

THÈSE PRÉSENTÉE
POUR OBTENIR LE GRADE DE

**DOCTEUR DE
L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX**

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR
SPÉCIALITÉ : Productique

Par **Alioune FALL**

**Planification des activités en logistique
inverse : modélisation et optimisation des
performances par une approche stochastique
en programmation linéaire**

Sous la direction de : **Rémy DUPAS**, Professeur de l'Université de Bordeaux
Co-encadrant : **Julien FRANCOIS**, Maître de conférence de l'Université de Bordeaux

Date de soutenance : 12 Juillet 2016

Membres du jury :

Mr Bernard ARCHIMEDE	Professeur, ENIT, Tarbes	Rapporteur
Mr Samir LAMOURI	Professeur, Arts et Métiers ParisTec, Paris	Rapporteur
Mr Rémy DUPAS	Professeur, Université de Bordeaux	Directeur
Mr Julien FRANCOIS	Maître de conférence, Université de Bordeaux,	Co-encadrant

A la mémoire de mon cher père Talla FALL,

A ma mère Rokhaya SARR,

A mon fils Ibrahima FALL,

A mon épouse Oumou K. FALL,

Titre : Planification des activités en logistique inverse : modélisation et optimisation des performances par une approche stochastique en programmation linéaire.

Résumé : Durant les dernières décennies, des réseaux de logistiques inverses ont été lancés dans plusieurs pays industrialisés dans l'objectif de préserver l'environnement. La mise en place et la gestion de cette logistique concernent les différents niveaux, stratégique, tactique et opérationnel existants dans le cadre de la logistique directe pour tout système de production de biens industriels. Pour améliorer ce type de réseau, la modélisation et la simulation sont des outils efficaces. Après avoir présenté un état de l'art de ce domaine, notre étude se focalise sur la planification de certains sous-ensembles (appelés maillons) de cette chaîne inverse (i.e. collecte-tri, désassemblage) au niveau tactique, c'est-à-dire à moyen terme. Le but de ce travail est donc de proposer un modèle générique en programmation linéaire dans un contexte multi-produit et multi-période, qui cherche à maximiser le profit total du maillon étudié et qui prend en compte l'incertitude sur la qualité des produits traités. Le modèle linéaire en nombres entiers (déterministe, stochastique et évaluation stochastique) est ainsi formulé autour d'un profit contraint par les capacités du maillon, l'évolution des stocks entrants et sortants et la livraison des produits traités aux clients, avec une politique de livraison sans déclassement ou avec déclassement des produits.

Mots-clés : Logistique inverse, Planification, Programmation linéaire stochastique, Collecte-tri, Désassemblage.

Title : Planning of reverse logistics activities : modeling and optimization of performance using a stochastic approach to linear programming.

Abstract: During the last decades, reverse logistics networks have been launched in several industrialized countries with the aim of preserving the environment. The implementation and management of the reverse logistics concerns the different levels (strategic, tactical and operational) existing in the framework of forward logistics for any production system. To improve this type of network, modeling and simulation are effective tools. After presenting a state of the art in this domain, our study focuses on the planning of two sub-systems of the reverse logistics chain (i.e. collection-sorting and disassembly) on the tactical level that is to say the medium term. The aim of this work is to propose a generic model by linear programming in a multi-product and multi-period context, which searches for maximizing the total profit of the sub-system studied, taking into account the uncertainty of the products supplied. The integer linear model (deterministic, stochastic and stochastic assessment) is thus formulated around a profit constrained by the sub-system capacity, the evolution of incoming and outgoing inventory and the delivery of products to customers: a delivery policy authorizing the quality degrading of products or not.

Keywords : Reverse Logistic, Planning, Collection-sorting, Disassembly, Stochastic linear programming.

Université de Bordeaux
Laboratoire d'Intégration du Matériau au Système (IMS) UMR 5218 CNRS
351, cours de la Libération - 33405 Talence cedex France

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au sein du Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système (IMS) dans le domaine des Sciences et de l'Ingénierie des Systèmes à l'Université de Bordeaux à Talence (33).

Je tiens tout d'abord à exprimer mes plus vifs remerciements et ma gratitude à mes directeurs de thèse, Mr Rémy DUPAS, Professeur à l'Université de Bordeaux et Mr Julien FRANCOIS, Maître de Conférences à l'Université de Bordeaux, pour leur aide à l'écriture et à la relecture de ce mémoire ainsi que leurs conseils, leurs remarques constructives et pour leurs propositions durant ces longues années de thèse.

J'adresse mes remerciements à Mr Bernard ARCHIMEDE et Mr Samir LAMOURI qui ont accepté d'être rapporteurs de mon travail de thèse. Je tiens à les remercier sincèrement pour toutes leurs remarques sur mon travail ainsi que leurs conseils.

Je remercie sincèrement Mme Karine VERDEAU, chargée d'accompagnement des étudiants handicapés à besoins spécifiques, pour m'avoir facilité toutes les démarches administratives depuis ma licence et Mr Éric WOIRGNARD, ancien chargé de mission handicap, pour avoir participé à la convention entre l'Université de Bordeaux et les Entreprises (Thalès, CEA, SAFRAN) conduisant à un accord de partenariat en situation de handicap. J'adresse mes remerciements les plus vifs à ces entreprises d'avoir financé ma thèse. J'adresse mes plus vifs remerciements aussi à Éric DUGAS, ayant remplacé Mr Éric WOIRGNARD en 2014, qui a obtenu mon financement de 4^{ème} année de thèse auprès de ces entreprises. Je remercie finalement les membres du CESENS (Centre d'inclusion et de préparation des Sourds à l'ENseignement Supérieur) pour les démarches administratives du BTS à la Licence.

Mes sincères remerciements s'adressent aux professeurs Mme Isabelle DORDAN et Mr Jean Remy LEBON pour la relecture de ce mémoire et aux interprètes LSF (Langue Signe Français) Mme Maïté GARANX et Mme Flore DARAMY pour leur présence lors de nos réunions de travail.

Je désire aussi exprimer ma profonde gratitude à ma famille, à mes amis et plus particulièrement à ma mère qui m'a soutenu pendant toute ma scolarité ainsi qu'à mon tuteur Mr Mbaye NDIAYE qui m'a soutenu dans toutes mes démarches et m'a conseillé de m'engager dans un doctorat.

Table des matières

Remerciements	4
Table des matières.....	5
Table des figures.....	10
Table des tableaux.....	12
Introduction générale.....	14
Chapitre 1 : Contextes et définitions des chaînes logistiques inverses	17
1.1 Introduction	18
1.1.1 Contexte de la chaîne logistique.....	18
1.1.2 La complexité du cycle de vie d'un produit.....	19
1.1.2.1 Le cycle de vie d'un produit	19
1.1.2.2 L'utilisation d'un produit et sa durée de vie	20
1.1.2.3 La fin de vie d'un produit	21
1.1.2.4 Le flux en boucle ouverte	23
1.1.2.5 Le flux en boucle fermée	23
1.1.3 La gestion des déchets.....	24
1.1.3.1 Les déchets.....	24
1.1.3.2 Les déchets dangereux dans différents pays	25
1.2 La chaîne logistique inverse	25
1.2.1 Pourquoi mettre en place une logistique inverse ?.....	25
1.2.1.1 L'aspect environnemental et écologique	25
1.2.1.2 L'aspect marketing et l'intérêt des consommateurs désirant des produits sains pour l'environnement	26
1.2.1.3 L'aspect économique :	26
1.2.2 Emergence de la logistique inverse.....	26
1.2.3 Définitions issues de la littérature scientifique de la logistique inverse	27
1.2.3.1 La définition de la logistique inverse.....	27
1.2.3.2 Exemples de logistique inverse déjà en place.....	28
1.2.4 Les flux de la chaîne logistique inverse	29
1.2.4.1 Le flux d'information.....	29
1.2.4.2 Le flux physique	30

Table des matières

1.2.4.3	Le flux financier.....	30
1.2.5	La structure de la chaîne logistique inverse	30
1.3	Etapes impliquées dans la logistique inverse	32
1.3.1	La barrière (« <i>product acquisition</i> »)	33
1.3.2	La collecte (« <i>collection</i> »).....	33
1.3.3	Le tri (« <i>inspection & sorting</i> »).....	33
1.3.4	La mise à disposition (« <i>disposition</i> »).....	34
1.3.4.1	La réparation (« <i>repair</i> »)	34
1.3.4.2	La réutilisation (« <i>reuse</i> »)	34
1.3.4.3	La refabrication (« <i>remanufacturing</i> »)	34
1.3.4.4	Le recyclage (« <i>recycle</i> »).....	35
1.3.4.5	L'élimination (« <i>disposal</i> »).....	35
1.4	Les niveaux de décision de la chaîne logistique inverse	35
1.4.1	Le niveau décisionnel stratégique	35
1.4.2	Le niveau décisionnel tactique	36
1.4.3	Le niveau décisionnel opérationnel.....	37
1.5	Conclusion.....	37
Chapitre 2	: Modélisation des problèmes de logistique inverse	38
2.1	Modélisation déterministe et stochastique	39
2.1.1	Cas déterministe	39
2.1.2	Cas stochastique	41
2.2	Les indicateurs de performance pour l'évaluation de la chaîne logistique.....	43
2.2.1	Les indicateurs de performance généraux.....	44
2.2.2	Les indicateurs de la performance dédiés à la modélisation stochastique	44
2.2.2.1	La Valeur Attendue de l'Information Parfaite (EVPI)	45
2.2.2.2	La Valeur de la Solution Stochastique (VSS).....	45
2.2.2.3	Adaptation des indicateurs précédents avec une nouvelle référence	46
2.2.2.4	Illustration des indicateurs	46
2.3	Les problématiques liées à la logistique inverse	47
2.3.1	Le problème de conception d'un réseau de chaîne logistique inverse	47
2.3.2	Le problème de localisation	49
2.3.3	Le problème de sélection de sites.....	50
2.3.4	Le problème du transport	51

2.4	Classification de la littérature scientifique sur la logistique inverse	51
2.4.1	Le domaine d'étude des articles	53
2.4.2	Les niveaux décisionnels.....	54
2.4.3	Les activités de retour	57
2.4.4	Le type de produit	58
2.4.5	Le type de modèle et d'application	60
2.4.6	La fonction objectif du modèle	63
2.4.7	Le type de contrainte	65
2.5	Positionnement de la thèse.....	66
2.6	Conclusion.....	69
Chapitre 3	: Formulation d'un modèle générique de planification en logistique inverse.....	70
3.1	Introduction	71
3.1.1	Périmètres de la modélisation : <i>Collecte-tri</i> et <i>Désassemblage</i>	71
3.1.2	Principe de fonctionnement du modèle de planification	72
3.1.3	Prise en compte de la qualité dans les flux.....	74
3.1.3.1	Politique de livraison sans déclassement	75
3.1.3.2	Politique de livraison avec déclassement.....	75
3.2	Modèle déterministe - <i>Wait and See</i> (WS).....	76
3.2.1	Les ensembles, paramètres et variables.....	77
3.2.1.1	Les ensembles et indices du modèle	77
3.2.1.2	Les paramètres du modèle	77
3.2.1.3	Les variables du modèle.....	79
3.2.2	La fonction objectif du modèle	80
3.2.3	Les contraintes du modèle.....	80
3.3	Modèle stochastique - <i>Recourse Problem</i> (RP)	85
3.3.1	Les ensembles, paramètres et variables.....	86
3.3.1.1	Nouvel ensemble représentant les scénarios.....	86
3.3.1.2	Les nouveaux paramètres.....	86
3.3.1.3	Les variables	86
3.3.2	La fonction objectif du modèle	86
3.3.3	Les contraintes du modèle.....	87
3.4	Evaluation de la performance de la chaîne logistique inverse	89
3.4.1	Le niveau de stock.....	89

Table des matières

3.4.2	Le nombre de ruptures.....	90
3.4.3	Le taux de rupture de stock	90
3.4.4	Le taux de livraison par qualité	90
3.4.5	Le taux de déclassement.....	90
3.4.6	Le taux d'élimination	91
3.5	Modèle d'évaluation stochastique (EEV).....	91
3.5.1	Processus d'évaluation	92
3.5.2	Mise en œuvre des indicateurs de performance stochastique	94
3.6	Conclusion.....	95
Chapitre 4	: Etude expérimentale : application à la planification des activités de collecte-tri et de désassemblage d'une entreprise de négoce et de démantèlement.....	96
4.1	Introduction	97
4.1.1	Environnement de résolution pour les modèles	97
4.1.2	<i>Description de la société CODIMATRA</i>	97
4.1.2.1	Présentation de l'entreprise.....	97
4.1.2.2	<i>Modélisation des flux/activités</i>	98
4.1.3	Démarche expérimentale.....	99
4.2	Etude de l'étape de Collecte-tri.....	100
4.2.1	La génération des données	100
4.2.2	Résultats du modèle déterministe WS.....	103
4.2.2.1	Analyse de la variation des niveaux de qualité des produits collectés	103
4.2.2.1.1	Analyse détaillée des résultats par scénario	103
4.2.2.1.2	Synthèse de la variation des niveaux de qualité	105
4.2.2.2	Analyse de la variation des approvisionnements par rapport à la demande.....	105
4.2.2.2.1	Résultats de variation sur les approvisionnements	106
4.2.2.2.2	Synthèse de la variation des approvisionnements	107
4.2.2.3	Analyse de la politique de livraison avec et sans déclassement	107
4.2.2.3.1	Résultats des simulations Avec / Sans déclassement	107
4.2.2.3.2	Synthèse de l'analyse de la politique de livraison.....	108
4.2.3	Résultats du modèle stochastique RP.....	108
4.2.4	Résultats du modèle d'évaluation EEV.....	110
4.2.5	Analyses détaillées par scénario des indicateurs stochastiques	111
4.2.5.1	Résultats comparés d'une politique de livraison avec déclassement.....	111

Table des matières

4.2.5.2	Résultats comparés d'une politique de livraison sans déclassement	113
4.2.5.3	Synthèse de l'analyse des indicateurs stochastiques.....	114
4.3	Etude d'une maquette logicielle de <i>Collecte-tri</i> et de <i>Désassemblage</i>	114
4.3.1	Génération des données.....	114
4.3.2	Les flux des produits d'un centre à l'autre	117
4.3.3	Analyse des performances de la maquette logicielle <i>Collecte-tri</i> et <i>Désassemblage</i>	118
4.3.3.1	Résultats de la maquette logicielle pour une politique avec déclassement	118
4.3.3.2	Résultats de la maquette logicielle pour une politique sans déclassement	121
4.4	Conclusion.....	125
	Conclusion générale et perspectives	126
	Bibliographie.....	130
	Annexes	137

Table des figures

Figure 0.1 : Synoptique du manuscrit de thèse	15
Figure 1.1 : Les différentes durées de vie (Mudgal <i>et al.</i> , 2012)	20
Figure 1.2 : Les taux de demande et de retour sur un cycle de vie d'un produit.....	22
Figure 1.3 : Les flux des produits en boucle fermée et en boucle ouverte (Landrieu, 2001)...	22
Figure 1.4 : La fin de vie d'un produit (Landrieu, 2001)	24
Figure 1.5 : Les containers pour la collecte de certains déchets (Varmatin, 2009)	29
Figure 1.6 : Les flux physique, d'information et financier	29
Figure 1.7 : Exemple d'une logistique inverse (Chouinard, 2007)	31
Figure 1.8 : Les structures en réseau de la logistique inverse	31
Figure 1.9 : Description des étapes de la logistique inverse	32
Figure 2.1 : Représentation des scénarios du système	42
Figure 2.2 : Les solutions obtenues selon les modèles.....	47
Figure 2.3 : La structure en réseau de la logistique directe/inverse intégré (Pishvaei <i>et al.</i> , 2009).....	48
Figure 2.4 : Localisation des installations dans la chaîne (Salema <i>et al.</i> , 2007).....	49
Figure 2.5 : La répartition annuelle des articles lus sur la logistique inverse	52
Figure 2.6 : La répartition annuelle des publications selon (Agrawal <i>et al.</i> , 2015)	52
Figure 2.7 : Analyse mono/multi période sur la logistique inverse	61
Figure 2.8 : Analyse mono/multi période d'après (Govindan <i>et al.</i> , 2015)	62
Figure 2.9 : Analyse mono/multi produit sur la logistique inverse.....	62
Figure 2.10 : Analyse mono/multi produit sur la logistique inverse (Govindan <i>et al.</i> , 2015) .	62
Figure 2.11 : Flux entrant/sortant d'un maillon de la logistique inverse	66
Figure 2.12 : Schéma général de la logistique directe et inverse	67
Figure 3.1 : Vision globale du maillon étudié.....	72
Figure 3.2 : Processus de planification de l'approvisionnement aux livraisons clients.....	73
Figure 3.3 : Flux associés à la politique de livraison sans déclassement	75
Figure 3.4 : Flux associés à la politique de livraison avec déclassement.....	76
Figure 3.5 : Positionnement des <i>variables</i> et paramètres principaux.....	76
Figure 3.6 : Processus d'exécution des modèles	93

Table des figures

Figure 4.1 : Schéma des activités de CODIMATRA	98
Figure 4.2 : Démarche expérimentale	100
Figure 4.3 : Evolution des profits en fonction des scénarios dans les cas avec déclassement.....	105
Figure 4.4 : Evolution des profits en fonction des scénarios ; modèle WS.....	106
Figure 4.5 : Evolution des profits en fonction des scénarios pour les cas avec et sans déclassement : modèle WS.....	108
Figure 4.6 : Evolution du profit en fonction des scénarios pour les cas avec/sans déclassement : modèle stochastique RP	109
Figure 4.7 : Evolution du profit en fonction des scénarios pour les cas avec et sans déclassement : modèle d'évaluation EEV	110
Figure 4.8 : Evolution des trois profits en fonction des scénarios dans les cas avec une politique avec déclassement	111
Figure 4.9 : Evolution des quatre indicateurs pour chaque scénario dans le cas avec déclassement.....	112
Figure 4.10 : Evolution des trois profits sur les scénarios avec une politique sans déclassement	113
Figure 4.11 : Evolution des quatre indicateurs pour chaque scénario dans le cas sans déclassement.....	113
Figure 4.12 : Fonctionnement de la maquette de <i>Collecte-tri</i> et de <i>Désassemblage</i> $u = U2$..	117
Figure 4.13 : Utilisation de la maquette de <i>Collecte-tri</i> et de <i>Désassemblage</i>	118
Figure 4.14 : Evolution du profit total par scénario dans le cas avec déclassement	120
Figure 4.15 : Evolution par scénario de l'écart entre les résultats stochastique et déterministe	121
Figure 4.16 : Evolution du profit total par scénario, avec une livraison sans déclassement..	123
Figure 4.17 : Evolution par scénario de l'écart entre les résultats stochastique et déterministe	124

Table des tableaux

Tableau 1.1 : Les cinq phases génériques caractérisant le cycle de vie d'un produit	19
Tableau 1.2 : Définitions de la logistique inverse	28
Tableau 1.3 : Exemples de décisions stratégiques des chaînes logistiques directe et inverse .	36
Tableau 1.4 : Exemples de décisions tactiques des chaînes logistiques directe et inverse	36
Tableau 1.5 : Exemples de décisions opérationnelles des chaînes logistiques directe et inverse	37
Tableau 2.1 : Les paramètres du problème	40
Tableau 2.2 : Classification par type de réseau	54
Tableau 2.3 : Classification selon les niveaux décisionnels de la logistique inverse.....	55
Tableau 2.4 : Les décisions stratégiques rencontrées dans la littérature	56
Tableau 2.5 : Les décisions tactiques rencontrées dans la littérature	57
Tableau 2.6 : Classification selon les activités de retour	58
Tableau 2.7 : Classification par type de produit.....	60
Tableau 2.8 : Classification par type de modèles et caractéristiques rencontrées dans la littérature	61
Tableau 2.9 : Le type de modélisation stochastique.....	63
Tableau 2.10 : Classification par fonction objectif du modèle	64
Tableau 2.11 : Classification par contrainte	65
Tableau 2.12 : Positionnement du travail de thèse	68
Tableau 3.1 : La quantité de produits aléatoirement traités	78
Tableau 3.2 : Autorisation d'expédition dans une politique sans déclassement	83
Tableau 3.3 : Autorisation d'expédition dans une politique de déclassement	84
Tableau 4.1 : Ensemble des produits, des périodes de temps, des qualités et des scénarios..	101
Tableau 4.2 : Paramètres décrivant le centre de <i>Collecte-tri</i>	101
Tableau 4.3 : Paramètres relatifs aux capacités du centre de <i>Collecte-tri</i>	101
Tableau 4.4 : Paramètres de coûts et de prix de vente par unité de produit	102
Tableau 4.5 : Initialisation des variables du centre de <i>Collecte-tri</i>	102
Tableau 4.6 : Paramètres relatifs aux demandes	102
Tableau 4.7 : Evolution des profits en fonction des scénarios	103
Tableau 4.8 : Le détail des résultats de scénario 3 (scénario moyen)	104

Table des tableaux

Tableau 4.9 : Comparaison des profits moyens des scénarios en fonction de la variation des approvisionnements.....	106
Tableau 4.10 : Comparaison des profits moyens des scénarios associés aux cas avec/sans déclassement : modèle WS.....	107
Tableau 4.11 : Comparaison des profits moyens des scénarios associés aux cas avec / sans déclassement : modèle stochastique RP	109
Tableau 4.12 : Comparaison des profits moyens des scénarios associés aux cas avec et sans déclassement : modèle d'évaluation EEV	110
Tableau 4.13 : Résultats globaux associés à une politique de livraison avec déclassement ..	111
Tableau 4.14 : Résultats globaux associés à une politique de livraison sans déclassement ..	113
Tableau 4.15 : Ensemble des produits, composants, temps, scénarios et qualités	115
Tableau 4.16 : Paramètres décrivant le centre de <i>Désassemblage</i>	115
Tableau 4.17 : Paramètres relatifs aux capacités du centre de <i>Désassemblage</i>	115
Tableau 4.18 : Paramètres de coûts et de prix de vente par unité de composant	116
Tableau 4.19 : Initialisation des variables du centre de <i>Désassemblage</i>	116
Tableau 4.20 : Paramètres relatifs aux demandes	116
Tableau 4.21 : Résultat de la <i>Collecte-tri</i> , et initialisation du <i>Désassemblage</i> avec une livraison avec déclassement	119
Tableau 4.22 : Résultats de la maquette de <i>Collecte-tri</i> et de <i>Désassemblage</i> avec une livraison avec déclassement	120
Tableau 4.23 : Résultat de la <i>Collecte-tri</i> , et initialisation du <i>Désassemblage</i> avec une livraison sans déclassement.....	122
Tableau 4.24 : Résultats de la maquette de <i>Collecte-tri</i> et de <i>Désassemblage</i> avec une livraison sans déclassement.....	123

Introduction générale

Pendant la dernière décennie, la logistique inverse est devenue un secteur économique de plus en plus important qui concerne de nombreuses filières industrielles telles que les fabricants d'équipements électriques et électroniques, de verres ou de papiers par exemple. Cela s'explique par plusieurs facteurs comme par exemple la facilité à trouver certains matériaux devenant rares à l'état naturel, ou encore par des coûts d'approvisionnement réduits, mais aussi l'apparition des réglementations en faveur de la protection de l'environnement. Cette logistique inverse prend en compte des flux inverses, du client vers l'entreprise, et commence par prendre en charge la collecte-tri des produits, leur désassemblage, le recyclage des composants et leur éventuelle élimination. Une problématique propre à la logistique inverse est le retour de produits en quantités variables et avec différents niveaux de qualité également variables : défectueux, usagés, obsolètes.

Notre thèse vise un triple objectif :

- proposer des modèles génériques en programmation linéaire pour la planification des activités de la logistique inverse au niveau tactique ;
- chercher à maximiser le profit total de certains sous-ensembles de la chaîne logistique (appelés maillons) et à comparer les résultats obtenus à l'aide d'indicateurs de performances en prenant en compte l'incertitude des niveaux de qualité ;
- assurer un fonctionnement optimal de ces maillons.

Notre travail qui porte sur deux maillons de la chaîne logistique inverse (i.e. *collecte-tri* et *désassemblage*) a été abordé en élaborant un seul modèle générique en programmation linéaire. Ce modèle générique, en effet, peut être appliqué à chacun des deux maillons car les fonctionnalités du maillon de désassemblage sont globalement similaires à celles du maillon de collecte-tri. Notre modélisation de ces maillons doit prendre en compte des incertitudes portant sur le niveau de qualité des produits traités, d'où la nécessité de travailler avec un modèle stochastique. Une approche par une modélisation stochastique (RP) s'appuie sur une modélisation déterministe (WS). Cependant, comme cela est proposé dans (Ramezani et *al.*, 2012), afin de valider cette approche, nous évaluerons sa pertinence à travers un modèle d'évaluation stochastique (EEV).

Cette thèse est composée de 4 chapitres : le chapitre 1 précise le contexte et les définitions des chaînes logistiques, le chapitre 2 présente un état de l'art et le positionnement de la thèse, le chapitre 3 propose un modèle générique de planification de deux maillons de la logistique inverse et le chapitre 4 est consacré à des applications numériques pour la validation et l'étude expérimentale des modèles de planification. Le synoptique illustré sur la figure 0.1 vise à faciliter la lecture du manuscrit et présente l'organisation de ce mémoire.

