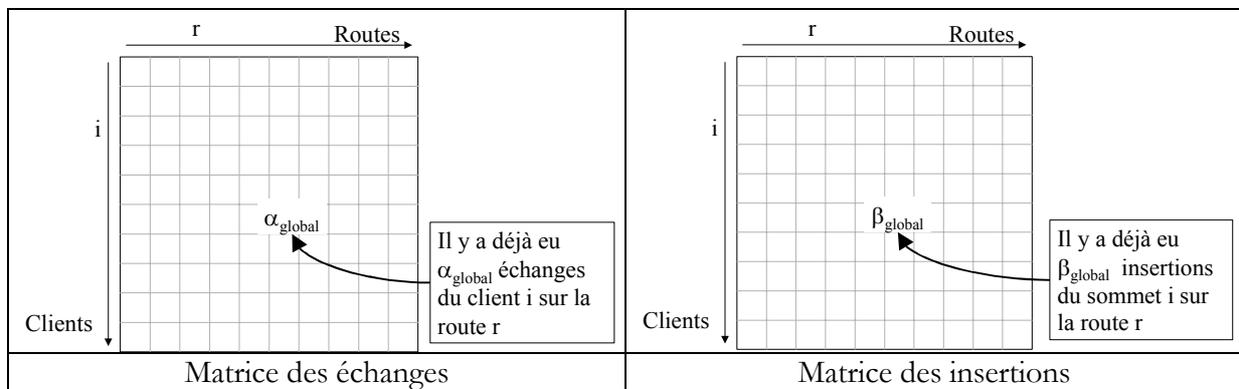


Figure 4.7 : Stratégie de diversification pour le (m-PDPTW) – structures de mémoire

4.5.3.1.7 Critères d’arrêt

Les critères d’arrêt portent sur le nombre d’itérations. Le processus d’optimisation globale s’arrête si l’une des conditions suivantes est vérifiée :

- un nombre maximal d’itérations Max\_Global\_Iter est atteint ;
- aucune amélioration de la meilleure solution n’est recensée pendant Max\_Global\_Best\_Iter itérations.

4.5.3.2 Algorithme général

Avec les données décrites ci-dessus, l’algorithme général d’optimisation inter routes pour le (m-PDPTW), basé sur la recherche tabou probabiliste, est présenté dans la figure (Figure 4.8).

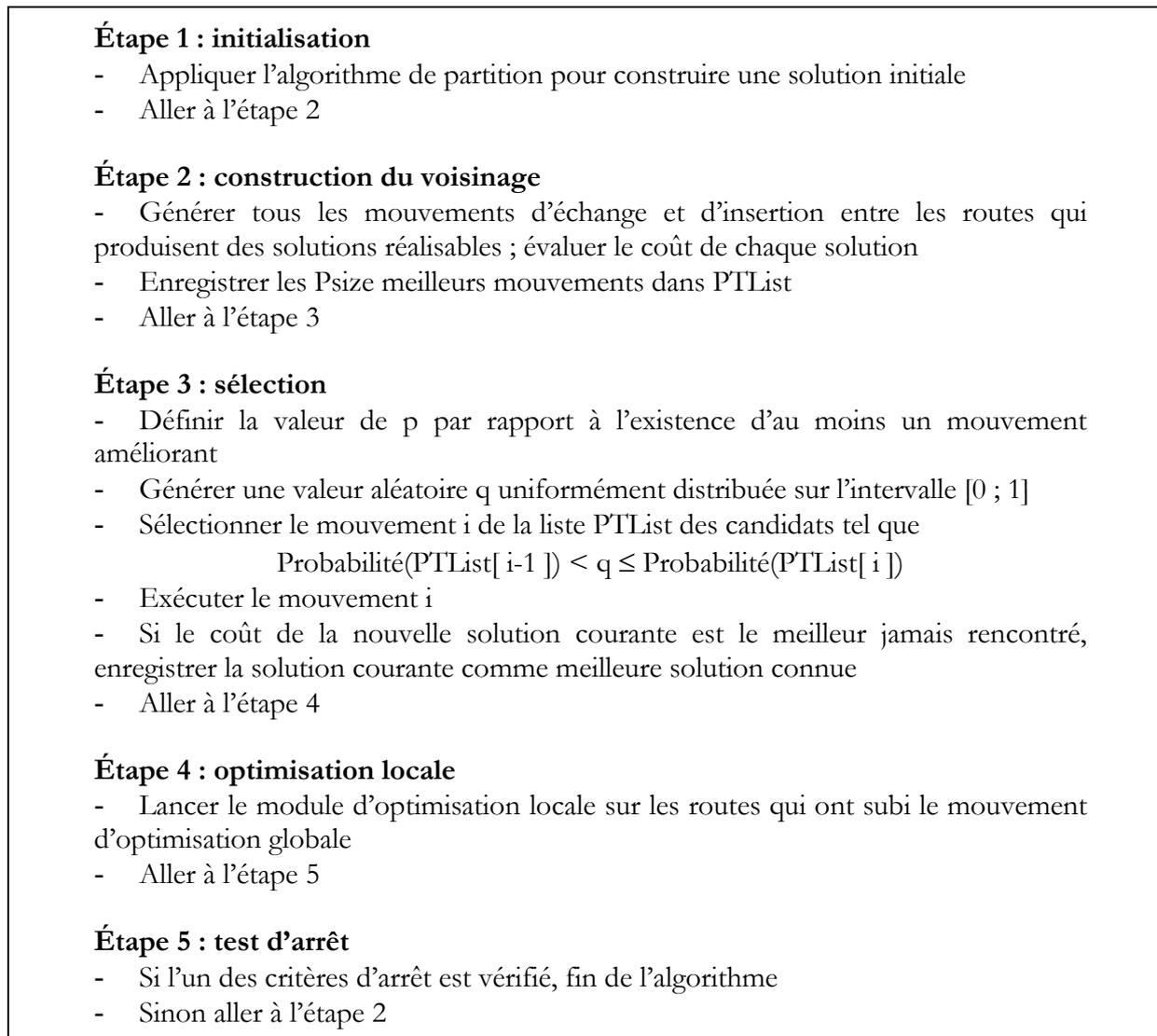


Figure 4.8 : Algorithme de résolution du (m-PDPTW)

## 4.6 Heuristiques de comparaison

L'heuristique de résolution que nous proposons est évaluée par rapport à trois autres méthodes, qui permettent de mieux situer les performances de notre méthode et de comparer les résultats obtenus. Les deux premières heuristiques sont des méthodes de construction d'une solution initiale basées sur des règles d'insertion, et permettent d'analyser notre phase d'initialisation. La troisième méthode se base sur la recherche tabou déterministe, et est employée afin de pouvoir étudier le comportement de la recherche tabou et de sa variante probabiliste sur un problème complexe d'Optimisation Combinatoire comme le (m-PDPTW).

### 4.6.1 Une heuristique d'insertion parallèle

Premièrement, une heuristique d'insertion parallèle des requêtes est introduite, car ce type d'approche est réputé pour proposer des résultats compétitifs avec les méthodes séquentielles sur des problèmes comprenant des contraintes temporelles (Potvin and Rousseau, 1993)<sup>[149]</sup>.

L'heuristique que nous proposons reprend le principe présenté par (Ioachim et al., 1995) <sup>[115]</sup> qui a servi à évaluer leur technique de génération de colonnes.

Dans un premier temps, les requêtes sont classées par ordre décroissant de leur durée d'exécution. Si des requêtes possèdent la même durée d'exécution, elles sont triées par ordre croissant de leur date de départ. La notion de durée d'exécution d'une requête doit être introduite : c'est le temps qu'il faut à un véhicule pour satisfaire cette requête uniquement, en partant et en revenant au dépôt. Ainsi, si  $d_i$  correspond à la durée d'exécution de la requête  $r_i$  :

$$d_i = t_{0,i} + p_i + t_{i,n+i} + p_{n+i} + t_{n+i,2n+1} \quad (E4.4)$$

Puis les requêtes sont traitées une par une. Chaque requête a la possibilité d'être insérée dans une route existante, d'initialiser une nouvelle route, ou d'être « mise en attente ». Le choix dépend des caractéristiques de la requête, et est basé sur l'hypothèse de (Ioachim et al., 1995) <sup>[115]</sup> que les requêtes ayant une longue durée d'exécution sont celles qui sont les plus aptes à initialiser une nouvelle route. Ainsi, pour une requête de durée d'exécution longue, son potentiel d'initialiser une nouvelle route est comparé avec sa meilleure insertion dans les routes existantes. Si le résultat de la comparaison est significatif, la meilleure alternative est appliquée ; si aucune conclusion probante ne ressort de la comparaison, la requête est « mise en attente ». En ce qui concerne une requête de durée d'exécution courte, il y a juste l'évaluation de son insertion dans une route existante. Si l'une des possibles insertions ne dégrade pas trop le coût de la solution, l'insertion est réalisée ; le cas échéant, la requête est « mise en attente ». Lorsque toutes les requêtes sont traitées au moins une fois, une seconde passe est réalisée sur les requêtes « en attente », en tentant de les insérer dans une route existante, et sinon en créant une nouvelle route.

Il nous reste maintenant à préciser trois points pour compléter la présentation de l'heuristique, qui ne sont pas décrits dans (Ioachim et al., 1995) <sup>[115]</sup>. Le premier concerne la définition de la longueur d'une durée d'exécution. En posant  $D$  la somme des durées d'exécution des requêtes et  $D_{moy}$  la moyenne des durées d'exécution, le critère de classement est le suivant :

- si  $d_i > D_{moy}$  : la durée d'exécution est longue
- si  $d_i \leq D_{moy}$  : la durée d'exécution est courte

Les deux autres points à éclaircir portent sur le critère d'évaluation de plusieurs alternatives. Introduisons  $n_{current}$  le nombre de requêtes déjà affectées sur des routes existantes. Pour affirmer que l'une des alternatives d'une requête de durée longue est significative, la comparaison entre la durée des solutions respectives est établie. En posant  $D_{create}$  la durée totale de la nouvelle solution courante pour une création de route et  $D_{insert}$  la durée totale de la nouvelle solution pour une insertion, le résultat de la comparaison est significatif, et l'alternative correspondant au minimum entre  $D_{create}$  et  $D_{insert}$  est appliquée, lorsque la différence des deux solutions possibles est supérieure à la durée d'exécution moyenne pondérée par un facteur dépendant du nombre de requêtes déjà traitées :

$$|D_{create} - D_{insert}| > \frac{n_{current}}{n} \cdot D_{moy} \quad (E4.5)$$

Enfin, le critère de décision de l'insertion d'une requête de courte durée peut être formulé par :

$$D_{insert} < n_{current} \cdot D_{moy} \quad (E4.6)$$

### 4.6.2 Une heuristique de construction spatio-temporelle

Nous présentons maintenant une heuristique de construction spatio-temporelle d'une solution initiale. Ce type de construction se base sur une règle de classement des sommets du graphe qui prend en compte les caractéristiques spatiale et temporelle des nœuds à visiter. Deux exemples d'une telle règle peuvent être trouvés dans (Ioachim et al., 1995)<sup>[115]</sup> et (Sexton and Choi, 1986)<sup>[166]</sup>.

La composante temporelle entre deux sommets s'exprime par la différence des milieux des fenêtres temporelles. Pour deux sommets  $v_i$  et  $v_j$ , de fenêtres temporelles  $[e_i, l_i]$  et  $[e_j, l_j]$ , posons  $z_i$  et  $z_j$  les milieux des fenêtres temporelles de  $v_i$  et  $v_j$ . La composante temporelle entre  $v_i$  et  $v_j$  se note alors :

$$Z_{\text{temp}}(i, j) = z_j - z_i \quad (\text{E4.7})$$

La composante spatiale entre les sommets  $v_i$  et  $v_j$  correspond au temps nécessaire à un véhicule pour se déplacer de  $v_i$  à  $v_j$  après avoir effectué l'opération demandée sur  $v_i$ . Ainsi,

$$Z_{\text{spat}}(i, j) = t_{ij} + p_i \quad (\text{E4.8})$$

La séparation spatio-temporelle entre  $v_i$  et  $v_j$  est la somme de la composante spatiale et de la composante temporelle entre ces sommets :

$$Z(i, j) = Z_{\text{temp}}(i, j) + Z_{\text{spat}}(i, j) \quad (\text{E4.9})$$

Il faut observer que la séparation temporelle peut être négative, et que par conséquent il n'est pas impossible que la séparation spatio-temporelle entre deux sommets soit également négative. D'une manière intuitive, deux sommets dont la séparation spatio-temporelle est grande auront peu de chance de se succéder dans une solution réalisable de bonne qualité. L'heuristique d'insertion proposée raisonne donc itérativement sur le principe du plus proche voisin : le premier sommet de la route est celui de plus petite date de départ, puis chaque nouveau sommet inséré en fin de route est celui qui a la plus petite séparation spatio-temporelle par rapport au dernier sommet de la route. L'insertion doit respecter les contraintes du problème : le sommet à insérer est testé sur les routes existantes, en explorant les routes par leur date de création, et si il ne peut s'intégrer dans aucune route, un nouveau véhicule est alloué avec ce sommet comme premier sommet à visiter.

### 4.6.3 Recherche tabou déterministe

Les deux premières heuristiques ci-dessus sont des procédures d'insertion visant à produire une solution initiale de bonne qualité, mais elles ne sont pas suivies d'une phase d'optimisation : elles sont utilisées comme moyen d'évaluation de la construction de notre solution initiale. Malheureusement, devant la complexité du (m-PDPTW), il ne nous a pas été possible ni d'implémenter efficacement l'une des méthodes de résolution citées dans la partie (§4.3 - Méthodes de résolution), ni de récupérer les jeux de tests utilisés par ces méthodes, afin de comparer la globalité des résultats.

Nous avons donc retenu comme seul moyen d'évaluation globale de notre heuristique la comparaison avec la méthode tabou déterministe. Une deuxième version de notre méthode a donc été implémentée, où le processus probabiliste de sélection du prochain mouvement (voir §4.4 - Recherche tabou probabiliste) a été remplacé par la sélection du meilleur mouvement du voisinage. Bien entendu, les résultats de cette analyse doivent être considérés avec précaution, car

le principe de base de résolution est identique pour les deux parties. Cependant, cette situation a le double avantage :

- d'une facilité d'implémentation ;
- d'offrir l'opportunité d'établir une analyse comparative du comportement des deux principales versions de la recherche tabou (déterministe / probabiliste) sur un problème aussi complexe que le (m-PDPTW).

### 4.7 Résultats expérimentaux

Nous avons désormais présenté tous les outils qui vont nous permettre d'évaluer l'heuristique de résolution de recherche tabou probabiliste. Il nous reste donc à présenter et analyser les résultats numériques fournis par les différentes heuristiques énoncées. Dans un premier temps, il nous faut cependant décrire les instances qui composent notre jeu de tests.

#### 4.7.1 Instances (m-PDPTW)

Pour évaluer notre heuristique, des jeux de tests sont générés, et la procédure de génération se base sur celle de (Solomon, 1987)<sup>[169]</sup> pour le problème de routage de véhicules avec fenêtres temporelles. Le principe de cette procédure est de créer plusieurs classes de problèmes, chaque classe faisant évoluer un paramètre particulier alors que les autres paramètres restent constants. Les facteurs déterminants qui sont retenus sont : la répartition géographique des villes, la durée maximale des routes, le positionnement et la largeur des fenêtres temporelles. La flotte est homogène : les véhicules sont considérés comme ayant les mêmes caractéristiques de capacité et de vitesse de déplacement. Les quantités à transporter, les temps de service et les temps de transport sont générés aléatoirement selon le même principe que dans la section (§3.8.2 - Instances (1-PDPTW)).

Les coordonnées géographiques des villes du réseau sont générées aléatoirement dans l'espace euclidien  $[0, 100]^2$ , de manière à vérifier l'inégalité triangulaire. La génération aléatoire peut être totale (nous parlons alors de problèmes de classe T1 et T2), par groupes (problèmes correspondants de classe G1 et G2), ou par semi-groupes (problèmes correspondants de classe S1 et S2). Les problèmes de type semi-groupes possèdent des villes qui sont générées à la fois de manière aléatoire totale et de manière semi-groupée. Il est également possible de jouer sur la durée maximale des routes (intervalle  $[e_0 ; l_0]$ ) et la capacité des véhicules, de manière à influencer le nombre de clients desservis par un même véhicule. Ainsi, comme l'utilise (Solomon, 1987)<sup>[169]</sup>, les problèmes T1, G1 et S1 ont un horizon de temps relativement court et des capacités de véhicule faibles, réduisant le nombre de clients par véhicule. À l'inverse, les problèmes T2, G2 et S2 ont un horizon de temps large et des capacités élevées, autorisant a priori un grand nombre de clients par véhicule.

Indépendamment de la durée maximale des routes, la largeur moyenne des fenêtres temporelles est un facteur primordial sur l'obtention des solutions réalisables, car elle donne plus ou moins de souplesse aux véhicules en offrant plus ou moins de possibilités de passage sur les sommets. Deux types de largeur de fenêtres sont générés pour une taille d'instance donnée : plutôt courte (C) ou plutôt longue (L).

Pour produire une instance du (m-PDPTW) dont nous sommes sûrs qu'il existe au moins une solution réalisable, nous procédons de la manière suivante. Dans un premier temps, les fenêtres temporelles des sommets sont déterminées, par leur centre et leur largeur. Le centre de la fenêtre

temporelle de chaque sommet  $v_i$  suit une loi uniforme sur l'intervalle  $[e_0 + t_{0i} ; l_{2n+1} - t_{i,2n+1} - p_i]$ . Puis la largeur de la fenêtre est définie comme étant la moitié d'un nombre généré par une loi normale de distribution, et dépend du type de largeur retenue (courte ou large). Les sommets sont ensuite répartis par paire, de manière à avoir pour chaque paire un sommet de chargement et un sommet de déchargement, et chaque paire est affectée à un client, avec le respect des contraintes de précédence et de temporalité. Lors de cette étape, la fenêtre temporelle peut être ajustée au besoin, par étirement sur les sites de chargement et de déchargement, pour obtenir au moins un trajet admissible avec ce client uniquement.

2 tailles d'instances de 50 clients et 100 clients sont créées. En tenant compte des 3 modes de génération des coordonnées géographiques du réseau, des 2 types de durée maximale et des 2 largeurs de fenêtres temporelles, c'est au total un ensemble de 24 instances qui compose notre jeu de test. Ainsi, par exemple, l'instance T1-C-50 correspond à une taille de 50 clients, avec une génération des sommets totalement aléatoire et une durée maximale des routes et une largeur de fenêtres temporelles relativement courtes. De même, l'instance G2-L-100 comprend 100 clients, avec des sommets générés d'une manière groupée, et la durée maximale des routes et la largeur des fenêtres temporelles sont relativement longues.

#### 4.7.2 Résultats numériques

La stratégie d'évaluation de notre heuristique de résolution du (m-PDPTW) se décompose en deux parties. La première consiste à comparer ses résultats à ceux des heuristiques de test sur un ensemble de problèmes communs, et d'en tirer les conclusions les plus pertinentes. Six instances de 50 clients représentant des situations où les contraintes temporelles sont soit plutôt fortes (3 instances : T1-C-50, G1-C-50, S1-C-50), soit plutôt faibles (3 instances : T2-L-50, G2-L-50, S2-L-50) nous paraissent adéquates pour ce type d'évaluation. La deuxième partie observe les solutions obtenues sur la totalité du jeu d'instances.

L'étude comparative des heuristiques considère 5 méthodes. La recherche tabou probabiliste est décomposée en deux étapes : la partition (PTS partition) et l'optimisation globale (PTS globale). Sont également présentées la recherche tabou déterministe (TS), l'heuristique d'insertion parallèle (IP) et l'heuristique d'insertion spatio-temporelle (ISP). L'intérêt de faire apparaître les résultats de la partition de la recherche tabou probabiliste tient au fait que les deux heuristiques d'insertion peuvent être vues, au même titre que la partition de l'instance, comme des méthodes de construction d'une solution initiale réalisable, de bonne qualité mais sans phase d'optimisation globale. Nous pourrions dire que ces deux heuristiques d'insertion sont utilisées dans le but d'établir un comparatif avec notre étape de construction d'une solution initiale. La recherche tabou déterministe permet, quant à elle, de fournir des repères sur la globalité de l'optimisation. Les paramètres en commun des deux recherches tabou sont présentés dans le tableau (Tableau 4.3).