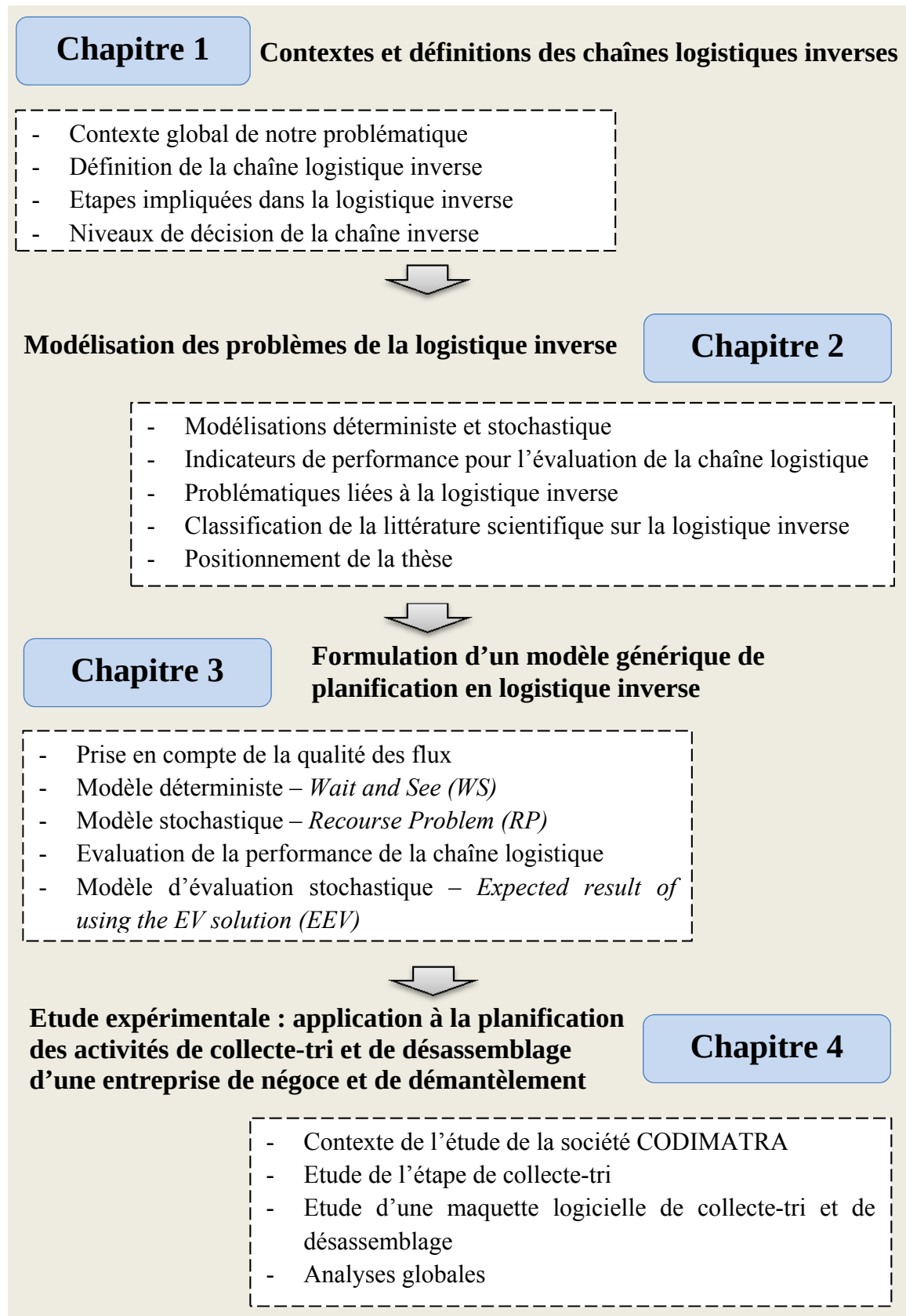


Figure 0.1 : Synoptique du manuscrit de thèse

Dans le **chapitre 1**, nous introduisons le contexte de la chaîne logistique inverse. Pour ce faire, nous montrons comment se met en place la logistique inverse par rapport à la logistique directe. Nous présentons des définitions de la chaîne logistique ainsi que les principaux flux de la logistique inverse. Nous détaillons ensuite les processus caractérisant la chaîne logistique inverse tels que la barrière, la collecte, le tri, etc. Puis, nous décrivons les niveaux de décision associée au pilotage de la chaîne logistique inverse qui sont inspirés des niveaux existants dans une chaîne logistique « classique », à savoir les niveaux stratégique, tactique et opérationnel.

Le **chapitre 2** a pour objectif de présenter le champ général dans lequel nos travaux de recherche s'inscrivent. Nous présentons l'état de l'art de la logistique inverse selon quatre dimensions complémentaires : les approches de modélisations déterministe et stochastique associées dont l'intérêt est de pouvoir prendre compte l'incertitude qui caractérise le problème étudié ; les indicateurs de performance des modèles stochastiques qui permettent de mesurer l'intérêt de ces modèles par rapport à un modèle déterministe ; les problématiques de logistique inverse abordées dans la littérature scientifique, et finalement une classification possible de ces travaux scientifiques. A la suite de cet état de l'art, nous précisons le positionnement de notre thèse et nos objectifs.

Le **chapitre 3** a pour objectif de modéliser le problème de planification des maillons de la logistique inverse. Pour cela, nous introduisons le périmètre de la modélisation et la prise en compte de la qualité dans les activités. Nos travaux se focalisent sur les études de *collecte-tri* et de *désassemblage*. Nous commençons par formuler en programmation linéaire un modèle déterministe de ces activités puis un modèle stochastique. Dans chacun des cas, nous présentons les indices, les paramètres, les variables, les contraintes et les fonctions objectifs du modèle. Ensuite, nous présentons les indicateurs de performance utilisés dans nos simulations, permettant de caractériser une solution de planification. Par la suite, nous présentons la mise en œuvre de la méthode qui permet d'évaluer l'intérêt d'avoir une approche stochastique. D'autres indicateurs de performances, propres à ce troisième modèle, sont également explicités.

Le **chapitre 4** est consacré à l'application numérique et l'étude expérimentale afin de valider les modèles de planification de *collecte-tri* et de *désassemblage*. Pour cela, nous avons récupéré des données d'une entreprise de négoce et de démantèlement de machines de travaux publics. Ensuite, nous nous sommes appuyés sur une démarche expérimentale qui consiste à partir d'un scénario de référence sur lequel des variantes sur divers paramètres (choix de la politique de livraison, rapport entre les quantités d'approvisionnement et des demandes) ont été testées et évaluées afin de mesurer l'impact de ces paramètres. Ces expérimentations ont été faites en déterministe et stochastique. Nous étudierons enfin les différents résultats obtenus pour le problème de la planification d'un maillon *collecte-tri*. D'autres tests ont été faits sur une maquette logicielle couplant les modèles de *collecte-tri* et de *désassemblage*.

Enfin, une conclusion générale clôturera notre travail, regroupant les principaux résultats obtenus ainsi que la présentation de perspectives de recherche.

Chapitre 1 : Contextes et définitions des chaînes logistiques inverses

Ce chapitre a pour objectif de présenter le domaine de la chaîne logistique inverse. Pour ce faire, nous commencerons dans une première partie par une large introduction explicitant le contexte global de notre problématique en abordant notamment les notions de chaîne logistique, de cycle de vie d'un produit et de gestion des déchets. Nous pourrions alors mieux définir la logistique inverse en la comparant à la logistique « classique ». Nous évoquerons alors dans la seconde partie les définitions issues de la littérature scientifique et les principaux flux de la logistique inverse. Dans la troisième partie, nous détaillerons les processus caractérisant la chaîne logistique inverse comme la barrière, la collecte, le tri, etc. Finalement, nous aborderons la description des niveaux de décisions associées au pilotage de la chaîne logistique inverse, qui sont inspirés des niveaux existants dans une chaîne logistique « classique », à savoir les niveaux stratégique, tactique et opérationnel. Enfin, nous conclurons brièvement ce chapitre.

1.1 Introduction

Dans ce paragraphe, nous présentons le contexte économique et industriel actuel dans lequel la logistique inverse revêt une importance grandissante. Nous rappelons ensuite la complexité du cycle de vie d'un produit ainsi que les problèmes associés d'approvisionnement en matière ou composant pour la production des produits et nous terminons par un bilan de la gestion actuelle des déchets. Cette présentation n'est pas exhaustive mais nous essayons de donner les éléments nécessaires pour comprendre le concept de « logistique inverse ».

1.1.1 Contexte de la chaîne logistique

La société contemporaine est dite « société de consommation ». Les clients achètent de plus en plus régulièrement des produits pour répondre à leurs besoins, avec un profit attendu pour les entreprises créatrices de ces marchandises. Ces entreprises travaillent la plupart du temps en réseau pour élaborer et fabriquer ces produits. Ce type de mise en réseau est plus connu sous le nom de « chaîne logistique ». Dans ces travaux, nous l'évoquerons aussi sous le terme de « logistique directe » ou « chaîne logistique directe », par opposition à la logistique inverse que nous évoquerons plus tard.

Voici quelques définitions extraites de la littérature scientifique afin de comparer les différents points de vue des auteurs sur cette notion de chaîne logistique :

- (Ramezani *et al.*, 2013) définissent la logistique directe comme suit : après l'achat auprès des fournisseurs, des matières premières sont converties en produits finis dans les usines de fabrication. Ces produits sont transférés aux clients *via* le centre de distribution afin de répondre à leurs demandes ;
- (Salema *et al.*, 2007) définissent la logistique directe comme la chaîne de transmission reliant les usines aux clients en passant par des entrepôts ;
- (Pishvaei *et al.*, 2009) s'intéressent plus particulièrement à la conception de réseaux logistiques : la logistique directe est conçue comme un réseau qui détermine les flux directs des fournisseurs aux clients, en passant par la production et les centres de distribution.

Mais une fois fabriqués, puis vendus, que deviennent ces produits après usage ? Ils deviennent **des déchets** : produits usagés, détériorés, cassés, en panne, ou passés de mode, et parfois jamais utilisés (Govindan *et al.*, 2012).

Nous nous intéressons particulièrement à la logistique inverse qui se préoccupe de ces déchets et permet aux produits d'emprunter, le chemin inverse et ainsi de remonter la chaîne d'approvisionnement des clients vers les entreprises, afin d'être revalorisés. La logistique inverse s'oppose naturellement au schéma traditionnel de circulation des matières, envisageant un mouvement unidirectionnel des activités des fournisseurs vers les clients.

La problématique du retour des produits défectueux, usagés, périmés et de leur devenir est au centre des travaux consacrés à la logistique inverse. Dans la littérature scientifique, ces problèmes sont généralement traités par une modélisation du réseau des entreprises afférentes afin de chercher, par exemple, une implantation et un pilotage efficace des usines dans la

chaîne de retour des produits, ou, de manière plus précise et plus technique, sur les processus industriels (notamment chimiques) de traitement de ces déchets. La logistique inverse est donc un investissement que chaque entreprise se doit aujourd'hui de faire car :

- d'une part, la législation est de plus en plus sévère surtout en matière écologique ;
- et d'autre part, il s'agit de satisfaire le client qui aujourd'hui n'achète plus seulement un produit, mais des services livrés avec le produit et qui s'inquiète du devenir de ses déchets. Le client cherche à acheter des produits propres ou « verts ».

La législation européenne impose notamment le recyclage de certains produits jugés dangereux. Face à cette contrainte de régulation, les entreprises doivent s'organiser pour que les clients rapportent leurs produits aux points de vente ou dans les centres de collecte lorsqu'ils s'en séparent.

1.1.2 La complexité du cycle de vie d'un produit

1.1.2.1 Le cycle de vie d'un produit

Le cycle de vie d'un produit se définit comme le parcours d'un produit, suivant plusieurs phases, de la conception puis de la transformation des matières premières en produit jusqu'à son utilisation. De nombreux auteurs définissent ainsi le cycle de vie d'un produit. Par exemple, (Östlin *et al.*, 2009) mentionnent qu'un produit passe par une série de phases au cours de sa vie.

Avant d'introduire la logistique inverse dont l'objectif est de traiter les produits en fin de vie, nous présentons dans le tableau 1.1 les cinq phases génériques caractérisant le cycle de vie d'un produit (Riopel *et al.*, 2011) : conception, production, distribution, utilisation et destruction. Chacune des phases du cycle peut s'avérer très complexe et peut être définie succinctement par un ensemble d'activités qu'elle doit assurer.

Phases	Activités correspondantes
Conception	Analyse du besoin du client
	Analyse fonctionnelle, Analyse de la valeur
	Conception du produit, Maquettage, Prototypage
Production	Conception, Adaptation de la chaîne de production
	Achat
	Production
Distribution	Stockage
	Transport
Utilisation	Installation, Mise en service chez le client
	Utilisation (pendant la durée de vie du produit)
	Maintenance, Service après-vente
Destruction	Retour, récupération, Démantèlement du produit (fin de vie du produit)
	Traitement du produit, Enfouissement, Incinération

Tableau 1.1 : Les cinq phases génériques caractérisant le cycle de vie d'un produit

Aujourd'hui, avec l'introduction de la notion de recyclage, les entreprises doivent considérer le cycle de vie complet de leurs produits en y incluant une forme de revalorisation des produits après usage, et cela dès la phase de conception. On parle alors « d'écoconception ».

1.1.2.2 L'utilisation d'un produit et sa durée de vie

Nous nous focalisons ici sur la phase d'utilisation du cycle de vie. Dans cette phase, la notion de durée de vie peut être comprise de différentes façons. Nous pouvons utiliser le schéma proposé par l'Ademe¹ (Mudgal *et al.*, 2012), ci-dessous en figure 1.1 pour représenter les différentes durées de vie incluant le produit et le déchet.

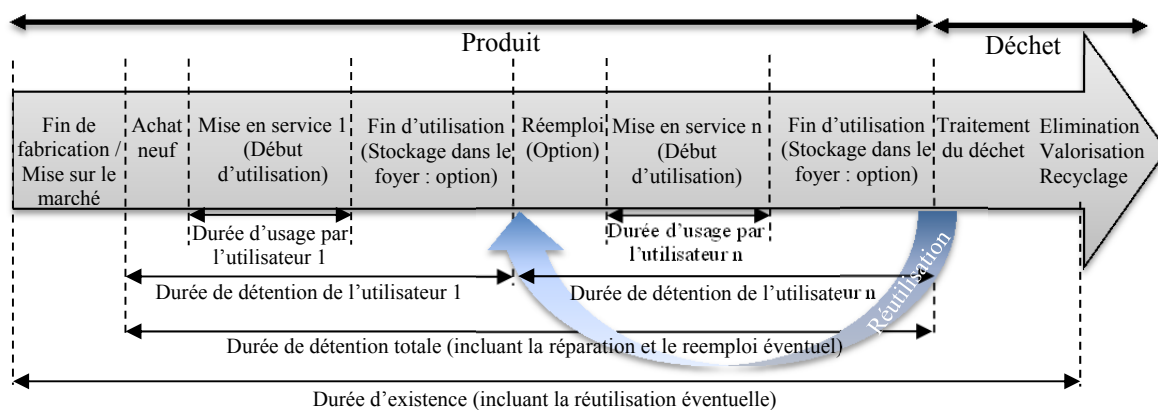


Figure 1.1 : Les différentes durées de vie (Mudgal *et al.*, 2012)

La durée de vie d'un produit s'étend de la fin de fabrication ou la mise sur le marché, à l'élimination, à la valorisation ou au recyclage. Cette durée correspond à la durée d'existence du produit sans modification majeure : c'est la durée de détention totale à laquelle est ajoutée la durée de traitement de déchet.

Il existe quatre autres durées, dont voici les définitions :

- **la durée d'usage** correspond à l'espace de temps pendant lequel le produit en état de marche et prêt à l'emploi est utilisé par l'utilisateur donné. La durée d'usage totale est la somme des durées d'usage de chaque utilisateur ;
- **la durée de détention** correspond au temps écoulé entre la date d'entrée du produit dans la phase « Achat neuf » ou « Réemploi » et sa date de sortie dans la phase « Fin d'utilisation ». Cette durée comprend le stockage éventuel et la réparation du produit ;
- **la durée de détention totale** est la somme des durées de détention. Elle correspond à la période entre l'achat d'un appareil neuf et son passage en phase de traitement des

¹ L'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public à caractère industriel et commercial, placé sous la tutelle des Ministères chargés de l'environnement, de l'industrie et de la recherche.

déchets, quel que soit l'état de l'appareil : en état de fonctionnement ou non. Elle inclut une réparation éventuelle ;

- **la durée d'existence** correspond à la période entre la fin de fabrication du produit et son élimination, sa valorisation ou son recyclage. Elle inclut la réutilisation éventuelle d'un produit, après son passage par l'étape de traitement des déchets ainsi que la période entre la fin de fabrication et l'achat neuf.

Le tableau a.1 (annexe 1) représente à titre indicatif des exemples de durées de vie des différentes catégories de produits examinées.

1.1.2.3 La fin de vie d'un produit

Plusieurs événements expliquent la fin de vie d'un produit : il peut s'agir d'une volonté du client car le produit ne répond plus au besoin qui a évolué, d'une demande en baisse du marché, d'une volonté de l'entreprise suite à de nouveaux développements ou d'innovations technologiques qui peuvent modifier le produit, ou d'une fin programmée du produit (i.e. obsolescence programmée).

La fin de vie d'un produit est l'objet de nombreuses études :

- (Dhuoib & Elloumi, 2011) proposent ainsi de réglementer strictement et de considérer les impacts environnementaux pour décider de la meilleure stratégie de gestion des produits en fin de vie ;
- (Wan & Gonnuru, 2013) étudient les décisions de désassemblage des produits-déchets permettant de les réutiliser et de les recycler afin de réduire l'impact environnemental.

(Ahiska & King, 2010) différencient les flux de vente (i.e. demande) et de retour des produits pendant la durée d'existence d'un produit. Ils envisagent ainsi plusieurs étapes, illustrées dans la figure 1.3 :

- **Etape « Introduction »** (1) : le taux de retour est presque nul tandis que celui de la demande est croissant ;
- **Etape « Croissance »** (2) : le taux de demande ne cesse d'augmenter et devient stable après un certain temps, et on assiste aux premiers retours de produits : le taux de retour commence à augmenter ;
- **Etape « Maturité »** (3) : les taux de demande et de retour ont un niveau stable ;
- **Etape « Déclin »** (4) : le taux de demande commence à décroître, tandis que le taux de retour reste stable pendant un certain temps puis commence à décroître ;
- **Etape « Terminale »** (5) : la demande de produit est nulle alors que le taux de retour peut être toujours positif.

On peut noter que l'ensemble des produits retournés (aire sous le trait pointillé, figure 1.2) peut être plus faible que le volume des produits demandés et vendus (représenté par l'aire sous le trait plein, figure 1.2). Cela sous-entend bien sûr des « pertes » dans la phase de récupération des produits. Certains n'empruntent pas le circuit de retour prévu et sont donc « perdus ».

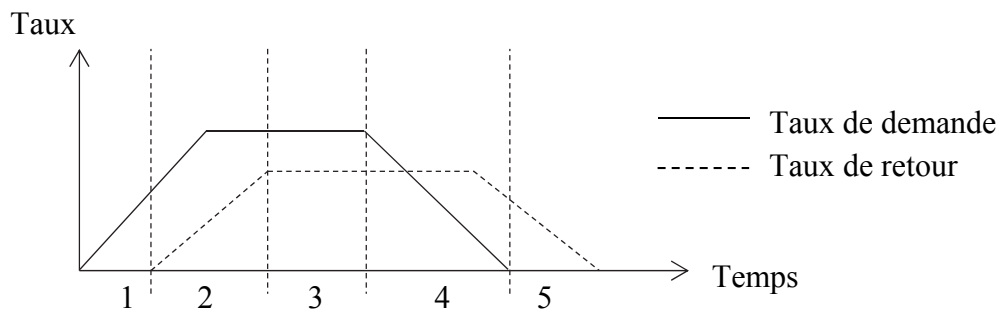


Figure 1.2 : Les taux de demande et de retour sur un cycle de vie d'un produit

Un des objectifs des entreprises est de mieux prendre en compte l'étape de collecte des produits qui devient de plus en plus importante, notamment pour l'image de l'entreprise qui l'a créée. C'est pourquoi certaines entreprises ont modifié leur façon de concevoir les produits : on parle désormais d'« écoconception ». L'idée est de prendre en compte dès la phase de conception du produit, les étapes de démantèlement, de démontage et de réutilisation.

De manière générale, les retours de produits peuvent s'organiser de deux façons selon un flux en boucle ouverte ou un flux en boucle fermée (cf. figure 1.4) que nous détaillons dans les paragraphes suivants.

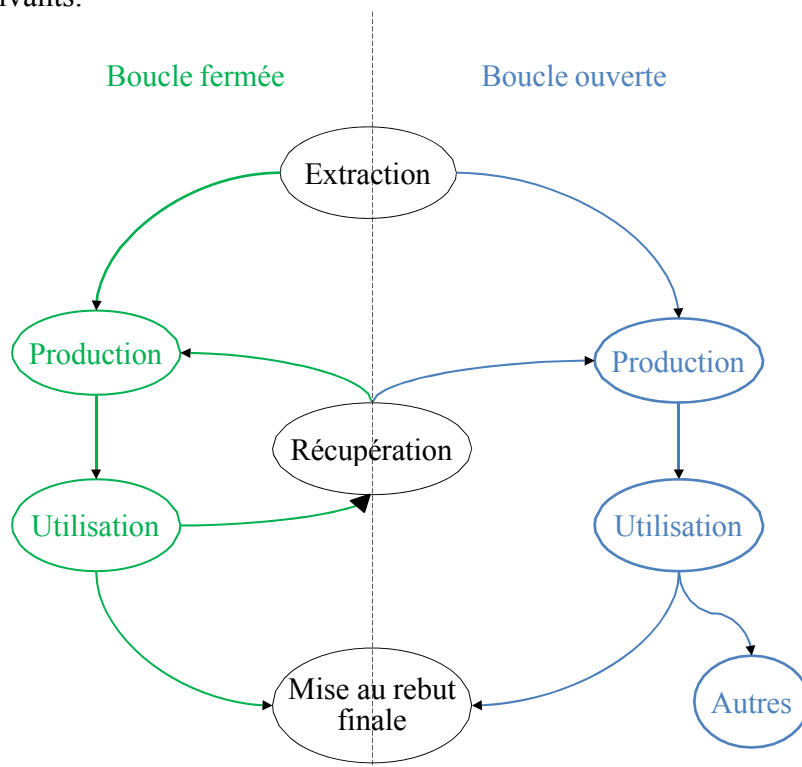


Figure 1.3 : Les flux des produits en boucle fermée et en boucle ouverte (Landrieu, 2001)

1.1.2.4 Le flux en boucle ouverte

Dans ce cas, le produit est fabriqué à partir de matière provenant d'une extraction ou d'une récupération, utilisé puis mis au rebut (i.e. incinération, enfouissement).

Il est toutefois possible que les produits soient envoyés vers une « autre » destination (Figure 1.4- partie droite) : les produits ne sont pas retournés aux producteurs originaux mais ils sont récupérés par d'autres industries désireuses et en mesure de réutiliser les produits ou matériaux (Gou *et al.*, 2008).

1.1.2.5 Le flux en boucle fermée

En boucle fermée, après son utilisation, on va chercher à récupérer le produit pour le remettre en état de marche avec des opérations plus ou moins importantes et ainsi pouvoir le réutiliser une seconde fois, une troisième fois, une énième fois (Figure 1.4- partie gauche). Dans le cas où le produit n'est pas récupérable, car il est par exemple trop endommagé, il est alors mis au rebut.

De nombreux auteurs ont étudié le flux en boucle fermée. Nous nous proposons de regrouper quelques définitions rencontrées dans la littérature afin de comparer les différents points de vue des auteurs.

- D'après (Guide & Wassenhove, 2009), la gestion des flux en boucle fermée (CLSC)² est définie comme « *la conception, le contrôle et l'exploitation d'un système afin de maximiser la création de valeur sur l'ensemble du cycle de vie d'un produit* ».
- D'après (Blumberg, 2005), le flux en boucle fermée est défini comme « *le processus complet de transport aller-retour pour les produits* ». L'auteur a particulièrement travaillé sur les produits de haute technologie.
- Selon (Wen-hui *et al.*, 2011) le flux en boucle fermée est défini comme « *un système de chaîne d'approvisionnement où coexistent la fabrication et la refabrication* ».

Une telle gestion « intégrale » du produit peut se définir comme fermant le cycle des flux de matières dans la chaîne logistique du produit, dans le but de réduire les impacts néfastes dus à la mise au rebut, comme les émissions de gaz, notamment en cas d'incinération, et les déchets résiduels qui s'accumulent dans les centres d'enfouissement. On peut ajouter à cette liste d'impacts, une recherche réduite des matières premières dans la nature par extraction de minerai ou par tout autre moyen.

Voici les principales stratégies élaborées pour gérer les produits en fin de vie :

- la réutilisation des produits ;
- la refabrication ou re-production des produits utilisés/usagés ;
- l'utilisation des produits utilisés pour les pièces de rechange (cannibalisation) ;
- le recyclage avec désassemblage ;

² Closed-loop supply chain (CLSC).

- le recyclage sans désassemblage ;
- l'incinération ou le « dumping³ » des produits utilisés/usagés.

On retrouve des stratégies ou parcours équivalents sur la figure 1.4 de (Landrieu, 2001).

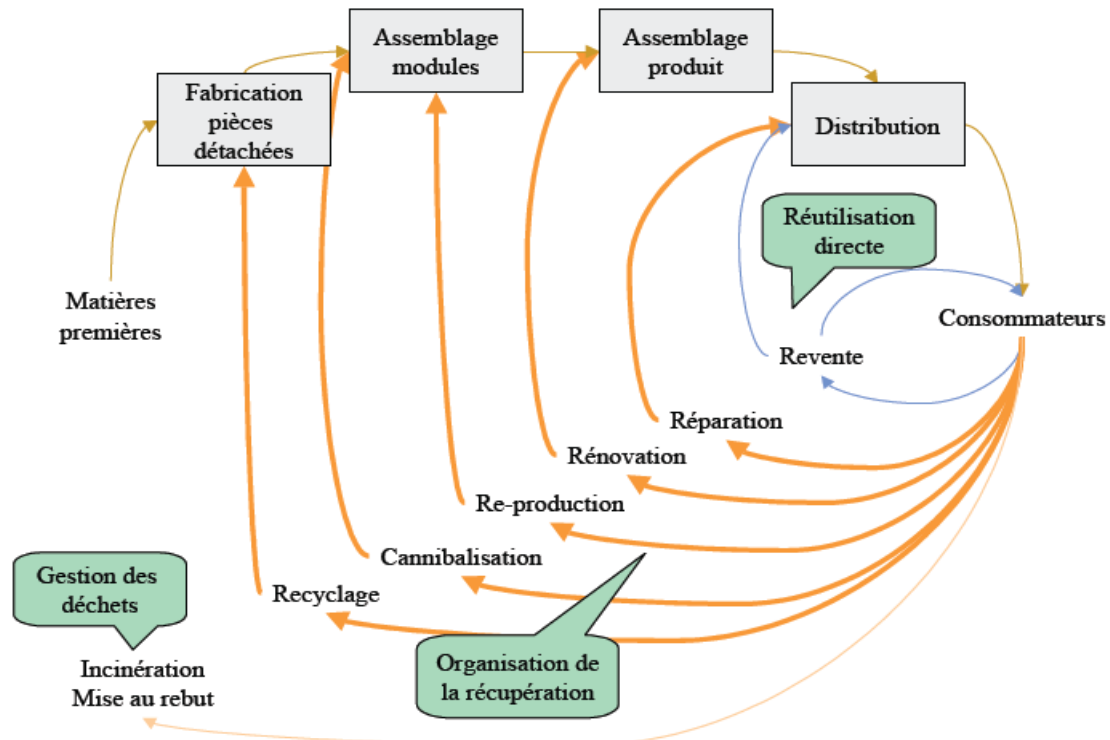


Figure 1.4 : La fin de vie d'un produit (Landrieu, 2001)

A titre d'exemple, l'automobile est l'un des produits les plus polluants au cours de sa période d'utilisation et de fin de vie. C'est l'une des raisons pour lesquelles (Mahmoudzadeh *et al.*, 2013) proposent de mettre en œuvre la logistique inverse relative à des Véhicules Hors d'Usage (VHU), et donc en fin de vie.