Les résultats comparatifs entre les différentes heuristiques sont présentés dans les tableaux (Tableau 4.4) à (Tableau 4.11). Pour chaque instance, les heuristiques de recherche tabou sont relancées 5 fois. Ne connaissant pas initialement la solution optimale de chaque problème,  $S^*$  est considérée être la meilleure solution rencontrée au cours de l'ensemble des exécutions des heuristiques. La meilleure solution est celle qui satisfait par ordre de priorité décroissante aux critères : nombre de routes utilisées, coût total de la flotte (distance totale parcourue), durée totale (somme des durées individuelles des véhicules). Ainsi, une solution avec un nombre de routes plus petit, mais un coût total supérieur, par rapport à une autre solution du même problème, est considérée meilleure. Dans chaque tableau, la colonne 2 propose la moyenne des solutions obtenues en terme de distance totale, de durée totale, de nombre de routes, et de temps CPU

utilisé pour trouver cette solution. Le temps CPU est calculé à partir d'exécutions réalisées sur un PC 350 Mhz équipé d'un microprocesseur Pentium II. La colonne 3 établit l'erreur relative moyenne des solutions par rapport à S\*.

Fonction objectif	Minimiser la distance totale parcourue
Critères d'arrêt	Max_Iter =100000 ; Max_Best_Iter = 10000
Voisinage	$\lambda_{cap} = \lambda_{prec} = \lambda_{temp} = 100$ ; $\mu_{cap} = \mu_{prec} = \mu_{temp} = 500$
Tenure	T varie entre $[n/4, n/2]$ et change toutes les 2n itérations
Stratégie de diversification	W =500; $\lambda = 10$

**Tableau 4.3 : Paramètres des heuristiques de recherche Tabou**

Heuristique	Valeur des solutions moyennes (*)		Erreur relative moyenne	
PTS – Partition	10215	20	12 %	25%
	36700	47	24 %	
PTS Optimisation globale	9200	16	2 %	0%
	29700	370	3 %	
TS	9330	16	5%	0%
	29840	362	4 %	
Insertion parallèle	9530	16	6%	0%
	30170	5	5%	
Insertion spatio-temporelle	9735	18	8%	12,5%
	31580	6	6%	

(\*) Coût total                      Nombre de routes  
 Durée totale                      Temps CPU

**Tableau 4.4 : Comparaison des heuristiques pour T1-C-50**

Heuristique	Valeur des solutions moyennes (*)		Erreur relative	
PTS Partition	8920	17	16 %	6 %
	31090	42	15 %	
PTS Global	7580	16	0,8%	0 %
	26540	210	1%	
TS	7710	16	2%	0 %
	26890	217	1%	
IP	7687	16	1%	0 %
	27460	4	3,5%	
IST	7750	16	2%	0 %
	27885	6	5,1%	

(\*) Coût total                      Nombre de routes  
 Durée totale                      Temps CPU

**Tableau 4.5 : Comparaison des heuristiques pour G1-C-50**

Heuristique	Valeur des solutions moyennes (*)		Erreur relative	
PTS Partition	9380	14	12%	0 %
	27880	50	12%	
PTS Global	8850	14	4%	0 %
	25410	260	2%	
TS	9010	14	5%	0 %
	25360	235	2%	
IP	8430	14	0,5 %	0 %
	24870	18	0 %	
IST	8360	14	0%	0 %
	25060	17	0,1%	
(*)	Coût total	Nombre de routes		
	Durée totale	Temps CPU		

**Tableau 4.6 : Comparaison des heuristiques pour S1-C-50**

Heuristique	Valeur des solutions moyennes (*)		Erreur relative	
PTS Partition	6849	5	18 %	0 %
	19620	85	5 %	
PTS Global	6215	5	7 %	0 %
	18600	330	0,2%	
TS	6209	5	0,7 %	0 %
	18583	294	0,1%	
IP	5800	11	0,3%	2,2 %
	30275	10	62 %	
IST	6065	8	4 %	1,6 %
	27840	14	50 %	
(*)	Coût total	Nombre de routes		
	Durée totale	Temps CPU		

**Tableau 4.7 : Comparaison des heuristiques pour T2-L-50**

Heuristique	Valeur des solutions moyennes (*)		Erreur relative	
PTS Partition	5410	4	22 %	0 %
	15865	160	1,5 %	
PTS Global	4810	4	8 %	0 %
	15700	450	0,8 %	
TS	4890	5	9 %	25 %
	16010	360	2 %	

IP	4420	5	1 %	25 %
	18400	20	17 %	
IST	5000	5	13 %	25 %
	17850	18	14 %	

(\*) Coût total  
Durée totale

Nombre de routes  
Temps CPU

**Tableau 4.8 : Comparaison des heuristiques pour G2-L-50**

Heuristique	Valeur des solutions moyennes (*)		Erreur relative	
	PTS Partition	7105	6	35 %
	22720	90	0,8 %	
PTS Global	6430	6	22 %	0 %
	22510	230	0,3 %	
TS	6690	6	27 %	0 %
	23140	275	3 %	
IP	5270	7	0,5 %	16 %
	23560	10	4%	
IST	5420	7	3 %	16 %
	23750	12	5,5 %	

(\*) Coût total  
Durée totale

Nombre de routes  
Temps CPU

**Tableau 4.9 : Comparaison des heuristiques pour S2-L-50**

Enfin, les solutions relatives à la totalité des jeux de test sont relatées dans les tableaux (Tableau 4.10) et (Tableau 4.11), chaque tableau étant associé à une classe de problèmes. Chaque ligne des tableaux représente un type de problème sur lequel l'heuristique de recherche tabou probabiliste est relancée 5 fois. Les colonnes des tableaux décrivent respectivement la meilleure solution rencontrée sur l'ensemble des exécutions, la moyenne des solutions initiales construites par l'étape de partition, et la moyenne des meilleures solutions finales obtenues en fin de chaque exécution.

Instance	S* (*)	Solution initiale moyenne		Meilleure solution obtenue moyenne		
		T1-C-50	9115	16	10215	20
	29380	390	36700	47	29700	370
G1-C-50	7516	16	8920	17	7580	16
	24930	208	31090	42	26540	210
S1-C- 50	8407	14	9380	14	8850	14
	24886	245	27880	50	25410	260
T1-L-50	6541	10	7825	11	6620	10
	21782	240	23454	65	21960	240
G1-L-50	5402	10	6370	11	5420	10,2
	20115	260	22085	42	20820	213
S1-L- 50	7015	9	8230	11	7420	9

	18750	205	19620	55	18880	218
T1-C-100	19550	33	23310	39	19855	33
	60762	3210	66470	450	61260	1240
G1-C-100	17420	32	23360	38	18445	33
	56340	2460	61890	510	58430	2210
S1-C- 100	18405	28	24335	32	19175	28,7
	51750	1400	56420	480	52460	1540
T1-L-100	15680	21	19555	27	16060	21,3
	45130	2840	52190	340	47445	1800
G1-L-100	14885	20	21450	25,6	15025	20
	41320	1875	47442	510	42320	1980
S1-L- 100	12230	19	13990	23,6	12630	19,8
	38580	2070	41486	420	38970	4350
(*)	Coût total	Nombre de routes				
	Durée totale	Temps CPU				

**Tableau 4.10 : Résultats de PTS pour le (m-PDPTW) – Classe 1**

Instance	S* (*)		Solution initiale moyenne		Meilleure solution obtenue moyenne	
T2-C-50	9350	11	11020	13	9680	11,4
	21460	540	24570	140	21865	515
G2-C-50	9120	12	10820	17	9360	12
	20085	520	22310	180	19740	745
S2-C- 50	8850	10	11210	13	8940	10
	19830	655	20810	167	20035	785
T2-L-50	5854	5	6849	5	6215	5
	18570	345	19620	85	18600	330
G2-L-50	4430	4	5410	4	4810	4
	15570	480	15865	160	15700	450
S2-L- 50	5080	6	7105	6	6430	6
	22450	215	22720	90	22510	230
T2-C-100	18670	25	22630	29,2	19540	25
	54910	3480	56470	510	54190	3255
G2-C-100	19870	27	24780	31	20040	27
	52700	2850	53640	470	52250	2780
S2-C- 100	17450	24	21880	27,6	17990	24,1
	52430	3040	54720	485	52360	4500
T2-L-100	10540	9	12420	12	10870	9
	30270	3200	3670	575	29870	3410
G2-L-100	11225	10	13725	15	12055	10,2
	31540	2895	31948	445	32345	2945
S2-L- 100	9965	8	13285	12,7	10385	8,3
	27720	2625	30375	405	27845	2560
(*)	Coût total	Nombre de routes				
	Durée totale	Temps CPU				

**Tableau 4.11 : Résultats de PTS pour le (m-PDPTW) – Classe 2**

### 4.7.3 Discussion

Après avoir présenté ci-dessus les tableaux de résultats, quelque peu rédhibitoires il faut le reconnaître, nous allons maintenant analyser leur contenu afin de tirer les conclusions qui s'imposent sur le comportement des méthodes heuristiques développées. Notre analyse se découple en deux parties. La première partie porte sur l'évaluation des résultats des méta heuristiques de recherche tabou par rapport à d'autres heuristiques de résolution issues de la littérature, et plus particulièrement l'étape de construction d'une première solution réalisable. Pour ce faire, un jeu de test représentatif est sélectionné parmi toutes les instances générées pour l'évaluation. La deuxième partie est une application de la recherche tabou probabiliste sur l'ensemble des instances dans le but de tester la convergence de la méthode.

Concentrons-nous donc premièrement sur les tableaux (Tableau 4.4) à (Tableau 4.9). Le premier point à souligner concerne le comportement relativement médiocre de la partition des clients de la recherche tabou lorsqu'il faut construire la première solution réalisable. Le coût de cette première solution est en effet généralement 20 % au-dessus de celui fourni par les deux heuristiques d'insertion, et dans un temps d'exécution non comparable. Un bémol peut cependant être apporté quant au type d'instance traitée, qui influence le nombre de routes créées par ces étapes d'initialisation. Il apparaît en effet que pour le nombre de routes créées, la partition de PTS est plus performante pour les problèmes où les contraintes temporelles sont lâches (Tableaux 4.6 à 4.9), et que les heuristiques d'insertion sont plus efficaces lorsque les contraintes temporelles sont fortes (Tableaux 4.4 à 4.6). Néanmoins, ce premier résultat démontre que la règle utilisée par la partition des clients n'est pas des plus efficaces, et que l'idée de classer les villes du réseau par borne inférieure de la fenêtre temporelle ne garantit pas systématiquement la bonne qualité de la première solution en terme de coûts. Les heuristiques d'insertion, même si elles génèrent dans certaines situations un nombre de routes plus important, créent une solution réalisable plus homogène et plus exploitable : il est préférable d'avoir une solution de départ déjà faible de coût mais avec un nombre de routes plus élevé, surtout lorsqu'un module d'optimisation suit et peut avoir pour rôle de réduire le nombre de routes.

Ce premier résultat s'explique somme toute facilement. Les règles d'insertion utilisées sont en effet plus riches dans le cas des heuristiques d'insertion, car elles considèrent deux facettes du problème de chargement et de déchargement, la contrainte temporelle et la contrainte spatiale, alors que la règle de la partition PTS ne considère que l'aspect temporel. En outre, l'heuristique d'insertion parallèle évalue les deux possibilités d'intégrer un nouveau client dans une route existante ou de créer une nouvelle route avec ce client avant de choisir la solution de coût le plus significatif. Son comportement diffère en cela des deux autres méthodes de construction, qui tentent simplement d'insérer le nouveau client dans l'une des routes existantes, et le cas échéant créent une nouvelle route. L'heuristique d'insertion parallèle se situe à un niveau d'optimisation plus élevé, ce qui explique ses meilleurs résultats.

Cette même heuristique d'insertion parallèle semble également dominer légèrement la recherche tabou probabiliste, puisque cette dernière se retrouve derrière sur quatre des six instances en terme de coût, et qu'en terme de routes créées, ces deux méthodes sont à égalité sur 3 instances, et que PTS est meilleure sur les trois autres instances. Cependant, cette constatation doit être pondérée par le fait que PTS, comme nous l'avons constaté ci-dessus, démarre son optimisation avec une solution de départ relativement moyenne, de coût élevé et avec un nombre de routes faible. En outre, une fonctionnalité du processus d'optimisation globale n'a pas été introduite, qui consiste à savoir dégrader la solution courante en créant une nouvelle route temporaire, quitte à la supprimer ensuite. Ne pas être capable de créer de nouvelle route dans les mouvements d'échange entre les routes s'avère handicapant dans la situation où justement la solution initiale correspond à celle fournie par l'étape de partition. Pourtant, le processus d'optimisation globale

fonctionne tout de même remarquablement, puisque la différence entre la solution de la partition et la solution finale est importante.

Enfin, la comparaison des résultats entre les deux formes de recherche tabou (probabiliste et déterministe) tend à conclure que ces deux méthodes ont des performances quasi-identiques en qualité au niveau des coûts et du nombre de routes, même si la méthode déterministe paraît légèrement plus efficace en temps d'exécution : il n'existe pas de processus de sélection probabiliste d'un candidat.

D'une manière générale, l'optimisation de la solution après construction ressort comme relativement conséquente, puisqu'il n'existe pas de résultat incohérent, et que les solutions optimales sont toujours atteintes relativement rapidement par rapport à la taille des instances.

## 4.8 Conclusions

Dans notre démarche de vouloir proposer une méthode de planification opérationnelle de la collecte des produits manufacturés de l'électroménager qui arrivent en fin de vie, nous sommes amenés à considérer le problème de chargement et de déchargement avec contraintes de fenêtres temporelles, de capacité et de précedence, dans un contexte de véhicules multiples. La résolution de ce problème de l'Optimisation Combinatoire fait l'objet de ce chapitre.

### 4.8.1 Ce qu'il faut retenir

À l'instar de toutes les méthodes de résolution du (m-PDPTW) rencontrées dans la littérature, la méthode que nous proposons repose sur une approche en deux temps, de type partition / optimisation. L'intérêt principal de ce type d'approche est de « casser » la complexité du problème en répartissant la difficulté globale sur un ensemble de sous-problèmes locaux plus abordables. La question est alors de savoir sur quelle étape du processus engager la majorité des efforts : certaines méthodes de la littérature privilégient un effort important lors de la partition des requêtes des clients sur la flotte de véhicules, alors que d'autres approches préfèrent une partition simple pour lancer ensuite des algorithmes d'optimisation globale complexes. Par rapport à ces méthodes, l'une des originalités que nous introduisons porte sur l'équilibre des efforts d'amélioration de la solution consentis sur les deux étapes, par l'optimisation de la route d'un véhicule à la fois dans la phase de partition et dans la phase d'optimisation globale. La deuxième originalité concerne l'utilisation de la méthode tabou, qui à notre connaissance n'a encore jamais été exploitée sur des problèmes de routages de véhicules comprenant des contraintes de chargement et de déchargement.

L'étape de partition traite séquentiellement les requêtes des clients qui ont été préalablement ordonnées selon une règle de priorité. Une requête est insérée sur la route d'un véhicule de manière à minimiser les coûts. Lorsqu'une requête ne peut être affectée sur l'une des routes existantes, une étape d'optimisation locale sur chaque route est exécutée pour être sûr que l'allocation d'un nouveau véhicule est nécessaire. Une fois toutes les requêtes affectées, l'optimisation globale de la solution est une alternance entre une optimisation entre routes (échanges de requêtes entre deux routes) et une optimisation individuelle des routes.

Afin d'évaluer la performance des deux étapes de notre méthode, des heuristiques de comparaison sont introduites. La partition des requêtes est ainsi évaluée par rapport à une heuristique d'insertion parallèle et une heuristique d'insertion spatio-temporelle, deux procédures

d'insertion rencontrées dans la littérature, et dont le principe général est adapté à nos contraintes. L'étape d'optimisation globale n'a pu être comparée à d'autres méthodes existantes, car les contraintes ou les fonctions objectif traitées ne sont malheureusement jamais rigoureusement identiques, et ces méthodes sont relativement complexes à implémenter. En revanche, notre algorithme principal, basé sur la recherche tabou probabiliste, est modifié pour considérer la recherche tabou déterministe. Nous avons alors un support d'analyse du comportement de deux implémentations de la méthode tabou sur un problème complexe comme le (m-PDPTW).

### 4.8.2 Ce qui va suivre

Après avoir présenté la problématique de la collecte des produits manufacturés en fin de vie et avoir mis en évidence la nécessité de produire des plans opérationnels de ramassage, les deux derniers chapitres ont été consacrés à l'élaboration d'une méthode de résolution visant à satisfaire les demandes émises à l'intérieur d'une zone géographique, et à acheminer les produits collectés vers les centres de traitement adaptés.

Cependant, la collecte n'est qu'un des chaînons de la logistique inverse des produits manufacturés en fin de vie, et d'autres acteurs ont un rôle également déterminant dans le processus de récupération de ces produits. Même si la planification opérationnelle du ramassage que nous proposons réalise l'ensemble des objectifs attendus, il reste à établir son intégration dans le contexte plus général du recyclage de ces produits. Cette intégration fait l'objet du chapitre suivant, en se basant sur un modèle générique de plate-forme de récupération et sur un langage de modélisation unifié qui permet de rassembler dans un même modèle des informations et des comportements a priori hétérogènes.

# Chapitre 5 Aide à la décision

## 5.1 Introduction

L'un des objectifs annoncés au début de ce mémoire était de proposer une contribution à la planification opérationnelle de la collecte des produits techniques en fin de vie, en étudiant les différents types de collecte existants ou à venir et en déterminant des solutions réalisables et applicables pour les situations qui autorisaient cette démarche. Cet objectif a été atteint et présenté dans les trois chapitres précédents : le chapitre 2 a permis d'identifier le mode de ramassage à domicile comme étant l'un des modes de collecte les plus prometteurs, et a été modélisé et résolu dans les chapitres 3 et 4.

Nous nous étions également fixé comme objectif de participer à l'optimisation globale de la chaîne logistique inverse des produits techniques, notamment en refusant d'étudier individuellement le système de collecte, mais plutôt en analysant et en proposant des solutions sur l'interfaçage entre la collecte et les autres acteurs du processus de récupération des produits. Tel est donc l'objet de ce chapitre : l'intégration du module de planification opérationnelle de la collecte comme une simple composante du système global du recyclage. En ne voulant pas rester au niveau algorithmique et technique des deux chapitres précédents, nous montrons ainsi notre volonté de rendre nos résultats exploitables et insérables dans le contexte de la chaîne inverse. Nous allons en particulier justifier cette approche en positionnant les résultats algorithmiques des deux chapitres précédents comme le cœur d'un système d'aide à la décision axé sur l'opérateur humain, planificateur et gestionnaire de la flotte des véhicules chargés du transport des produits à recycler.

Pour illustrer nos propos et rendre notre contribution plus accessible et valorisable, la suite du chapitre est basée sur une étude de cas, un réseau de plates-formes de réparation et de désassemblage des produits techniques en fin de vie. Cette plate-forme générique de recyclage des déchets encombrants a été conçue dans le projet (Rester Propre, 2000)<sup>[43]</sup> financé par la région Rhône-Alpes, et regroupe en son sein les fonctions principales nécessaires à la récupération des produits. De plus, afin d'exprimer le plus clairement possible les idées que nous proposons de mettre en œuvre, il nous apparaît primordial de disposer d'un langage de modélisation capable de représenter facilement des entités aussi complexes et hétérogènes que la collecte, la réparation ou le désassemblage des produits techniques en fin de vie, à l'intérieur d'un réseau de plates-formes

de recyclage. Rassembler et manipuler ces entités en un même modèle est rendu possible par l'utilisation du concept de l'objet, en s'appuyant sur le langage de modélisation unifié orienté objet UML (Unified Modeling Language) (Muller, 1997)<sup>[19]</sup>.

Le chapitre se structure donc de la façon suivante. Dans un premier temps, la plate-forme de réparation et de démontage est brièvement présentée, ainsi que le réseau de plates-formes. Ce réseau constitue la base sur laquelle nous nous appuyons pour développer nos dires. Puis nous nous attardons quelques instants sur la description succincte du langage UML, de ses notations et des diagrammes utilisés. Nous attaquons enfin la modélisation du réseau de plates-formes par UML et deux études de situations faisant intervenir l'ensemble des coopérants du réseau, avant de conclure.

## 5.2 Étude de cas : plate-forme de réparation et de désassemblage

Afin d'illustrer notre vision de la manière dont la planification opérationnelle de la collecte doit s'intégrer dans le processus de récupération des produits encombrants de l'électroménager, nous avons pris le parti de nous baser sur un exemple précis, un cas d'étude proche de la réalité et qui permettra de valider nos propos. L'exemple que nous allons maintenant présenter est une extrapolation du fonctionnement de l'association ENVIE<sup>[186]</sup>, partenaire industriel du projet (Rester Propre, 2000)<sup>[43]</sup>, financé par la Région Rhône-Alpes, et dont le sujet principal de recherche porte sur l'automatisation du recyclage des produits encombrants de l'électroménager. Dans ce projet multi disciplinaire, faisant intervenir des compétences issues de la Sociologie, de l'Automatique et de l'Informatique, une plate-forme de réparation et de désassemblage a été imaginée afin de fédérer toutes les intelligences et les attentions quant à l'appréhension de la problématique de la récupération des produits. C'est sur cette plate-forme virtuelle et générique, censée représenter de la meilleure des façons ce que seront les installations futures de traitement des produits, que nous allons nous appuyer pour développer notre argumentation sur l'intégration de la collecte dans un système de recyclage plus général.