1.1.3 La gestion des déchets

1.1.3.1 Les déchets

Un déchet est défini comme tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation jusqu'à l'élimination ou à l'incinération. Il peut être produit par les intermédiaires de distribution, par les ménages et assimilés, par les industriels, par le secteur du bâtiment et des travaux publics ainsi que par les activités agricoles et agroalimentaires.

A titre indicatif, le tableau a.2 (annexe 2) présente les différents types de déchets en France, les quantités, en millions de tonnes, pour chaque type et les filières d'élimination possibles.

³ De l'anglais « *to dump* » signifiant « se débarrasser de ».

1.1.3.2 Les déchets dangereux dans différents pays

Les déchets dangereux sont généralement constitués de plus d'une substance susceptible de danger pour les humains, la faune et la flore, ce qui en rend compliqué la mesure de dangerosité (Das *et al.*, 2012). Il est difficile de comparer les quantités de déchets dangereux produites dans différents pays car la définition de « déchets dangereux » varie selon les pays. La mise en décharge contrôlée est le moyen principal « d'élimination » des déchets dangereux, bien que des déchets dangereux, en quantité importante, soient incinérés dans certains pays.

A titre indicatif, le tableau a.3 (annexe 3) récapitule les informations sur les sources des déchets dangereux, les méthodes d'élimination et les préoccupations pour la santé et l'environnement dans ces pays.

1.2 La chaîne logistique inverse

Il est important de bien comprendre l'historique et les différentes définitions de la logistique inverse rencontrées dans la littérature. Cette présentation des définitions permettra de situer les travaux des différents auteurs et d'identifier la définition que nous prendrons en considération dans le cadre du présent travail.

1.2.1 Pourquoi mettre en place une logistique inverse ?

1.2.1.1 L'aspect environnemental et écologique

Le respect de la législation environnementale et écologique produite essentiellement par l'Union européenne (UE) et les Etats-Unis (USA) constitue une préoccupation sociétale majeure parmi les questions liées à l'environnement et l'écologie. Les entreprises de production réalisent l'importance d'adopter des pratiques environnementales en conformité avec la législation et la réglementation environnementale.

Par exemple, les fabricants doivent mettre en place des filières de récupération et de recyclage de leurs produits ou composants. La grande distribution s'implique de plus en plus dans la collecte et le tri et le transfert de ces produits aux fabricants.

La logistique inverse a précisément pour objectif de minimiser :

- les impacts potentiels sur la santé et l'environnement (Slack *et al.*, 2009), (Misra & Pandey, 2005), (Dat *et al.*, 2012) ;
- les impacts d'une mauvaise gestion des déchets (Slack *et al.*, 2009) ;
- les impacts écologiques de la logistique (Logozar *et al.*, 2006) ;
- les approvisionnements en réduisant les besoins en extraction de matière première (Aitken *et al.*, 2003).

1.2.1.2 L'aspect marketing et l'intérêt des consommateurs désirant des produits sains pour l'environnement

Les emballages et « sur-emballages » tendent à être de plus en plus critiqués par les clients qui ne voient en cela que des déchets en puissance ou des supports au marketing. Citons par exemple le programme « Green Dot », créé en Allemagne, qui permet de recycler l'emballage à la charge de l'entreprise. Ce type de programme, grâce à la prise en compte de la gestion des emballages par une logistique inverse, contribue à réduire les quantités de déchets. Ce type de programme s'est étendu dans les pays membres de la communauté européenne, notamment aux notions de réutilisation des emballages et de retour des containers (Lambert & Riopel, 2003).

1.2.1.3 L'aspect économique :

D'après (Lambert & Riopel, 2003), sur le plan économique, les législations viennent souvent responsabiliser les industriels et inciter à mettre en place une logistique inverse, parfois peu ou pas rentable pour l'entreprise. Selon (Bennekrouf, 2013), il n'est pas aisé de mettre en œuvre une logistique inverse au niveau des entreprises en raison de l'importance des investissements financiers nécessaires à sa mise en place. En effet, si la reprise d'un produit peut permettre de générer des économies par rapport à la fabrication d'un produit neuf ou par rapport à l'achat des matières premières neuves, un nouveau réseau logistique inverse s'avère nécessaire. Dans ce contexte, la logistique inverse peut conduire, par exemple, à la mise en place d'activités par un groupement d'entreprises partageant des intérêts communs afin de répartir les coûts.

1.2.2 Emergence de la logistique inverse

La logistique inverse, devenue aujourd'hui un thème de plus en plus important de la logistique d'un point de vue général, est une activité apparue dans les années 90. En effet, c'est ce concept qui a introduit pour la première fois cette notion de « rétro logistique ». Cette approche inclut dans un processus unique la totalité des flux d'informations et physiques (directs et inverses) qui sont nécessaires à la fabrication, à la distribution et au retour d'un produit en fonction de son cycle de vie.

Apparu donc au début des années 1990, ce concept a vu le jour presque simultanément en Amérique du Nord et en Europe, mais avec des descriptions sensiblement différentes :

- En Amérique du Nord, notamment aux Etats-Unis, la logistique inverse a été mise en place suite à un besoin et un marché potentiel. En effet, les consommateurs comme les clients ou acheteurs souhaitaient recycler les produits en fin de vie, les emballages, les déchets de production. Cette pratique régulière du retour est nécessaire à la satisfaction de la clientèle américaine.

Le Council of Logistics Management publiait dès 1991 un document intitulé « *Reverse Logistics* » suivi en 1993 du livre « *Reuse and Recycling – Reverse Logistics opportunities* ».

D'après la publication de (Lambert & Riopel, 2003), le coût de la logistique aux Etats-Unis était estimé à environ 862 milliards de dollars en 1997 (Delaney B. , 1998). En ce qui concerne la logistique inverse, elle était estimée à environ 4% des coûts de la logistique soit 35 milliards de dollars en 1997 (Stock, 2001).

- En Europe, notamment en Allemagne, l'organisation de la protection de l'environnement favorise le développement du concept : au congrès international de la Haye en 1991, a été proposée la duplication du schéma classique de la chaîne logistique en « inverse » (Florie, 2005). Ce schéma met en évidence le mécanisme de la logistique inverse, en y incluant les flux retour et en imaginant une *entreprise de retour*.

1.2.3 Définitions issues de la littérature scientifique de la logistique inverse

Dans la littérature, différentes expressions telles que « distribution inverse » ou « logistique inverse » sont utilisées pour référer essentiellement au même concept. De nombreuses définitions ont été proposées avec des ressemblances plus ou moins importantes. Pour proposer une définition pertinente, à nos yeux, de la logistique inverse, il faut préalablement étudier les définitions issues de la littérature : c'est le rôle du prochain paragraphe. Nous donnerons ensuite quelques exemples de logistique inverse.

1.2.3.1 La définition de la logistique inverse

La logistique inverse concerne tant les flux physiques du consommateur vers le producteur que les flux d'information, c'est-à-dire le sens opposé à la logistique directe. Certains auteurs, évoqués dans le Tableau 1.2, ont défini la logistique inverse en complétant la définition de la chaîne logistique classique.

Auteurs	Définitions de la logistique inverse
(Salema <i>et al.</i> , 2007)	La logistique inverse est définie comme la chaîne de retour reliant les clients vers les usines en passant par le centre de désassemblage
(Riopel <i>et al.</i> , 2011) ; (Jamshidi, 2011)	La logistique inverse est définie comme le processus de planification, d'implantation et de suivi de l'efficacité, des flux à coût minimum de matières premières, des stocks de produits finis et des informations associées du point de consommation au point d'origine dans le but d'en récupérer de la valeur ou de les traiter proprement.
(Zhou & Wang, 2008) ; (Salema <i>et al.</i> , 2007)	La logistique inverse est le processus efficient de planification, d'exécution et de contrôle des flux entrants, des stocks des marchandises secondaires et de l'information relative à ces flux, dont le but est de récupérer la valeur des matières.

(Lee <i>et al.</i> , 2009)	La logistique inverse est définie par le groupe de travail européen sur la logistique inverse (RELOG) comme un processus de planification, de mise en œuvre et de contrôle des flux de matières premières, d'encours, de produits finis à partir d'un point d'utilisation à un point de récupération ou à un point d'élimination.
(Hu <i>et al.</i> , 2002)	La logistique inverse est appelée processus de gestion de logistique impliquée dans la planification, la gestion et le contrôle de flux des déchets en vue de leur réutilisation et de leur élimination finale.
(Pishvaei <i>et al.</i> , 2009)	On considère la logistique inverse comme le retour de produits collectés dans des centres de collecte spécifiques. Après inspection, les produits récupérables sont expédiés au centre de récupération et les produits mis au rebut sont livrés au centre d'élimination.
(Assavapokee <i>et al.</i> , 2012)	La logistique inverse se concentre sur le flux de retour en fin de vie des produits auprès des consommateurs.
(Roghanian & Pazhoheshfar, 2014)	La logistique inverse est définie comme le processus de planification, de mise en œuvre et de contrôle de l'efficacité et de l'efficience des flux de matières premières, de l'en-cours des stocks, des produits finis et des informations reliant le point de consommation au point d'origine dans le but de redonner une valeur aux produits ou bien de les éliminer.

Tableau 1.2 : Définitions de la logistique inverse

(Salema *et al.*, 2007) propose une définition intéressante de la logistique inverse en raison de son exhaustivité. C'est pourquoi, nous nous en inspirons pour proposer la définition suivante de la logistique inverse :

La logistique inverse est une chaîne de retour et un pilotage des flux de produits défectueux, usagés et récupérés auprès ou par des clients jusqu'aux usines, en passant par des activités telles que la collecte/tri et le désassemblage, le tout en minimisant les impacts sur l'environnement et à moindre coût.

1.2.3.2 Exemples de logistique inverse déjà en place

La réglementation oblige les entreprises à isoler et évacuer les produits dangereux comme les produits chimiques par exemple, *via* des réseaux spécialisés.

Mais beaucoup reste à faire pour quasiment tous les autres produits, même si des lois ou réglementations incitent les entreprises à récupérer leurs produits après usage, notamment pour l'électroménager, les écrans TV, etc.

La notion de logistique inverse n'est donc pas nouvelle. Elle est déjà appliquée pour certains produits depuis plusieurs années. Citons par exemple le papier (Kara & Onut, 2010), le carton, les boîtes en aluminium, le verre, les microprocesseurs, les ordinateurs, les téléviseurs (Assavapokee *et al.*, 2012), les huiles de palme (Alfonso-Lizarazo *et al.*, 2013), les vêtements. Cela fonctionne notamment *via* des réseaux dédiés de récupération des produits, directement auprès des usagers (cf. figure 1.5).



Figure 1.5 : Les containers pour la collecte de certains déchets (Varmatin, 2009)

1.2.4 Les flux de la chaîne logistique inverse

Nous pouvons utiliser la figure 1.6 pour représenter trois types de flux de la chaîne inverse : le flux d'information, le flux financier et le flux physique. La gestion de la chaîne inverse du client à l'usine exige une approche visant l'intégration et l'optimisation des flux physiques et des flux d'informations (Gautrin, 2013).

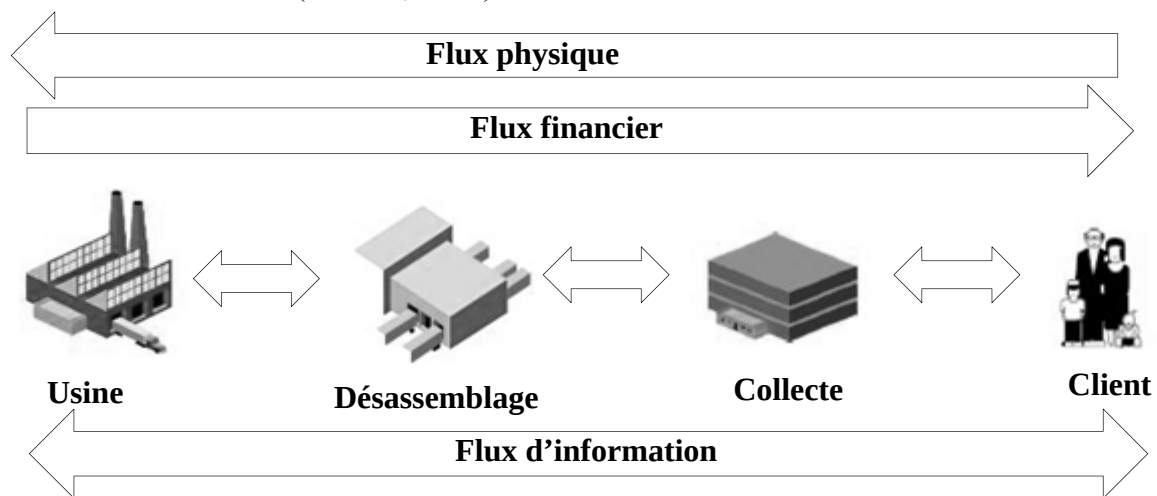


Figure 1.6 : Les flux physique, d'information et financier

1.2.4.1 Le flux d'information

Le flux d'information consiste à analyser les transferts ou échanges d'information entre différents acteurs⁴ de la chaîne inverse comme par exemple des centres de collecte, des centres de désassemblage. Selon (François, 2007), les entreprises s'échangent aussi des informations plus techniques : paramètres physiques et configurations du produit, gammes

⁴ Un acteur est un émetteur ou un récepteur d'un flux d'information liée à une activité.

opératoires, capacités de production et éventuellement de transport, informations de suivi des niveaux de stocks. Nous pouvons produire un diagramme de flux simplifié représenté sur la figure 1.6 qui donne une vue d'ensemble de la circulation de l'information entre les acteurs. (Cetin & List, 2006).

1.2.4.2 Le flux physique

Le flux physique est constitué des flux matériels : le retour de produits défectueux ou périmés, la transformation de produits défectueux en produits rénovés et encore la livraison des produits. L'optimisation de ce flux vise à satisfaire les clients. Les activités de ce flux génèrent la collecte, le désassemblage, la refabrication et le recyclage. D'après (François, 2007), ce flux justifie l'organisation d'un réseau logistique comprenant différents sites avec leurs ressources de production et des moyens de transport.

1.2.4.3 Le flux financier

Le flux financier constitue les échanges des valeurs monétaires entre différents acteurs. Par exemple : ventes de produits, achats de produits ou de composants retournés ou utilisés. Ce flux est nécessairement en lien étroit avec le flux physique. Ce flux ne sera pas véritablement étudié dans le cadre de ces travaux.

1.2.5 La structure de la chaîne logistique inverse

Dans l'étude des chaînes logistiques inverses, il est nécessaire d'identifier et de caractériser les acteurs qui interfèrent et coopèrent afin de créer une telle chaîne. La figure 1.7 illustre la structure type d'une chaîne logistique inverse qui consiste à prendre en charge les flux de produits retournés. Ces derniers sont collectés, traités puis redistribués aux clients qui sont généralement des clients différents de ceux qui ont retourné les produits. Dans cette chaîne, figurent de nombreux acteurs :

- les clients ont en général accès au service-après-vente qui a pour objectif de recevoir ;
- les produits défectueux ou en panne ;
- les points de collecte pour la récupération de ces produits ;
- les centres de traitements pour les traiter ou réparer ;
- les centres de redistribution permettant le rassemblement et la distribution des produits traités ;
- les « nouveaux » clients utilisateurs des produits.

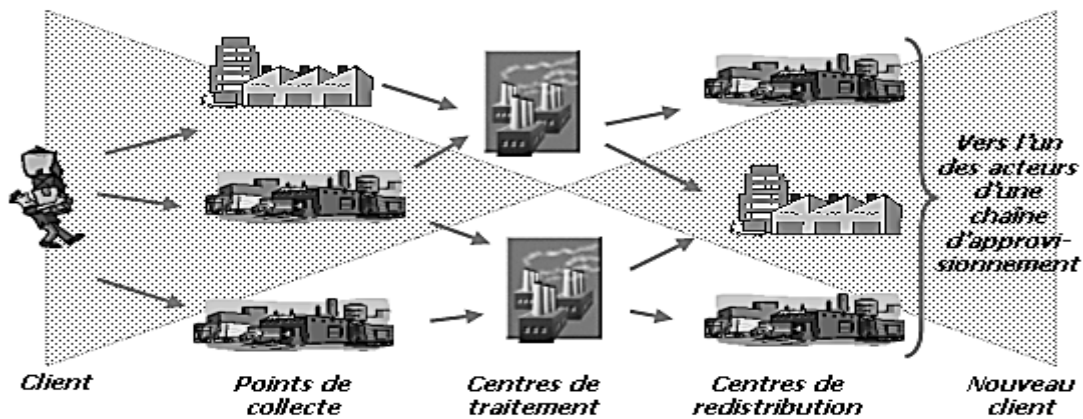


Figure 1.7 : Exemple d'une logistique inverse (Chouinard, 2007)

Une chaîne logistique inverse au même titre que la chaîne directe peut se décomposer en trois structures types, selon (François, 2007).

Dans cette section, nous présentons les différents types de structure qui peuvent donc être décelés dans tout ou partie d'une chaîne logistique inverse : la structure en « réseau », la structure convergente et la structure divergente.

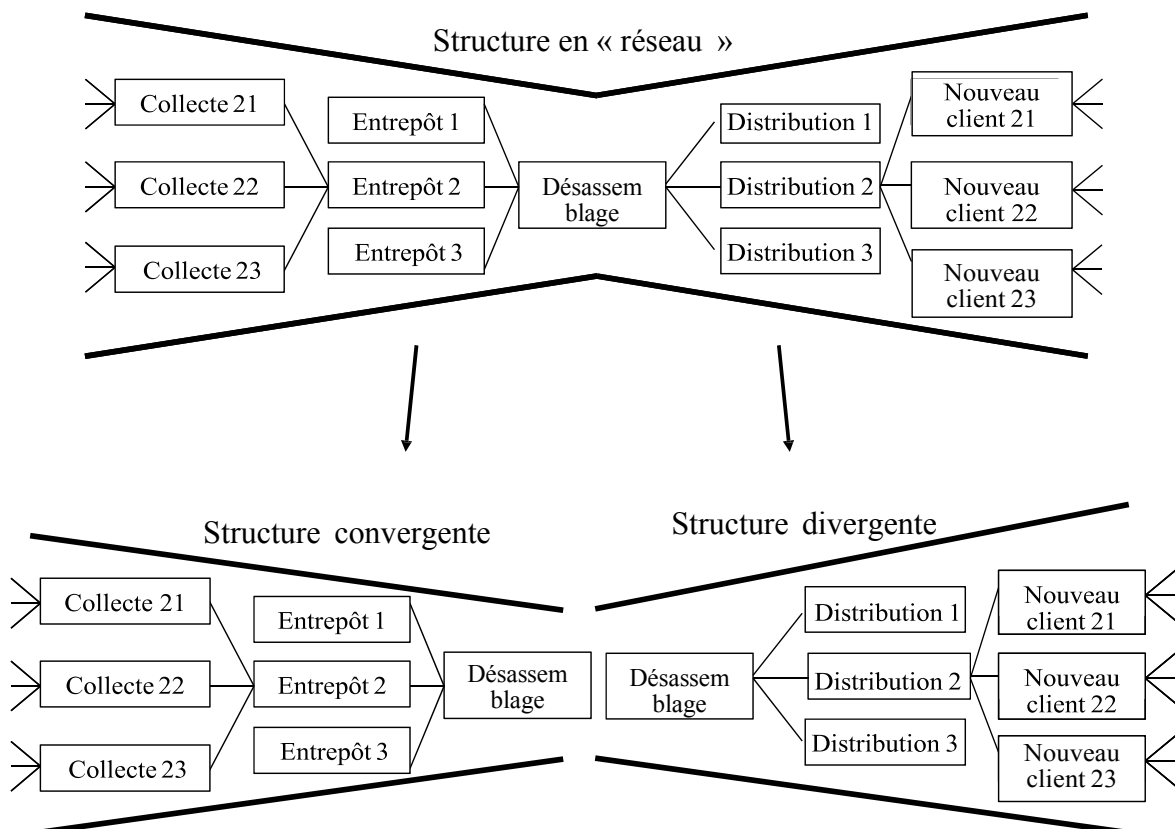


Figure 1.8 : Les structures en réseau de la logistique inverse

Définition 1.1 : La *structure convergente* est définie comme une chaîne constituée d'un ensemble d'entreprises qui forment un réseau de collecte et de stockage (entrepôts) afin d'alimenter un centre de traitement (i.e. désassemblage).

Définition 1.2 : La *structure divergente* est définie comme une chaîne constituée d'un ensemble d'entreprises qui forment un réseau de redistribution. Par exemple, le centre de désassemblage est l'entreprise où les produits sont traités puis expédiés ; les centres de redistribution sont des unités permettant le transport vers les nouveaux clients (consommateurs).

Définition 1.3 : La *structure en « réseau »* est définie comme une chaîne logistique inverse plus étendue et plus complexe. En effet, dans l'exemple donné figure 1.8, elle comprend à la fois un réseau de collecte et un réseau de redistribution.

1.3 Etapes impliquées dans la logistique inverse

Nous présentons dans cette section, certaines étapes impliquées dans la logistique inverse, illustrées par la figure 1.9 inspirée de (Agrawal *et al.*, 2015). Dans la littérature, la plupart des auteurs semblent considérer ces mêmes étapes que nous allons expliquer dans les paragraphes suivants.

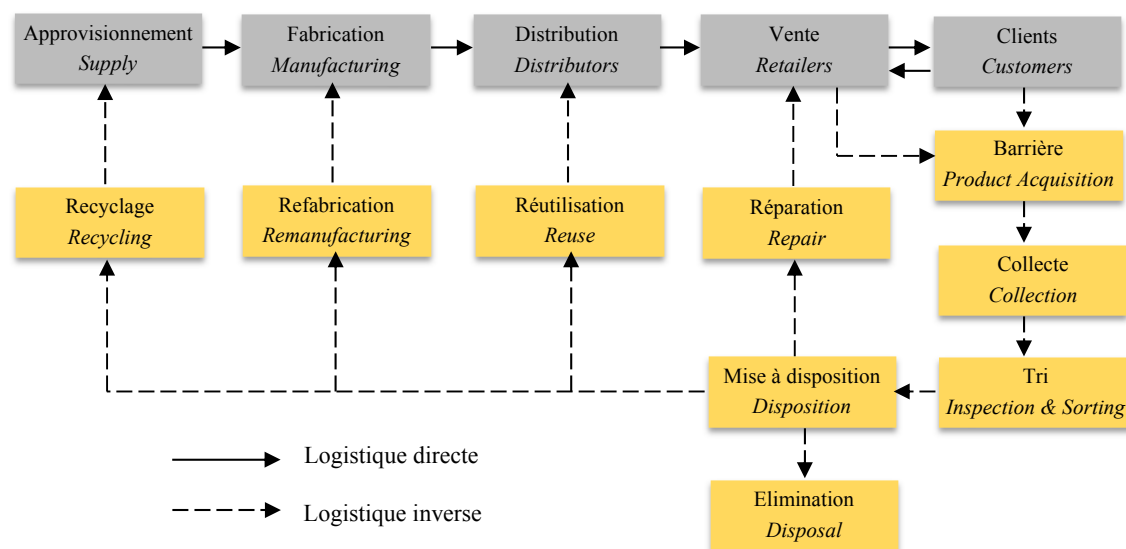


Figure 1.9 : Description des étapes de la logistique inverse

D'après (Agrawal *et al.*, 2015), les produits utilisés ou retournés suite à l'insatisfaction du client sont collectés après leur acquisition et sont inspectés pour le tri. L'étape suivante est de décider du traitement que le produit devra subir : la réparation, la réutilisation, la refabrication, le recyclage ou l'élimination. Chacun de ces termes est défini et présenté dans les paragraphes suivants.

1.3.1 La barrière (« *product acquisition* »)

D'après (Riopel *et al.*, 2011), la barrière consiste à contrôler l'entrée des produits dans le système de la logistique inverse et à décider d'autoriser ou non leur retour vers l'entreprise. En général, c'est le service après-vente qui reconnaît le besoin d'un retour des produits pour la réparation ou le remplacement (Lee *et al.*, 2009). La réception d'un retour des produits entraîne des transactions comptables sur les stocks et les ventes.

(Das & Chowdhury, 2012) proposent la description du système de retour. Des produits peuvent être retournés par le détaillant ou le client *via* le service après-vente dans les cas suivants : **i)** après l'utilisation (i.e. fin de vie ou avant la fin de vie), **ii)** sous garantie, **iii)** dans un état défectueux, **iv)** dans un état périmé.

1.3.2 La collecte (« *collection* »)

La collecte est la récupération et le regroupement des produits auprès du client ou des services après-vente. D'après (Riopel *et al.*, 2011), la collecte comporte deux volets : la reprise et le transport des produits retournés.