### 5.2.1 Une plate-forme de réparation et de désassemblage

La plate-forme de récupération des produits que nous introduisons maintenant (Figure 5.1) se veut une plate-forme générique, car elle rassemble en son sein les principales fonctions nécessaires au traitement complet des produits : le tri, le diagnostic, le stockage, la réparation et le désassemblage (§1.2.6 - Logistique inverse). Le cheminement d'un produit à l'intérieur de cette structure peut être décrit de la manière suivante. Le produit usagé arrive en entrée de la plate-forme grâce à une opération de collecte. Il est diagnostiqué dans le but de déterminer son mode de récupération : la réparation ou le désassemblage. La réparation est entièrement manuelle, alors que le désassemblage fait appel à des techniques semi-automatisées (découpe à jet d'eau, robot). Une fois diagnostiqué, le produit est stocké en attente de traitement. Le désassemblage du produit fournit des pièces détachées réutilisables pour la réparation d'autres produits usagés, des matières premières (plastiques, matières ferreuses ...), ou des ensembles de pièces à caractère polluant qui ne peuvent pas être plus démontées et qu'il est nécessaire de stocker de manière définitive dans des endroits spécifiques (exemple du tube cathodique). Les pièces détachées et les matières premières extraites sont acheminées dans des stocks appropriés. La réparation du produit nécessite l'utilisation de pièces détachées qui sont prises dans ces stocks. Les matières recyclées (produits réparés, pièces détachées, matières premières) sont ensuite réinjectées sur le marché, mises en décharge, ou laissées en stock pour une utilisation future. Une description précise des fonctionnalités de cette plate-forme peut être trouvée dans (Rester Propre, 2000)<sup>[43]</sup>.

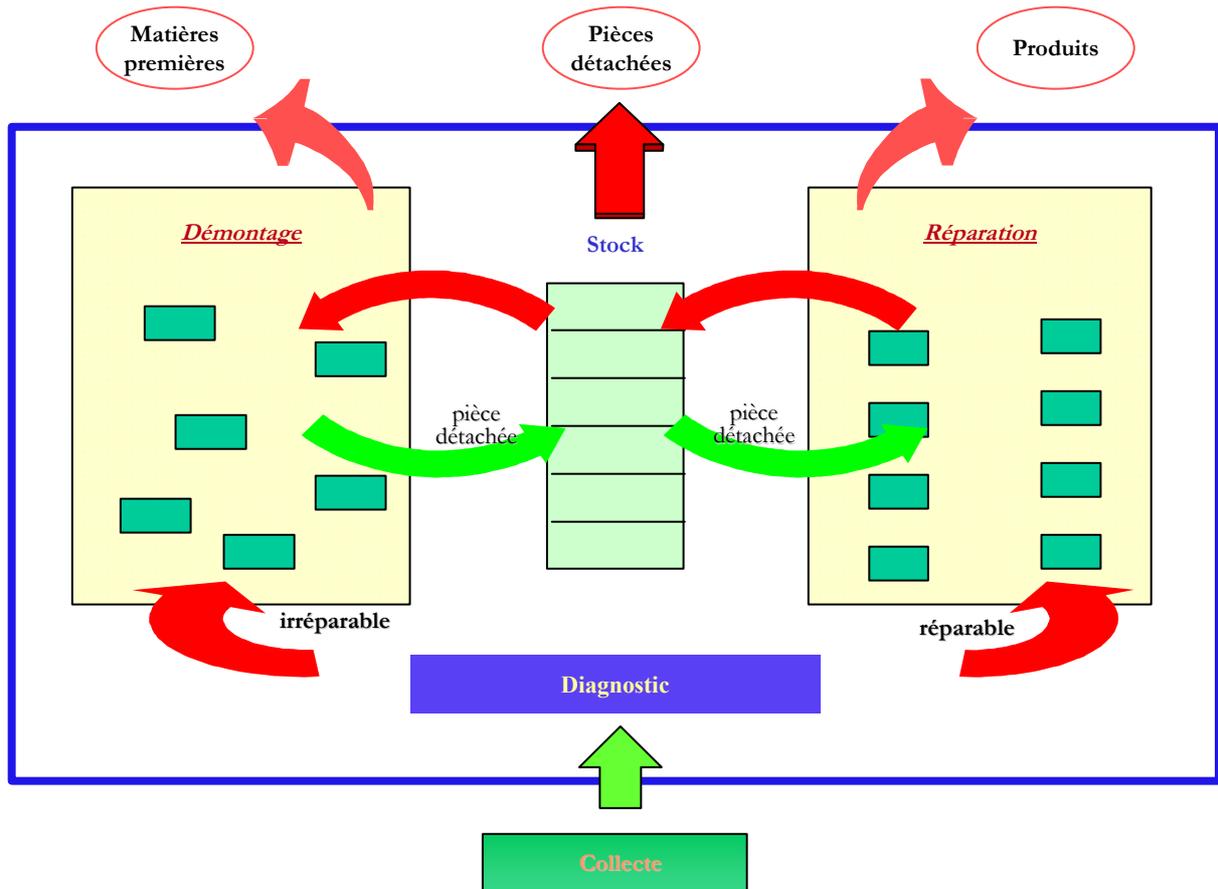


Figure 5.1 : Plate-forme de réparation et de désassemblage

### 5.2.2 Un réseau de plates-formes de réparation et de désassemblage

Le principe de la plate-forme décrite ci-dessus est étendu au réseau de plates-formes, afin de tendre vers une situation plus proche de la réalité et plus applicable par rapport à la situation d'une plate-forme unique et générique, rassemblant en un même endroit toutes les fonctionnalités utiles à la récupération des produits. L'existence d'un réseau de plates-formes se conçoit avec un double objectif :

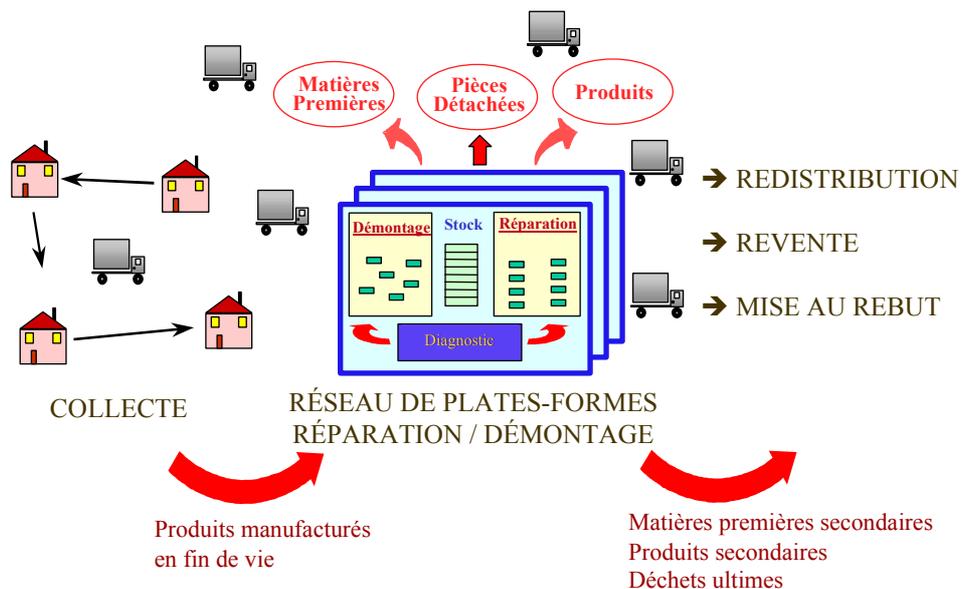
- proposer une meilleure couverture géographique des installations de recyclage ;
- favoriser la spécialisation des installations sur certains types de produits et de traitements adaptés pour ces produits.

En ce qui concerne la couverture géographique, imaginons un instant le cas d'une grande agglomération qui ne disposerait en tout et pour tout que d'une seule et unique installation de récupération des produits techniques usagés. Cette situation engendrerait, du point de vue de la collecte et des transports, des coûts d'exploitation relativement conséquents, du fait des grandes distances parcourues pour le ramassage et l'acheminement des déchets vers cette plate-forme de recyclage. De notre point de vue, afin de faciliter l'exécution de la planification de la collecte, l'implantation d'un réseau de points de contrôle et de diagnostic des produits usagés prend tout son sens, dans la mesure où chaque point de contrôle aurait comme rôle, pour un produit usagé, soit de conserver ce produit si le traitement de récupération approprié existe sur ce point d'arrêt, soit de déterminer la meilleure installation de traitement. Ces points de contrôle sont alors

matérialisés par tout ou partie de la plate-forme de récupération décrite ci-dessus, rassemblant l'une ou plusieurs des fonctions de recyclage proposées.

En outre, les produits manufacturés en fin de vie sont de diverses natures, et peuvent nécessiter dans le cas du démontage des techniques de désassemblage appropriées. Dans le but d'optimiser le rendement de chaque plate-forme, il peut être intéressant de spécialiser chaque unité sur des types de produits spécifiques, nécessitant peu de changement d'outils ou de préparation des techniques (§1.3.2 - Le désassemblage et la collecte). Ces techniques ayant des coûts d'exploitation relativement conséquents, cette solution permet une plus grande efficacité de la plate-forme. Les matières secondaires ainsi produites sont alors revendues sur le marché avec une valeur ajoutée négociable, et viabilisent le recyclage des produits manufacturés.

Ainsi, la suite de notre travail se base sur l'hypothèse de l'existence d'un réseau de plates-formes de réparation et de désassemblage, qui autorise l'optimisation du rendement du désassemblage semi-automatisé et l'amélioration de la couverture géographique de la collecte. Chaque plate-forme peut être spécialisée sur certains types de produits. Des échanges d'information ou de matières sont autorisés entre ces plates-formes, comme par exemple l'acheminement d'un produit qui ne peut être désassemblé par une plate-forme vers une seconde plate-forme, ou le transport d'une pièce détachée lors d'une réparation urgente. L'implantation de ces plates-formes est supposée réalisée de manière pertinente sur la zone géographique à couvrir, afin de minimiser les coûts de transport liés à la collecte des produits et aux échanges de matière entre plates-formes.



**Figure 5.2 : Réseau de plates-formes de réparation et de désassemblage**

Cette hypothèse primordiale de travail étant désormais établie, nous allons pouvoir nous consacrer de manière plus approfondie au sujet de ce chapitre, qui porte sur l'intégration du module de planification de la collecte dans l'architecture globale du système de récupération des produits. Cependant, il ne nous est pas encore possible de présenter immédiatement le contenu de nos idées sans introduire auparavant un outil de support qui nous permet de faire ressortir les acteurs et les mécanismes divers qui s'enchaînent au sein du système. De plus, cet outil doit être capable de manipuler un niveau d'abstraction relativement élevé afin de symboliser des activités

aussi hétérogènes que la collecte, le diagnostic, la réparation et le désassemblage au sein d'un même modèle. En réalité, ce n'est pas tant d'un outil de modélisation à proprement parler dont nous avons besoin, mais plutôt d'une notation, d'un langage de modélisation qui n'offre aucune restriction quant au contenu à modéliser, mais qui propose en revanche une manière de noter les modes de communication et d'échanges entre les différentes entités du modèle. C'est pourquoi nous optons pour le langage de modélisation unifié orienté objet UML (Unified Modeling Language) (Muller, 1997) <sup>[19]</sup>. Ce langage s'appuie sur la notion objet, qui s'avère être une notion très intéressante dans notre cas, puisque un objet est capable de représenter tout et n'importe quoi. La structure d'un objet se compose à la fois d'un état, modifiable à chaque instant, et d'une définition de son comportement interne et vis-à-vis du monde qui l'entoure. Un objet sait donc communiquer avec d'autres objets environnants. Le langage UML reprend ces propriétés et les affiche au lecteur d'une manière graphique par des diagrammes, rendant la compréhension des modèles excessivement aisée et accessible. Le paragraphe suivant présente brièvement ce langage de modélisation UML.

### 5.3 Un langage de modélisation unifié : UML

UML (*Unified Modeling Language*) est un langage de modélisation objet qui a été développé afin de définir la notation standard pour la modélisation des applications construites à l'aide d'objets. La notation UML représente l'état de l'art des langages de modélisation objet, et se place comme successeur naturel des notations des méthodes de Booch, OMT (*Object Modeling Technique*) et OOSE (*Object Oriented Software Engineering*) (Muller, 1997) <sup>[19]</sup>.

Le langage UML se base sur le concept de l'objet et sur une présentation graphique, à l'aide de diagrammes, pour répondre à quatre objectifs :

- la modélisation de systèmes entiers : considérer le système étudié de manière globale, dans son comportement à la fois statique et dynamique ;
- l'établissement d'un couplage explicite entre les concepts et les artefacts exécutables : caractériser l'impact de perturbations sur le fonctionnement et la structure du système ;
- la prise en compte des facteurs d'échelle inhérents aux systèmes complexes ;
- la facilité de communication entre l'homme et l'ordinateur : la manipulation des diagrammes permet de générer automatiquement du code de programmation directement exploitable par la machine.

#### 5.3.1 Modèles et diagrammes

Dans le langage UML, il n'existe pas un mais plusieurs modèles servant à la représentation des systèmes. Chaque modèle est une unité de base du développement, entité abstraite et simplifiée qui permet de comprendre et de simuler. Une classe de modèles permet de capturer un aspect particulier, mais mis bout à bout, l'ensemble des classes de modèles fournit l'exhaustivité des informations liées aux systèmes. UML utilise les classes de modèles suivantes :

- le modèle des classes capture la structure statique ;
- le modèle des états exprime le comportement dynamique des objets ;
- le modèle des cas d'utilisation décrit les besoins de l'utilisateur ;
- le modèle d'interaction représente les scénarii et les flots de messages ;
- le modèle de réalisation montre les unités de travail ;
- le modèle de déploiement précise la répartition des processus.

Ces modèles de base sont manipulés par des vues graphiques ou diagrammes, qui permettent d'établir des projections et des liaisons entre les éléments de modélisation des diverses classes de modèles. Pour un modèle, il peut exister plusieurs diagrammes, montrant la globalité ou simplement une partie du modèle. Les diagrammes suivants sont définis par UML :

- les diagrammes de classes ;
- les diagrammes de séquence ;
- les diagrammes de collaboration ;
- les diagrammes d'objets ;
- les diagrammes d'états-transitions ;
- les diagrammes d'activité ;
- les diagrammes des cas d'utilisation ;
- les diagrammes de composants ;
- les diagrammes de déploiement.

Dans la suite du chapitre, nous n'utiliserons pas la totalité des diagrammes précités, car certains ne sont employés que dans une phase d'analyse fine des relations entre modèles, alors que d'autres servent à la définition des besoins et des contraintes liées à une approche projet. Notre objectif étant l'intégration de la planification opérationnelle de la collecte dans le système de réseaux de plates-formes de réparation et de démontage, les diagrammes des cas d'utilisation, de classes, de collaboration et de séquence nous semblent suffisants pour montrer la manière dont nous pensons faire interagir la collecte avec les autres acteurs du système de recyclage. Nous ne présenterons pas plus profondément les composants du langage UML. En revanche, dans la suite du chapitre, lorsqu'une nouvelle notion en rapport avec UML apparaîtra, une petite explication permettra au lecteur d'affirmer sa compréhension du langage et de se situer par rapport au contexte général.

### 5.4 Intégration du module de collecte

Dans les deux chapitres précédents, nous avons présenté des algorithmes axés sur la résolution d'un problème de collecte particulier, où la flotte de véhicules va vers la population pour ramasser les produits usagés et les acheminer vers des installations de récupération. Ce type de collecte n'est pourtant qu'un type parmi d'autres (voir la liste §2.3.4 - Les différents modes de collecte), et tous les modes de collecte existants ne doivent pas être occultés par celui que nous avons considéré dans ce travail. Pour finaliser notre contribution sur l'élaboration de plans de collecte des produits encombrants, il est donc de notre devoir d'analyser les interactions de la collecte avec les autres acteurs de la logistique inverse. Dans ce contexte, la planification opérationnelle que nous proposons est incluse dans un module d'aide à la décision, dont les solutions sont présentées à un opérateur humain de routage de la flotte, qui lui seul déterminera le plan de route qui lui semblera le plus en adéquation avec la réalité du moment. Telle est la vision que nous nous faisons des algorithmes que nous avons créés précédemment, et c'est sûrement la seule qui autorise une possible exploitation en milieu industriel. Il est en effet tout à fait déraisonnable et illusoire que penser que le processus de collecte puisse être complètement géré, validé et exécuté de manière totalement automatisée ; ce serait une négligence grave que d'oublier le facteur humain dans ce système si complexe qu'est la récupération des produits.

De ce fait, nous allons nous baser sur le réseau de plates-formes de réparation et de désassemblage, introduit dans la première partie de ce chapitre, pour valider notre approche et

présenter la manière dont le module de planification de la collecte peut se greffer autour des autres acteurs du recyclage. Notre présentation va utiliser les notations UML, car celles-ci possèdent une puissance de modélisation qui permet de gérer dans un même modèle des entités extrêmement complexes et de nature totalement différente, tout en exprimant aisément les relations entre les entités, notamment les flux d'information. Nous allons donc nous engager dans la modélisation du réseau de plates-formes, en précisant ses structures statique et dynamique, puis en analysant par quelques situations significatives son comportement face à de nouveaux événements, et en nous focalisant sur le rôle de la collecte.

Comme nous l'avons déjà indiqué précédemment, la notation UML ne gère pas un mais plusieurs modèles, et chaque modèle peut être instancié par un ou plusieurs diagrammes. Les diagrammes que nous introduisons maintenant nous permettent de capturer les fonctionnalités essentielles du réseau et de montrer les interactions avec la collecte. Pour chaque nouveau type de diagramme introduit, nous expliquons brièvement au lecteur novice le rôle et la particularité du diagramme, afin que la compréhension du modèle en soit facilitée. Les diagrammes qui vont suivre sont :

- **deux diagrammes des cas d'utilisation**, qui expliquent le fonctionnement du réseau de plates-formes et la manière dont est planifiée la logistique des transports dans la logistique inverse ;
- **deux diagrammes de classe**, l'un présentant la structure physique statique du réseau, l'autre pour la détermination des ordres de transport ;
- **deux diagrammes de séquence** précisent le processus de création d'une requête de transport pour une pièce détachée, ainsi que la prise en compte d'une nouvelle requête de collecte.

#### 5.4.1 Diagramme des cas d'utilisation

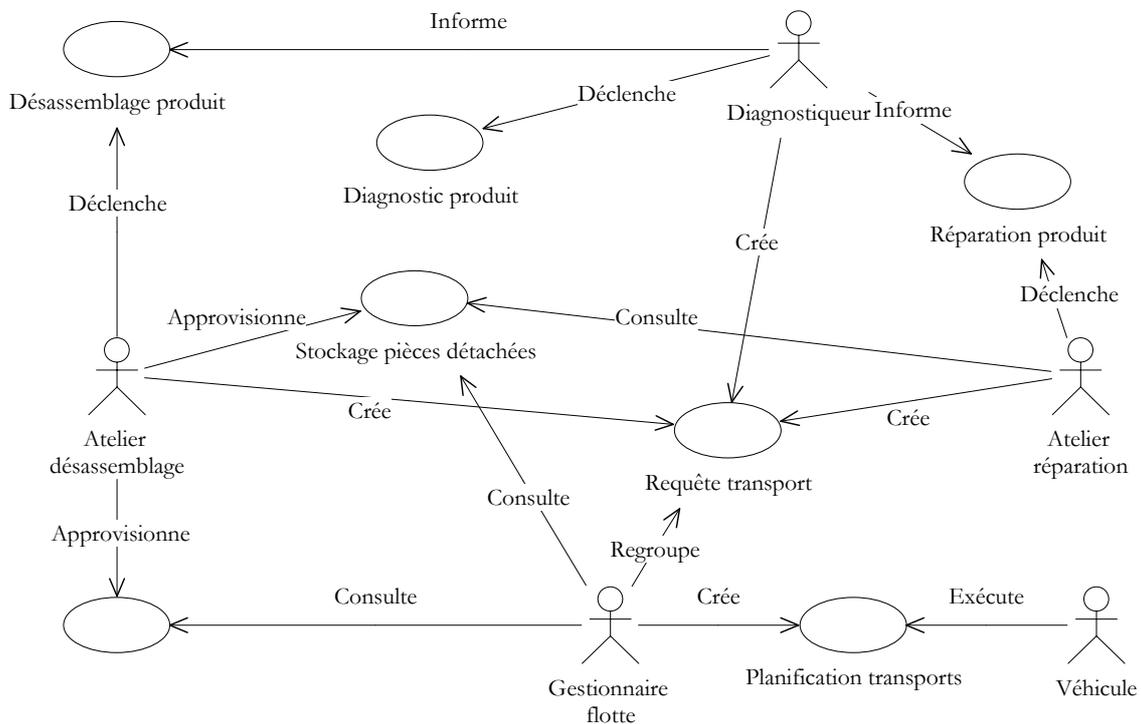
Les cas d'utilisation représentent le premier pas dans la modélisation d'un système par la notation UML. Ils permettent de mettre en évidence les limites du système et ses relations avec l'environnement extérieur, et décrivent sous forme d'actions et de réactions son comportement du point de vue de l'utilisateur. C'est dans cette première étape d'analyse qu'il est possible d'établir une bonne expression des besoins des utilisateurs et de centrer l'attention sur les informations primordiales du système.

##### 5.4.1.1 Structure physique et statique du réseau

Ce premier diagramme des cas d'utilisation (Figure 5.3) présente la structure physique et statique du réseau de plates-formes de recyclage. Il est un support descriptif des flux informationnels nécessaires à la détermination d'un plan de transport des matières au sein du réseau de plates-formes. Il se compose de cinq acteurs (véhicule, gestionnaire de la flotte, atelier de réparation, atelier de recyclage, diagnostiqueur) et de huit cas d'utilisation. Les liens entre les acteurs et les cas d'utilisation sont des associations qui soulignent le rôle de chaque acteur avec les cas d'utilisation. Ce diagramme peut être explicité du point de vue des acteurs, comme ce qui suit le montre.

Le premier acteur de ce diagramme est l'atelier de réparation. Son rôle principal au sein du réseau est de réparer les produits usagés qui ont été diagnostiqués comme réparables. Pour réparer, des pièces détachées sont donc nécessaires, afin de remplacer les composants inutilisables. Une pièce détachée pour la réparation peut être accessible par deux moyens : par le propre stock de pièces détachées de l'atelier de réparation, et par le réseau de plates-formes. Ainsi, lorsqu'une pièce détachée n'est pas disponible sur le stock propre de l'atelier, un besoin pour cette pièce détachée peut être communiqué sur le réseau par la création d'une requête de transport, ayant pour

destination l'atelier de réparation, et comme nature transportée la pièce détachée. L'un des moyens de satisfaire ce besoin, grâce à un atelier de désassemblage, est détaillée par le diagramme d'interaction de (Figure 5.7).



**Figure 5.3 : Diagramme des cas d'utilisation - Fonctionnement interne du réseau**

Le deuxième acteur du diagramme des cas d'utilisation est l'atelier de désassemblage. Son principal objectif est de désassembler les produits usagés arrivants sur la plate-forme, grâce à des techniques semi-automatisées ou entièrement manuelles. L'atelier de désassemblage approvisionne les stocks de pièces détachées et de matières premières. L'inventaire régulier des stocks de pièces détachées et de matières premières est une tâche gérée par l'atelier de désassemblage. Diverses politiques peuvent être retenues pour la gestion des stocks, et bien qu'elles ne soient pas référencées ici, le point commun entre toutes est le besoin d'opérations de transport pour les approvisionner et les vider.

La phase de diagnostic constitue le troisième acteur du diagramme. Elle considère un produit arrivant sur chaque plate-forme et l'évalue afin de déterminer sa future destination. Comme ce diagnostic est réalisé de manière entièrement manuelle chez ENVIE<sup>[186]</sup> par un expert, il n'est pas excessivement coûteux en temps. Cependant il est essentiel car il fournit l'information initiale sur l'aspect réel du produit et le traitement de recyclage approprié. En outre, le diagnostiqueur peut également décider de transférer un produit usagé d'une plate-forme vers une autre plate-forme, si le traitement de recyclage diagnostiqué ne peut être réalisé sur la plate-forme courante, et par conséquent générer une requête de transport.

Le gestionnaire de la flotte de véhicules, quatrième acteur du réseau, définit le plan de transport qui permet de répondre aux trois types de demandes de transport : le transport des pièces détachées se fait sur la demande de l'atelier de réparation, celui des produits usagés par le diagnostiqueur, celui des matières premières par l'atelier de désassemblage. Le gestionnaire de la flotte a pour rôle de rassembler les requêtes de transport, de les rendre homogènes en vérifiant qu'elles comportent toutes un type de matière à transporter (produit, pièce détachée ou matière

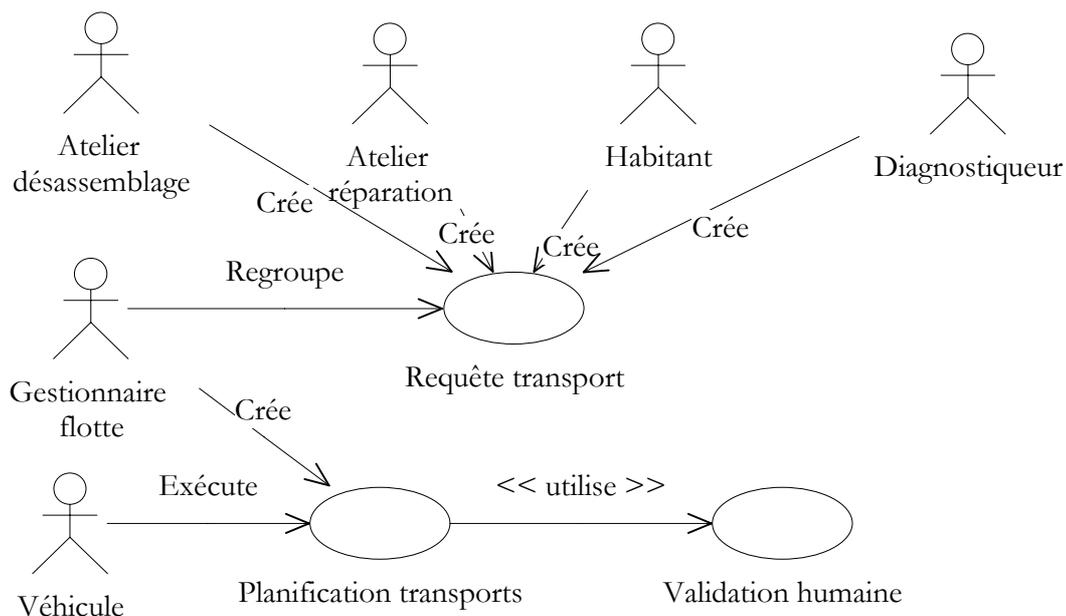
première), une quantité, une origine et une destination de chargement, ainsi que des intervalles de temps pour ce chargement / déchargement (dans le cas d'un transport urgent par exemple).

Le cinquième acteur du réseau de plates-formes est le véhicule, qui possède ses caractéristiques propres (vitesse, dépôt, capacité). Une fois qu'un certain nombre de requêtes de transport lui sont affectées, il est chargé de confirmer que sa route peut satisfaire toutes les requêtes, de trouver une route en accord avec les objectifs qui lui sont fixés, puis de la réaliser.

Ce premier diagramme des cas d'utilisation présente succinctement le fonctionnement interne du réseau de plates-formes de réparation et de désassemblage que nous avons introduit. Par fonctionnement interne nous entendons sans demande ni perturbation externe. La collecte étant considérée comme l'approvisionneuse du réseau, aucune information n'y est présente. Voyons donc maintenant comment peut être prise en compte une requête de collecte.

#### 5.4.1.2 Planification des transports

Ce diagramme des cas d'utilisation (Figure 5.4) schématise la manière dont sont planifiées les opérations de transport liées à la logistique inverse dans le réseau de plates-formes, y compris les intervenants en amont (comme la collecte) et met en œuvre les acteurs correspondants. Il donne une vision globale du fonctionnement de la planification, sans donner aucun détail pour l'instant.



**Figure 5.4 : Diagramme des cas d'utilisation - Planification des transports**

Chaque opération de transport est représentée par une requête de transport à satisfaire. Cette requête de transport, qui correspond à une demande d'acheminement de matière d'un point vers un autre point, est générée par quatre acteurs différents :

- l'atelier de réparation crée une requête de transport de pièce détachée lorsqu'un besoin se fait sentir lors d'une réparation d'un produit usagé ;
- l'atelier de désassemblage crée une requête de transport de matières premières recyclées pour vider les stocks de pièces détachées démontées ou de matières premières secondaires récupérées sur les produits désassemblés ;

- le diagnostic crée une requête de transport pour acheminer un produit usagé vers la bonne installation de recyclage (désassemblage ou réparation), selon le diagnostic réalisé ;
- l'habitant crée une requête de transport lorsqu'un contact a été pris pour aller collecter un ou plusieurs produits sur la zone géographique considérée.

Comme nous allons le voir dans la suite du rapport, ces quatre types de requêtes de transport sont différents, car ils ne contiennent pas la même information. Le gestionnaire de la flotte a donc pour rôle, dans le but d'élaborer un plan de transport, de regrouper l'ensemble des requêtes, de les traiter en les rendant homogènes, afin de pouvoir les prendre en compte lors de la phase de calcul du plan.

### 5.4.2 Diagrammes des classes

Une fois les acteurs et les cas d'utilisation explicités, les classes nécessaires pour la modélisation objet peuvent être introduites par les diagrammes des classes des figures (Figure 5.5) et (Figure 5.6). Une classe est un modèle abstrait générique qui est instancié par un ou plusieurs objets. Ce sont les objets qui constituent le monde réel, mais ils suivent le modèle de leur classe. Un diagramme de classes permet donc de synthétiser et de regrouper les éléments qui se ressemblent, tout en réduisant la complexité environnante par l'atteinte d'un haut niveau d'abstraction.

Dans les deux diagrammes, la notion d'héritage (appelée également généralisation) est introduite afin d'agrèger le maximum d'informations au niveau d'abstraction le plus élevé. Par exemple, une requête de transport peut être générée par quatre acteurs différents, et de ce fait avoir à la fois une information générale, et une information spécifique à chaque acteur. Une classe générique a donc un sens : elle rassemble les informations communes à tous les types de requêtes de transport présents dans la logistique inverse. Puis une classe plus spécialisée permet d'inclure les informations spécifiques à un transport particulier.

Les deux diagrammes ci-dessous proposent les classes nécessaires à la modélisation du processus de planification des transports au sein du réseau de plates-formes, et notamment des opérations de collecte. Nous en donnons premièrement une vue relativement synthétique, avec une description générale des classes et des relations entre ces classes. Puis nous présentons chaque classe en détail, en précisant son domaine de définition (ses attributs) et sa réalisation (ses méthodes).

#### 5.4.2.1 Création d'une requête de transport

Le premier diagramme décrit les relations d'ordre statique entre les classes qui interviennent dans la création d'une requête de transport. Les classes peuvent être une représentation d'acteurs physiques du réseau, comme par exemple les ateliers de désassemblage, de réparation, le diagnostic, extérieur, ou encore les classes matières. Elles peuvent également modéliser une abstraction, comme une requête de transport ou les trois types de requêtes de transport.

Ce diagramme présente douze classes, qui peuvent être divisées en trois catégories, selon qu'elles décrivent la notion de matière, de requête de transport, ou de demandeur de transport. La notion de matière est modélisée par la classe abstraite CMatière, qui se généralise en trois sous-classes : CMatièrePremière, CProduitUsagé, CPièceDétachée. Ces trois classes symbolisent les différents types de matières transitant dans le réseau de plates-formes. Chaque objet de la classe CMatière est associé avec une instance de la classe CRequête, qui modélise la notion de requête de transport. La relation entre les deux classes est une relation d'association, qui permet la prise en

charge de la matière à déplacer par une requête de collecte qui va être ensuite planifiée. La classe CRequête se généralise également en trois sous-classes, CRequêteCollecte, CRequêteÉchange, et CRequêteRedistribution. Ces trois classes sont utilisées afin de différencier les différents types de transport agissant dans le réseau de plates-formes. Enfin, chaque objet instanciant une requête de transport est associé à un demandeur par une relation de création, le demandeur pouvant être un objet de l'une des quatre classes CHabitant, CDiagnostic, CRéparation et CDésassemblage.

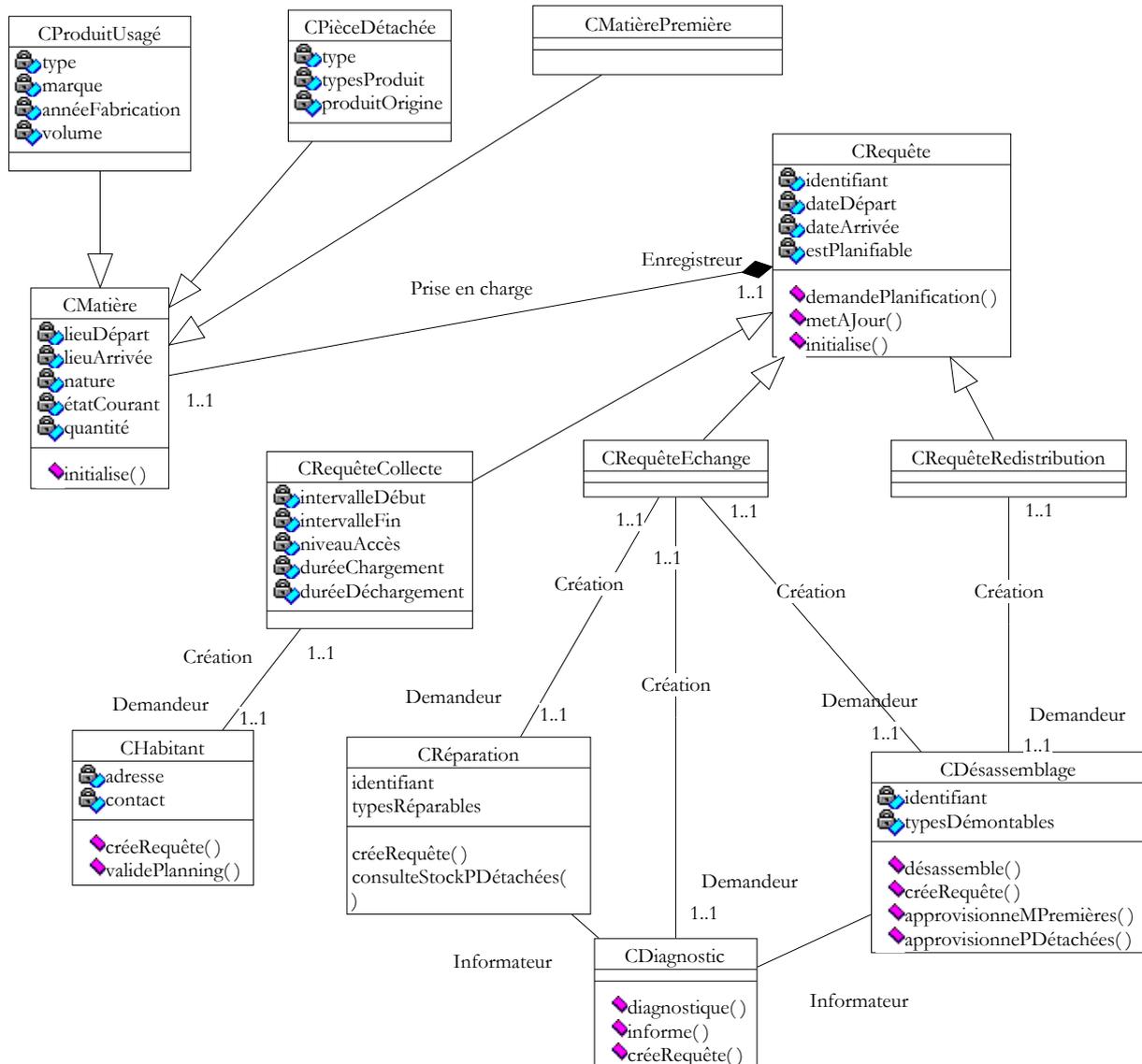


Figure 5.5 : Diagramme de classes - Création d'une requête de transport

#### 5.4.2.2 Planification des transports

Le deuxième diagramme des classes rassemble les classes utiles à la définition du plan de transport. La classe CTypeVéhicule est une classe générique modélisant les informations principales sur les véhicules. La classe CVéhicule en est une généralisation. Elle est associée avec la classe CGestionnaireFlotte par une association de planification ; les cardinalités de cette relation signifient qu'un gestionnaire de flotte a à sa disposition plusieurs véhicules, et que chaque véhicule peut ou non être utilisé par le gestionnaire dans la planification des transports. La classe CVéhicule est également associée à la classe CRequête par une relation d'affectation : un véhicule peut traiter plusieurs requêtes de transport, alors qu'une requête ne peut être affectée qu'à un seul

véhicule. Enfin, les classes CGestionnaireFlotte et CRequête sont reliées par une association de regroupement : chaque requête de transport existante doit être considérée par le planificateur, mais il se peut qu'aucune nouvelle requête de transport ne soit à ordonnancer.

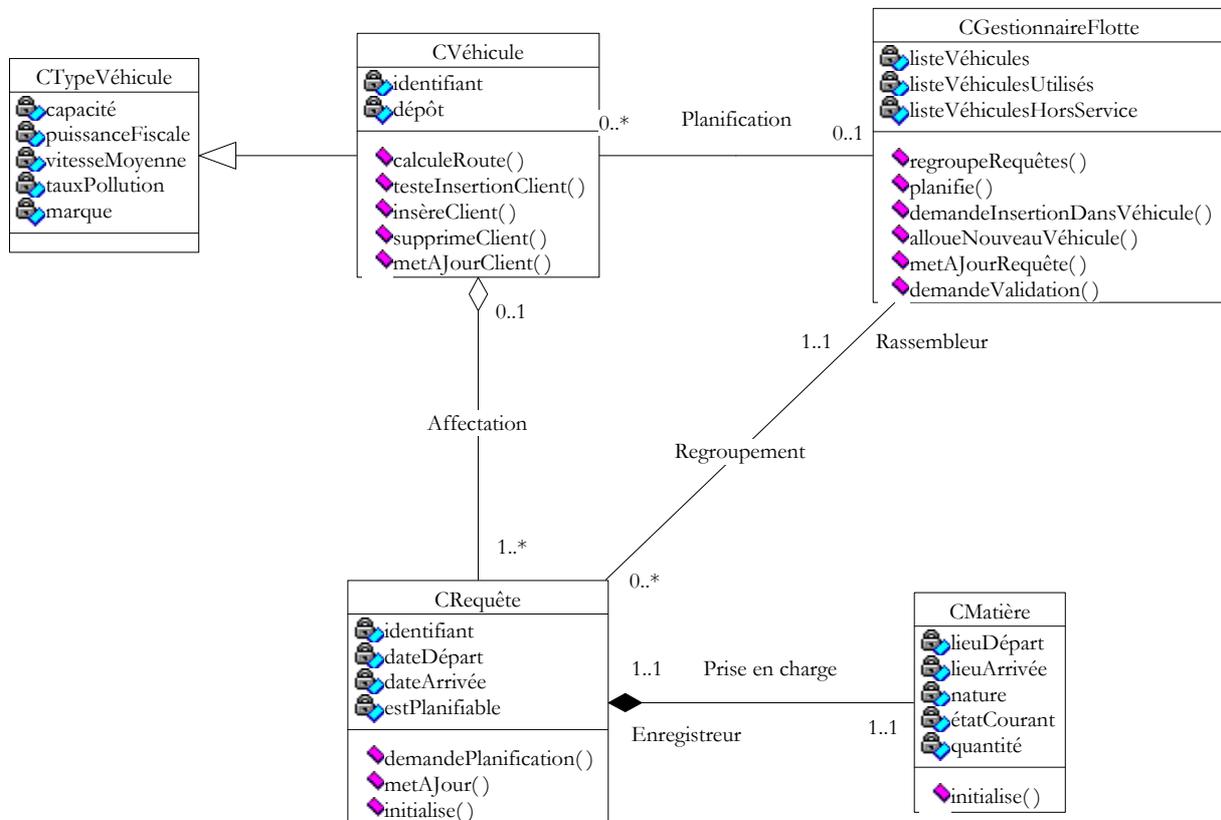


Figure 5.6 : Diagramme de classes – Planification des transports

A partir de ces deux diagrammes de classe, les caractéristiques principales des classes (les attributs et les opérations) sont précisées ci-dessous, et complètent les diagrammes.