La cause du retour influence directement l'approche à privilégier, ainsi :

- les collectes sont dirigées vers le centre de désassemblage puis vers les usines de production (Salema *et al.*, 2007) ;
- la collecte des produits périmés est réalisée, soit directement aux points de collecte (gérés par les systèmes collectifs), soit indirectement par l'intermédiaire des détaillants, des réparateurs d'équipements électriques et électroniques (EEE) ou autres, des autorités locales et des écoles (Das & Chowdhury, 2012).

1.3.3 Le tri (« *inspection & sorting* »)

Le tri du produit retourné s'effectue selon une méthode qui permet de tester ou d'examiner le produit afin de déterminer son état. Il est effectué par les particuliers et les industriels puis affiné dans des centres de tri spécialisés.

(Riopel *et al.*, 2011) indiquent que le tri est présent dans les systèmes de logistique inverse qui comportent plusieurs sites et plusieurs activités de traitement. Dans certains cas, le produit retourné correspond à une demande de retour sur laquelle figureront les informations suivantes : produit, quantité, numéro d'autorisation, état visuel. Ces informations permettront de faciliter l'étape de tri. Par ailleurs, on peut citer quatre besoins physiques qui occasionnent des coûts pour le tri : i) la réception, ii) les moyens de stockage (entrepôt), iii) le personnel, et iv) les moyens de manutention.

1.3.4 La mise à disposition (« *disposition* »)

L'inspection des produits est suivie par le processus de mise à disposition qui consiste à prendre les décisions de choix du traitement à effectuer sur ce produit. L'objectif général des traitements en logistique inverse est de redonner une nouvelle vie aux produits usagés. Le traitement consiste à l'une, au moins, des actions suivantes : réparer, réutiliser, refabriquer, recycler et/ou éliminer (cf. figure 1.9). L'élimination est un traitement particulier car il ne revalorise pas les produits. Les définitions de ces cinq types de traitement sont données ci-après.

1.3.4.1 La réparation (« *repair* »)

La réparation est un processus de remplacement ou de réparation des pièces défectueuses ou en panne. Elle peut signifier que le produit légèrement endommagé peut être ramené afin d'être remis en état de marche normale (El-Sayed *et al.*, 2010). En général, les produits réparés sont d'une qualité inférieure à celle des produits neufs et sont renvoyés aux centres de (re)distribution (Zhou & Wang, 2008).

1.3.4.2 La réutilisation (« *reuse* »)

La réutilisation signifie que le produit suivra un processus court qui consiste à un nettoyage et une réinitialisation des paramètres du produit notamment pour les produits numériques, avant d'être immédiatement remis en vente.

De nombreux auteurs considèrent les cas de réutilisation :

- (Kim *et al.*, 2006) considèrent que le produit retourné, utilisé plus d'une fois, après le nettoyage ou le retraitement, (par exemple récipients, palettes, bouteilles) a bénéficié d'un système de réutilisation ;
- (Hu *et al.*, 2002) intègrent une planification de la production en vue de la réutilisation des pièces et des matériels.

1.3.4.3 La refabrication (« *remanufacturing* »)

La refabrication est un processus de désassemblage de produits utilisés, d'inspection, de réparation des composants. Ces derniers sont alors renvoyés sur la chaîne directe dans une usine de fabrication qui va réassembler le produit. Un produit est considéré comme refabriqué si ses composants proviennent de produits usagés. Nous pouvons citer quelques éléments refabriqués que l'on peut trouver dans le commerce : ordinateurs, téléphones, imprimantes.

Plusieurs définitions sont possibles suivant les auteurs :

- D'après (Kim *et al.*, 2006), la refabrication est définie comme un procédé industriel dans lequel des produits utilisés peuvent être restaurés à l'état neuf ;
- La refabrication est définie comme un désassemblage puis un réassemblage de produits récupérés (Lee *et al.*, 2009).

1.3.4.4 Le recyclage (« *recycle* »)

Le recyclage consiste à démanteler les produits et en séparer les matériaux, par exemple : métaux ferreux ou non ferreux, verre, plastique, papier, etc. Ces matériaux sont, soit recyclables donc envoyés aux fournisseurs, soit non recyclables donc mis au rebut ou à l'élimination. Voici quelques exemples d'application dans divers domaines :

- (Assavapokee *et al.*, 2012) mentionnent que le « National Recycling Coalition », qui prend en charge l'avancement et l'amélioration du recyclage et de la prévention de déchets, compte environ 1,5 million d'ordinateurs mis au rebut chaque année, et seulement 160 000 environ sont recyclés ;
- Le recyclage de l'aluminium compte parmi les activités les plus importantes du secteur de l'aluminium (Logozaar *et al.*, 2006) ;
- Le cas du recyclage de papier est présenté par (Kara & Onut, 2010).

1.3.4.5 L'élimination (« *disposal* »)

L'élimination est l'opération qui porte sur certains produits récupérés. Ces produits qui ne peuvent être ni réutilisés ni refabriqués, ni recyclés pour des raisons techniques ou pécuniaires, sont éliminés. Dans ce cas, ces produits sont rejetés lors de l'étape du tri. L'opération d'élimination peut inclure le transport et la mise en décharge. Là, les produits seront incinérés ou entreposés, éventuellement par enfouissement, pour subir ultérieurement un traitement spécifique de dépollution.

1.4 Les niveaux de décision de la chaîne logistique inverse

Pour gérer les entreprises d'une chaîne logistique inverse, diverses décisions doivent être prises. Ces dernières peuvent être classées, comme dans la gestion de la chaîne logistique directe, en trois niveaux : stratégique, tactique et opérationnel correspondant à des décisions respectivement de long, moyen et court terme. La mise en place et la gestion d'une logistique inverse nécessitent cette même hiérarchisation des décisions. Nous allons définir ces 3 niveaux de décision, en citant des exemples de décision pour chacun des niveaux.

1.4.1 Le niveau décisionnel stratégique

Le niveau stratégique correspond aux décisions, à long terme, pour définir les objectifs globaux de l'entreprise ou du réseau d'entreprises. On peut citer dans le tableau 1.3 quelques exemples d'études concernant les décisions stratégiques qui relèvent de la logistique au sens large ou qui sont parfois dédiées à la logistique inverse :

Décisions stratégiques	Chaîne logistique directe	Chaîne logistique inverse
La conception de la chaîne de production (Ramezani <i>et al.</i> , 2013), (Zhou & Wang, 2008), (El-Sayed <i>et al.</i> , 2010) avec notamment le choix de <i>faire en interne</i> ou de <i>faire faire</i>	x	x
La localisation des installations (El-Sayed <i>et al.</i> , 2010), (Lee & Dong, 2009), (Hu <i>et al.</i> , 2002), (Das & Chowdhury, 2012), (Dat <i>et al.</i> , 2012)	x	x
La fermeture ou l'ouverture des sites industriels (Salema <i>et al.</i> , 2007), (El-Sayed <i>et al.</i> , 2010), (Ramezani <i>et al.</i> , 2013), (Kannan <i>et al.</i> , 2012)	x	x
Le choix technologique du traitement (Riopel <i>et al.</i> , 2011)		x
La sélection des sites de retour (Ramezani <i>et al.</i> , 2013), (Assavapokee <i>et al.</i> , 2012)		x

Tableau 1.3 : Exemples de décisions stratégiques des chaînes logistiques directe et inverse

1.4.2 Le niveau décisionnel tactique

Le niveau tactique est relatif aux décisions à moyen terme qui portent sur l'agencement et les règles d'usage des ressources en prévision des besoins à venir d'un réseau (Lambert & Riopel, 2004). De manière générale, les décisions tactiques définissent les moyens, par un choix et un dimensionnement des ressources nécessaires, pour atteindre les objectifs définis au niveau supérieur.

Le tableau 1.4 donne quelques exemples de décisions classiques au niveau tactique :

Décisions tactiques	Chaîne logistique directe	Chaîne logistique inverse
La coordination de la production, de la distribution et du traitement en désignant par exemple des volumes de produits à traiter par an ou en fixant une évaluation des divers flux (Riopel <i>et al.</i> , 2011)	x	x
La planification de la production (Kim <i>et al.</i> , 2006)	x	x
La définition des politiques de stockage (stock de sécurité...) (Riopel <i>et al.</i> , 2011), (Salema <i>et al.</i> , 2007), (Salema <i>et al.</i> , 2010), (Kim <i>et al.</i> , 2006)	x	x
Le marketing et le choix de la technologie de l'information (Riopel <i>et al.</i> , 2011)	x	x
La détermination de la capacité des sites (El-Sayed <i>et al.</i> , 2010), (Ramezani <i>et al.</i> , 2013), (Zhou & Wang, 2008), (Lee <i>et al.</i> , 2009)	x	x

Tableau 1.4 : Exemples de décisions tactiques des chaînes logistiques directe et inverse

1.4.3 Le niveau décisionnel opérationnel

Le niveau opérationnel correspond aux décisions qui visent les activités à court terme. Les décisions opérationnelles se concentrent sur des activités plus précises comme le transport, le choix du traitement, la gestion du traitement lui-même. Ce sont des décisions qui permettent d'agir en mettant en œuvre les moyens définis au niveau supérieur.

On trouve dans le tableau 1.5 des exemples de décisions opérationnelles :

Décisions opérationnelles	Chaîne logistique directe	Chaîne logistique inverse
Gérer le transport (routage) et les flux des matières premières, des produits et des déchets (Ramezani <i>et al.</i> , 2013), (Hu <i>et al.</i> , 2002), (Zhou & Wang, 2008), (Lee <i>et al.</i> , 2009), (Salema <i>et al.</i> , 2010), (Achillas <i>et al.</i> , 2010)	x	x
Contrôler et gérer les stocks (Kim <i>et al.</i> , 2006)	x	x
Ordonnancer, contrôler et suivre la production (Hu <i>et al.</i> , 2002), (Zhou & Wang, 2008)	x	x

Tableau 1.5 : Exemples de décisions opérationnelles des chaînes logistiques directe et inverse

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le contexte de la logistique inverse dans lequel s'inscrit notre travail. Nous avons aussi décrit la complexité du cycle de vie d'un produit et de la gestion du déchet ainsi que les types de flux induits sur une chaîne logistique inverse.

Nous avons également défini toutes les étapes d'une chaîne de retour de produits : de la barrière aux différents traitements possibles. A partir de ces éléments, nous pouvons dégager les centres d'intérêt de nos travaux de recherche. En effet, nous allons, dans ce travail de thèse, étudier la planification des activités d'entreprises de la chaîne inverse, en prenant en compte la difficulté à orienter les produits vers un traitement adéquat en fonction de leur quantité et de leur état de qualité qui sont peu prévisibles. Parmi les différents niveaux évoqués, nos travaux se situent clairement au niveau de planification tactique des activités de logistique inverse, et plus particulièrement dans le domaine de l'industrie mécanique. Nous nous focaliserons plus particulièrement sur les étapes de collecte et de tri ainsi que sur leurs liens avec l'ensemble des autres activités de cette chaîne.

Afin de pouvoir affiner le positionnement de nos travaux, le chapitre suivant présente un état de l'art de la logistique inverse et plus particulièrement des modèles mathématiques quantitatifs utilisés dans une démarche d'aide à la décision.

Chapitre 2 : Modélisation des problèmes de logistique inverse

Ce chapitre a pour objectif de proposer une analyse des modèles de la littérature qui traitent de la logistique inverse, pour en faire un état de l'art. Nous commençons par rappeler les notions de modélisations déterministe et/ou stochastique associé ainsi que le principe d'évaluation des performances d'un modèle stochastique. Nous présentons ensuite les principales problématiques rencontrées en logistique inverse telles que les problèmes de conception de réseau, de localisation, de sélection et de transport. Nous poursuivrons avec une classification de cette littérature scientifique précisant successivement le domaine d'étude des travaux analysés, les niveaux décisionnels concernés, le type de produits traités, le type de modèle utilisé, la fonction objectif du modèle et le type de contraintes. Enfin, ce chapitre synthétise, en dernière section, les objectifs de notre travail de thèse par rapport à l'état de l'art ainsi établi. Enfin, nous concluons ce chapitre.

La littérature considérée s'intéresse aux modèles mathématiques quantitatifs des chaînes logistiques et plus particulièrement des chaînes inverses. Certains articles sont présentés au fur et à mesure de ce chapitre afin d'illustrer les notions de modélisation évoquées. Ces modèles s'appuient sur des modélisations déterministe ou stochastique, et permettent d'évaluer les performances de la chaîne logistique ou d'une éventuelle modification de cette chaîne à l'aide d'indicateurs de performance. Ces méthodes de modélisation et les outils afférents sont en effet nécessaires pour établir notre propre modélisation de la logistique inverse avec une formulation mathématique générique pour la planification des activités des entreprises de tri et de désassemblage. Cette littérature fera l'objet, en fin de chapitre, d'une classification.

2.1 Modélisation déterministe et stochastique

2.1.1 Cas déterministe

Un modèle déterministe, aussi dénommé « *Wait and See* » (WS), est défini comme un modèle mathématique avec des paramètres ou données (par exemple, les coûts de transport ou de production) et des variables à déterminer (par exemple, le nombre de produits à livrer, à stocker) afin d'optimiser un critère donné.

Ce dernier est, en général, une combinaison linéaire de certaines variables : on parle alors de modèle linéaire. D'autres formulations de type quadratique sont aussi possibles.

Les variables sont liées entre elles par des contraintes formalisées par des expressions mathématiques sous forme « d'égalité » ou « d'inéquation ». Selon la nature des variables, réelles, entières ou encore binaires, on parlera de modèle réel ou de modèle en nombres entiers ou mixtes (*MILP : Mixed Integer Linear Programming*).

Diverses méthodes existent pour traiter ce genre de modèle (Simplex, par exemple). Il existe plusieurs logiciels d'optimisation capables de résoudre des modèles déterministes (par exemple : GLPK⁵, Cplex⁶). Lorsque ces méthodes s'avèrent inefficaces car elles nécessitent un temps de résolution trop long, il est alors possible de mettre en place des heuristiques qui vont chercher rapidement une « bonne » solution qui n'est pas toujours la solution optimale. Parmi ces heuristiques (ou méta-heuristiques), on trouve par exemple, les algorithmes génétiques, les algorithmes gloutons, la méthode tabou, la méthode de recuit simulé.

Suivant le problème modélisé, on pourra distinguer des modèles :

- multi-périodes, lors d'une planification sur un horizon de temps divisé en plusieurs périodes. Par opposition, on parle de modèle mono-période ;
- mono/multi-produits : un ou plusieurs produits peuvent être considérés dans le problème modélisé.

⁵ <https://en.wikibooks.org/wiki/GLPK>

⁶ <http://www-01.ibm.com/software/commerce/optimization/cplex-optimizer/>

A titre d'exemple, nous proposons le **modèle déterministe du fermier** présenté par (Birge & Louveaux, 2011). Le problème est celui d'un fermier qui doit décider de la répartition de ses cultures pour la prochaine saison. On se situe donc dans un cas mono-période (on ne traite qu'une seule saison), et multi-produits (plusieurs cultures possibles : blé, maïs, betterave). L'objectif du fermier est de maximiser son profit (vente de la récolte – coût des semences et de la plantation).

Paramètres :

Culture	Blé	Maïs	Betterave
Rendement moyen (T/acres)	2.5	3	20
Coût de plantation (\$/acres)	150	230	260
Prix de vente (\$/T)	170	150	36 ($\leq 6000T$), 10
Prix d'achat (\$/T)	238	210	-
Minimum requis (T)	200	240	-

Tableau 2.1 : Les paramètres du problème

- Surface totale exploitée par le fermier : 500 acres.

Variables :

- x_1, x_2, x_3 : acres à semer pour le blé, le maïs, la betterave ;
- y_1, y_2 : tonnes de blé, maïs achetées ;
- w_1, w_2 : tonnes de blé, maïs vendues ;
- w_3, w_4 : tonnes de betteraves vendues, à prix favorables et à bas prix

Le modèle est alors le suivant :

Fonction objectif : maximiser le profit total

$$\text{Max } 150x_1 + 230x_2 + 260x_3 + 238y_1 - 170w_1 + 210y_2 - 150w_2 - 36w_3 - 10w_4$$

Soumis aux **Contraintes** suivantes :

$$\begin{aligned} x_1 + x_2 + x_3 &\leq 500 ; \\ 2.5x_1 + y_1 - w_1 &\geq 200 ; \\ 3x_2 + y_2 - w_2 &\geq 240 ; \\ w_3 + w_4 &\leq 20x_3 ; \\ w_3 &\leq 6000 ; \\ x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, w_1, w_2, w_3, w_4 &\geq 0 \end{aligned}$$

Dans ce cas, la solution est la suivante :

120 acres pour le blé, 80 acres pour le maïs et 300 acres pour la betterave.

De nombreux auteurs ont proposé une modélisation déterministe de la logistique inverse. On peut citer d'autres exemples de ce modèle :

- (Hu *et al.*, 2002) utilisent un modèle linéaire mixte pour présenter un système multi-périodes et multi-produits afin de minimiser les coûts totaux de la logistique inverse incluant le coût de collecte, de stockage, de traitement, de transport pour la réutilisation de déchets traités et le coût de transport pour l'élimination de déchets traités ;
- (Kim *et al.*, 2006) présentent une application de modèle linéaire mixte (chaîne d'approvisionnement) concernant le système de refabrication afin de maximiser l'économie de coût de la refabrication. Cette économie est mesurée par l'écart entre le coût d'achat pour toutes les parties du fournisseur externe et le coût de refabrication des produits collectés.

2.1.2 Cas stochastique

Un modèle stochastique peut être défini comme un modèle déterministe dont certains paramètres et/ou certaines variables sont aléatoires.

L'approche aléatoire peut être modélisée de diverses façons (Sen & Hingle, 1999) :

- Par scénario : chaque scénario est identifié par une valeur du paramètre aléatoire (ou un ensemble de valeurs des paramètres aléatoires) et par une probabilité d'occurrence. A titre d'exemple, on peut définir des scénarios « bons », « moyens » et « mauvais » associés à des probabilités respectives de 60%, 25% et 15% ;
- Par contrainte probabiliste : une formule mathématique définit le respect d'une contrainte à tenir avec une certaine probabilité (on parle aussi de « Chance Constrained Programming ») ;
- Par optimisation robuste : un modèle cherche à optimiser un système en prenant en compte les différentes incertitudes du problème.

De nombreux auteurs proposent les différents modèles suivants, liés à la logistique inverse :

- Pishvaei *et al.*, (2009) propose d'utiliser un modèle d'optimisation stochastique pour la conception de réseau logistique directe/inverse afin de minimiser les coûts totaux ;
- (Salema *et al.*, 2007) développent un modèle stochastique multi-produits en programmation linéaire en nombres entiers (MILP). Ce modèle est utilisé pour la conception de réseaux de logistique inverse.

Présentation détaillée de la modélisation par scénarios

Ce cas est aussi appelé modèle avec recours ou « *Recourse Problem* » (RP). Dans une modélisation stochastique par scénario, chaque scénario est identifié par des valeurs propres des paramètres aléatoires. Dans l'exemple de la figure 2.1, il s'agit de la quantité de produits traités qui prend des valeurs différentes pour chaque scénario α_s . Il est alors possible de créer

ainsi un certain nombre de scénarios. De plus, pour le modèle stochastique qui intègre l'ensemble de ces scénarios, il faut aussi définir, pour chacun d'eux, sa propre probabilité d'occurrence π_s et ses propres variables associés.

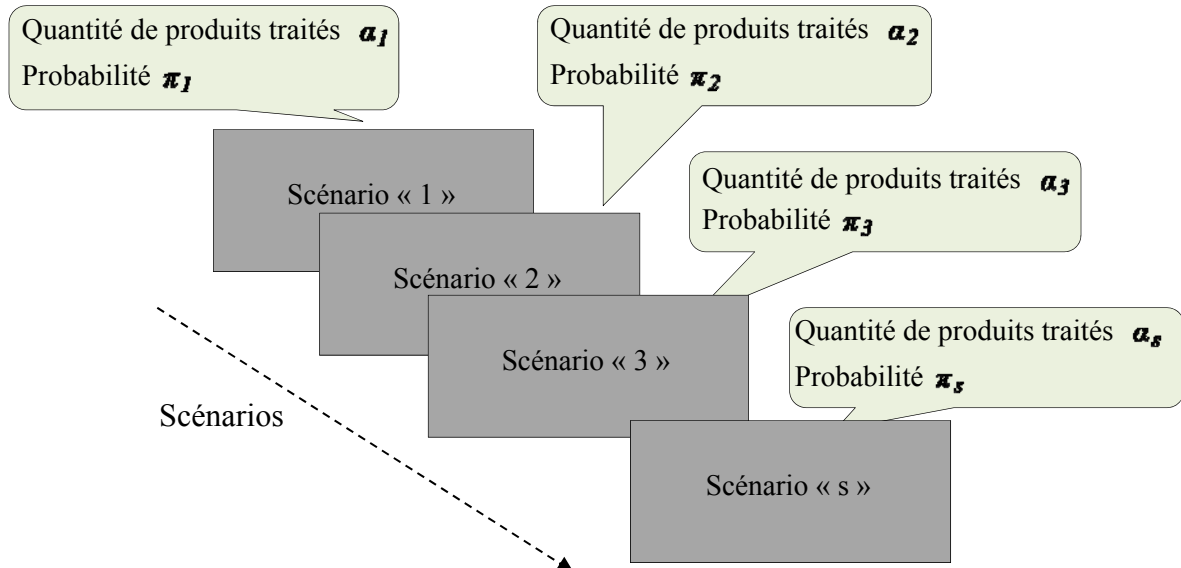


Figure 2.1 : Représentation des scénarios du système

A titre d'illustration, on peut reprendre l'exemple du fermier (Birge & Louveaux, 2011). Dans ce cas, le fermier est confronté à une incertitude : la météo ! Dans la modélisation proposée, on présente trois scénarios équiprobables : S1 bonne météo, S2 météo moyenne, S3 mauvaise météo. Voici les éléments spécifiques du modèle stochastique qui modifient ou s'ajoutent aux ensembles, paramètres et variables du modèle déterministe décrit dans la section 2.1.1.

Variables :

- y_{1s}, y_{2s} tonnes de blé, maïs achetées dans le scénario s ;
- w_{1s}, w_{2s} tonnes de blé, maïs vendues dans le scénario s ;
- w_{3s}, w_{4s} tonnes de betteraves vendues, à prix favorables et à bas prix dans le scénario s ;

Le modèle est alors le suivant :

Fonction objectif : maximiser le profit total

$$\text{Max } 150 x_1 + 230 x_2 + 260 x_3 + \sum_{s=1}^3 \frac{1}{3} (238 y_{1s} - 170 w_{1s} + 210 y_{2s} - 150 w_{2s} - 36 w_{3s} - 10 w_{4s})$$

Contraintes :

$$\begin{aligned}x_1 + x_2 + x_3 &\leq 500 ; \\3x_1 + y_{11} - w_{11} &\geq 200 ; 2.5x_1 + y_{12} - w_{12} \geq 200 ; 2x_1 + y_{13} - w_{13} \geq 200 ; \\3.6x_2 + y_{21} - w_{21} &\geq 240 ; 3x_2 + y_{22} - w_{22} \geq 240 ; 2.4x_2 + y_{23} - w_{23} \geq 240 ; \\w_{31} + w_{41} &\leq 24x_3 ; w_{32} + w_{42} \leq 20x_3 ; w_{33} + w_{43} \leq 20x_3 ; \\w_{31} &\leq 6000 ; w_{32} \leq 6000 ; w_{33} \leq 6000 ; \\Tous les &x_i, y_{i,s}, w_{i,s} \geq 0\end{aligned}$$

Dans ce cas stochastique, le résultat est le suivant :

170 acres pour le blé, 80 acres pour le maïs et 250 acres pour la betterave.

Ce résultat, qui prend en compte les trois scénarios différents avec leur probabilité d'occurrence dans un seul modèle stochastique, est différent des résultats du cas déterministe qui ne prenait en compte que le scénario 2 (année moyenne).

Dans le cas de la modélisation d'un problème de logistique inverse, il convient d'utiliser cette approche stochastique pour diverses décisions, car les paramètres incertains sont multiples :

- date d'arrivée des produits collectés ;
- quantité de produits collectés ;
- qualité des produits collectés ;
- demande des produits, composants ou matières premières.

Par exemple, (Salema *et al.*, 2007) ont présenté un problème de la logistique inverse dans lequel les industriels (entreprise de recyclage) veulent récupérer / collecter des produits en fin de vie. Un modèle déterministe multi-produit a été construit. Cependant, afin de prendre en compte l'incertitude sur la demande et les retours de produit, un modèle stochastique par scénario a été mis en place. Trois scénarios sont définis pour les demandes et les retours avec des probabilités associées suivant une loi uniforme.

Le modèle consiste à définir un réseau de distribution et de récupération des produits. Il est ainsi possible de construire des scénarios plausibles, pondérés par une probabilité d'occurrence.

2.2 Les indicateurs de performance pour l'évaluation de la chaîne logistique

Il est généralement utile de vérifier l'intérêt d'une modélisation à l'aide d'indicateurs de performance. Ceci concerne à la fois les modèles déterministes et les modèles stochastiques. Dans le cas particulier d'un modèle stochastique, il est nécessaire de mesurer la performance de ce modèle par rapport à un modèle déterministe. Divers indicateurs sont définis et utilisés

dans la littérature. Nous les présentons dans cette partie du chapitre en commençant par les indicateurs généraux puis en considérant les indicateurs spécifiques au modèle stochastique.

2.2.1 Les indicateurs de performance généraux

Les indicateurs de performance généraux sont des outils utiles pour l'évaluation d'un système industriel ou logistique. Ils peuvent aussi s'appliquer dans le cas d'une logistique inverse. Nous listons ci-dessous les trois indicateurs les plus classiques et les plus utilisés dans la littérature.