### 5.4.2.3 Caractéristiques des classes du modèle

Avant de rentrer dans la description fine des caractéristiques des classes, attardons-nous un instant sur quelques définitions. L'objet, entité du monde réel, n'existe que par son modèle générique et abstrait, la classe. L'objet est caractérisé par son état et son comportement. L'état représente toutes les valeurs des attributs de l'objet à un instant donné, sachant qu'un attribut est une information particulière qui qualifie l'objet. Le comportement regroupe toutes les compétences de l'objet et décrit ses actions et ses réactions par rapport à son environnement : une opération détermine une unité de comportement. Les caractéristiques d'un objet sont modélisées par la classe de cet objet. Dans la notation UML, le nom de la classe est dans le premier cadre du rectangle, les attributs sont dans le deuxième cadre, et les opérations dans le dernier cadre.

#### 5.4.2.3.1 Classe CTypeVehicule

La classe CTypeVehicule est une classe générique abstraite recensant les informations générales sur un véhicule.

**Attributs**

- Capacité
- Vitesse moyenne : permet d'estimer le temps nécessaire à réaliser un parcours
- Taux de pollution : indice écologique utilisé lors de la satisfaction d'objectifs de respect de l'environnement

## 5.4.2.3.2 Classe CVéhicule

La classe CVéhicule modélise les objets physiques véhicules utilisés pour le transport des matières gravitant dans et autour du réseau de plates-formes.

**Attributs**

Dépôt : dépôt physique associé à chaque véhicule

**Opérations**

- calculeRoute() : une fois les requêtes de transport affectées à un véhicule, celui-ci peut optimiser sa route selon une fonction objectif à minimiser
- testeInsertionClient() : teste si une nouvelle requête de transport peut être ajoutée à la route du véhicule, tout en respectant l'ensemble des contraintes en présence
- insèreClient() : insère un client dans la route du véhicule
- supprimeClient() : supprime un client de la route du véhicule
- metAJourClient() : actualise les attributs du véhicule suite à la modification de sa route (ajout ou suppression d'un client, modification de la nature de la marchandise à transporter ...)

## 5.4.2.3.3 Classe CGestionnaireFlotte

La classe CGestionnaireFlotte représente le module de gestion de la flotte. C'est par cette classe que la communication avec un opérateur humain de planification peut être faite.

**Attributs**

- listeVéhicules : liste de tous les véhicules de la flotte
- listeVéhiculesUtilisés : liste des véhicules actuellement en service
- listeVéhiculesHorsService : liste des véhicules non disponibles actuellement

**Opérations**

- regroupeRequêtes() : il s'agit de rassembler l'ensemble des requêtes de transport à planifier pour les affecter ensuite aux véhicules
- planifie() : lancement du module qui détermine le plan de transport
- demandeInsertionDansVéhicule() : consulte un véhicule pour l'intégration d'une nouvelle requête de transport dans le routage de ce véhicule
- alloueNouveauVéhicule() : crée un nouvel objet véhicule pour transporter des marchandises
- metAJourRequête() : actualise les informations de la requête de transport en lui affectant le véhicule qui va traiter son transport par exemple
- demandeValidation() : lorsque le module de planification automatique propose un plan de route pour la flotte de véhicules, ce plan est proposé à un opérateur humain pour validation ou modification

## Chapitre 5

### 5.4.2.3.4 Classe CMatière

La classe CMatière est une classe générique synthétisant les informations de base sur les matières transitant dans et autour du réseau de plates-formes. Un objet CMatière est qualifié par les attributs suivants.

#### Attributs

- lieuDépart : origine du transport
- lieuArrivée : destination du transport
- nature : nature de la marchandise à transporter (pièce détachée, produit fini, matière première, matière première secondaire)
- étatCourant : état de la matière (exemple pour un produit : désassemblé, réparé, en attente réparation ...)
- quantité : selon la nature de la matière, la quantité se mesure avec l'unité appropriée

#### Opérations

- initialise() : initialisation des attributs de la classe lorsqu'ils peuvent être renseignés

### 5.4.2.3.5 Classe CMatièrePremière

La classe CMatièrePremière dérive de la classe mère CMatière, et possède donc toutes les propriétés de cette classe

### 5.4.2.3.6 Classe CProduitUsagé

La classe CProduitUsagé modélise un produit en fin de vie sur lequel un traitement est à appliquer. C'est une généralisation de la classe CMatière, avec les nouveaux attributs suivants.

#### Attributs

- type : le type fonctionnel du produit (exemple : réfrigérateur, four, lave-linge)
- volume : correspond aux caractéristiques physiques d'encombrement
- marque : désignation précise du produit, utilisée pour le diagnostic et le traitement adéquat
- annéeFabrication : idem marque

### 5.4.2.3.7 Classe CPièceDétachée

La classe CProduitUsagé modélise un produit en fin de vie sur lequel un traitement est à appliquer. C'est une généralisation de la classe CMatière, avec les nouveaux attributs suivants.

#### Attributs

- type : description de la pièce
- typesProduits : liste des produits sur lesquels la pièce peut être appliquée
- produitOrigine : trace du type de produit duquel la pièce est extraite

### 5.4.2.3.8 Classe CRequête

La classe CRequête est une classe générique modélisant une requête de transport à satisfaire. Chaque requête doit être associée à une marchandise pour pouvoir être planifiée dans le prochain routage de la flotte de véhicules.

**Attributs**

- dateDépart : date de début du transport (chargement)
- dateArrivée : date de fin du transport (fin livraison)
- estPlanifiable : indicateur que la requête peut être considérée par le gestionnaire de la flotte afin d'être affectée à un véhicule

**Opérations**

- demandePlanification : envoie un message au gestionnaire de la flotte pour lui indiquer que la requête courante peut être affectée à un véhicule
- metAJour : met à jour les attributs lorsque des modifications ont lieu
- initialise() : initialisation des attributs de la classe lorsqu'ils peuvent être renseignés

## 5.4.2.3.9 Classe CRequêteCollecte

La classe CRequêteCollecte modélise une requête pour la collecte d'un produit en fin de vie. C'est une généralisation de la CRequête, avec les attributs spécifiques suivants, dont le lecteur averti se souvient peut-être dans la modélisation du problème de chargement et de déchargement (§3.3 - Modélisation).

**Attributs**

- intervalleChargement : intervalle de temps disponible pour charger le produit dans le véhicule
- intervalleDéchargement : intervalle de temps disponible pour décharger le produit
- duréeChargement : durée nécessaire pour charger le produit
- duréeDéchargement : durée nécessaire pour décharger le produit
- niveauAccès : indique le niveau d'accessibilité du produit par rapport aux contraintes environnementales (ascenseur, escalier ...) et à celles du produit (volume ...)

## 5.4.2.3.10 Classe CRequêteÉchange

La classe CRequêteÉchange représente une requête de transport effectuée entre deux plates-formes du réseau afin de s'échanger une marchandise, par exemple un produit ou une pièce détachée. Cette classe dérive de la classe CRequête, et dispose donc de toutes les informations de cette classe mère.

## 5.4.2.3.11 Classe CRequêteRedistribution

La classe CRequêteRedistribution introduit la notion de remise sur le marché des matières stockées au sein du réseau de plates-formes. Son rôle est donc à l'opposé de celui de la classe CRequêteCollecte, qui elle est chargée d'approvisionner le réseau. Cette classe est une généralisation de la classe CRequête.

## 5.4.2.3.12 Classe CHabitant

La classe CHabitant modélise un acteur externe du réseau de plates-formes ayant un ou plusieurs produits techniques en fin de vie à collecter et à récupérer par le réseau de plates-formes.

**Attributs**

- adresse : adresse où doit s'effectuer la collecte
- contact : moyen de contacter le propriétaire des produits à collecter

### Opérations

- créeRequête() : crée une requête de transport qui exprime une demande de collecte
- validePlanning() : donne ou non son accord sur le plan de ramassage qui lui est proposé

#### 5.4.2.3.13 Classe CRéparation

La classe CRéparation modélise un atelier de réparation qui constitue tout ou partie d'une plate-forme du réseau.

### Attributs

- typesRéparables : liste des types de produits réparables par cet atelier (certains ateliers peuvent être spécialisés sur des types de produits particuliers, comme des petites unités de réparation par exemple)

### Opérations

- consulteStockPDétachées : recherche dans les stocks de pièces utiles à une réparation
- créeRequête() : crée une requête de transport pour remettre sur le marché un produit réparé, ou pour exprimer le besoin d'une ou plusieurs pièces nécessaires à la réparation d'un produit
- répare() : déclenche la réparation d'un produit

#### 5.4.2.3.14 Classe CDésassemblage

La classe CDésassemblage modélise un atelier de désassemblage qui constitue tout ou partie d'une plate-forme du réseau.

### Attributs

- typesDémontables : liste des types de produits démontables par cet atelier (certains ateliers peuvent être spécialisés sur des types de produits particuliers, comme des petites unités par exemple, ou bien lorsqu'elles sont contraintes par les techniques de désassemblage)

### Opérations

- créeRequête() : crée une requête de transport pour remettre sur le marché des pièces détachées désassemblées, ou pour exprimer la volonté d'équilibrer les stocks de matières recyclées (pièces détachées désassemblées, matières secondaires extraites) avec d'autres plates-formes du réseau
- approvisionnePDétachées() : remplit un stock de pièces détachées
- approvisionneMPremières() : approvisionne un stock de matières premières secondaires
- désassemble() : déclenche le désassemblage d'un produit

#### 5.4.2.3.15 Classe CDiagnostic

La classe CDiagnostic modélise la phase de diagnostic des produits arrivant dans le réseau de plates-formes, afin de diriger ces produits vers l'installation de recyclage appropriée.

### Opérations

- diagnostique() : déclenche le diagnostic d'un produit technique en fin de vie afin de déterminer le traitement approprié (réparation, désassemblage, mise au rebut ?)
- informe() : informe les ateliers de réparation et de désassemblage sur l'état des produits qui vont arriver, et sur les actions de recyclage à effectuer

- créeRequête() : crée une requête de transport pour diriger au besoin un produit vers la plateforme de recyclage offrant les techniques de récupération préconisées par le diagnostic

### 5.4.3 Diagrammes d'interaction

Arrêtons-nous un instant sur le travail de modélisation déjà effectué. Grâce aux diagrammes des cas d'utilisation, nous avons pu exprimer les besoins liés au fonctionnement du réseau de plateformes de réparation et de désassemblage, et les principaux flux d'information transitant au sein et autour de ce système. Les acteurs du réseau, ainsi que les relations entre eux, ont été décrits sommairement par ces diagrammes, puis affinés par les diagrammes de classes, qui permettent également l'introduction de la notion objet dans la modélisation. Nous disposons donc maintenant de la base statique des objets utiles pour la planification des transports au sein du réseau.

Cependant, ces résultats en eux-mêmes restent insuffisants si les interactions dynamiques entre les objets du modèle ne sont pas explicitées, c'est-à-dire si les moyens et les modes de communication ne sont pas établis. Il serait en effet alors impossible de prédire le comportement du système et le processus utilisé pour la planification. C'est pourquoi il nous reste à introduire des diagrammes d'interaction dans notre modélisation UML.

Les diagrammes d'interaction représentent les associations dynamiques entre les objets lors du traitement d'un cas particulier. Typiquement, ils permettent de simuler le comportement des classes pour un cas d'utilisation. Il existe deux types de diagrammes d'interaction, chacun ayant ses propres spécificités : le diagramme de collaboration et le diagramme de séquence. Le diagramme de collaboration insiste sur la représentation spatiale des objets pour la mise en collaboration d'un groupe d'objets. Le diagramme de séquence montre les interactions entre les objets du point de vue temporel, sans se préoccuper de leur contexte, mais en privilégiant la chronologie des envois de messages entre objets. Deux types de diagrammes d'interaction sont présentés, illustrant deux cas d'utilisation. Le premier est un diagramme de collaboration, montrant la création d'une requête de transport d'une pièce détachée pour la réparation d'un produit usagé. Le deuxième est un diagramme de séquence pour la planification d'une nouvelle requête de collecte. La simple différence entre les diagrammes d'interaction et de collaboration se situe au niveau de la présentation des diagrammes.

#### 5.4.3.1 Transport d'une pièce détachée pour la réparation d'un produit usagé

Le premier diagramme d'interaction est un diagramme de collaboration qui illustre la création et la planification d'une requête de transport d'une pièce détachée dans le contexte de la réparation d'un produit en fin de vie. Le diagramme débute lorsque le produit est en phase de réparation, et que le besoin d'une pièce détachée survient alors que cette pièce détachée n'est pas en stock. Ce besoin est alors exprimé par la création et l'initialisation d'une requête de transport, où sont connues la destination (l'atelier de réparation) et la marchandise à transporter (la pièce détachée). Cette requête est communiquée sur l'ensemble du réseau, particulièrement aux ateliers de désassemblage pour savoir s'il est possible d'approvisionner un stock avec la pièce requise. Lorsqu'un atelier de désassemblage est capable de fournir cette pièce détachée, la requête de transport est mise à jour, puis envoyée en planification et traitée par le gestionnaire de la flotte de véhicules.

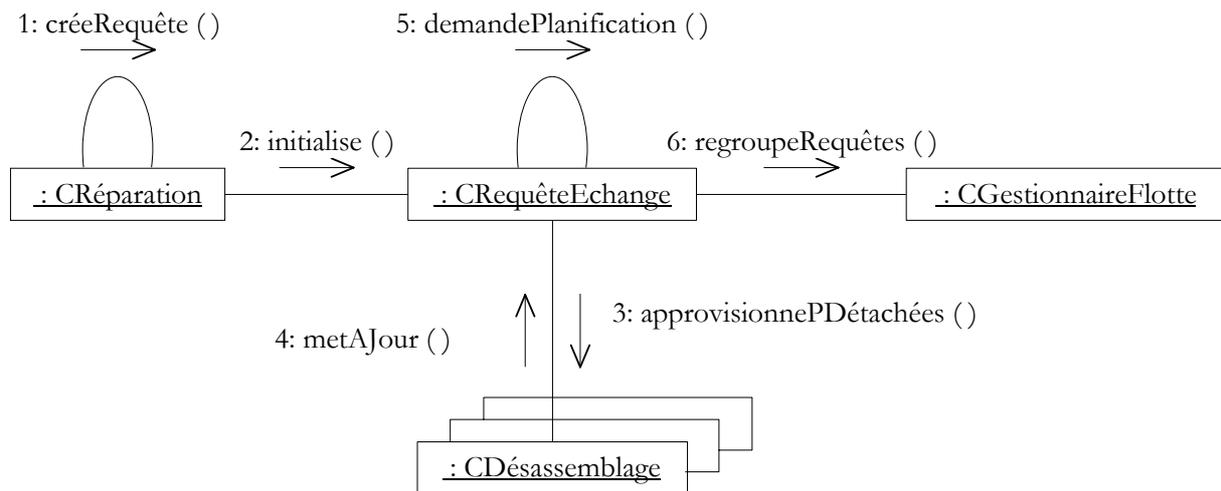


Figure 5.7 : Diagramme de collaboration - Transport d'une pièce détachée

#### 5.4.3.2 Planification temps réel d'une nouvelle requête de collecte

Le deuxième diagramme d'interaction que nous présentons est un diagramme de séquence présentant les relations entre les objets concernés par la création et la planification en temps réel d'une nouvelle requête de collecte. Le diagramme débute lorsqu'un habitant prend contact avec le système de récupération des produits afin de demander le passage d'un véhicule chez lui pour collecter un ou plusieurs produits usagés. Une requête de collecte est donc créée, contenant les informations sur le lieu de la collecte, le type et la quantité des produits collectés, les dates de passage autorisées pour le véhicule. Lors de la création, les informations sont également répercutées dans l'objet de la classe CMatière pour une mise à jour. La requête se met ensuite dans l'état planifiable, et demande au gestionnaire de flotte à être prise en compte par au moins un véhicule. Il faut alors déterminer quel véhicule est capable de traiter cette requête de collecte. Le processus qui s'applique alors utilise les outils qui sont développés au chapitre 4, notamment le processus d'affectation des requêtes aux véhicules (§4.5.2 - Partition : construction de la solution initiale). Pour chaque véhicule, la prise en compte d'une nouvelle requête de transport à satisfaire pourrait être testée par la résolution de l'une des heuristiques d'insertion déjà présentées : l'heuristique d'insertion parallèle (4.6.1 - Une heuristique d'insertion parallèle) ou l'heuristique de construction spatio-temporelle (4.6.2 - Une heuristique de construction spatio-temporelle). Le véhicule qui offre la meilleure nouvelle solution se voit donc attribué la nouvelle requête, les structures sont mises à jour, l'information circule et retourne jusqu'à l'habitant, qui donne son accord et valide ainsi la proposition de ramassage.

Cet exemple de fonctionnement pourrait être complexifié de diverses manières, notamment dans le cas où aucun véhicule ne présente les conditions nécessaires à la prise en compte d'une nouvelle requête (il faut alors allouer un nouveau véhicule), ou lorsque la requête peut être prise en compte mais à une date autre que celle demandée par l'habitant (il est alors question d'aide à la décision en temps réel entre plusieurs solutions de planification). Cependant, nous rappelons qu'il ne s'agit pas ici de dresser l'exhaustivité des situations de collecte qui risquent d'arriver, mais de justifier l'intégration de la planification du module de collecte dans l'architecture globale de la récupération des produits techniques en fin de vie. Les quelques diagrammes UML présentés nous ont donc simplement aidés dans cette optique.

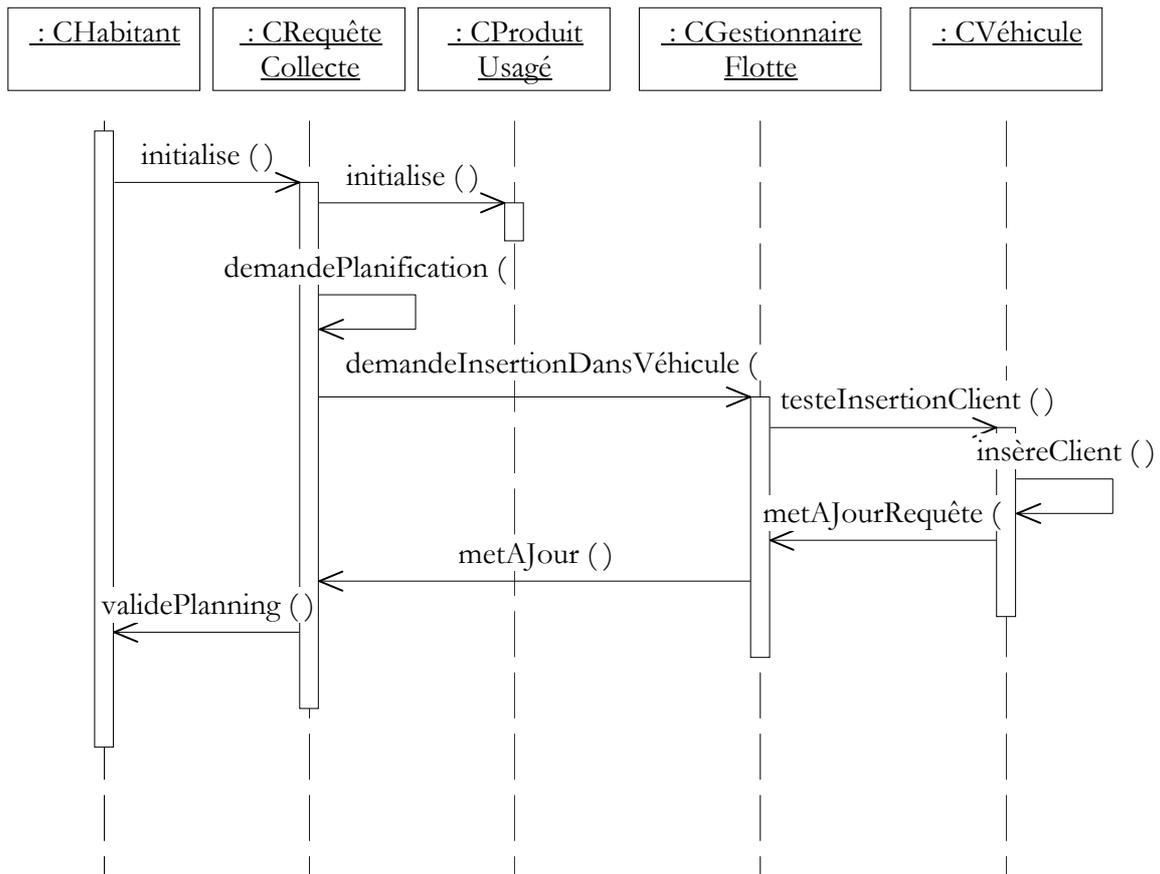


Figure 5.8 : Diagramme de séquence - Planification d'une nouvelle requête de collecte

## 5.5 Conclusions

Après avoir présenté ci-dessus les derniers diagrammes d'interaction UML, notre travail sur l'intégration du module de collecte se termine, et nous pouvons en tirer les conclusions suivantes.