Niveau de stocks :

Cet indicateur désigne le nombre total de produits en stock dans l'entreprise à un moment donné (Supply Chain Management, 1996). En général, il comptabilise les stocks de produits entrants dans l'entreprise, les stocks de produits sortants et d'éventuels stocks intermédiaires :

$$NS = \text{Stocks entrants} + \text{Stocks intermédiaires} + \text{Stocks sortants}$$

Taux de rupture de stocks :

Cet indicateur mesure le nombre de demandes insatisfaites dans les délais, et plus précisément le nombre de produits livrés en retard en raison des ruptures de stocks (Balmana & Balmes, 2001) (Supply Chain Management, 1996). On peut le formuler de la façon suivante :

$$T_r = \frac{\text{Nombre de rupture de stocks}}{\text{Nombre total de livraison}} \times 100$$

Taux d'élimination :

Cet indicateur représente, par rapport à l'ensemble des produits livrés, la part de produits mis au rebut, i.e. ne garantissant pas un certain niveau de qualité pour être vendus. En logistique inverse, cela peut correspondre aux produits périmés, obsolètes ou encore trop endommagés pour un éventuel traitement (Kim *et al.*, 2006) (Ramezani *et al.*, 2013). Il peut s'exprimer ainsi :

$$T_e = \frac{\text{Nombre de produits éliminés}}{\text{Nombre total de livraison}} \times 100$$

2.2.2 Les indicateurs de la performance dédiés à la modélisation stochastique

Il est important de savoir si une étude utilisant la programmation stochastique fournira un avantage appréciable en dépit de sa complexité. Ainsi, un modèle stochastique peut être

évalué en utilisant deux concepts : la valeur attendue de l'information parfaite (EVPI – « *Expected Value Perfect Information* ») et la valeur de la solution stochastique (VSS – « *Value of the Stochastic Solution* ») (Birge & Louveaux, 2011), (Ayvaz & Bolat, 2014), (Lee & Johnson, 2014) et (Ramezani *et al.*, 2013).

2.2.2.1 La Valeur Attendue de l'Information Parfaite (EVPI)

Cet indicateur est souvent utilisé avec le sigle anglais EVPI qui signifie « *Expected Value Perfect Information* ». C'est l'indicateur d'un écart dû à l'imperfection des informations (données) qui se traduisent par divers scénarios dans un modèle stochastique. L'un de ces scénarios possède des valeurs qui sont égales aux valeurs moyennes de l'ensemble des scénarios. Il représente un scénario dans lequel l'information est certaine. Il est appelé **scénario moyen** ; et ce sont ces valeurs moyennes qui définissent le modèle déterministe. L'indicateur EVPI se calcule alors par la différence entre la fonction objectif du modèle déterministe (cas de l'information parfaite) « $\mathcal{R}_{WS}$ » et la fonction objectif du modèle stochastique (intégrant divers scénarios) « $\mathcal{R}_{RP}$ ». On peut la formuler ainsi :

$$EVPI = \mathcal{R}_{WS} - \mathcal{R}_{RP}$$

$$EVPI(\%) = \frac{\mathcal{R}_{WS} - \mathcal{R}_{RP}}{\mathcal{R}_{RP}} * 100$$

Cet indicateur permet de mesurer le coût maximum qu'un décisionnaire (utilisateur du modèle) accepterait de payer pour obtenir l'information certaine.

2.2.2.2 La Valeur de la Solution Stochastique (VSS)

L'indicateur VSS qui signifie « Valeur de la Solution Stochastique », et en anglais, « *Value of the Stochastic Solution* » est l'indicateur d'un écart dû à l'évaluation stochastique. Pour évaluer en pratique cet indicateur, il faut :

- résoudre, par le modèle déterministe, le scénario « moyen » qui correspond au scénario dans lequel les valeurs des paramètres aléatoires sont égales aux valeurs moyennes de l'ensemble des scénarios ;
- résoudre le modèle comportant l'ensemble des scénarios en stochastique : « $\mathcal{R}_{RP}$ » ;
- relancer le modèle en stochastique en forçant certaines variables à leur valeur obtenue dans le scénario moyen déterministe : « $\mathcal{R}_{EEV}$ ». Ce modèle stochastique modifié est appelé **modèle d'évaluation stochastique** ;
- enfin, calculer l'indicateur VSS, qui représente la différence entre la fonction objectif du modèle stochastique « $\mathcal{R}_{RP}$ » et la fonction objectif du modèle d'évaluation stochastique « $\mathcal{R}_{EEV}$ ».

$$VSS = \mathcal{R}_{RP} - \mathcal{R}_{EEV}$$

$$VSS(\%) = \frac{\mathfrak{R}_{RP} - \mathfrak{R}_{EEV}}{\mathfrak{R}_{EEV}} * 100$$

Le VSS représente le coût de l'ignorance de l'incertitude dans le choix d'une décision. Plus le VSS est important, plus le modèle stochastique est justifié (et inversement).

2.2.2.3 Adaptation des indicateurs précédents avec une nouvelle référence

Dans cette section, nous proposons de définir deux nouveaux indicateurs complémentaires aux indicateurs EVPI et VSS.

- La Valeur de la Solution Déterministe et Stochastique (VSDS)

L'indicateur VSDS, signifiant la « Valeur de la Solution Déterministe et Stochastique », est la différence entre la fonction objectif du modèle déterministe « $\mathfrak{R}_{WS}$ » et la fonction objectif du modèle stochastique « $\mathfrak{R}_{RP}$ ». Dans ce cas, il est similaire à l'EVPI, mais la nuance vient du point de repère choisi lors du calcul en pourcentage de cet indicateur qui se fait par rapport à « $\mathfrak{R}_{WS}$ » au lieu de « $\mathfrak{R}_{RP}$ ». Notre indicateur est explicité ci-dessous :

$$VSDS = \mathfrak{R}_{WS} - \mathfrak{R}_{RP}$$

$$VSDS(\%) = \frac{\mathfrak{R}_{WS} - \mathfrak{R}_{RP}}{\mathfrak{R}_{WS}} * 100$$

- La Valeur de la Solution Déterministe et d'Evaluation stochastique (VSDE)

L'indicateur VSDE signifiant « Valeur de la Solution Déterministe et d'Evaluation stochastique » est la différence entre la fonction objectif du modèle déterministe « $\mathfrak{R}_{WS}$ » et du modèle d'évaluation stochastique et la solution d'évaluation stochastique « $\mathfrak{R}_{EEV}$ ». Nous proposons la formule ci-dessous :

$$VSDE = \mathfrak{R}_{WS} - \mathfrak{R}_{EEV}$$

$$VSDE(\%) = \frac{\mathfrak{R}_{WS} - \mathfrak{R}_{EEV}}{\mathfrak{R}_{WS}} * 100$$

2.2.2.4 Illustration des indicateurs

Pour calculer ces indicateurs, les modèles WS, RP et EEV doivent être résolus. A titre d'exemple, voici une illustration graphique de ces indicateurs avec des valeurs fictives :

- $\mathfrak{R}_{WS}$, la solution de modèle WS, est équivalent à 100€ ;
- $\mathfrak{R}_{RP}$, la solution de modèle RP, est équivalent à 90€ ;
- $\mathfrak{R}_{EEV}$, la solution de modèle EEV, est équivalent à 70€.

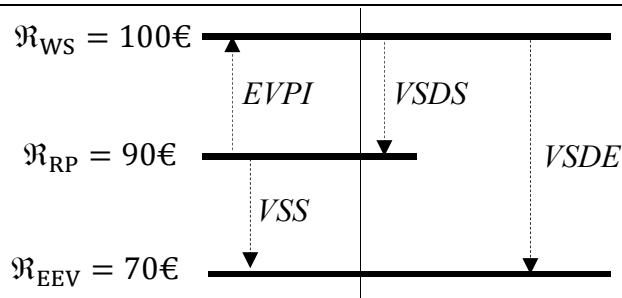


Figure 2.2 : Les solutions obtenues selon les modèles

2.3 Les problématiques liées à la logistique inverse

Nous présentons dans cette partie une recherche bibliographique portant sur la chaîne logistique inverse en la structurant par problématique. Nous allons ainsi retrouver les principales décisions à prendre dans une chaîne logistique inverse que nous avons déjà exposées au chapitre 1. Ces problématiques sont très étudiées dans la littérature que nous avons analysée.

2.3.1 Le problème de conception d'un réseau de chaîne logistique inverse

Les problèmes de conception d'un réseau de chaîne logistique inverse ont donné lieu à plusieurs travaux: (Pishvaei *et al.*, 2009), (Lee & Dong, 2009), (Ramezani *et al.*, 2013) et (Vahdani *et al.*, 2012), (Salema *et al.*, 2010). Ce problème consiste à (re-)construire une chaîne logistique inverse, parfois couplée à la chaîne logistique directe, en définissant le rôle de chaque site et les flux globaux de produits entre ces sites.

(Pishvaei *et al.*, 2009) étudient le problème de conception du réseau intégré de la logistique, que rencontrent des entreprises qui travaillent à la fois pour la logistique directe et la logistique inverse, comme cela est illustré dans la figure 2.3. Dans le flux direct, de nouveaux produits sont expédiés à partir de centres de production/récupération sur les zones de clients par le biais des centres de distribution/collecte. Dans le flux inverse, les produits retournés sont recueillis dans les centres de collecte /distribution et, après inspection, les produits récupérables sont expédiés au centre de récupération et les produits mis au rebut sont expédiés au centre d'élimination (*disposal*).

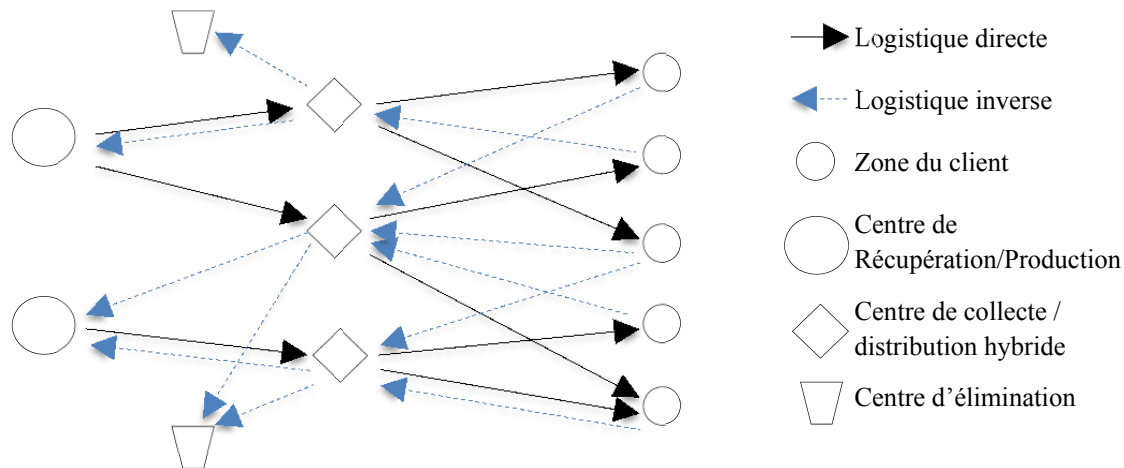


Figure 2.3 : La structure en réseau de la logistique directe/inverse intégrée (Pishvae et al., 2009)

Ce problème est résolu par un modèle linéaire pour ce réseau afin d'éviter la sous-optimalité causée par la conception séparée des réseaux direct/inverse. En effet, dans cet exemple, les centres sont des maillons à double emploi : l'un pour la logistique directe, l'autre pour la logistique inverse. On trouve aussi des réseaux avec des chaînes logistiques directes et inverses complètement disjointes à l'exception bien entendu de l'utilisateur du produit qui est commun aux deux chaînes. (Pishvae et al., 2009) montrent ainsi qu'il est plus rentable de construire un réseau intégré ou hybride.

(Lee & Dong, 2009) indiquent que la conception de réseau logistique inverse, connue sous le nom de « Conception du réseau de la chaîne d'approvisionnement », permet la mise en place des sites de production et d'expédition des produits. Ils proposent des modèles dynamiques de localisation et d'allocation. A partir d'un modèle déterministe multi-périodes pour la conception du réseau logistique inverse, les auteurs ont développé un modèle de programmation stochastique en deux étapes en décrivant des incertitudes par divers scénarios.

Selon (Ramezani et al., 2013), le problème du SCND (*Supply Chain Network Design* : Conception du réseau de la chaîne d'approvisionnement) discuté dans l'article est résolu par un modèle stochastique multi-objectif, multi-échelon et multi-produits pour le réseau logistique directe/inverse. L'objectif de ce problème est de maximiser le profit de la chaîne d'approvisionnement et de minimiser le coût total des défauts des matières premières collectées auprès des fournisseurs.

(Vahdani et al., 2012) considèrent une étude d'une chaîne d'approvisionnement, dans l'industrie sidérurgique où les produits usagés peuvent être refondus. Cette chaîne d'approvisionnement se compose d'achat de matières premières, de processus de fonderie, de fabrication, de refabrication et de distribution d'un produit (métal). Le résultat montre que le modèle d'optimisation robuste est pire que le modèle déterministe.

(Salema et al., 2010) présentent un travail semblable à celui de (Lee & Dong, 2009). Ils étudient le problème de conception de la chaîne d'approvisionnement qui peut être divisée en

trois grands groupes : chaîne directe, chaîne inverse et chaîne directe/inverse. Ce problème est résolu par le modèle linéaire multi-produits et multi-périodes pour ce réseau afin de minimiser le coût total de la chaîne globale d'approvisionnement.

2.3.2 Le problème de localisation

Le problème de la localisation des sites ou des installations est un problème qui est étudié dans la littérature pour ses applications dans le monde industriel. Il consiste à choisir le(s) meilleur(s) site(s) pour installer un ou plusieurs maillons de la chaîne logistique inverse. Certains travaux, par exemple, se focalisent sur le problème de localisation de centres de collecte-tri et de désassemblage. En anglais, ce problème est appelé *collection/inspection and disassembly facility location problem*. Nous citons ici quelques travaux sur le sujet : (Salema *et al.*, 2007), (Das & Chowdhury, 2012), (Zhou & Wang, 2008).

(Salema *et al.*, 2007) étudient un problème de localisation de sites, illustré sur la figure 2.4 qui est un problème d'optimisation avec des variables entières. Il s'agit de chercher la meilleure installation des sites en Espagne et d'en minimiser le coût d'installation. La solution montre que les localisations des usines, des centres d'entrepôts ainsi que des centres de désassemblage ont été optimisées.

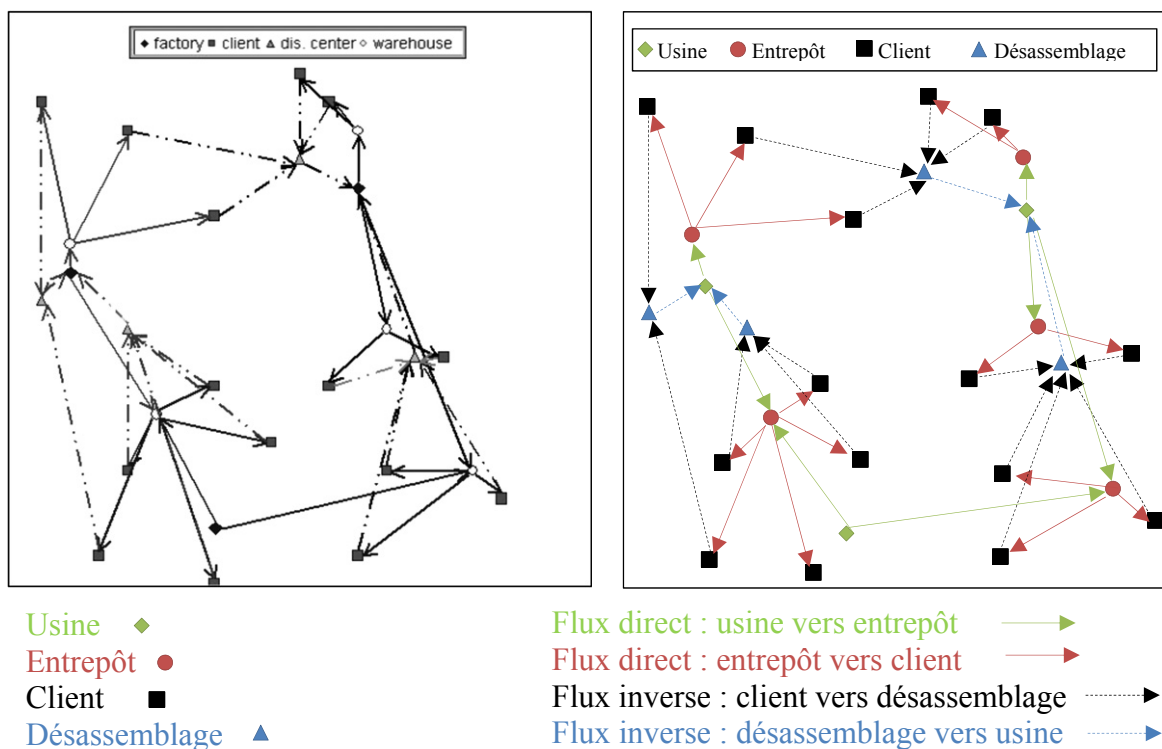


Figure 2.4 : Localisation des installations dans la chaîne (Salema *et al.*, 2007)

Sur la figure 2.4- partie droite, la complexité du réseau de logistique directe et inverse permet de gérer les flux directs des produits à partir d'un point usine à un point client et les flux inverses des produits à partir d'un point client à un point usine.

(Cruz-Rivera & Ertel, 2009) proposent de traiter un problème de la logistique inverse relatif à des véhicules au Mexique en utilisant des centres de collecte pour déterminer la localisation des usines.

(Zhou & Wang, 2008) relatent une structure de chaîne directe/inverse à trois niveaux. On doit décider du nombre et de la localisation des installations de trois types différents : les usines, les centres de distribution et les centres de récupération. Il s'agit d'un problème de localisation pour ces trois types d'installation. La solution montre que les localisations de ces installations sont bien optimisées.

2.3.3 Le problème de sélection de sites

Le problème de la sélection de sites consiste à déterminer, dans un réseau logistique existant comportant un certain nombre de sites potentiels, des sites qui seront ouverts (opérationnels) ou fermés. En général, les modèles utilisés pour résoudre ce type de problème, nécessitent des variables de décisions binaires liées aux sites (par exemple : usine, centre de désassemblage). Après résolution, ces variables binaires prennent la valeur 1 si le site est ouvert, et la valeur 0 s'il est fermé. Voici quelques références de travaux sur ce sujet : (Salema *et al.*, 2007), (El-Sayed *et al.*, 2010), (Ramezani *et al.*, 2013), (Lee & Dong, 2009), (Lee *et al.*, 2009), (Pishvaei *et al.*, 2009).

(Salema *et al.*, 2007) ont étudié un cas d'ouverture ou de fermeture des usines, des entrepôts et des centres de désassemblage. Le modèle associé cherche à minimiser les coûts d'ouverture. La solution montre que les usines situées à Viseu, Madrid et Séville ont été ouvertes pour servir cinq centres d'entrepôts et quatre centres de désassemblage ont été créés pour satisfaire les demandes et les retours de tous les clients.

(El-Sayed *et al.*, 2010) ont conduit une étude sur les problèmes de décisions d'ouverture ou de fermeture de divers sites : fournisseurs, producteurs, centres de distribution, centres de désassemblage, centres de redistribution et centres d'élimination. Le modèle correspondant cherche aussi à minimiser les coûts d'ouverture, avec cependant une contrainte forte qui consiste à limiter le nombre de sites ouverts.

(Ramezani *et al.*, 2013) s'intéressent à l'étude d'un cas de la chaîne directe (fournisseurs usines, centres de distribution) et de la chaîne inverse (centres de collecte, centres de traitement et centres d'élimination). Le modèle linéaire prévoit la possibilité d'ouvrir les sites pour répondre aux besoins des clients. Et de la même façon, le nombre de ces sites doit être inférieur ou égal au nombre maximum d'ouvertures de sites.

(Lee & Dong, 2009) présentent une étude pour l'ouverture ou la fermeture de sites tels que des centres de traitement direct, des centres de collecte et des centres de retraitement. La particularité dans ces travaux est une modélisation multi-périodes. De plus, pour chaque période, un site ne peut livrer ses produits qu'à un seul dépôt.

Quant à (Lee *et al.*, 2009), ces chercheurs travaillent sur l'ouverture ou la fermeture de centres de désassemblage et de centres de traitement. Ce problème cherche à minimiser les coûts fixes d'ouverture. Ici, le nombre de sites ouverts est aussi limité.

Enfin, (Pishvaei *et al.*, 2009) présentent un travail assez semblable à celui de (Ramezani *et al.*, 2013). Cependant, ils utilisent un modèle d'optimisation stochastique : la demande et les coûts variables sont considérés comme des paramètres incertains. La solution montre que le nombre de sites ouverts est plus élevé pour le modèle stochastique que pour le modèle déterministe.

2.3.4 Le problème du transport

Certains auteurs (Vahdani *et al.*, 2012), (Ramezani *et al.*, 2013), (Hu *et al.*, 2002), (Logozar *et al.*, 2006) traitent du problème du transport et prennent notamment en compte les flux de produits au niveau opérationnel de la logistique inverse.

(Vahdani *et al.*, 2012) étudient les problèmes de transport entre les divers couples de sites sur un cas incluant une chaîne logistique directe et une chaîne inverse. Il propose des modèles déterministes et robustes qui minimisent les coûts de transport. Les fonctions objectif sont croissantes sur les coûts de transport moyens entre les couples de sites.

De la même façon, (Ramezani *et al.*, 2013) cherchent à optimiser le transport entre les sites, avec la prise en compte des coûts de transport définis en fonction de la distance entre les sites sur le réseau de la chaîne d'approvisionnement.

La particularité des travaux de (Hu *et al.*, 2002) tient à l'étude du problème de transport pour la collecte des déchets dangereux vers un centre de collecte puis la distribution de ces produits pour une éventuelle réutilisation ou pour l'élimination. Le modèle cherche à minimiser les coûts totaux de ces deux transports.

(Logozar *et al.*, 2006) présentent un modèle de transport appliqué à deux architectures : l'une pour le transport direct entre des sources de déchets d'aluminium et le centre de traitement, et l'autre pour le transport entre un centre de collecte et le centre de traitement. La seconde architecture semble la plus optimale.

2.4 Classification de la littérature scientifique sur la logistique inverse

Nous avons souhaité exploiter un ensemble non exhaustif de travaux sur ce thème pour élaborer une classification à plusieurs critères que nous allons développer dans les paragraphes suivants. Plusieurs articles ont déjà été présentés dans les paragraphes précédents. Ces derniers sont simplement mentionnés dans la classification développée ci-dessous.

Sur un total de 88 articles, 69 articles concernent le thème de la logistique inverse. Les articles lus sur la logistique inverse se répartissent de l'année 2000 à l'année 2015 (cf figure 2.5).

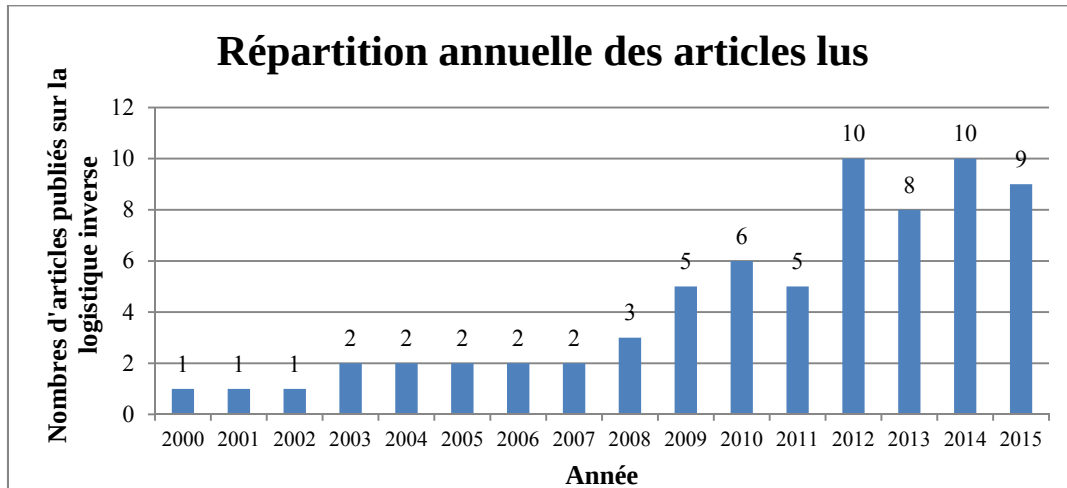


Figure 2.5 : La répartition annuelle des articles lus sur la logistique inverse

Le plus grand nombre d'articles (10) a été publié en 2012 et 2014. C'est effectivement à ce moment que la logistique inverse suscite de plus en plus d'intérêt. Notre répartition annuelle des articles lus semble proche de celle de (Agrawal *et al.*, 2015) illustré figure 2.6.

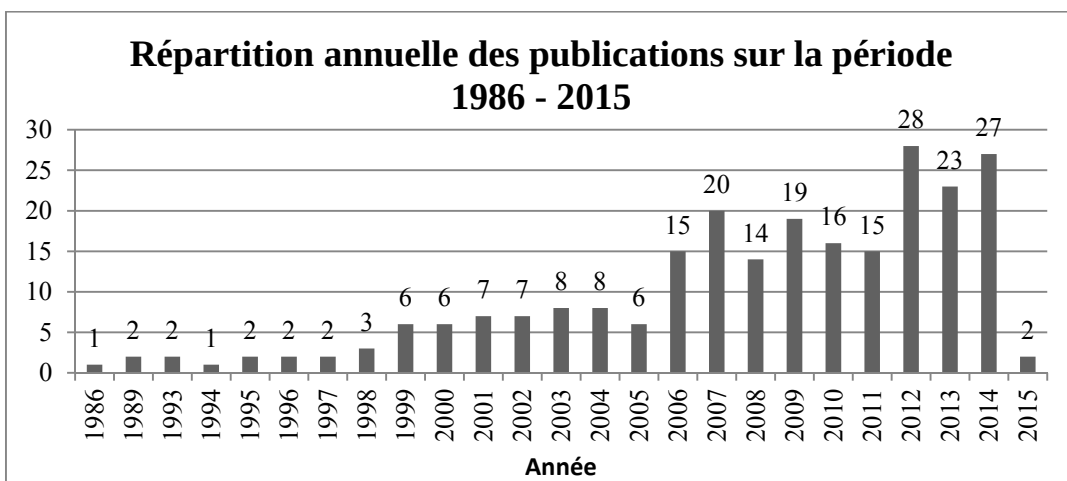


Figure 2.6 : La répartition annuelle des publications selon (Agrawal *et al.*, 2015)

Dans cette partie du chapitre, nous nous intéressons à la caractérisation de la logistique inverse. La classification a pour but de distinguer les problèmes proposés par certains auteurs. Ces problèmes sont classifiés en 7 catégories qui sont listées dans les sections suivantes :

- La section 2.4.1 se focalise sur quelques définitions de la logistique inverse et directe. Ceci permettra de définir notre premier critère : le type de réseau d'acteurs liés aux activités de la logistique inverse.
- La section 2.4.2 concerne les décisions relatives à la logistique inverse. En général, on peut les classer en trois niveaux (stratégique, tactique et opérationnel).
- La section 2.4.3 concerne les différentes activités de retours considérés comme un processus de la logistique inverse.
- La section 2.4.4 s'intéresse aux domaines d'application concernant les produits traités.