### 5.5.1 Ce qu'il faut retenir

Dans les deux chapitres précédents, nous avons abordé la problématique de la collecte des produits techniques encombrants arrivant en fin de vie par la résolution d'un problème complexe de routage de véhicules. Ces deux chapitres représentent une partie relativement technique, et les algorithmes proposés fournissent des solutions qui peuvent être utilisées dans la planification des opérations de la collecte. Cependant, la situation de collecte sur laquelle nous nous sommes attardés, même si elle nous semble être la voie de l'avenir, n'est qu'une situation parmi tous les contextes de ramassage des produits encombrants que nous avons énumérés dans le chapitre 2 (§2.3.4 - Les différents modes de collecte). Il nous est donc nécessaire de ramener nos résultats dans l'environnement plus général de la récupération des déchets. Tel est donc l'objet du présent chapitre : étudier les mécanismes d'interaction du module de planification de la collecte avec les autres intervenants du système global du recyclage.

Pour valider nos propos, nous nous basons sur une étude de cas qui a été introduite dans le projet de recherche (Rester Propre, 2000)<sup>[43]</sup>, financé par la région Rhône-Alpes, et dans lequel est développé le concept d'une plate-forme de réparation et de désassemblage des produits

techniques en fin de vie. Cette plate-forme générique rassemble les fonctions de première importance nécessaires à une bonne récupération des déchets : le diagnostic, le stock, la réparation et le désassemblage des produits. Dans le cadre de la collecte, le principe de la plate-forme de réparation et de désassemblage est étendu au réseau de plates-formes, afin de tendre vers une situation plus proche de la réalité. Cette extension se justifie par une meilleure couverture géographique des installations de recyclage et par la spécialisation des installations sur certains types de produits et de traitements adaptés pour ces produits.

Une fois établi le réseau d'installations de recyclage, dans un souci de représentation homogène au sein d'un même modèle d'entités aussi hétérogènes qu'un atelier de désassemblage et un atelier de diagnostic, la recherche d'un langage de modélisation universel nous mène vers le langage orienté objet UML (Unified Modeling Language). Outre le fait de savoir manipuler la puissance de modélisation offerte par l'objet, UML capture aisément les différentes étapes de la communication entre les entités du modèle, et présente les interactions environnant le système à l'aide de diagrammes, ce qui facilite grandement la compréhension du modèle. Grâce à cette notation UML, il nous est alors aisé de :

- faire l'analyse des besoins primordiaux liés au réseau de plates-formes et de modéliser ces besoins par deux diagrammes de cas d'utilisation ;
- capturer l'architecture statique du réseau de plates-formes sous forme de deux diagrammes de classes ;
- étudier par deux diagrammes d'interaction la manière dont les transports, et notamment la collecte, peuvent être planifiés au sein du réseau.

### 5.5.2 Ce qui ne va pas suivre

Les résultats qui sont annoncés dans ce chapitre se distinguent sous forme de diagrammes et démontrent notre volonté de revenir vers la réalité des problèmes de collecte par l'intervention de l'homme dans les prises de décision liées à la planification des transports, et par la prise en compte des différents acteurs du processus de récupération des produits techniques en fin de vie. Nous n'avons pas recherché systématiquement l'exhaustivité des situations qui débouchent sur une réactualisation de la planification, car notre travail restant à un niveau d'analyse et de maquette, il est fort probable que des situations particulières aient alors été oubliées. En outre, chaque situation devant être modélisée par un nouveau diagramme d'interaction, nous aurions risqué de nous retrouver avec une multitude de diagrammes, alourdissant inutilement le contenu du mémoire à moins qu'une étude de terrain sérieuse avec des cas d'exemple réels n'autorise une phase d'industrialisation et de mise en application de nos résultats. Nous avons donc préféré nous en tenir aux six diagrammes présentés dans ce chapitre, estimant qu'ils sont suffisants pour refléter notre vision de l'intégration et de l'interaction de la planification de la collecte avec les autres acteurs du système de recyclage.

Un axe de recherche intéressant n'a pas été abordé dans ce mémoire, mais il constitue un sujet de réflexions pour les chercheurs et les industriels : il s'agit de l'étude des systèmes de production et de leur coordination avec les systèmes logistiques. Dans le contexte industriel de la dernière décennie, marqué par une extrême concurrence, les industries ont du faire face à une rationalisation draconienne des coûts de leurs appareils de production d'un côté et de leur réseau de transports de l'autre, afin de pouvoir faire face à la concurrence et de conserver leurs avantages compétitifs. Puis, lorsque les économies de coûts ne furent plus possibles sur les entités prises individuellement, l'effort fut porté sur la chaîne logistique globale des produits, incluant toutes les étapes du cycle de vie du produit. D'où ce nouveau concept sur la coordination entre

les systèmes de production et de logistique, dont (Flipo-Dhaenens, 1998) <sup>[9]</sup> nous en présente une application remarquable.

Ce principe de coordination entre des opérations logistiques et des opérations de production pourrait être interprété, dans le cadre du recyclage des produits techniques en fin de vie, en imaginant les unités de récupération des déchets comme des centres de production de matières, et dont la matière première serait fournie par la collecte. L'un des objectifs de rationalisation des coûts pourrait alors consister à minimiser les stocks de produits usagés entrant dans le processus, en faisant en sorte que tout nouveau produit à recycler puisse être immédiatement traité dès son déchargement du véhicule sur la plate-forme de recyclage. En résumé, cet exemple, pris parmi tant d'autres, témoigne de l'importance grandissante des systèmes logistiques dans la production manufacturière pour l'approvisionnement des marchés primaires et secondaires, et démontre s'il en faut l'existence de perspectives de recherche futures restant à explorer pour la pérennité de la récupération des produits techniques encombrants.



# Conclusions et perspectives

## Conclusions

Depuis quelques années, les législations française et européenne ont évolué vers une meilleure protection de l'homme et de l'environnement vis-à-vis des nuisances provoquées par la massification des déchets de notre société. À partir de 2002, la mise en décharge n'étant plus acceptée que pour les déchets dits « ultimes », des processus de traitement et de revalorisation des déchets actuels doivent être mis en place. L'impact sur les systèmes logistiques classiques de collecte et de transport des déchets est considérable, et conduit à repenser la globalité de l'organisation des transports. Cette restructuration prend toute son ampleur dans la collecte des produits de l'électroménager issus des ménages, produits à forte potentialité de revalorisation et pour lesquels de nouvelles techniques de revalorisation doivent être entérinées, notamment le désassemblage.

Dans ce contexte, notre contribution porte donc sur la planification de la collecte au sein de la logistique inverse des produits manufacturés encombrants de types blanc ou brun, issus des ménages. La collecte apparaît en effet comme un élément crucial de la chaîne logistique inverse, à la fois par son rôle d'approvisionneur unique du système de récupération des produits, et par les coûts relativement importants qui sont engagés et liés à son bon fonctionnement. L'approche méthodologique que nous retenons débute par l'analyse des modes de collecte existants consacrés à la fois aux ordures ménagères et aux produits techniques encombrants en fin de vie. L'accent est dans un premier temps porté sur les systèmes de ramassage des déchets ménagers classiques, dans l'objectif de situer la collecte des encombrants par rapport aux modes de collecte existants. Cependant, devant la trop grande différence de nature des déchets entre les ordures ménagères et les produits encombrants, il apparaît rapidement que ce qui existe pour les déchets classiques est difficilement transposable aux produits blancs et bruns de l'étude.

Le parc des produits manufacturés encombrants représente un gisement non négligeable qu'il convient d'appréhender correctement. Ces produits, à caractéristiques physiques uniques et à fort potentiel de revalorisation unitaire, peuvent être ramassés de diverses manières. Nous mettons en évidence deux grandes familles de collecte : celle par apport volontaire et celle par enlèvement à domicile. Parmi les membres de ces deux familles, trois modes de collecte sont particulièrement analysés : l'apport en déchetterie ou en grande distribution, et l'enlèvement à domicile à la

demande de l'habitant. Cependant, devant la contrainte de l'encombrement physique des produits, la collecte par enlèvement à domicile ressort comme le mode de collecte le plus prometteur, et retient donc toute notre attention.

Ainsi, la situation de collecte des produits encombrants à domicile, ramassés par une flotte de véhicules et acheminés vers des installations de recyclage disséminées sur une zone géographique, est la situation sur laquelle nous nous attardons. Afin d'en extraire les caractéristiques essentielles, cette situation est modélisée par un problème de routage de véhicules, le problème de chargement et de déchargement sous contraintes de capacité, de précedence et de fenêtres temporelles. Ce problème complexe d'Optimisation Combinatoire est ensuite abordé en découplant son analyse et sa résolution en deux étapes, en séparant les situations avec un véhicule unique et avec plusieurs véhicules. Dans les deux cas, le fondement de la méthode de résolution repose sur la méta heuristique de recherche tabou : l'analyse bibliographique sur le sujet laisse apparaître que cette méthode n'a jamais été appliquée sur ce problème précis de routage de véhicules, alors que des résultats plus que prometteurs ont déjà été obtenus par ailleurs sur des problèmes comportant un nombre moins important de contraintes. Par nos choix, nous contribuons donc à agrandir le champ d'application de cette méta heuristique performante vers des problèmes de plus en plus complexes.

La situation où la flotte de véhicules est composée d'une seule unité est premièrement traitée. L'accent est mis sur la manière dont la recherche tabou est implémentée par rapport aux contraintes inhérentes au problème. Notamment, la structure du voisinage à chaque itération est construite par des mouvements d'insertion et d'échange entre les solutions, et l'existence de solutions non réalisables est autorisée dans le voisinage afin de favoriser, par un voisinage extrêmement peuplé, l'émergence de la solution optimale. Nos résultats sont évalués de deux manières. La première consiste à appliquer notre algorithme sur des instances du problème de voyageur de commerce comprenant uniquement les contraintes de fenêtres temporelles, et dont les solutions optimales sont connues. Cette démarche a pour but de situer notre méthode par rapport à des méthodes optimales et en se concentrant sur la contrainte la plus forte, le temps. La deuxième méthode d'évaluation repose sur des instances du problème complet, générées aléatoirement, et pour lesquelles la meilleure solution construite pendant le processus de génération est considérée comme la solution de référence. Dans les deux cas, les résultats obtenus sont très encourageants, puisque la solution optimale est systématiquement trouvée, et dans des temps d'exécution relativement peu conséquents. Une limite semble néanmoins trouvée avec des instances d'une taille supérieure ou égale à 40 clients, soit 80 villes à visiter par le véhicule.

Le contexte d'une flotte avec un seul véhicule est particulier, mais son étude et sa prise en compte permettent néanmoins d'étendre facilement les travaux au contexte de plusieurs véhicules. Devant la complexité du problème, une approche en deux phases est retenue, qui dans un premier temps réalise une affectation des requêtes de transport sur les véhicules, puis dans un deuxième temps optimise itérativement la solution globale. Cette optimisation utilise des mouvements d'insertion et d'échange pour évoluer entre les solutions, et ceci à deux niveaux : sur chaque véhicule pour une amélioration des routes individuelles, et parmi les véhicules pour une ré affectation des requêtes de transport, entraînant éventuellement une minimisation du nombre de véhicules, et par là même une optimisation de la solution globale. L'originalité de la méthode tient également au fait que l'algorithme d'optimisation locale, développé pour un seul véhicule, est utilisé à la fois dans l'étape d'affectation et dans l'étape d'optimisation. Ce double emploi garantit la bonne qualité des solutions trouvées pendant la recherche itérative, ce que prouvent sans contradiction possible les résultats produits à partir d'instances générées aléatoirement.

Finalement, les algorithmes développés ayant pour objectif de contribuer à la planification opérationnelle de la collecte, une description de l'intégration du module de planification dans le système global de la récupération des produits fait l'objet d'une dernière partie. Cette phase d'intégration nous permet également de ramener nos travaux et résultats algorithmiques vers le contexte humain, en recentrant la philosophie de l'exécution des activités du recyclage sur l'homme, décideur ultime de la chaîne inverse et acteur principal de la récupération. Pour pouvoir présenter une description des interactions entre la collecte et les autres acteurs du système, nous nous basons sur un réseau de plates-formes génériques de réparation et de désassemblage, que nous modélisons par le formalisme objet à l'aide du langage de modélisation unifié orienté objet UML. Grâce à l'utilisation de diagrammes, il nous est alors aisé de présenter divers mécanismes d'interaction entre la planification de la collecte et les autres acteurs du recyclage des produits.

## Perspectives

La Recherche est une perpétuelle remise en cause des acquis et des résultats déjà entérinés, qui assure la motivation nécessaire pour améliorer sans cesse notre soif de connaissance et de savoir. Aussi, à la relecture du contenu de ce mémoire, nous ne pouvons nous empêcher de livrer au lecteur les quelques perspectives de recherche que voici.

En ce qui concerne les tailles maximales des instances dans le cas d'un véhicule, nous avons probablement décelé leur limite supérieure raisonnable avec une taille majorant 40 clients. Deux pistes sérieuses peuvent être envisagées pour améliorer cet état de fait. Premièrement, le voisinage de la solution courante qui est construit à chaque itération pourrait être restreint aux seules solutions réalisables : ce voisinage serait alors moins riche, mais le temps d'exploration de toutes les solutions le composant serait alors amélioré. Deuxièmement, le peuplement du voisinage est réalisé systématiquement par l'application de deux mouvements sur les villes du réseau, l'échange et l'insertion. Nous proposons de mettre en place un processus d'alternance entre les deux mouvements afin d'économiser des opérations de calcul.

Le problème de transport qui nous a accompagné dans ce rapport repose sur la collecte des produits manufacturés en fin de vie. Il est intéressant de se poser la question de ce que devient ce problème lorsque pour la flotte de véhicules, les actions de ramassage des produits usagés sont couplées avec des actions de livraison de produits neufs. Le processus de chargement et de déchargement des produits ne se fait plus alors uniquement de la population vers les installations de récupération, mais également dans le sens inverse. Comment être sûr de la bonne cohabitation des produits usagés et neufs dans un même véhicule ? Des contraintes supplémentaires sont-elles à prendre en compte ?

Enfin, une dernière ouverture de recherche peut être suggérée par le retour vers la conception des informations sur les produits collectés, quant à leur état général et leurs conditions de transport. En effet, les études sur le recyclage des produits manufacturés conduisent inévitablement à considérer la source d'approvisionnement, c'est-à-dire la phase de réflexion et de conception des nouveaux produits qui seront mis sur le marché. Les données déjà recueillies grâce aux premières réutilisations de produits revalorisés apparaissent très utiles pour concevoir des produits plus écologiques, plus démontables, et mieux revalorisables. Dans ce contexte, la collecte, par le transport et la maniabilité des produits encombrants, a un rôle à jouer pour faire en sorte que le recyclage s'affirme comme LA solution de référence permettant l'élimination et l'évacuation des déchets sans aucun dommage pour l'environnement.



# Bibliographie

## Thèses et ouvrages

- [1] Ademe (1998). Gestion des déchets ménagers et assimilés : transport et logistique. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, juillet 1998, Ademe éditions.
- [2] Andersson Charlotta (1995). Reverse logistics systems for wastepaper. Licenciate dissertation, Dpt. Of Engineering Logistics, Lund Institute of Technology, Sweden.
- [3] Ascheuer N. (1995). Hamiltonian path problems in the on-line optimization of flexible manufacturing systems. Ph.D. Thesis, Technische Universität Berlin, Germany.
- [4] Cairncross F. (1991). Costing the earth. The Economist Books Ltd., Great Britain.
- [5] Chevron D. (1999). Contribution à l'étude de la supervision d'une cellule de démontage de produits techniques en fin de vie. Thèse de doctorat de l'INPG, Grenoble, France.
- [6] Council of Logistics Management (Ed.) (1993). Reuse and recycling – Reverse logistics opportunities. Hard Cover, 324 p., U.S.A.
- [7] Eymery P. (1997). La logistique de l'entreprise - Supply chain management. Hermès éditions, Paris.
- [8] Ferrer G.L.S. (1997). Managing the recovery of value from durable products. Ph.D. Thesis, June 1997, INSEAD, Fontainebleau, France.
- [9] Flipo-Dhaenens C. (1998). Optimisation d'un réseau de production et de distribution. Thèse de doctorat de l'INPG, Grenoble, France.
- [10] Gelosi S. et L. Giubilei (1994). Guide juridique et pratique de la gestion des déchets ménagers. Confédération Syndicale du Cadre de Vie (CSCV), éditions de Vecchi, Paris.
- [11] Gerner (2001). Génération d'un processus de désassemblage et évaluation du recyclage d'un produit. Thèse de doctorat de l'INPG, Grenoble, France.
- [12] Guinet A. (1984). Le système T.I.R., un système d'établissement de tournées industrielles routières. Thèse de 3<sup>e</sup> cycle de l'Université Claude-Bernard, Lyon 1.

- [13] van Hooijdonk R.A.D. (1996). The pickup and delivery problem with practical side-constraints. Master's Thesis, Department of Mathematics and Computing Science, Eindhoven University of Technology, The Netherlands.
- [14] Jahre M. (1995). Logistics systems for recycling – Efficient collection of household waste. Ph.D. Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden
- [15] Kobeissi A. (2001). Contribution à la mise en œuvre du système d'évaluation des produits techniques en fin de vie. Thèse de doctorat de l'INPG, Grenoble, France.
- [16] Krikke H.R. (1998). Recovery strategies and reverse logistics network design. Ph.D. Thesis, University of Twente, The Netherlands.
- [17] van der Laan E.A. (1997). The effects of remanufacturing on inventory control. Ph.D. Thesis, Eburon Publishers, Delft, The Netherlands.
- [18] Marks D.H. (1969). Facility locations and routing models on solid waste collection systems. Ph.D. Thesis, Johns Hopkins University, Baltimore, U.S.A..
- [19] Muller P.-A. (1997). Modélisation objet avec UML. Eyrolles editions., Paris.
- [20] Osman I. and J. Kelly (editors) (1996). Meta-heuristics : theory and applications. Kluwer Academic Publishers, Boston, Massachusetts, U.S.A.
- [21] Seliger G., E. Zussman and A. Kriwet (1994). "Integration of recycling consideration into product design: a system approach". Integration Information and Collaboration Models, S.Y. Nof editors, Kluwer Academic Publishers.
- [22] Sexton T.R. (1979). The single vehicle many-to-many routing and scheduling problem. Ph.D. dissertation, SUNY at Stony Brook, U.S.A.
- [23] Stock J.R. (1998). Development and implementation of reverse logistics programs. Ph.D., University of South Florida, Hard Cover, 248 p., Council of Logistics Management, U.S.A.
- [24] Thierry M. (1997). An analysis of the impact of product recovery management on manufacturing companies. Ph.D. Thesis, Erasmus University Rotterdam, The Netherlands.

## Rapports et parties d'ouvrage

- [25] Bloemhof-Ruwaard J.M., M. Fleischmann and J.A.E.E. van Nunen (1999). "Reviewing distribution issues in Reverse Logistics". In: New Trends in Distribution Logistics, Speranza and Stähly editors, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 480, p. 23-44, Springer Verlag, Berlin.
- [26] Debets F.J.C. and L. van Wassenhove (1992). "A guided tour through applications of OR-techniques to environmental problems". INSEAD working paper N°92/24/TM, January 1992, France.
- [27] Desgeorges J.P. (1992). "Rapport d'émission sur la valorisation des produits électriques et électroniques". Rapport de propositions à la demande du Premier Ministre de la République Française, 4 décembre 1992.
- [28] Desgeorges J.P. (1994). "Propositions pour l'organisation des filières de collecte et valorisation des produits électriques et électroniques arrivés en fin de vie". Rapport complémentaire à la demande du Ministère de l'Environnement et du Ministère de

- l'Industrie, des Postes et Télécommunications et du Commerce Extérieur de la République Française, 21 novembre 1994.
- [29] Desrochers M., J.K. Lenstra, M.P.W. Savelsbergh and F. Soumis (1988). "Vehicle routing with time windows: optimisation and approximation". In: *Vehicle Routing: Methods and Studies*, B.L. Golden and A.A. Assad editors, Elsevier Science Publishers (1988).
- [30] FIEE (1997). "Produits électriques et électroniques non portables en fin de vie en région Rhône-Alpes". Fédération des Industries Électriques et Électroniques, Rapport final, janvier 1997.
- [31] Flapper S.D.P. (1993). "On the logistics of recycling: an introduction". Research Report TUE/BDK/LBS/93-16, Departement of Operations Planning and Control, Eindhoven University of Technology, The Netherlands.
- [32] Fleischmann M., R. Kuik and R. Dekker (1997). "Controlling inventories with stochastic item returns: a basic model". Management Report Series 43 (13), Erasmus University Rotterdam, The Netherlands.
- [33] Fleischmann M. and R. Kuik (1998). "On Optimal Inventory Control with Stochastic Item Returns". Management Report Series 21-1998, Erasmus University Rotterdam, The Netherlands.
- [34] Fleischmann M., H.R. Krikke, R. Dekker and S.D.P. Flapper (1999). "Logistics network (re-)design for product recovery and re-use". Management Report Series 17-1999, Erasmus University Rotterdam, The Netherlands.
- [35] Gendreau M., G. Laporte and J.-Y. Potvin (1997). "Vehicle routing: modern heuristics". In: *Local Search in Combinatorial Optimization*, E. Aarts and J.K. Lenstra editors, John Wiley publishers.
- [36] Glover F. and A. Lokketangen (1994). Probabilistic Tabu search for zero-one mixed integer programming problems. University of Colorado, U.S.A..
- [37] Golden B.L., E.A. Wasil, J.P. Kelly and I-M. Chao (1998). "The impact of metaheuristics on solving the vehicle routing problems: algorithms, problem sets, and computational results". In: *Fleet Management and Logistics*, T.C. Crainic and G. Laporte editors, Kluwer Academic Publishers.
- [38] Inderfurth K. (1996). "Modeling period review control for a stochastic product recovery problem with remanufacturing and procurement leadtimes". Working paper 2/96, Faculty of Economics and Management, University of Magdeburg, Germany.
- [39] Inderfurth K., A.G. de Kok and S.D.P. Flapper (1998). "Product recovery policies in stochastic remanufacturing systems with multiple reuse options". Technical Report TUETM/LBS/98-05, Eindhoven University of Technology, The Netherlands. (abbrevated version submitted to *European Journal of Operational Research*).
- [40] Poquet G. (1997). "Produits électriques et électroniques en fin de vie en Rhône-Alpes - Enquête sur les comportements des consommateurs". Centre de Recherche pour l'Etude et l'Observation des Conditions de Vie, Département Évaluation des politiques publiques, Janvier 1997.
- [41] Roth N. (1992). "Disassembly and recycling of electrotechnical and electronic products". Tech. Rep., Siemens AG, Munich, Germany.
- [42] Roy R. (1991). "End-of-life electronic equipment waste". Tech. Rep, Centre for Exploitation of Science and Technology CEST, London, UK.