- La section 2.4.5 s'intéresse aux modèles, en général mathématiques, considérés dans les articles lus. On verra des modèles déterministes et stochastiques.
- La section 2.4.6 concerne les fonctions objectif qui sont centrées sur la minimisation de coûts et la maximisation de profits.
- La section 2.4.7 vise les contraintes le plus utilisées dans les modèles d'optimisation de la logistique inverse.

2.4.1 Le domaine d'étude des articles

Nous distinguons tout d'abord les travaux de certains auteurs, présentés dans le tableau 2.2 ci-dessous, selon que leur domaine d'étude concerne la logistique directe ou la logistique inverse, voire les deux. Pour cela, nous avons classé l'ensemble des articles lus dans un tableau indiquant ces trois possibilités. (Ramezani *et al.*, 2013) et (Pishvae *et al.*, 2009) avaient d'ailleurs proposé des tableaux semblables.

Auteurs	Type de réseau		
	Logistique directe	Logistique inverse	Logistique directe/inverse
(Achillas <i>et al.</i> , 2010)		x	
(Alshamsi & Diabat, 2015)		x	
(Alumur <i>et al.</i> , 2012)		x	
(Alumur <i>et al.</i> , 2015)	x	x	
(Assavapokee <i>et al.</i> , 2012)	x	x	
(Choudhary <i>et al.</i> , 2015)	x	x	x
(Das & Chowdhury, 2012)		x	
(Dat <i>et al.</i> , 2012)		x	
(El-Sayed <i>et al.</i> , 2010)	x	x	x
(Ferri <i>et al.</i> , 2015)		x	
(Gonzalez-Torre <i>et al.</i> , 2004)		x	
(Govindan <i>et al.</i> , 2012)	x	x	
(Hu <i>et al.</i> , 2002)		x	
(Kannan <i>et al.</i> , 2012)	x	x	
(Keyvanshokoo <i>et al.</i> , 2013)	x	x	x
(Kim <i>et al.</i> , 2006)	x	x	
(Lambert <i>et al.</i> , 2011)		x	
(Lee & Dong, 2009)	x	x	x
(Lee <i>et al.</i> , 2009)	x	x	
(Logozar <i>et al.</i> , 2006)	x	x	
(Pishvae <i>et al.</i> , 2009)	x	x	x
(Ramezani <i>et al.</i> , 2013)	x	x	x
(Riopel <i>et al.</i> , 2011)	x	x	
(Roghanian & Pazhoheshfar, 2014)		x	
(Salema <i>et al.</i> , 2007)	x	x	

(Salema <i>et al.</i> , 2010)	x	x
(Vahdani <i>et al.</i> , 2012)	x	x
(Zhang <i>et al.</i> , 2011)	x	x
(Zhou & Wang, 2008)		x
(Zhou & Zhou, 2015)	x	x

Tableau 2.2 : Classification par type de réseau

Dans le tableau 2.2, la colonne « logistique directe/inverse » signifie que la chaîne inverse est intégrée à la chaîne directe : elle utilise les mêmes ressources. Par exemple, un centre de distribution sert aussi de centre de collecte (Pishvae *et al.*, 2009). Alors que d'autres auteurs étudient des cas de chaînes dissociées : dans ce cas, seules les colonnes « Logistique directe » et « Logistique inverse » sont cochées.

Nous remarquons que seuls six articles, avec 3 croix, ont étudié un réseau complet : chaîne directe, chaîne inverse et chaîne directe/inverse. Les travaux de treize autres articles, avec 2 croix, considèrent majoritairement les études : flux direct et inverse.

Enfin, 11 articles ne sont orientés que sur la logistique inverse (1 seule croix dans la colonne « Logistique inverse »).

2.4.2 Les niveaux décisionnels

Cette classification a pour but de distinguer les niveaux décisionnels (stratégique, tactique et opérationnel) sur lesquels se focalisent les travaux d'optimisation de la chaîne logistique inverse étudiés dans ces articles.

Pour rappel, les décisions de **niveau stratégique** se concentrent souvent sur la localisation de sites, l'ouverture ou la fermeture de sites, la sélection de sites et la conception de la chaîne inverse. Les décisions de **niveau tactique** se concentrent sur la planification de la chaîne inverse, la planification de transport, la planification de production. Les décisions de **niveau opérationnel** concernent souvent la gestion de transport, le contrôle et l'approvisionnement de produits, le prix de vente d'un produit.

Le tableau 2.3 ci-dessous positionne ainsi un ensemble non exhaustif d'articles étudiés selon le type de niveau décisionnel traité de la logistique inverse (stratégique, tactique et opérationnel).

Auteurs	Niveau décisionnel		
	Stratégique	Tactique	Opérationnel
(Achillas <i>et al.</i> , 2010)	x		
(Alshamsi & Diabat, 2015)	x	x	x
(Alumur <i>et al.</i> , 2012)	x	x	
(Alumur <i>et al.</i> , 2015)	x	x	
(Assavapokee <i>et al.</i> , 2012)	x	x	x
(Das & Chowdhury, 2012)	x	x	x

(Dat <i>et al.</i> , 2012)	x	x	x
(Demirel <i>et al.</i> , 2014)	x	x	x
(El-Sayed <i>et al.</i> , 2010)	x	x	
(Ferri <i>et al.</i> , 2015)	x	x	x
(Govindan <i>et al.</i> , 2012)	x	x	
(Hu <i>et al.</i> , 2002)	x	x	x
(Kannan <i>et al.</i> , 2012)	x	x	x
(Keyvanshokoo <i>et al.</i> , 2013)	x	x	x
(Kilic <i>et al.</i> , 2015)	x	x	x
(Kim <i>et al.</i> , 2006)	x	x	
(Lee & Dong, 2009)	x	x	x
(Lee <i>et al.</i> , 2009)	x	x	x
(Logozar <i>et al.</i> , 2006)	x	x	
(Pishvae <i>et al.</i> , 2009)	x	x	
(Ramezani <i>et al.</i> , 2013)	x	x	x
(Riopel <i>et al.</i> , 2011)	x	x	x
(Roghanian & Pazhoheshfar, 2014)	x	x	
(Salema <i>et al.</i> , 2007)	x	x	x
(Salema <i>et al.</i> , 2010)	x	x	x
(Vahdani <i>et al.</i> , 2012)	x	x	
(Zaarour <i>et al.</i> , 2014)	x	x	x
(Zhou & Wang, 2008)	x	x	x
(Zhou & Zhou, 2015)	x	x	x

Tableau 2.3 : Classification selon les niveaux décisionnels de la logistique inverse

Tous les articles que nous avons lus, excepté celui de (Achillas *et al.*, 2010), concernent les décisions de niveaux stratégique et tactique en logistique inverse. Toutefois, dans notre bibliographie, les articles traitant de la décision de niveau opérationnel sont très peu nombreux.

Nous présentons dans la suite de ce paragraphe, des précisions sur les décisions traitées dans les articles.

Au niveau stratégique : la conception des chaînes d'approvisionnement avec des flux inverses sont au centre des problèmes traités (El-Sayed *et al.*, 2010 - Salema *et al.*, 2010).

(El-Sayed *et al.*, 2010) travaillent sur un problème de conception de réseau qui traite trois sites de la logistique directe (fournisseurs, producteurs et centre de distribution) et deux sites de la logistique de retour (désassemblage et centre de redistribution).

Salema *et al.*, 2010) répartissent les problèmes de logistique en trois grands groupes selon les flux modélisés : flux direct, flux inverse et flux direct/inverse.

Le Tableau 2.4 ci-dessous présente les diverses décisions du niveau stratégique que nous avons rencontrées dans la littérature.

Auteurs	Décisions stratégiques
(Achillas <i>et al.</i> , 2010)	Décider le développement de stockage intermédiaire local ou régional.
(Alumur <i>et al.</i> , 2015)	Décider de l'utilisation ou non des sites.
(Assavapokee <i>et al.</i> , 2012)	Décider l'utilisation ou non des sites de collecte et de traitement.
(Das & Chowdhury, 2012)	Concevoir le réseau de la logistique inverse. Décider de l'utilisation ou non des sites.
(El-Sayed <i>et al.</i> , 2010) et (Salema <i>et al.</i> , 2010).	Concevoir la chaîne d'approvisionnement avec des flux inverses. Décider de l'utilisation ou non des sites.
(Kim <i>et al.</i> , 2006)	Décider la mise en place (set-up) ou non de rénovation de pièces i et de démontage de produits p.
(Lee & Dong, 2009)	Gérer la conception d'un réseau « dynamique » pour la logistique inverse. Décider l'utilisation ou non des sites dans la période.
(Lee <i>et al.</i> , 2009)	Décider des rôles des sites (centres de démontage ou de retraitement)
(Logozar <i>et al.</i> , 2006)	Déterminer la nécessité de collecter les ferrailles.
(Ramezani <i>et al.</i> , 2013) et (Pishvaei <i>et al.</i> , 2009)	Déterminer l'utilisation ou non des sites
(Zhou & Wang, 2008)	Décider l'utilisation ou non des usines, des centres de distribution et des CRC ⁷ .

Tableau 2.4 : Les décisions stratégiques rencontrées dans la littérature

Au niveau tactique : Les décisions au niveau tactique cherchent à répondre aux besoins du niveau stratégique, en décidant notamment des ressources à utiliser. Dans le cas de la logistique inverse, cela peut correspondre au choix des moyens de collecte, tri et traitement, ou à la planification des chaînes d'approvisionnement, c'est-à-dire à l'établissement de tous les flux « inverses » (El-Sayed *et al.*, 2010). Cela englobe plus généralement la planification de production, de stockage et de distribution. Par exemple, (Ramezani *et al.*, 2013) envisagent la planification de livraison (transport) de produits avec un modèle stochastique.

Le Tableau 2.5 ci-dessous présente les diverses décisions tactiques que nous avons rencontrées dans la littérature.

⁷ CRC (Centre de récupération centrale)

Auteurs	Décisions tactiques
(Assavapokee <i>et al.</i> , 2012)	Planifier la collecte et le traitement en multi-périodes.
(Das & Chowdhury, 2012)	Planifier les produits par niveau de qualité
(El-Sayed <i>et al.</i> , 2010)	Planifier la chaîne d’approvisionnement avec des flux inverses.
(Hu <i>et al.</i> , 2002)	Planifier, manager et contrôler les flux de déchets pour la réutilisation et l’élimination finale de déchets.
(Kim <i>et al.</i> , 2006)	Planifier la production et l’activité logistique.
(Lee & Dong, 2009)	Planifier en multi-périodes les flux de produits et les capacités appliqués dans la logistique inverse.
(Lee <i>et al.</i> , 2009)	Planifier l’expédition des produits et des pièces, de l’origine à la destination
(Logozar <i>et al.</i> , 2006)	Planifier le transport des produits entre les sites de la chaîne inverse
(Ramezani <i>et al.</i> , 2013)	Organiser et planifier le service client avec un niveau minimum (approche stochastique par scénario).
(Salema <i>et al.</i> , 2010)	Planifier la chaîne d’approvisionnement avec les flux inverses.
(Zhou & Wang, 2008)	Planifier les flux de demande et de retour

Tableau 2.5 : Les décisions tactiques rencontrées dans la littérature

2.4.3 Les activités de retour

Une classification des articles étudiés selon les activités de retour est présentée dans le tableau 2.6. Ce tableau récapitule les études réalisées sur un ensemble non exhaustif d’articles étudiés en fonction des activités de retour que nous avons évoquées au paragraphe 1.4.

Auteurs	Barrière	Collecte	Tri	Transport	Stockage	Désassemblage	Réutilisation	Refabrication	Recyclage	Redistribution	Élimination
(Achillas <i>et al.</i> , 2010)		x		x	x	x	x		x		x
(Alumur <i>et al.</i> , 2012)		x	x	x		x		x	x		x
(Ashfari <i>et al.</i> , 2014a)		x	x	x				x			x
(Assavapokee <i>et al.</i> , 2012)		x	x	x	x			x	x		
(Das & Chowdhury, 2012)	x	x		x	x						
(Dat <i>et al.</i> , 2012)		x		x		x			x		x
(El-Sayed <i>et al.</i> , 2010)		x		x		x		x	x	x	x
(Govindan <i>et al.</i> , 2012)		x					x	x	x	x	x
(Hu <i>et al.</i> , 2002)		x			x		x				x
(Kannan <i>et al.</i> , 2012)		x	x	x		x	x	x	x		x
(Kim <i>et al.</i> , 2006)		x		x	x	x		x			x
(Lee & Dong, 2009)	x	x		x							
(Lee <i>et al.</i> , 2009)	x					x	x	x	x		x
(Logozar <i>et al.</i> , 2006)		x		x					x		
(Pishvaei <i>et al.</i> , 2009)		x									x
(Ramezani <i>et al.</i> , 2013)	x	x		x	x	x		x	x	x	x
(Riopel <i>et al.</i> , 2011)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
(Roghanian & Pazhoheshfar, 2014)				x		x		x	x		
(Salema <i>et al.</i> , 2007)				x	x	x		x			x
(Salema <i>et al.</i> , 2010)			x		x	x		x			x
(Vahdani <i>et al.</i> , 2012)		x		x	x						
(Zhou & Wang, 2008)		x		x			x	x	x		x

Tableau 2.6 : Classification selon les activités de retour

(Riopel *et al.*, 2011) proposent une vision très générale, ils traitent des questions globales de la logistique inverse. (Ramezani *et al.*, 2013) travaillent sur presque toutes les activités (8 croix sur la ligne). Certains proposent une modélisation qui couvre plus ou moins les activités de la chaîne logistique de retour : 4 à 7 croix par ligne. Le bilan à la lecture des colonnes met en évidence un grand intérêt pour la collecte, le transport, le désassemblage, la refabrication, le recyclage et l'élimination. En revanche, le tri et la redistribution sont rarement envisagés.

2.4.4 Le type de produit

La classification par type de produit est présentée dans le tableau 2.7 ci-dessous. Les modèles rencontrés dans la littérature concernent différents types de produits. L'analyse des cas regroupe le type de produit, les objectifs/motivations et les auteurs.

Type de produit	Objectifs/Motivations	Auteurs
Général	Concevoir un réseau logistique inverse en tenant compte de la collecte optimale et de la récupération.	(Das & Chowdhury, 2012)
	Déterminer le nombre de produits à refabriquer, recycler et éliminer pour assurer la demande du site de désassemblage.	(El-Sayed <i>et al.</i> , 2010)
	Quantifier les avantages environnementaux du cycle de vie atteint par la refabrication dans le système de produits.	(Kim <i>et al.</i> , 2006)
	Considérer les flux de produits utilisés et récupérés.	(Lee & Dong, 2009)
	Considérer le centre de traitement selon le type des pièces.	(Lee <i>et al.</i> , 2009)
	Analyser un système de réseau de retour qui inclut la production, la distribution, la collecte, la récupération et l'élimination.	(Pishvaei <i>et al.</i> , 2009)
	Maximiser le profit en utilisant un niveau de qualité de produit.	(Ramezani <i>et al.</i> , 2013)
	Considérer les demandes et les retours de produits. Planifier un réseau de distribution de l'origine à la destination.	(Salema <i>et al.</i> , 2007)
	Considérer une approche graphique avec nœuds et arcs. Concevoir et planifier la chaîne d'approvisionnement avec les flux inverses.	(Salema <i>et al.</i> , 2010)
Huile de palme	Développer un modèle générique afin de minimiser le coût total pour le réseau de récupération.	(Zhou & Wang, 2008)
	Considérer les flux d'huile de palme dans le secteur agro-industriel.	(Alfonso-Lizarazo <i>et al.</i> , 2013)
Papier	Concevoir une localisation des centres de recyclage des papiers.	(Kara & Onut, 2010)
Déchets dangereux	Déterminer le minimum de collecte déclaré par la réglementation.	(Hu <i>et al.</i> , 2002)
Aluminium	Evaluer l'impact de logistique inverse par	(Logozar <i>et al.</i> ,

	rapport au recyclage	2006)
Equipements Electriques Electroniques	Déterminer le nombre de déchets afin de minimiser les coûts dans le recyclage et la collecte	(Achillas <i>et al.</i> , 2010)
Microprocesseurs Ordinateurs Téléviseurs	Déterminer le nombre d'appareils rénovés et périmés. Analyser un système de refabrication et les options de réparation et de recyclage.	(Assavapokee <i>et al.</i> , 2012)
Tableau 2.7 : Classification par type de produit		

D'après nos lectures, le traitement de nombreux produits est soit déjà opérationnel, soit en cours d'étude. Les articles lus n'évoquent pas les cas de l'acier et des plastiques. Visiblement beaucoup de travaux restent à faire sur le processus de traitement de certains produits et aussi sur la mise en place de certaines logistiques inverses.

2.4.5 Le type de modèle et d'application

Les modèles mathématiques rencontrés dans la littérature ont été considérés dans notre étude bibliographique (cf. Tableaux ci-dessous), à savoir, les modèles déterministes (programmation linéaire en nombres entiers et mixtes et programmation non linéaire) et les modèles stochastiques (programmation stochastique).

Le tableau 2.8 présente aussi quelques caractéristiques du modèle utilisé (mono/multi période, mono/multi produit).

Auteurs	Type de modèle		Caractéristiques			
	Déterministe	Stochastique	Période		Produit	
			Mono	Multi	Mono	Multi
(Achillas <i>et al.</i> , 2010)	x			x	x	
(Alumur <i>et al.</i> , 2012)	x			x		x
(Assavapokee <i>et al.</i> , 2012)	x			x		x
(Ayvaz & Bolat, 2014)	x	x	x			x
(Ayvaz <i>et al.</i> , 2015)		x	x			x
(Das & Chowdhury, 2012)	x		x			x
(Dat <i>et al.</i> , 2012)	x		x			x
(Demirel <i>et al.</i> , 2014)	x			x		x
(El-Sayed <i>et al.</i> , 2010)	x			x	x	
(Ene & Öztürk, 2015)		x		x		x
(Hatefi & Jolai, 2014)	x	x	x		x	
(Hu <i>et al.</i> , 2002)	x		x			x
(Kannan <i>et al.</i> , 2012)	x		x		x	
(Kara & Onut, 2010)	x	x	x		x	
(Keyvanshokoo <i>et al.</i> , 2013)	x			x		x

(Kilic <i>et al.</i> , 2015)	x		x		x
(Kim <i>et al.</i> , 2006)	x			x	x
(Lee & Dong, 2009)	x	x		x	x
(Lee <i>et al.</i> , 2009)	x		x		x
(Logozar <i>et al.</i> , 2006)	x		x	x	
(Pishvaei <i>et al.</i> , 2009)	x	x	x	x	
(Ramezani <i>et al.</i> , 2013)	x	x	x		x
(Salema <i>et al.</i> , 2007)	x	x	x		x
(Salema <i>et al.</i> , 2010)	x		x	x	
(Soleimani & Govindan, 2014)		x	x		x
(Vahdani <i>et al.</i> , 2012)		x	x		x
(Zaarour <i>et al.</i> , 2014)	x		x	x	
(Zhou & Wang, 2008)	x		x	x	

Tableau 2.8 : Classification par type de modèles et caractéristiques rencontrées dans la littérature

Dans ce tableau, nous nous apercevons qu'une majorité des auteurs (24) travaillent avec des modèles déterministes cherchant à minimiser le coût ou à maximiser le profit.

Dans la colonne « Caractéristiques », beaucoup d'articles ont développé des modèles mono-période et multi-produits. Pour cette caractéristique, il est possible de comparer l'évolution annuelle avec les résultats de (Govindan *et al.*, 2015), visualisable sur les figures suivantes :

- La figure 2.7 montre que la répartition temporelle des 28 articles lus concernant le thème mono/multi-période.

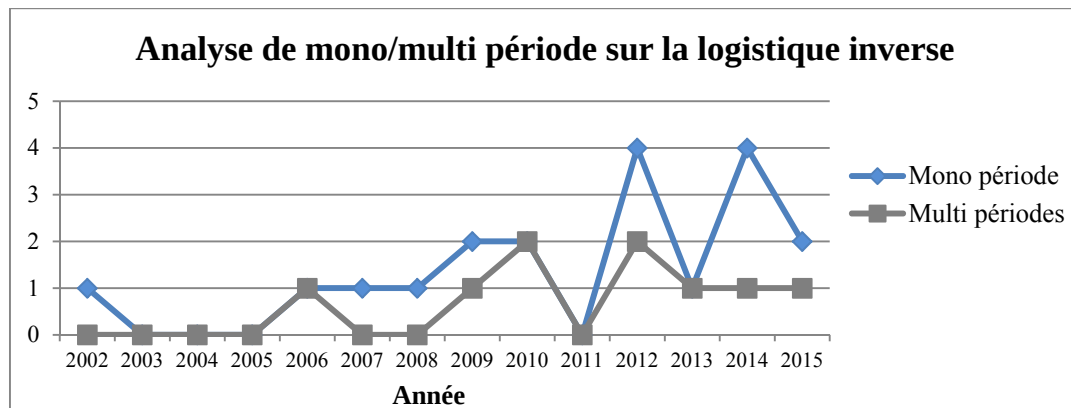


Figure 2.7 : Analyse mono/multi période sur la logistique inverse

Le plus grand nombre d'articles (4) présentant des modèles mono-période a été publié en 2012 et 2014. Notre analyse temporelle des travaux mono/multi période semble proche de celle de (Govindan *et al.*, 2015) illustrée sur la figure 2.8.

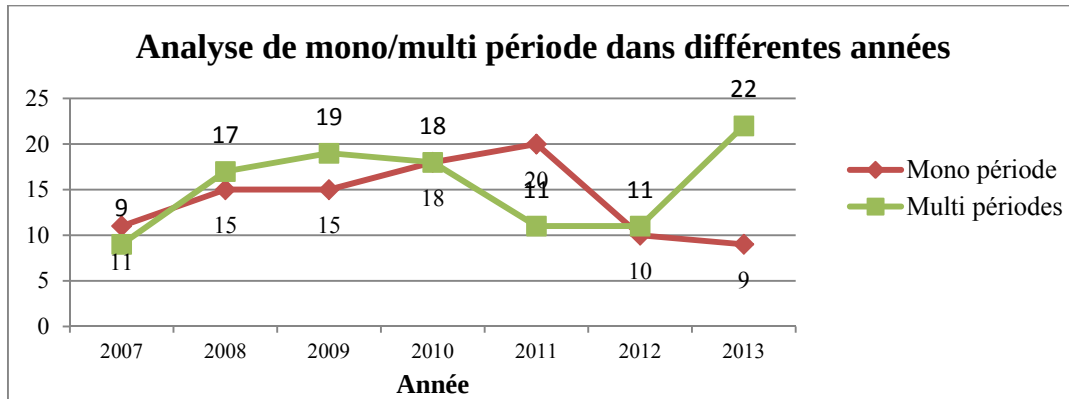


Figure 2.8 : Analyse mono/multi période d'après (Govindan *et al.*, 2015)

La figure 2.9 montre la répartition temporelle des 28 articles lus sur le thème mono/multi produit.

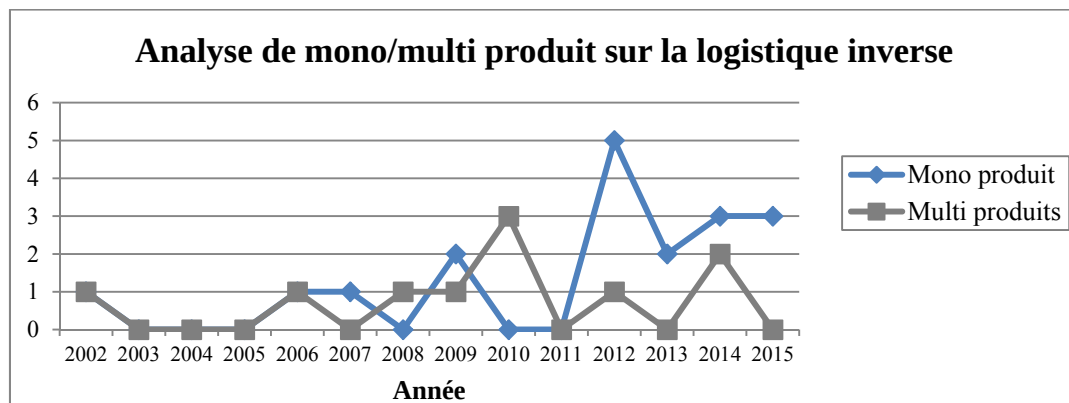


Figure 2.9 : Analyse mono/multi produit sur la logistique inverse

Dans cette figure 2.9, nous constatons qu'une majorité des auteurs en 2010 ont travaillé sur des modèles multi-produits. La figure 2.10 montre l'analyse semblable effectuée par (Govindan *et al.*, 2015).

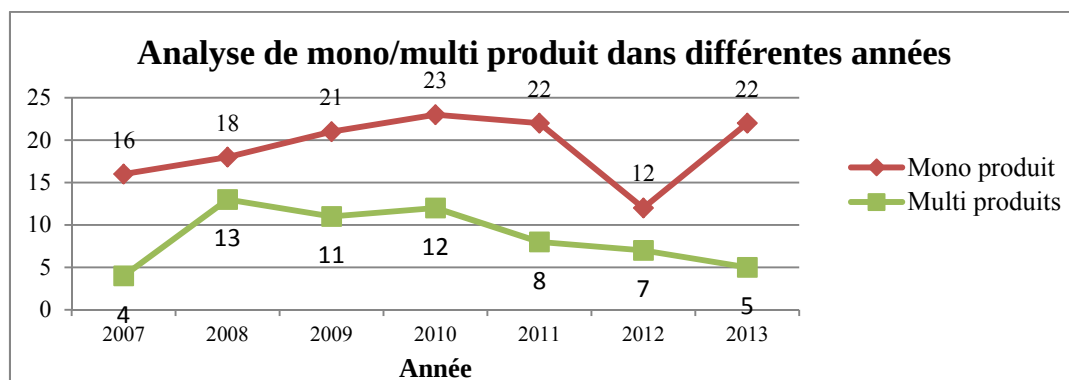


Figure 2.10 : Analyse mono/multi produit sur la logistique inverse (Govindan *et al.*, 2015)

Nous avons extrait la colonne « stochastique » dans le tableau précédent 2.8 afin de préciser le type de modélisation stochastique utilisé dans les articles. Cette extraction est présentée dans

le tableau 2.9 en distinguant les approches par scénario, par optimisation robuste et par contrainte probabiliste. Ces types sont définis dans la section 2.1.2.