## Bibliographie

- [43] Rester Propre (2000). REcherches Socio-TEchniques pour le Recyclage de PROduits manufactures Par REvalorisation. Rapport final du programme des thématiques prioritaires de la Région Rhône-Alpes, Laboratoire d'Automatique de Grenoble, France, octobre 2000.
- [44] Sexton T.R. and L.D. Bodin (1983). "The multiple-vehicle subscriber dial-a-ride problem". Working paper MS /S 83-009, College of Business and Management, University of Maryland (1983).

## Conférences et revues

- [45] "Déchets: suivez-les de bout en bout". Industries et Techniques, Octobre 1998 797, p.76-77.
- [46] Alting L. (1991). "Life cycle design". Concurrent Engineering: Issues, Practice and Technology 1 (6), p. 19-27.
- [47] Alting L. and J. Jorgensen (1993). "The life cycle concepts as a basis for sustainable industrial production". Annals of the CIRP 42 (1), 163-167.
- [48] Alting L. and J.B. Legarth (1995). "Life cycle engineering and design". Annals of the CIRP 44 (2), p. 569-580.
- [49] Anandalingam G. and Westfall M. (1988). "Selection of hazardous waste disposal alternatives using multi-attributes utility and fuzzy set analysis". Journal of Environmental Systems 18 (1), p. 69-85.
- [50] Barros A.I., R. Dekker and V. Scholten (1998). "A two-level network for recycling sand: a case study". European Journal of Operational Research 110, p. 199-214.
- [51] Barry J., G. Girard and C. Perras (1993). "Logistics planning shifts into reverse". The Journal of European Business, September-October, p. 34-38.
- [52] Batta R. and S.S. Chiu (1988). "Optimal obnoxious paths on a network: transportation of hazardous materials". Operations research 36 (1), p. 84-92.
- [53] Beckman S., P. Worhach and P.S. Sheng (1995). "Environmentally-conscious supply chain management". Proceedings of the IEEE international symposium on Electronics and the environment, p. 235-9, 1995.
- [54] Bloemhof-Ruwaard J.M., M. Salomon and L.N. Van Wassenhove (1994). "On the coordination of product and by-product flows in two-level distribution networks: Model formulation and solution procedures". European Journal of Operational Research 79 (2), p.325-339.
- [55] Bloemhof-Ruwaard J.M., P. van Beck, L. Hordijk and L.N. Van Wassenhove (1995). "Interactions between operational research and environmental management". European Journal of Operational Research 85, p. 229-243.
- [56] Bloemhof-Ruwaard J.M., M. Salomon and L. Van Wassenhove (1996). "The capacitated distribution and waste disposal problem". European Journal of Operational Research 88 (3), p. 490-503.
- [57] Bloemhof-Ruwaard J.M., L. Van Wassenhove, H.L. Gabel and P. Weaver (1996). "An environmental life cycle optimization model for the european pulp and paper industry". Omega 24 (6), p.615-629.

- [58] Bodin L.D., B.L. Golden, A. Assad and M.O. Ball (1983), "Routing and scheduling of vehicles and crew: the state of the art". *Computers and Operations Research* 10 (2), p. 63-211.
- [59] Bodin L. and T. Sexton (1986). "The multi-vehicle subscriber dial-a-ride problem". *TIMS Studies in the Management Science* 22, p. 73-86.
- [60] Boothroyd G. and L. Alting (1992). "Design for assembly and disassembly". *Annals of the CIRP* 41 (2), p. 625-636.
- [61] Bor J.M. (1994). "The influence of waste strategies on product design". *Materials and design* 15 (4), p. 219-224.
- [62] Bouzaher A., J.B. Braden and G.V. Johnson (1990). "A dynamic programming approach to a class of nonpoint source pollution control problems". *Management Science* 36 (1), p. 1-15. Article n°17.
- [63] van der Bruggen L.J.J., J.K. Lenstra and P.C. Schuur (1993). "Variable-depth search for the single-vehicle pickup and delivery problem with time windows". *Transportation Science* 27 (3), p. 298-311.
- [64] Caincross F. (1992). "How Europe's companies reposition to recycle". *Harvard Business review*, March-April, p. 34-45.
- [65] Carter C.R. and L.M. Ellram (1998). "Reverse logistics: a review of the literature and framework for future investigation". *Journal of Business Logistics* 19 (1), p. 85-102.
- [66] Caruso C., A. Colorni and M. Paruccini (1993). "The regional urban solid waste management system: a modelling approach". *European Journal of Operational Research* 70, p. 16-30.
- [67] Clark and Wright (1964). "Scheduling from a central depot to a number of delivery points". *Operations Research* 12, p. 568-581.
- [68] Clegg A.J., Williams D.J. and Uzsoy R. (1995). "Production planning for companies with remanufacturing capability". *Proceedings of the IEEE International symposium on Electronics on the environment*, Orlando, Florida, U.S.A., p. 186-191, 1995.
- [69] Cohen M.A., S. Nahmias and W.P. Pierskalla (1980). "A dynamic inventory system with recycling". *Naval Research Logistics Quarterly* 27 (2), p. 289-296.
- [70] Cohen M.A. and Kleindorfer P.R. (1989). "Near-optimal service constraints stocking policies for spare parts". *Operations Research* 37 (1), p. 104-17.
- [71] Corbett C.J.C., Debets F. and Van Wassenhove L.N. (1995). "Decentralisation of responsibility for site decontamination projects: a budget allocation approach". *European Journal of Operational Research* 86 (1), p. 103-119.
- [72] Cordeau J.F., G. Laporte and A. Mercier (2001). "A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows". *Journal of the Operational Research Society* 52, p. 928-36.
- [73] Cordeau J.F. and G. Laporte (2001). "A tabu search algorithm for the site dependent vehicle routing problem with time window". *INFOR* 39 (3), p. 292-297.
- [74] Cselényi J., B. Mang and Z. István (1998). "Some considerations about planning and control of logistics systems in disassembly factory". *Preprints on 1<sup>st</sup> IFAC Workshop on Intelligent Assembly and Disassembly IAD'98*, May 21-23 1998, Bled, Slovenia.
- [75] Daniel S., D. Diakoulaki and C.P. Pappis (1997). "Operational research and environmental planning". *European Journal of Operational Research* 102 (2), 248-263.

## Bibliographie

- [76] de Melo J.J. and A.S. Câmara (1994). "Models for the optimization of regional wastewater treatment systems". *European Journal of Operational Research* 73, p. 1-16.
- [77] Dekker R., J. Bloemhof-Ruwaard, M. Fleischmann, E.A. van der Laan, J.A.E.E. van Nunen and L. Van Wassenhove (1998). "Operational research in reverse logistics: some recent contributions". *International Journal of Logistics: Research and Applications* 1 (2), p. 141-155.
- [78] Dekker R. and E.A. van der Laan (1999). "Gestion des stocks pour la fabrication et la refabrication simultanées: synthèse des résultats récents". *Logistique & Management* 7 (2), p. 27-36.
- [79] Del Castillo E. and K.J. Cochran (1996). "Optimal short horizon distribution operations in reusable container systems". *Journal of the Operational Research Society* 47, p. 48-60.
- [80] Desrosiers J., Y. Dumas and F. Soumis (1986). "A dynamic programming solution of the large-scale single-vehicle dial-a-ride problem with time windows". *American Journal of Mathematical and Management Sciences* 6 (3), p. 301-325.
- [81] Dillon P.S. (1994). "Salvageability by design". *IEEE Spectrum*, August 1994, p. 18-24.
- [82] Dumas Y., J. Desrosiers and F. Soumis (1991). "The pickup and delivery problem with time windows". *European Journal of Operational Research* 54 (1), p. 7-22.
- [83] Elbing F. (1999). "Disassembly factories I - Technology and logistics". Workshop 4th World Congress R '99 - Recovery, Recycling, Re-integration. Genf, Schweiz, 05.02.1999.
- [84] Faigle U. and W. Kern (1992). "Some convergence results for probabilistic Tabu search". *ORSA Journal on Computing* 4 (1), p. 32-38.
- [85] Flapper S.D.P. (1994a). "On the logistics aspects of integrating procurement, production and recycling by lean and agilewise manufacturing companies". Proceedings of the 27<sup>th</sup> ISATA International Dedicated Conference on Lean / Agile Manufacturing in the Automotive Industries, Aachen, Germany, p. 749-756.
- [86] Flapper S.D.P. (1994b). "Matching material requirements and availabilities in the context of recycling: an MRP-I based heuristic". Proceedings of the Eight International Working Seminar on Production Economics 3, Igls / Innsbruck, Austria, February 21-25 1994, p. 511-519.
- [87] Flapper S.D.P. (1996). "Logistic aspects of reuse: an overview". Proceedings of the First International Working Seminar on Reuse, Eindhoven, The Netherlands, November 11-13, 1996, p. 109-118. Article n°27.
- [88] Flapper S.D.P. and G.P. Kiesmueller (1999). "Reusable distribution items with a technically preset maximum number of usage". Proceedings of the Second International Working Seminar on Reuse, March 1-3 1999, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands. (extended version submitted to IIE Transactions)
- [89] Fleischmann M., J. Bloemhof-Ruwaard, R. Dekker, E. van der Laan, J. van Nunen and L. Van Wassenhove (1997). "Quantitative models for reverse logistics: a review". *European Journal of Operational Research* 103, p. 1-17.
- [90] Fleischmann M., H.R. Krikke, R. Dekker and S.D.P. Flapper (2000). "A characterisation of logistics networks for product recovery". *Omega* 28, p. 653-666.
- [91] Geiger D. and E. Zussman (1996). "Probabilistic reactive disassembly planning". *Annals of the CIRP* 45 (1), p. 49-52.

- [92] Glover F. (1977). "Heuristics for integer programming using surrogate constraints". *Decision Sciences* 8 (1), p. 156-66.
- [93] Glover F. (1986). "Future paths for integer programming and links to artificial intelligence". *Computers and Operations Research* 13, p. 533-49.
- [94] Glover F. (1990). "Tabu search: a tutorial". *Interfaces* 20 (4), p. 74-94.
- [95] Glover F. (1997). "Tabu search and adaptative memory programming". In: *Interfaces in Computer Science and Operations Research - Advances in Metaheuristics, Optimisation and Stochastic Modeling Technologies*. Barr R., R. Helgason and J. Jennington editors, Kluwer Academic Publishers, Boston, Massachusetts.
- [96] Gooley T.B. (1998). "Reverse logistics: five step to success". *Logistics management and distribution report*, June 1998, p. 49-55, 1998.
- [97] Gottinger H.W. (1988). "A computational model for solid waste management with application". *European Journal of Operational Research* 35 (3), p. 350-364.
- [98] Guide Jr. V.D.R. (1996). "Scheduling using drum-buffer-rope in a remanufacturing environment". *International Journal of Production Research* 34 (4), p. 1081-1091.
- [99] Guide Jr. V.D.R., M.E. Kraus and R. Srivastava (1997). "Scheduling policies for remanufacturing". *International Journal of Production Economics* 48 (2), p.187-204.
- [100] Guide Jr. V.D.R., R. Srivastava and M.S. Spencer (1997). "An evaluation of capacity planning techniques in a remanufacturing environment". *International Journal of Production Research* 35 (1), p.67-82.
- [101] Gultinan J.P. and N.G. Nwokoye (1975). "Developing distribution channels and systems in the emerging recycling industries". *International Journal of Physical Distribution* 6 (1), p. 28-38.
- [102] Guinee J.B., H.A. Udo de Haes and G. Huppes (1993). "Quantitative life cycle assessment of products - 1: Goal definition and inventory". *Journal of Cleaner Production* 1 (1), p. 3-13.
- [103] Guinee J.B., H.A. Udo de Haes and G. Huppes (1993). "Quantitative life cycle assessment of products - 2: Classification, valuation and improvement analysis". *Journal of Cleaner Production* 1 (2), p. 81-91.
- [104] Guinet A. (1993). "Scheduling sequence-dependent jobs on identical parallel machines to minimize completion time criteria". *International Journal of Production Research* 31 (7), p. 1579-1594.
- [105] Gupta S.M. and K.N. Taleb (1994). "Scheduling disassembly". *International Journal of Production Research* 32 (8), p. 1857-1866.
- [106] Haberland S., A. Mager and A. Waltermath (1997). "Logistics strategies for the realization of a life cycle economy". *Life cycle networks, Proceedings of the 4th CIRP international seminar on Life cycle engineering, 26-28 June 1997, Berlin, Germany*, F.-L. Krause and G. Seliger ed., Chapman & Hall.
- [107] Hauschild M., H. Wenzel and L. Alting (1999). "Life cycle design - a route to the sustainable industrial cultur?". *Annals of the CIRP* 48 (1), p. 393-396.
- [108] Healy P. and R. Moll (1995). "A new extension of local search applied to the dial a ride problem". *European Journal of Operational Research* 83, p. 83-104.
- [109] Heymann D.P. (1977). "Optimal disposal policies for a single-item inventory system with returns". *Naval Research Logistcis Quaterly* 24, p. 385-405.

## Bibliographie

- [110] Hirsch B.E., T. Kuhlmann, Z. K. Marciniak and C. Mabow (1995). "Information system concept for the management of distributed production". *Computers in Industry* 26, p. 229-241.
- [111] Hirsch B.E. and S. Crom (1994). "Management challenges in globally distributed production environments: necessities and strategies for reorientation of production management methods". IFIP WG 5.7 Working Conference on Evaluation of Production Management Methods, Gramado, Brazil, March 21-24, 1994.
- [112] Hirsch B.E., T. Kuhlmann and J. Schumacher (1996). "Advanced strategic logistic concepts for life-cycle oriented production methodologies in virtual enterprises". ASI'96 - Life cycle approaches to production systems, Annual conference of ICIMS-NOE, 2-6 June, 1996, Toulouse, France.
- [113] Hirsch B.E., T. Kuhlmann and J. Schumacher (1996). "Multimodal logistic chain simulation for strategic decision making". Rapport Keep in Touch (KIT), STERMPROPLAN project, August 1995- June 1996.
- [114] Inderfurth K. (1997). "Simple optimal replenishment and disposal policies for a product recovery system with leadtimes". *OR Spektrum* 19, p. 111-122.
- [115] Ioachim I., J. Desrosiers, Y. Dumas, M.M. Salomon and D. Villeneuve (1995). "A request clustering algorithm for door-to-door handicapped transportation". *Transportation Science* 29 (1), p. 63-78.
- [116] Jacobs T.L. and J.W. Everett (1992). "Optimal scheduling of consecutive landfill operations with recycling". *Journal of Environmental Engineering* 118 (3), p. 420-9.
- [117] Jahre M. (1995). "Household waste collection as a reverse channel - A theoretical perspective". *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 25 (2), p. 39-55.
- [118] Jaw J.J., A.R. Odoni, H.N. Psaraftis and N.H.M. Wilson (1986). "A heuristic algorithm for the multi-vehicle advance request dial-a-ride problem with time windows". *Transportation Research* 20B (3), p. 243-257.
- [119] Johnson M.R. and M.H. Wang (1995). "Planning product disassembly for material recovery opportunities". *International Journal of Production Research* 33 (11), p. 3119-3142.
- [120] Jovane F., L. Alting, A. Armilotta, W. Eversheim, K. Feldmann, G. Seliger and N. Roth (1993). "A key issue in product life cycle: disassembly". *Annals of CIRP* 42 (2), p. 651-658.
- [121] Kalantari B., A.V. Hill and S.R. Adora (1985). "An algorithm for the traveling salesman with pickup and delivery customers". *European Journal of Operational Research* 22, p. 377-386.
- [122] Karacapilidis N.I., D. Papadias, T. Gordon and H. Voss (1997). "Collaborative environmental planning with GeoMed". *European Journal of Operational Research, Special Issue on Environmental Planning* 102 (2), p. 335-346.
- [123] Kokkinaki I., R. Dekker, J. van Nunen and C. Pappis (1999). "Etude exploratoire sur le commerce électronique lié à la reverse logistics". *Logistique & Management* 7 (2), p. 27-36.
- [124] Krikke H.R., A. van Harten, P.C. Schuur (1998). "On a medium term product recovery and disposal strategy for durable assembly products". *International Journal of Production Research* 36 (1), p. 111-139.

- [125] Kriwet A., E. Zussman and G. Seliger (1995). "Systematic integration of design-for-recycling into product design". *International Journal of Production Economics* 38, p. 15-22.
- [126] van der Laan E., R. Dekker and M. Salomon (1996a). "An (s;Q) inventory model with remanufacturing and disposal". *International Journal of Production Economics* 46-47, p. 339-350.
- [127] van der Laan E., R. Dekker and M. Salomon (1996b). "Product remanufacturing and disposal: a numerical comparison of alternative control strategies". *International Journal of Production Economics* 45 (1-3), p. 489-498.
- [128] van der Laan E.A. and M. Salomon (1997). "Production planning and inventory control with remanufacturing and disposal". *European Journal of Operational Research* 102 (2), p.264-278.
- [129] van der Laan E.A., M. Salomon and R. Dekker (1999). "An investigation of lead-time effects in manufacturing / remanufacturing systems under simple push and pull control strategies". *European Journal of Operational Research* 115 (1), p. 195-214.
- [130] Lee Y.Q. and S.R.T. Kumara (1992). "Individual and group disassembly sequence generation through freedom and interference spaces". *Journal of Design and Manufacturing* 2, p. 143-153.
- [131] Lin S. and B. Kernighan (1973). "An effective heuristic algorithm for the traveling salesman problem". *Operations Research* 21 (2), p. 498-516.
- [132] List G.F., P.B. Mirchandani, M.A. Turnquist and K.G. Zografos (1991). "Modelling and analysis of hazardous materials transportation: risk analysis, routing/scheduling and facility location". *Transportation Science* 25 (2), p. 100-114.
- [133] List G.F. and M.A. Turnquist (1998). "Routing and emergency response team siting for high-level radioactive waste shipments". *IEEE Transactions on Engineering Management* 45 (2), special issue on Emergency Management Engineering, p. 141-152.
- [134] Lund J.R. (1990). "Least-cost scheduling of solid waste management". *Journal of Environmental Engineering* 116 (1), p. 182-197.
- [135] Lund R.T. (1984). "Remanufacturing". *Technology Review* 87 (2), p. 19-29.
- [136] Mabini M.C. and L.F. Gelders (1991). "Repairable item inventory systems: a literature review". *Belgian Journal of Operations Research, Statistics and Computer Science* 30 (4), p. 57-69.
- [137] Mabini M.C., L.M. Pintelon and L.F. Gelders (1992). "EOQ type formulations for controlling repairable inventories". *International Journal of Production Economics* 28, p. 21-33.
- [138] Madsen O.B.G., H.F. Ravn and J.M. Rygaard (1995). "A heuristic algorithm for a dial-a-ride problem with time windows, multiple capacities, and multiple objectives". *Annals of Operations Research* 60, p. 193-208.
- [139] Marien E. J. (1998). "Reverse logistics as competitive strategy". *Supply Chain Management Review*, Spring 1998, p. 43-52, 1998.
- [140] Nagel-C. (1998). "TI: take IT back-European approaches for setting up reverse logistic systems". *Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment ISEE*, 4-6 May 1998, Oak Brook, IL, U.S.A., p. 25-9.

## Bibliographie

- [141] Nagel C., J. Nilsson and C. Boks (1999). "European end-of-life systems for electrical and electronic equipment". Proceedings of the First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 1-3 February 1999, Tokyo, Japan, p.197-202.
- [142] Nahmias S. (1981). "Managing repairable item inventory systems: a review". *TIMS Studies in the Management Science* 16, p. 253-277.
- [143] Navin-Chandra D. (1994). "The recovery problem in product design". *Journal of Engineering Design* 5 (1), p. 65-86.
- [144] Ossenbruggen P.J. and P.M. Ossenbruggen (1992). "SWAP, a computer package for solid waste management". *Computers, Environment and Urban Systems* 16, p. 83-99.
- [145] Penev K.D. and A.J. de Ron (1996). "Determination of a disassembly strategy". *International Journal of Production Research* 34 (2), p. 495-506.
- [146] Pierskalla W.P. and J.A. Voelker (1976). "A survey of maintenance models: the control and surveillance of deteriorating systems". *Naval Research Logistics Quarterly* 23, p. 353-388.
- [147] Pnueli Y. and E. Zussman (1997). "Evaluating the end-of-life value of a product and improving it by redesign". *International Journal of Production Research* 35 (4), p.921-942.
- [148] Pohlen T.L. and T. Farris II (1992). "Reverse logistics in plastic recycling". *International journal of physical distribution and logistics management* 22 (7), p. 35-47.
- [149] Potvin J.-Y. and J.-M. Rousseau (1993). "A parallel route building algorithm for the vehicle routing and scheduling problem with time windows". *European Journal of Operational Research* 66, p. 331-340.
- [150] Psaraftis H.N. (1980). "A dynamic programming solution to the single vehicle many-to-many immediate request dial-a-ride problem". *Transportation Science* 14 (2), p. 130-154.
- [151] Psaraftis H.N. (1983a). "An exact algorithm for the single vehicle many-to-many immediate request dial-a-ride problem with time windows". *Transportation Science* 17, p. 351-357.
- [152] Psaraftis H.N. (1983b). "k-interchange procedures for local search in a precedence-constrained routing problem". *European Journal of Operational Research* 13, p. 391-402.
- [153] ReVelle C., Cohon J. and Shobrys D. (1991). "Simultaneous siting and routing in the disposal of hazardous wastes". *Transportation Science* 25 (2), p. 138-145.
- [154] Richter K. (1996a). "The EOQ repair and waste disposal model with variable setup numbers". *European Journal of Operational Research* 95 (2), p. 313-324.
- [155] Richter K. (1996b). "The extended EOQ repair and waste disposal model". *International Journal of Production Economics* 45 (1-3), p. 443-448.
- [156] Savelsbergh M.P.W. and M. Sol (1995). "The general pickup and delivery problem". *Transportation Science* 29 (1), p. 17-29.
- [157] Savelsbergh M.P.W. and M. Sol (1998). "Drive: dynamic routing of independent vehicles". *Operations Research* 46 (4), p. 474-491.
- [158] Scharf C. and G. Vogel (1994). "A comparison of collection systems in European cities". *Waste Management and Research* 12 (5), p. 387-404.

- [159] Scheidt L.G., N. Abdoolcader, H. Stadlbauer, Shuqiang-Zong and P. Doelman (1995). "Electronics recycling: another dimension". Proceedings of the 1995 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment ISEE, 1-3 May 1995, Orlando, Florida, U.S.A., p. 290-294.
- [160] Scheidt L.G. and H. Stadlbauer (1995). "Electronics products and continuous improvement of their environmental performance – a comprehensive approach". Proceedings of the International Conference on Clean Electronics Products and Technology (n° 416), 9-11 October 1995, Edinburg, UK, p. 136-141.
- [161] Scheidt L.G. and H. Stadlbauer (1996). "CARE "VISION 2000" – the environmental research platform on the electronics industry in Europe". Proceedings of the 1996 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment ISEE, 6-8 May, Dallas, Texas, U.S.A., p. 264-268.
- [162] Schradly D.A. (1967). "A deterministic inventory model for repairable item". Naval Research Logistics Quarterly 14 (3), p. 391-398.
- [163] Sexton T.R. and L.D. Bodin (1983). "The multiple-vehicle subscriber dial-a-ride problem". Working paper MS /S 83-009, College of Business and Management, University of Maryland.
- [164] Sexton T.R. and L.D. Bodin (1985a). "Optimizing single vehicle many-to-many operations with desired delivery times: I. scheduling". Transportation Science 19 (4), p. 378-410.
- [165] Sexton T.R. and L.D. Bodin (1985b). "Optimizing single vehicle many-to-many operations with desired delivery times: II. routing". Transportation Science 19 (4), p. 411-435.
- [166] Sexton T. and Y. Choi (1986). "Pick-up and delivery of partial loads with time windows". The American Journal of Mathematical and Management Sciences 6, p. 369-398.
- [167] Sharma R.R.K. and S.S. Paradkar (1995). "Modelling a railway freight transport system". Asia Pacific Journal of Operational Research 12 (1), p. 17-36.
- [168] Skorin-Kapov J. (1990). "Tabu search applied to the quadratic assignment problem". ORSA Journal on Computing 2 (1), p. 33-41.
- [169] Solomon M.M. (1987). "Algorithms for the vehicle routing and scheduling problem with time window constraints". Operations Research 35 (2), p. 254-265.
- [170] Spengler T., H. Pückert, T. Penkuhn and O. Rentz (1997). "Environmental integrated production and recycling management". European Journal of Operational Research 97 (2), p. 308-326.
- [171] Tagaras G. and M.A. Cohen (1992). "Pooling in two-location inventory systems with non-negligible replenishment lead times". Management Science 38 (8), p. 1067-1083.
- [172] Tagaras G. (1999). "Pooling in multi-location periodic inventory distribution systems". Omega 27 (1), p. 39-59.
- [173] Taillard E. (1991). "Robust Taboo search for the quadratic assignment problem". Parallel Computing 17, p. 443-455.
- [174] Taillard E., P. Badeau, M. Gendreau, F. Guertin and J-Y. Potvin (1997). "A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with soft time windows". Transportation Science 31 (2), p. 170-186.

## Bibliographie

- [175] Thierry M., M. Salomon, J. van Nunen L. and Van Wassenhove (1995). "Strategic issues in product recovery management". *California Management Review* 37 (2), p. 114-135, Winter 1995.
- [176] vanderMerwe S. and M. Oliff (1991). "Corporate challenges for an age of reconsumption". *The Columbia Journal of World Business* 26 (3), p. 6-25.
- [177] Warnecke G. and S. Geelhaar (1999). "Life cycle oriented design of industrial recycling processes". *Production Engineering, Research and Development - Annals of the German Academic Society for Production Engineering*, vol. V1 (1), p. 103-106.
- [178] Weaver P.M., L. Landis Gabel, J.M. Bloemhof-Ruwaard and L. Van Wassenhove (1997). "Optimizing environmental product life cycles". *Environmental and Resource Economics* 9 (2), p.199-224.
- [179] Wenzel H. and L. Alting (1999). "Danish experience with the EDIP tool for environmental design of industrial products". *Proceedings of the IEEE EcoDesign 1999 Conference: First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, February 1999, Tokyo, Japan.
- [180] Wiendahl H.-P., T. Wahlers and M. Mittendorf (1999). "Supporting the design of logistically friendly products". *Production Engineering, Research and Development - Annals of the German Academic Society for Production Engineering*, vol. V1 (1), p. 119-124.
- [181] Wu H.-J. and S.C. Dunn (1995). "Environmentally responsible logistics systems". *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 25 (2), p. 20-38.
- [182] Zussman E., A. Kriwet and G. Seliger (1994). "Disassembly-oriented assessment methodology to support design for recycling". *Annals of CIRP* 43 (1), p. 9-14.
- [183] Zussman E. (1995). "Planning of disassembly systems". *Assembly Automation Journal* 15 (4), p. 20-23.
- [184] Zussman E. and M.C. Zhou (1998). "A methodology for modeling and adaptive planning of disassembly processes". *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 15 (1), p. 190-194.

## Autres

- [185] <http://www.zib.de/ascheuer/ATSPTW.html>
- [186] ENVIE DAUPHINE, 70 avenue Rhin et Danube, 38000 Grenoble

## Publications de l'auteur

- [187] Chetouane F., H. Bouvet, A. Landrieu et Z. Binder (1997). "Conduite d'atelier flexible de production : interaction transport-production". Note interne N°97002, Laboratoire d'Automatique de Grenoble, France.
- [188] Chetouane F., H. Bouvet, A. Landrieu et Z. Binder (1997). "Control of flexible manufacturing system : interaction between production and transportation". Conference

- on Management and Control of Production and Logistics-MCPL'97, Campinas (Brazil), 31 August - 3 September 1997, Vol. 1, pp. 95-101.
- [189] Descotes-Genon B., F. Chetouane, D. Chevron, A. Landrieu and C. Sassine (1997). "Logistic, maintenance, production in virtual manufacturing enterprise". Conference on Management and Control of Production and Logistics-MCPL'97, Campinas (Brazil), 31 August - 3 September 1997, Vol. 1, pp. 47-52.
- [190] Landrieu A. et S. Gerner (1998). "Plate-forme et réseau de plates-formes". Note interne N°98057, Laboratoire d'Automatique de Grenoble, France, Mai 1998.
- [191] Landrieu A., Z. Binder et B. Descotes-Genon (1999). "Recycling system : description of a green supply chain example". Note interne N° 98059, Laboratoire d'Automatique de Grenoble, France.
- [192] Landrieu A. (1999). "Une heuristique du problème de chargement et déchargement appliquée au recyclage des produits manufacturés". 2è Congrès de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision ROADEF'99, Autrans (Vercors), France, 13-15 Janvier 1999.
- [193] Gerner S., A. Landrieu, Z. Binder et B. Descotes-Genon (1999). "Recycling system : distributed disassembly networks and disassembly workshop modelling". 3e Congrès international de Génie Industriel, Montréal (Canada), 26-28 mai 1999.
- [194] Landrieu A. (1999). "Logistique du recyclage : modélisation d'un réseau de plates-formes REX". Note interne N°99025, Laboratoire d'Automatique de Grenoble, France.
- [195] Flipo C, A. Landrieu, Z Binder et G. Finke (1999). "Coordination of manufacturing and distribution : two industrial examples". Preprints of 14th World Congress IFAC'99, Beijing (P.R. China), July 5-9, 1999, volume A-1c-04-2, p. 343-347.
- [196] Landrieu A. (1999). "Coordination de la chaîne logistique dans le recyclage des produits manufacturés". Poster Doctoriales 98, Dolomieu (Isère), France, 22-27 Novembre 1998.
- [197] Landrieu A., Y. Mati et Z. Binder (2001). "A tabu search heuristic for the single vehicle pickup and delivery problem with time windows". Journal of Intelligent Manufacturing, special issue : "Global optimization meta-heuristics for industrial systems design and management", 12, p. 497-508.



# Annexes



# Annexe 1

République Française  
Ville de Saint-Martin-d'Hères  
Isère



le 18 juin 2001

Madame, monsieur,

Avec l'équipe municipale nous avons pris la décision de stopper la collecte mensuelle des objets encombrants pour des raisons de sécurité qui aujourd'hui s'imposent. Une mesure exigée également pour des raisons d'hygiène, de protection de l'environnement dans la vie des quartiers mais qui remet en question un service gratuit par ailleurs apprécié et que la Ville assurait depuis longtemps.

Les dépôts de ces "monstres" sur la voie publique sont depuis quelques temps sources de danger pour les enfants et les passants. Des déchets coupants, toxiques, polluants, ont été trouvés parmi les mobiliers ou autres matériaux qui entraient normalement dans cette collecte.

Outre le danger que cela représente pour les habitants, notamment les plus jeunes, ces négligences mettent également en péril les professionnels qui s'emploient à manipuler ces objets afin de les transporter. Ces produits dangereux ne peuvent en aucun cas être laissés à la portée de tous. Malgré les informations et rappels répétés à ce sujet, les consignes n'ont malheureusement pas été respectées.

**Aussi, à partir de ce jour la collecte est arrêtée. Celle devant être effectuée le 4 juillet n'aura pas lieu.** J'invite les Martinérois à venir déposer leurs objets encombrants à la déchetterie communale, avenue Jean Jaurès ou à la déchetterie intercommunale à La Tronche.

Je compte sur votre compréhension et votre bienveillance afin que chacun agisse pour le bien être, la propreté et la sécurité de chacun dans la commune.

**René Proby**  
Maire  
Conseiller général

**L'accès aux déchetteries est gratuit pour les particuliers**, dans la limite d'apports occasionnels et pouvant être contenus dans un véhicule léger ou une petite remorque. Afin de réserver le meilleur accueil aux habitants, ceux-ci devront être à même de présenter un justificatif de domicile au gardien.

**Horaires d'ouverture au public**

- Déchetterie communale, 74 avenue Jean Jaurès : du mardi au vendredi de 7 h 30 à 12 h et de 14 h à 17 h, le samedi de 8 h à 12 h et de 14 h à 17 h.
- Déchetterie intercommunale, près d'Athador, à La Tronche : du lundi au samedi de 7 h à 19 h.

Toute correspondance doit être adressée impersonnellement à M. le Maire, BP7 38401 Saint-Martin-d'Hères Cedex  
tél. 04 76 60 73 73 télécopie 04 76 60 73 00 Web <http://www.ville-st-martin-dheres.fr> e-mail [ville.com.smh@wanadoo.fr](mailto:ville.com.smh@wanadoo.fr)



# Annexe 2

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE



N° 3467

## PROCÈS-VERBAL DE SOUTENANCE

d'une thèse de DOCTORAT  
(Diplôme National institué par l'Arrêté Ministériel du 30 mars 1992)

spécialité (1) Automatique et Productique

soutenue le 27/09/2001 à L'ENSIEG

par M<sup>r</sup> LANDRIEU Antoine

né(e) le 22/09/1973 à Saint-Jean

inscrit(e) à l'Institut National Polytechnique de Grenoble sous le n° 0915190191101 09 MAR 2002 22 93 ZNE Etudiant

Jury (2) : Président LADET Pierre

Examinateurs GORTIER Gilles } Rapporteurs

GUINET Alain }

FINKE Gerold JEKKER Romuald

BINDER Zolenek

DESCOTES-GENON Bernard

Thèse préparée dans le laboratoire de d'Automatique de Grenoble

dirigé par M<sup>r</sup> Luc DUBARD

Travail conduit sous la direction de M<sup>r</sup> BINDER Zolenek

DESCOTES-GENON Bernard

Sujet de la thèse : Logistique inverse et collecte des

produits techniques en fin de vie

Tourner de recherche avec contraintes

.../...

(1) Le diplôme peut, en outre, préciser l'indication d'une spécialité dans le cadre de la discipline.  
(2) Le jury doit comprendre au moins trois membres. Indiquer les noms et titres des membres du Jury.

## RAPPORT DE SOUTENANCE

Monsieur Antoine Landrieu a montré dans sa soutenance orale toute sa maîtrise du sujet et du domaine dans lequel il a évolué au cours de ses recherches. Il a montré en même temps des qualités rédactionnelles que le jury s'est plu à souligner ; il a su donner à son exposé une organisation qui permettait un suivi agréable.

Le sujet a été rappelé et présenté avec beaucoup d'aisance, encadré par un rappel de l'étude bibliographique permettant de situer correctement l'apport principal de l'auteur qui, par ailleurs, a su prendre suffisamment de recul et extraire la philosophie de sa démarche.

Les idées et résultats principaux ont, de ce fait, étaient présentés et mis en évidence avec beaucoup de clarté ainsi que les perspectives qu'ouvrent de tels travaux et qui mériteront une attention particulière du laboratoire.

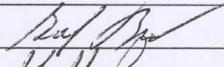
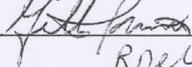
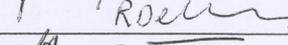
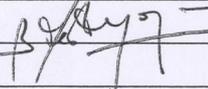
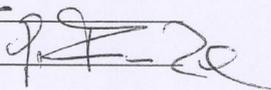
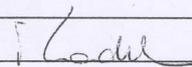
Le jury a par ailleurs particulièrement apprécié de quelle manière monsieur Antoine Landrieu a su intégrer ses résultats, obtenus à partir d'une démarche basée sur les disciplines de l'automatique et de la recherche opérationnelle, dans un contexte plus large, pluridisciplinaire, indispensable à la compréhension des mécanismes complexes abordés.

DÉCISION : Le jury décerne le grade de Docteur de  
l'Institut National Polytechnique de Grenoble  
MENTION : Très Honorable

En application des décisions des Conseils Scientifiques de l'I.N.P.G. du 24 mars 1994 et du 12 décembre 1996, la mention "Très Honorable avec Félicitations" est attribuée à l'unanimité du jury à l'issue d'un vote à bulletin secret. A partir du 1<sup>er</sup> janvier 1997, la question soumise au vote est : "Cette thèse fait-elle partie des 20 % meilleures thèses que vous avez examinées ?"

DATE : 27 septembre 2001

SIGNATURE DES MEMBRES DU JURY (précédée des noms et prénoms) :

BINDER Zdenek	
CORNIER Gilles	
DEKKER Rommert	
JACQ. GENON Bernard	
FINKE Gerald	
GUINET Alain	
LAFET Pierre	







## RÉSUMÉ

La logistique inverse des déchets techniques encombrants de type blanc ou brun se développe de nos jours afin de répondre aux contraintes législatives fortes qui n'autorisent à partir de juillet 2002 que la mise en décharge des déchets dits « ultimes ». Le recyclage noble apparaît comme une solution prometteuse, économiquement viable et écologique, où la collecte, approvisionneuse exclusive du processus de récupération des déchets, doit être appréhendée et planifiée dans l'objectif de maîtrise des coûts. Après avoir identifié les caractéristiques principales des systèmes de collecte existants, nous nous attardons sur le ramassage à domicile des produits usagés de la population. Afin de pouvoir établir une planification opérationnelle, ce mode de collecte est modélisé comme un problème de routage de véhicules : le problème de chargement et de déchargement avec contraintes de fenêtres temporelles, de précédence et de capacité. Ce problème d'Optimisation Combinatoire est ensuite résolu de manière algorithmique, en considérant successivement le cas d'un véhicule, puis de plusieurs véhicules. La résolution du problème se base sur la recherche tabou et la recherche tabou probabiliste, et fournit des résultats très satisfaisants sur le plan qualitatif et en temps d'exécution. Finalement, nous décrivons, grâce au langage de modélisation unifié orienté objet UML, une manière d'intégrer nos résultats algorithmiques dans un module d'aide à la décision pour la planification opérationnelle de la collecte, où l'opérateur humain est chargé de définir le plan de collecte à exécuter.

---

## **Reverse logistics and collection of end-of-life technical products - Vehicle routing problems with constraints**

---

### ABSTRACT

This thesis deals with durable household electronic appliances collection. Regarding legislative constraints that force disposal of so-called « ultimate » products from July 2002, recycling appears to be an ecologic and economic promising solution. Economic stability of recycling depends among other things on the costs management and the development of secondary markets, in order to add value on materials, spare parts and recycled products. This perspective leads us to consider the management and the planning of collection, the main supplier of reverse logistics and the responsible of a consequent part of system global costs. Once the principal characteristics of the logistics system are identified, the collection at home keeps our attention, and is modelled as a vehicle routing problem : the « pickup and delivery problem with time windows ». This Operational Research problem is then algorithmically resolved, successively considering the single vehicle and the multiple vehicle cases. Main algorithm is based on probabilistic and deterministic tabu searches, and give excellent results in terms of execution time and quality. Finally, a way is shown for easily integrating heuristics in a decision support module of collection operational planning, where the human operator has to define the collection plan to be executed. Module integration is modeled using the unified modelling language UML.

---

### DISCIPLINE

Automatique et Productique

---

### MOTS-CLÉS

Logistique inverse ; Collecte ; Routage de véhicules avec contraintes ; Problème de chargement et de déchargement avec contraintes de fenêtres temporelles, de capacité et de précédence ; Recherche Tabou ; UML.

---

### INTITULÉ ET ADRESSE DU LABORATOIRE

Laboratoire d'Automatique de Grenoble

ENSIEG, BP 46, Domaine universitaire, 38402 Saint Martin d'Hères Cedex, France.