Auteurs	Stochastique		
	Par scénario	Par optimisation robuste	Par contrainte probabiliste
(Ayvaz & Bolat, 2014)	x		
(Ayvaz <i>et al.</i> , 2015)	x		
(Beasley, 2002)			x
(Ene & Öztürk, 2015)	x		
(Hatefi & Jolai, 2014)		x	
(Henrion, 2004)			x
(Kara & Onut, 2010)	x		
(Langella & Kleber, 2006)			x
(Lee & Dong, 2009)		x	
(Pishvaei <i>et al.</i> , 2009)	x		
(Ramezani <i>et al.</i> , 2013)	x		
(Salema <i>et al.</i> , 2007)	x		
(Sen & Hingle, 1999)	x	x	x
(Soleimani & Govindan, 2014)	x		
(Vahdani <i>et al.</i> , 2012)		x	
(Zang <i>et al.</i> , 2012)			x

Tableau 2.9 : Le type de modélisation stochastique

2.4.6 La fonction objectif du modèle

Le tableau 2.10 propose une classification par fonction objectif. Elle a pour but de différencier les fonctions objectif en vue d'optimiser un système de la logistique inverse. Plusieurs propositions sont décrites selon les objectifs présentés par les auteurs, pour répondre aux maximisations de profits et aux minimisations de coûts totaux.

Auteurs	Fonction objectif
(Achillas <i>et al.</i> , 2010)	Minimiser le coût total du système
(Alumur <i>et al.</i> , 2012)	Maximiser le profit (revenus et coûts totaux).
(Assavapokee <i>et al.</i> , 2012)	Maximiser le profit total qui se décompose en revenu total et en coûts (d'ouverture et de fermeture, de traitement, de collecte, de stockage et de transport).
(Das & Chowdhury, 2012)	Maximiser le profit total qui représente le revenu et le coût total.
(Dat <i>et al.</i> , 2012)	Minimiser le coût total du réseau de recyclage qui est la somme des coûts fixes et des coûts de transport, de

	traitement et d'élimination.
(El-Sayed <i>et al.</i> , 2010)	Maximiser le profit total attendu du réseau de logistique directe/inverse qui inclut le revenu total et le coût total.
(Hu <i>et al.</i> , 2002)	Minimiser le coût total de la logistique inverse en multi-étape-temps et en multi-type de déchet dangereux.
(Kannan <i>et al.</i> , 2012)	Minimiser le coût total qui comprend les coûts fixes d'ouverture de collecte/inspection et les coûts de transport entre deux usines.
(Kim <i>et al.</i> , 2006)	Maximiser la réduction de coûts de refabrication.
(Lee & Dong, 2009)	Minimiser l'investissement total et les coûts opérationnels dans le réseau logistique.
(Lee <i>et al.</i> , 2009)	Minimiser le coût total de la logistique inverse qui inclut les coûts d'expédition et d'ouverture du désassemblage et du traitement.
(Logozar <i>et al.</i> , 2006)	Minimiser le coût du transport entre la source et la collecte et le coût de traitement.
(Pishvaei <i>et al.</i> , 2009)	Minimiser le coût total, comprenant les coûts fixes d'ouverture, les coûts de traitement et de pénalité et les frais de transport.
(Ramezani <i>et al.</i> , 2013)	Maximiser le profit total, y compris le revenu total moins le coût total.
(Salema <i>et al.</i> , 2007)	Minimiser le coût qui inclut le coût d'ouverture, d'entrepôts et de désassemblage.
(Salema <i>et al.</i> , 2010)	Minimiser le coût total de chaîne d'approvisionnement qui concerne les coûts d'ouverture, de pénalité et de transport.
(Vahdani <i>et al.</i> , 2012)	Minimiser le coût total qui représente les coûts fixes de location de collecte et de traitement.
(Zhou & Wang, 2008)	Minimiser le coût total du système qui inclut les coûts d'ouverture de l'usine, du centre de distribution et du centre de récupération centrale.

Tableau 2.10 : Classification par fonction objectif du modèle

Dans la colonne « fonction objectif », on constate que de nombreux articles se focalisent sur la minimisation des coûts totaux. En revanche, la maximisation de profit est rarement proposée dans les articles rencontrés.

2.4.7 Le type de contrainte

Dans cette section, le tableau 2.11 montre la classification par type de contrainte dans les modèles mathématiques de la littérature. En général, les contraintes permettent de traduire des limitations physiques, d'exprimer le respect des règlements et des législations appliqués dans l'entreprise et de contrôler le réseau de retour.

Nous avons répertorié 5 contraintes principales lors de la modélisation de la logistique inverse :

- la conservation de flux afférent à une activité ou un stock d'une période à une autre ;
- la limite de capacité d'une activité de transformation, d'une zone de stockage ou du transport) ;
- le nombre minimum de produits à traiter, à stocker, à transporter ;
- des bornes limites supérieures ou inférieures pour les produits, par rapport à la demande ou d'autres activités ;
- des contraintes liées à la demande.

Auteurs	Conservation de flux	Capacité	Minimum	Limite sup / inf.	Demande
(Achillas <i>et al.</i> , 2010)	x	x	x	x	
(Alumur <i>et al.</i> , 2012)	x	x	x		x
(Ashfari <i>et al.</i> , 2014b)	x	x		x	x
(Assavapokee <i>et al.</i> , 2012)	x	x	x	x	x
(Das & Chowdhury, 2012)	x	x		x	x
(Dat <i>et al.</i> , 2012)	x	x		x	x
(El-Sayed <i>et al.</i> , 2010)	x	x		x	x
(Hu <i>et al.</i> , 2002)	x	x	x		
(Kannan <i>et al.</i> , 2012)	x	x	x	x	
(Kim <i>et al.</i> , 2006)	x	x		x	
(Lee & Dong, 2009)	x	x		x	x
(Lee <i>et al.</i> , 2009)	x	x		x	x
(Logozaar <i>et al.</i> , 2006)	x	x	x	x	
(Pishvaei <i>et al.</i> , 2009)	x	x		x	x
(Ramezani <i>et al.</i> , 2013)	x	x		x	x
(Roghanian & Pazhoheshfar, 2014)	x	x		x	x
(Salema <i>et al.</i> , 2007)	x	x	x	x	x
(Salema <i>et al.</i> , 2010)	x	x	x	x	x
(Vahdani <i>et al.</i> , 2012)	x	x		x	x
(Zhou & Wang, 2008)	x	x	x	x	x

Tableau 2.11 : Classification par contrainte

L'ensemble des articles lus proposent systématiquement des contraintes de « conservation de flux », de « capacité » et de « limite de stock supérieure ou inférieure », excepté deux articles.

(Salema *et al.*, 2007), (Salema, *et al.*, 2010), (Zhou & Wang, 2008) et (Assavapokee *et al.*, 2012) proposent un jeu de contraintes complets (5 croix par ligne).

2.5 Positionnement de la thèse

Ce travail de thèse se focalise sur la planification (et sa modélisation) des activités des entreprises ou « maillons » de la chaîne logistique inverse. Nous modéliserons, en vue de leur optimisation, deux maillons en particulier : un centre de collecte-tri et un centre de désassemblage. Chacun des maillons reste indépendant dans ses décisions. Nous avons donc conçu un modèle mathématique générique de planification. Dans ce contexte, nous avons décrit les flux de retour des produits (entrée) et de livraison (sortie) vers des « clients » (i.e. autres maillons de la chaîne retour ou directe). Comme le montre la figure 2.11, les sorties peuvent concerner 4 maillons de destinations possibles : le maillon de la logistique inverse en aval, le maillon de la chaîne directe correspondante, le marché secondaire pour fabriquer d'autres produits que le produit original ou pour l'export vers d'autres régions du monde et l'élimination.

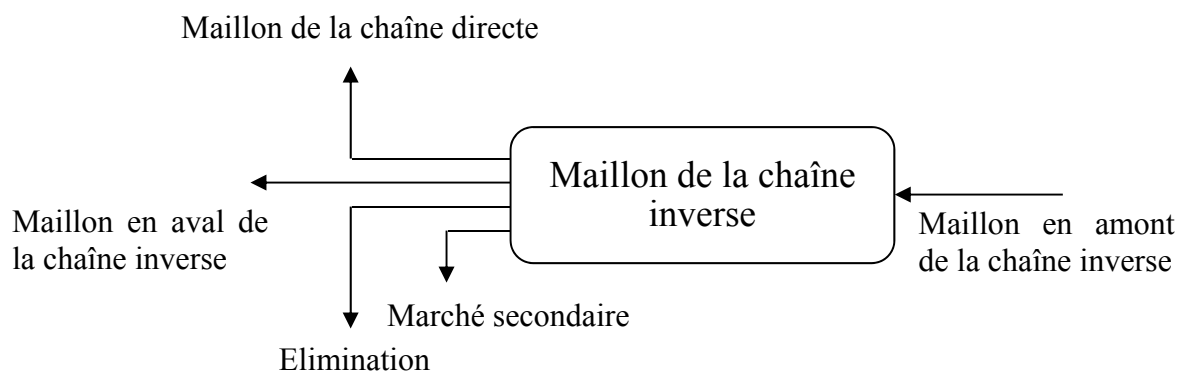


Figure 2.11 : Flux entrant/sortant d'un maillon de la logistique inverse

Cette vision peut alors être dupliquée pour chaque maillon de la chaîne inverse, comme le montre la figure 2.12.

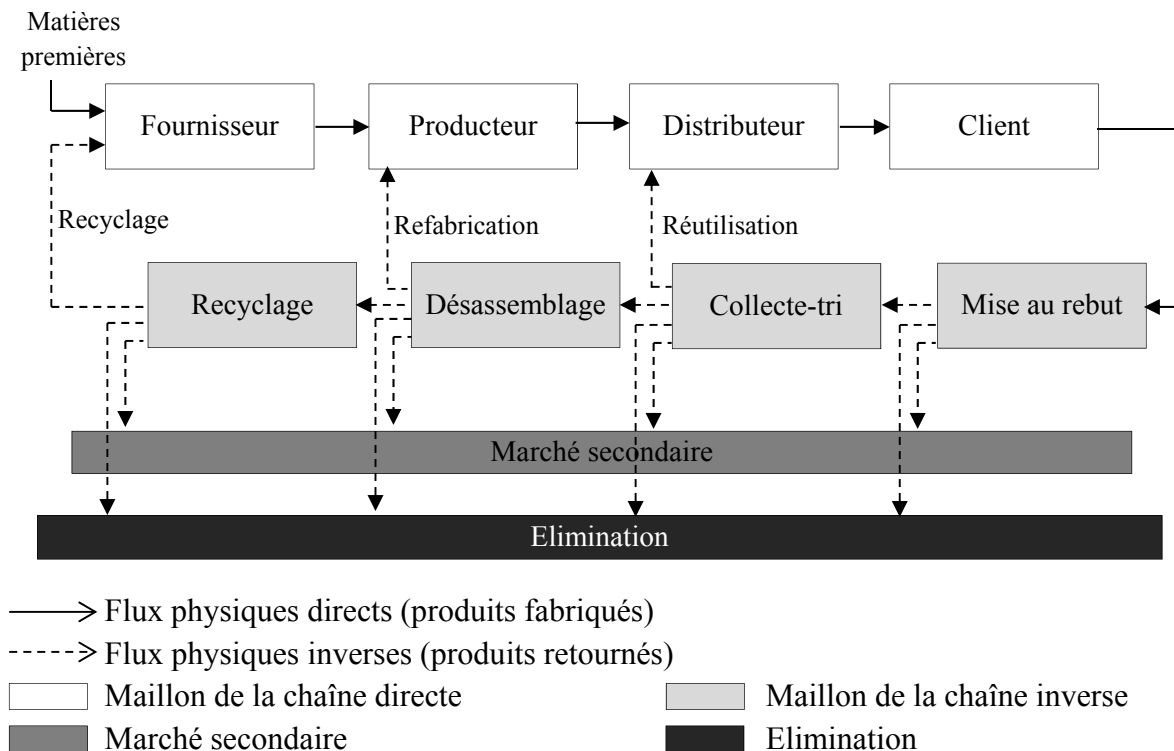


Figure 2.12 : Schéma général de la logistique directe et inverse

Notre étude a pour objectif de modéliser la planification de deux maillons de la logistique inverse uniquement : la collecte-tri et le désassemblage.

Notre modélisation utilise les méthodes en programmation linéaire déterministes et stochastiques avec une prise en compte de l'incertitude sur la qualité des produits traités. Notre objectif est de maximiser le profit de chaque maillon et d'évaluer un certain nombre d'indicateurs de performance.

Hypothèses prédéfinies du problème étudié :

Notre modélisation considère les hypothèses et les limites suivantes :

- les modèles déterministes et stochastiques sont multi-produits et multi-périodes ;
- les demandes existent pour chaque « client », excepté l'élimination ;
- nos décisions tactiques relatées dans la section 1.4.2 engagent le maillon à moyen terme sur la planification des activités de ce centre (collecte-tri ou désassemblage) ;
- les activités concernent la gestion de stocks, le traitement, les livraisons ;
- le stockage de produits sortants, la rupture de stocks et la livraison sont considérés comme incertains et sont décrits dans l'ensemble des scénarios ;
- les coûts unitaires suivants (coûts de stockage, de retard, de transport, de traitement et d'achat), ainsi que les prix de vente des produits ou composants, sont supposés connus.

Nous utilisons ici la classification de la littérature scientifique, proposée dans la section 2.4, pour synthétiser le positionnement de la thèse dans le domaine de la logistique inverse. Les cases grisées dans le tableau caractérisent ces travaux de thèse.

Type de réseau	Logistique directe	Logistique directe / inverse	Logistique inverse			
Niveau décisionnel	Stratégique	Tactique	Opérationnel			
Activité de retour	Barrière	Collecte	Tri	Transport	Stockage	Désassemblage
	Réutilisation	Refabrication	Recyclage	Redistribution	Elimination	
Type de produit	Général	Huile de palme	Papier	Déchets dangereux	Aluminium	Equipements Electriques et Electroniques
	Microprocesseurs, Ordinateurs, Télévisions					
Type de modèle et d'application	Déterministe	Stochastique			Période	
		*8	**9	***10	Mono	multi
Fonction objectif du modèle	Minimiser le coût total	Maximiser le profit total			Produit	
Type de contrainte	Conservation de flux	Capacité			Limité supérieure / inférieure	Demande

Tableau 2.12 : Positionnement du travail de thèse

Ce tableau montre clairement que notre thèse se focalise sur la planification d'activités liées à la chaîne inverse, à un niveau tactique c'est-à-dire à moyen terme. Les éléments suivants de la logistique inverse sont traités dans cette thèse :

- la modélisation déterministe, stochastique et d'évaluation stochastique de la planification de deux maillons (collecte-tri et désassemblage) en multi-périodes et multi-produits ;
- l'évaluation d'indicateurs de performance du modèle stochastique par rapport au modèle déterministe ;
- l'évaluation d'indicateurs d'exploitation comme le coût global, les niveaux de stock, le taux de déclassement, le taux d'élimination ou encore le taux de rupture de stocks.

⁸ Par scénario

⁹ Par optimisation robuste

¹⁰ Par contrainte probabiliste

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord rappelé certaines notions de programmation linéaire en contexte stochastique en nous focalisant sur les approches dites « par scénario ». Nous avons ensuite mentionné un ensemble d'indicateurs classiques dédiés à l'évaluation de performance des chaînes logistiques, puis présenté des indicateurs spécifiques à l'évaluation des modélisations stochastiques. Nous avons poursuivi ce chapitre en proposant une étude de l'état de l'art consacrée à l'identification des problèmes relatifs à la logistique inverse (conception du réseau, localisation, transport) et à leur modélisation (déterministe et stochastique) en nous appuyant sur l'analyse et la présentation d'un certain nombre de travaux scientifiques. Finalement, nous avons ainsi déterminé le positionnement de la thèse sur la planification tactique des principales activités liées au flux des produits, pour les maillons de collecte-tri et de désassemblage.

Le chapitre suivant proposera des modélisations mathématiques déterministe et stochastique pour une aide à la décision générique applicable pour les maillons de collecte-tri et de désassemblage.

Chapitre 3 : Formulation d'un modèle générique de planification en logistique inverse

Ce chapitre a pour objectif de proposer un modèle générique de planification des activités de certaines entreprises (appelées aussi maillons), parties prenantes du processus de la chaîne logistique inverse dans le domaine manufacturier. Pour ce faire, nous introduisons, dans une première partie le périmètre de la modélisation et la prise en compte de la qualité dans les activités et les flux de produits. Nos travaux se focalisent plus précisément sur l'étude des maillons de Collecte-tri et de Désassemblage. Les seconde et troisième parties de ce chapitre sont consacrées successivement à la formulation en programmation linéaire d'un modèle de planification déterministe de ces activités puis d'un modèle stochastique correspondant. Dans la quatrième partie, suite à leur présentation dans le chapitre 2, nous appliquons à ces modèles la mise en œuvre d'indicateurs de performances généraux. L'avant-dernière partie de ce chapitre porte sur la description du modèle d'évaluation stochastique et des indicateurs afférents en vue d'évaluer l'intérêt du modèle stochastique par rapport au modèle déterministe. D'autres indicateurs de performance, propre à ce troisième modèle, sont explicités. Enfin, nous terminons par une brève conclusion.

3.1 Introduction

Dans les chapitres un et deux, nous avons présenté le contexte, les définitions des chaînes logistiques inverses ainsi que l'état de l'art qui s'y rapporte et nous avons positionné le travail de thèse. Ce dernier se focalise, à présent, sur l'étude d'un modèle de planification générique pour certains maillons (i.e. entreprises de la logistique inverse), décrits dans la figure 2.12.

Nos travaux étudient en particulier deux maillons : *Collecte-tri* et *Désassemblage*.

Notre objectif est de construire un modèle générique de planification. Ce modèle pourra être utilisé pour le maillon *Collecte-tri* et pour le maillon *Désassemblage*. Dans ces deux maillons, il existe des données et des variables de planification similaires :

- plan¹¹ de réception ;
- plan de traitement ;
- plans de stockage entrant et sortant ;
- plan de livraison ;
- plan de rupture de stocks (i.e. « backorders ») ;
- capacité de livraison.

Nous cherchons à maximiser une fonction objectif qui est le profit total, défini comme la différence entre la somme des ventes et la somme des coûts (achat, stockage, livraison et rupture de stocks) du centre de *Collecte-tri* ou de *Désassemblage*.

3.1.1 Périmètres de la modélisation : *Collecte-tri* et *Désassemblage*

Les deux maillons que nous étudions peuvent être décrits de la manière suivante :

- un centre de *Collecte-tri* reçoit de la part de fournisseurs (i.e. amont de la chaîne de retour) des produits usagés ou endommagés pour les envoyer en aval vers des centres de réutilisation, de désassemblage, de redistribution vers le marché secondaire et enfin, des centres d'élimination. Ce centre de collecte-tri doit gérer les stocks collectés et triés, et les opérations de tri ;
- un centre de *Désassemblage* réceptionne des produits du centre de *Collecte-tri*, décompose ces produits en composants, et les expédie, suivant leur niveau de qualité, aux centres de refabrication, de redistribution vers le marché secondaire, de recyclage ou aux centres d'élimination. Il gère des stocks de produits et de composants ainsi que les opérations de désassemblage.

Les fonctionnalités des deux maillons sont similaires, c'est pourquoi notre problème peut être étudié à l'aide d'un seul modèle générique en programmation linéaire.

La figure 3.1 ci-dessous présente le fonctionnement global des maillons à étudier. Ceux-ci comportent 4 sites de destination respectivement : U1 (maillon de la chaîne directe), U2 (maillon aval de la chaîne inverse), U3 (marché secondaire) et U4 (centre d'élimination). Nous définissons par ailleurs 4 niveaux de qualité relatifs aux produits traités, correspondant

¹¹ Un plan est le résultat d'un processus de planification d'un maillon. Il informe sur les quantités de produits de diverses activités (traitement, stockage, livraison, etc.) en fonction du temps.

chacun à une destination donnée respectivement A (bon niveau), B (niveau moyen), C (niveau médiocre) et D (très mauvais niveau).

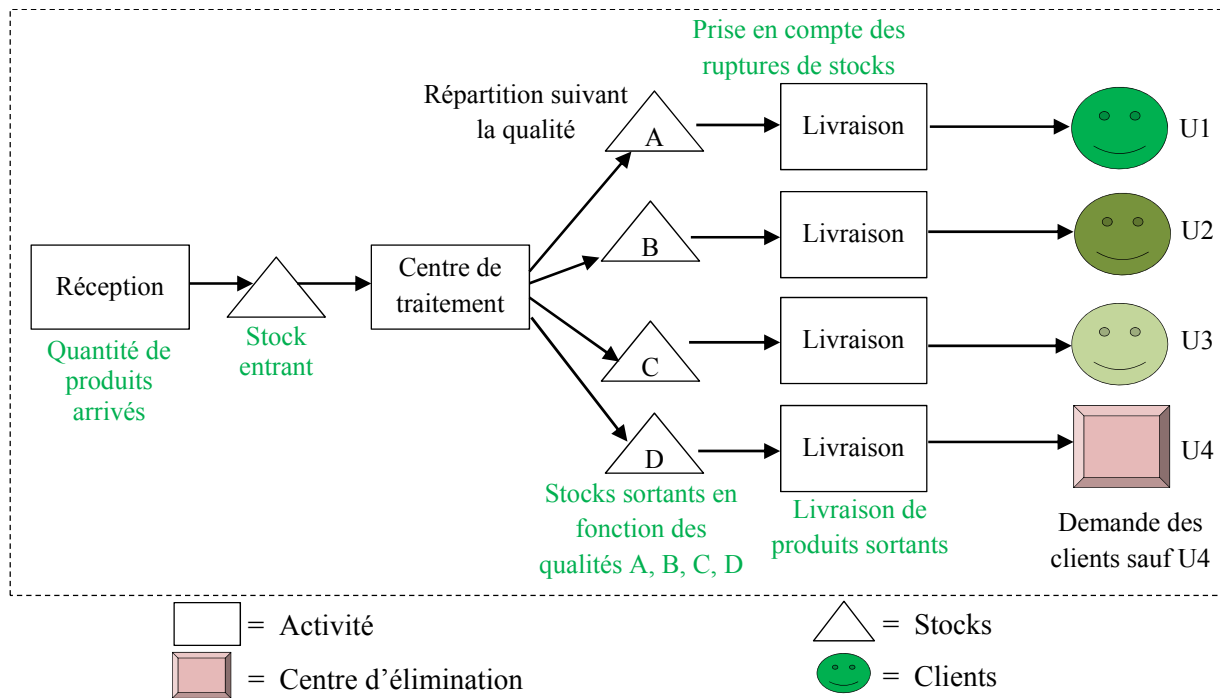


Figure 3.1 : Vision globale du maillon étudié

Notre étude qui porte sur la planification, nécessite par nature un modèle multi-période au niveau temporel. De plus, afin d'être réaliste, nous avons opté pour une approche multi-produit (Salema *et al.*, 2010), (Lee & Dong, 2009), (Alumur *et al.*, 2012).

De manière générale, même si l'on tente de réduire les aléas et les divers risques, il existe toujours une certaine part d'incertitude. Ainsi, en logistique inverse, une des incertitudes fortes est la qualité des produits entrants. Cette notion est détaillée dans le paragraphe 3.1.3.

3.1.2 Principe de fonctionnement du modèle de planification

Le principe de fonctionnement de notre modèle de planification, applicable aux deux maillons de la chaîne logistique inverse, est similaire à celui de (François, 2007). Le processus de la réception à la livraison aux clients peut se définir comme un ensemble d'activités qui transforment des produits entrants en produits sortants. Plus généralement, rappelons que les flux traversant un maillon de la chaîne logistique inverse vont de l'achat des produits entrants à la vente des « produits finis » en passant par le stockage entrant, le centre de traitement, le stockage sortant et le transport.

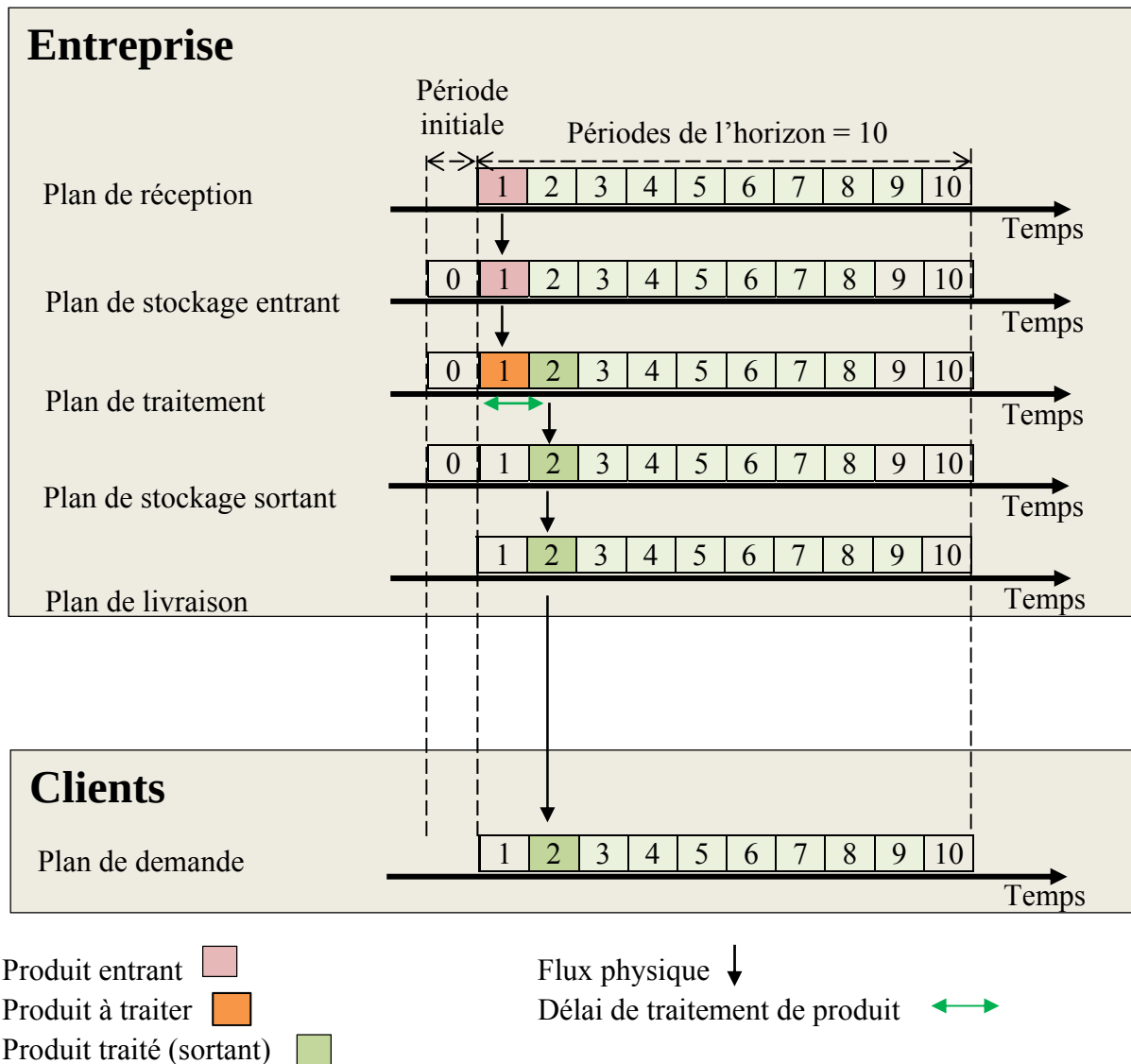


Figure 3.2 : Processus de planification de l'approvisionnement aux livraisons clients

La figure 3.2 présente les différents plans qui résultent de l'exécution du modèle de planification des activités que nous allons élaborer dans la suite du chapitre.

Etape 1 : le plan de réception

La réception est la première étape de la logistique inverse. Lorsque les produits collectés arrivent à la réception, nous devons procéder à leur intégration dans le stock entrant.

Etape 2 : Plan de stockage entrant

Les quantités des produits ainsi reçus viennent s'ajouter au stock entrant ce qui permet de calculer l'évolution des stocks de produits entrants que le modèle cherche à minimiser à cause des coûts de stockage. Les stocks entrants sont aussi contraints : leur niveau ne doit jamais dépasser un certain niveau maximum correspondant à la capacité de stockage.

Etape 3 : Plan de traitement

Les produits entrants sont ensuite envoyés vers le traitement. Dans ce cas, le modèle cherche à minimiser ces traitements, à cause des coûts associés, pour ne produire que les quantités demandées. Le modèle devra tenir compte de la capacité de traitement.

Etape 4 : Plan de stockage sortant (produits traités)

Dans cette étape, on cherche à déterminer l'évolution des stocks sortants du maillon en fonction des produits traités et triés selon les niveaux de qualité et des livraisons. Le modèle cherche aussi à minimiser ces stocks. Ce plan de stockage doit également respecter un niveau maximum de stocks sortants.

Etape 5 : Plan de livraison et de rupture

La demande des clients peut engendrer des ruptures de stocks (backorders). Le modèle cherche à éviter ces ruptures en provoquant des livraisons pour satisfaire au mieux les demandes des clients. Le modèle prévoit aussi une capacité de livraison à respecter et une limite maximale du nombre de ruptures autorisées. Pour assurer ces fonctionnalités, notre modèle comporte donc un plan de rupture et un plan de livraison sur un horizon donné. Il convient de noter que ces ruptures ne sont considérées que pour les produits destinés aux clients, donc inexistantes pour les produits destinés au centre d'élimination.

3.1.3 Prise en compte de la qualité dans les flux

En logistique inverse, on collecte des produits très variés de par :

- leur nature : des références de produits différents, comme par exemple dans l'électroménager avec des lave-linges, des lave-vaisselles, des réfrigérateurs de marques différentes ;
- leur qualité : les produits collectés arrivent dans divers états : de neuf à hors d'usage.

Concernant la nature des produits, dans une filière donnée, il est assez aisé de répertorier l'ensemble des références existantes. Dans notre modélisation, cela correspondra à la notion « multi-produit ».

Il est cependant difficile, voire impossible, de deviner le niveau de qualité des produits collectés. D'où cette notion d'incertitude. Dans notre modélisation, nous avons déterminé un nombre limité de qualités possibles. Ces qualités vont influencer le devenir des produits au cours de leur seconde vie. Pour chaque maillon modélisé, nous avons identifié 4 flux sortants possibles : retour vers la chaîne logistique directe, continuité dans la logistique inverse, redirection vers un marché secondaire et évacuation vers le centre d'élimination. Tout naturellement, nous avons alors défini quatre niveaux de qualité, mentionnés précédemment (A, B, C et D).

Il convient de noter que la détermination de la qualité des produits nécessite une intervention humaine :

- pour le maillon de *Collecte-tri*, le niveau de qualité est déterminé lors du tri par un expert qui évalue l'état du produit ;

- pour le maillon de *Désassemblage*, le niveau de qualité de chaque composant est défini juste après l'opération de désassemblage, à nouveau par un expert.

Les produits sortants de chaque maillon sont alors stockés suivant leur nature et leur niveau de qualité.

Concernant les flux sortants, idéalement, il faudrait que chaque produit d'une qualité donnée soit expédié vers la destination correspondante : par exemple un produit de niveau A (bon produit) est normalement destiné à un maillon de la logistique directe. Cependant, les flux de produits ne correspondent pas forcément aux demandes de ces destinataires. Soit la demande est trop faible, il faut alors stocker les produits sortants, sous réserve d'avoir l'espace disponible pour les stocker dans de bonnes conditions. Soit la demande est trop importante, le maillon ne dispose pas d'assez de produits du niveau de qualité requis, il apparaît alors des ruptures de stock ; celles-ci sont alors souvent répercutées par des coûts associés pour retard de livraison.

Afin de faciliter la gestion des flux sortants, plusieurs politiques sont possibles pour satisfaire les demandes de produits ou de pièces détachées ou de matières. Nous avons modélisé deux politiques possibles que nous détaillons dans les deux paragraphes suivants.

3.1.3.1 Politique de livraison sans déclassement

Dans cette politique, illustrée par la figure 3.3, les produits de qualité A sont réservés à l'usine de la chaîne directe. Mais, en cas de surstock, ils ne peuvent être expédiés que vers le centre d'élimination. Il en est de même pour les produits de qualité B et C, respectivement destinés à l'usine de la chaîne inverse en aval et au marché secondaire.

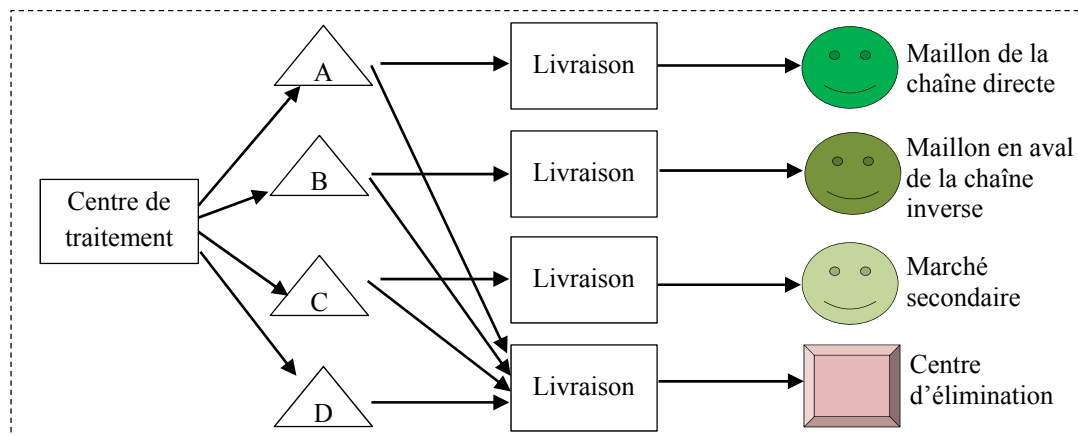


Figure 3.3 : Flux associés à la politique de livraison sans déclassement

3.1.3.2 Politique de livraison avec déclassement

Le déclassement, illustré par la figure 3.4, peut se faire librement suivant la demande des clients ou vers le centre d'élimination. Par exemple, les produits de qualité A répondant aux exigences de l'usine de la chaîne directe peuvent être déclassés vers une usine de la chaîne inverse ou un marché secondaire en cas de rupture de stock des produits de qualité B ou C, pour éviter un stockage important et peut-être inutile, et surtout pour répondre à la demande. Ceci permet d'éviter des coûts de stockage et des coûts de rupture de stock, et par conséquent

de gagner en profit tout en assurant un meilleur rendement à la chaîne inverse en réduisant les destructions inutiles. Il n'est bien sûr possible de déclasser un produit que vers un niveau de qualité inférieure.

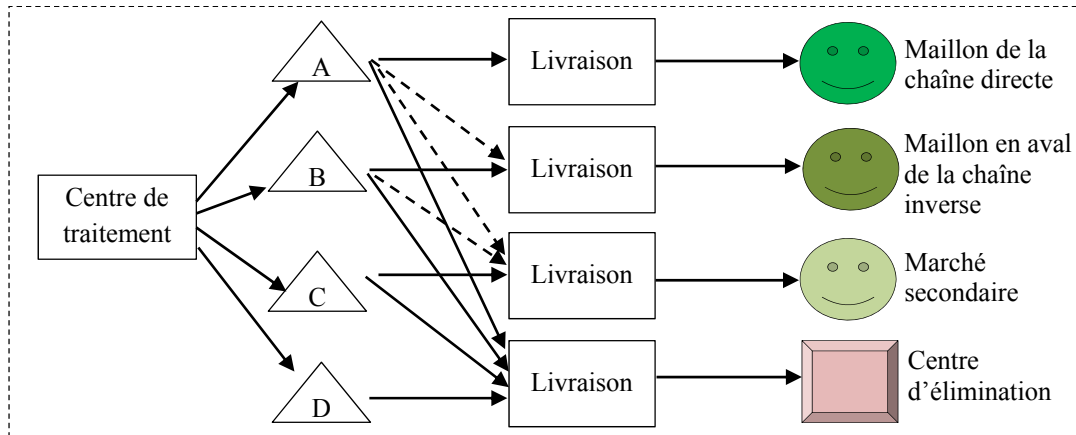


Figure 3.4 : Flux associés à la politique de livraison avec déclassement

3.2 Modèle déterministe - *Wait and See* (WS)

Nous présentons, dans cette section, une formulation mathématique des problèmes de planification de *Collecte-tri* et de planification du *Désassemblage*. Il convient de rappeler que cette formulation est commune aux planifications des deux maillons étudiés. Nous commençons par introduire les indices, les paramètres et les variables utilisés dans les modèles mathématiques de manière générique, et dont certains sont représentés dans la figure 3.5. Ces modèles sont élaborés en programmation linéaire.

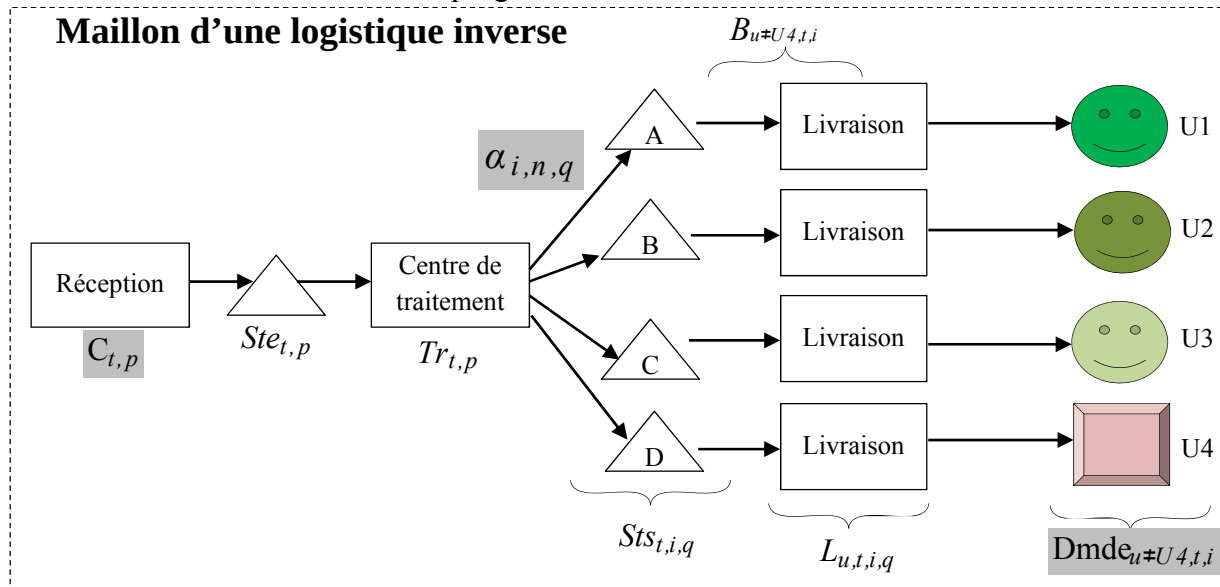


Figure 3.5 : Positionnement des *variables* et paramètres principaux

3.2.1 Les ensembles, paramètres et variables

3.2.1.1 Les ensembles et indices du modèle

Voici la liste des indices et des ensembles utilisés dans ce modèle :

- Les indices :

t	indice identifiant la période
p	indice identifiant un produit entrant
i	indice identifiant un produit sortant
u	indice identifiant la destination du produit ou le client
q	indice identifiant le niveau de qualité d'un produit sortant
n	indice identifiant le numéro de traitement

- Les ensembles de temps, de produits et de qualités :

$T = \{1..h\}$	Ensemble de périodes de l'horizon
$T0 = \{(1-d)..h\}$	Ensemble de périodes de l'horizon en tenant compte du délai de traitement d
$P = \{1..p'\}$	Ensemble de produits entrants
$I = \{1..i'\}$	Ensemble de produits sortants
$Q = \{1..q'\}$	Ensemble des niveaux de qualité. Dans ce travail, nous utiliserons 4 niveaux de qualité q : A = bonne qualité, B = qualité moyenne, C = qualité médiocre et D = mauvaise qualité.
U	Ensemble des sites de destination des produits sortants. Dans ce travail, nous utiliserons quatre destinations : $U1$: Maillon de la chaîne directe $U2$: Maillon aval de la chaîne inverse $U3$: Marché secondaire $U4$: Centre d'élimination
$NumP = \{1..100\}$	Numéro de traitement du produit. Il s'agit du numéro d'ordre du produit depuis le début de la planification du centre de traitement (<i>Collecte-tri</i> ou <i>Désassemblage</i>)

3.2.1.2 Les paramètres du modèle

Voici la liste des paramètres utilisés dans le modèle :

- Les paramètres décrivant le centre de traitement :

$kc_{p,i}$	Coefficient de nomenclature liant le produit entrant p et le produit sortant i
$C_{t,p}$	Quantité de produits p arrivés à la réception à la période t
$\alpha_{i,n,q}$	Quantité, générée aléatoirement, de produits traités i de niveau de qualité q entre le 1 ^{er} traitement et le n ^{ième} . Cette quantité est utilisée pour attribuer de manière aléatoire une qualité aux produits arrivants, qui respecte une clé de

répartition (i.e. un pourcentage fixé *a priori*, notée REP_q) des différentes qualités. Ce paramètre a également été élaboré de manière à avoir, pour un produit i donné, une seule unité supplémentaire entre la n ème et la n plus unième ligne. Voici un exemple de ce paramètre pour les cinq premières lignes d'un produit i :

$\alpha_{i,n,q}$		q			
		A	B	C	D
n	1	0	0	1	0
	2	1	0	1	0
	3	1	0	1	1
	4	1	0	2	1
	5	1	0	2	2

Tableau 3.1 : La quantité de produits aléatoirement traités

Dans ce tableau, à titre d'exemple, la case cerclée de bleu correspondant à la valeur $\alpha_{i,4,C}$ dont la valeur est deux, indique que le quatrième produit traité est de qualité C.

En renseignant, en pourcentage, une clé de répartition prédéfinie de la qualité, notée REP_q , un tirage aléatoire¹² suivant une loi uniforme permet d'obtenir la qualité du produit traité. A titre d'exemple, les valeurs de REP_q , pour les quatre qualités pourraient être : $REP_A = 30\%$, $REP_B = 20\%$, $REP_C = 40\%$ et $REP_D = 10\%$.

- Les paramètres relatifs aux capacités maximales de traitement, de livraison, de stockage et de rupture :

$CapTr_t$	Capacité de traitement pendant la période t
$CapLiv_t$	Capacité de livraison pendant la période t
$MaxSte_t$	Maximum de stocks entrants pendant la période t
$MaxSts_t$	Maximum de stocks sortants pendant la période t
$MaxBack_t$	Maximum de rupture de stocks pendant la période t.

- Les paramètres économiques :

CA_p	Coût d'achat unitaire du produit entrant p
$CSte_p$	Coût de stockage unitaire du produit entrant p
CTr_p	Coût de traitement unitaire du produit entrant p
$CSts_i$	Coût de stockage unitaire du produit sortant i
$Cret_{u,i}$	Coût de rupture de stock unitaire du produit sortant i auprès du client u

¹² Le tirage aléatoire est implémenté avec Microsoft Excel à partir d'un tableau similaire au tableau 3.1.

$CL_{u,i}$	Coût de transport unitaire du produit sortant i entre le centre de traitement et la destination u
$PV_{u,i}$	Prix de vente unitaire du produit sortant i pour le client u .

- Les paramètres définissant l'état initial :

$Ste0_p$	Quantité initiale de stock du produit entrant p
$Sts0_{i,q}$	Quantité initiale de stock du produit sortant i avec le niveau de qualité q
$Tr0_p$	Quantité initiale de produit p en cours de traitement
$BO_{u \neq U4,i}$	Quantité initiale de rupture de stock du produit sortant i auprès du client u (hors « centre d'élimination »)
$Cumul0_i$	Quantité initiale de produits sortis i .

- Les paramètres relatifs aux demandes :

$Dmde_{u \neq U4,t,i}$	Demande de produit i par un client de type u au centre de traitement pendant la période t . Pour rappel, ces demandes concernent tous les sites destinataires à l'exception du centre d'élimination.
------------------------	--

3.2.1.3 Les variables du modèle

Voici la liste des variables utilisées dans le modèle qui sont également représentées dans la figure 3.5 :

- Les variables décrivant les quantités de produits :

$Ste_{t,p}$	Quantité de produits entrants p à stocker pendant la période t
$Tr_{t,p}$	Quantité de produits p à traiter pendant la période t
$Sts_{t,i,q}$	Quantité de produits sortants i de qualité q à stocker pendant la période t
$L_{u,t,i,q}$	Quantité de produits sortants i de qualité q à expédier à la destination u pendant la période t
$B_{u \neq U4,t,i}$	Quantité de produits i en rupture de stock à la fin de la période t pour le client u (hors « centre d'élimination »).

- Les variables relatives aux cumuls et aux transferts de produits, nécessaires pour la modélisation sous contraintes linéaires des affectations de la qualité :

$Cumul_{t,i}$	Quantité cumulée de produits i traités jusqu'à la période t
$TF_{t,i,q}$	Quantité de produits sortants i à transférer au stockage sortant de niveau q pendant la période t
$y_{t,i,n=1...100}$	Variable binaire qui vaut 1 si, à la période t , un produit i est traité en $n^{ième}$ position ; et 0 sinon.

3.2.2 La fonction objectif du modèle

Notre modèle cherche à maximiser le profit. Pour cela, la fonction objectif se décompose en deux grandes parties : les revenus des ventes des produits et les coûts du centre de traitement qui incluent les achats de produits, le stockage des produits entrants et sortants, le traitement des produits, les livraisons des produits et les pénalités de retard pour rupture de stock. La fonction objectif de notre modèle de planification pour un maillon s'exprime ainsi :

$$\text{Profit} = \text{Ventes} - \text{Coûts}, \text{ où} \quad (1.1)$$

$$\text{Ventes} = \sum_{u \in U} \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \sum_{q \in Q} PV_{u,i} * L_{u,t,i,q} \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned} \text{Coûts} = & \sum_u \sum_t \sum_i \sum_q CL_{u,i} * L_{u,t,i,q} + \sum_t \sum_p CA_p * C_{t,p} + \sum_t \sum_p CSte_p * Ste_{t,p} \\ & + \sum_t \sum_p CTr_p * Tr_{t,p} + \sum_t \sum_i \sum_q CSts_i * Sts_{t,i,q} + \sum_{u \in U} \sum_t \sum_i Cret_{u,i} * B_{u,t,i} \end{aligned} \quad (1.3)$$

3.2.3 Les contraintes du modèle

Les variables du modèle sont soumises à un ensemble de contraintes. Ces dernières se traduisent dans le modèle sous forme d'équations ou d'inéquations. Elles correspondent à la modélisation du comportement des flux physiques des produits et aux politiques choisies par les décideurs pour orienter la solution. Nous listons ci-dessous les contraintes du centre de traitement.

- Calcul du cumul

La contrainte (1.4) permet de déterminer, de façon récursive, le cumul sur le temps par catégorie de produits sortants en fonction de la quantité de produits traités ($Tr_{t-d,p}$) et du coefficient de nomenclature ($kc_{p,i}$). Pour ce calcul, nous fixons la valeur initiale $Cumul_{0,i}$ à zéro.

$$Cumul_{t,i} = Cumul_{t-1,i} + \sum_p kc_{p,i} * Tr_{t-d,p} \quad \forall t, \forall i \quad (1.4)$$

Cette contrainte permet de lier les produits entrants p qui sont traités et les produits i sortants du traitement.

- Affectation du niveau de qualité des produits traités

La contrainte (1.5) permet, à chaque période t, de faire le bilan du nombre total de produits i qui seront transférés vers le stock de qualité q depuis le début de l'horizon de planification. Dans cette contrainte ainsi que dans la contrainte (1.6), M est supposé être un grand nombre entier positif.

$$\sum_{tp=1\dots t} TF_{tp,i,q} - \alpha_{i,n,q} \leq M^* (1 - y_{t,i,n}) \quad \forall t, \forall i, \forall q, \forall n = 1\dots 100 \quad (1.5)$$

Par exemple, si $y_{t,i,n}$ vaut 0, la contrainte (1.5) est inopérante. Par contre, si $y_{t,i,n}$ vaut 1, c'est-à-dire si à la période t le produit i est le $n^{\text{ième}}$ produit traité, alors l'inéquation (1.5) devient $\sum_{tp=1\dots t} TF_{tp,i,q} \leq \alpha_{i,n,q}$, ce qui limite le nombre de produits transférés, par le paramètre alpha ($\alpha_{i,n,q}$), généré aléatoirement, indiquant la qualité associée au $n^{\text{ième}}$ produit traité.

- Cohérence de la variable « Cumul »

L'équation (1.6) contraint la variable $Cumul_{t,i}$ à s'incrémenter pour chaque nouveau produit i traité.

$$M^* y_{t,i,n} = (n+1) - Cumul_{t,i} \quad \forall t, \forall i, \forall n = 1\dots 100 \quad (1.6)$$

- Relation entre les produits traités et les produits transférés dans les stocks

La contrainte (1.7) assure la non-perte des produits entre leur traitement et leur arrivée dans les stocks de produits sortants. Il faut ainsi vérifier, à chaque période, et pour chaque produit sortant, que la somme des quantités de produits transférés soit égale à celle des produits traités en respectant le coefficient de nomenclature.

$$\sum_q TF_{t,i,q} = \sum_p kc_{p,i} * Tr_{t-d,p} \quad \forall t, \forall i \quad (1.7)$$

Il convient de noter que dans l'application du maillon *Collecte-tri*, les coefficients de nomenclature sont des paramètres de type binaire (1 produit entrant donne 1 produit sortant) alors que dans le maillon *Désassemblage*, ils sont représentés par des paramètres de type entier (1 produit entrant peut donner plusieurs exemplaires de plusieurs composants sortants).

- Respect des capacités de traitement et de transport

La contrainte (1.8) traduit le respect de capacité de traitement à chaque période. Le total des quantités de produit à trier ($\sum_p Tr_{t,p}$) ne doit pas dépasser la limite de la capacité de traitement ($CapTr_t$).

$$\sum_p Tr_{t,p} \leq CapTr_t \quad \forall t \quad (1.8)$$

La contrainte (1.9) concerne le respect de la capacité de livraison au regard des quantités de produits livrés à chaque période t qui sont définies par la variable ($L_{u,t,i,q}$). Les moyens de transport sont ainsi pris en compte conjointement à leur capacité. Cela permet de supposer qu'un certain nombre de moyens de transport sont disponibles à chaque période pour livrer les produits vers les clients.

$$\sum_u \sum_i L_{u,t,i,q} \leq CapLiv_t \quad \forall t, \forall q \quad (1.9)$$

- Respect des capacités de stockage

Les contraintes (1.10 et 1.11) concernent le respect des maximums de stocks entrants et sortants ; cela traduit les limites d'utilisation de l'espace physique disponible associé aux stocks.

$$\sum_p Ste_{t,p} \leq MaxSte_t \quad \forall t \quad (1.10)$$

$$\sum_i \sum_q Sts_{t,i,q} \leq MaxSts_t \quad \forall t \quad (1.11)$$

- Respect des capacités de ruptures de stocks

La contrainte 1.12 assure le respect des limites autorisées de ruptures de stocks.

$$\sum_i B_{u,t,i} \leq MaxBack_t \quad \forall u \neq U4, \forall t \quad (1.12)$$

- Conservation des stocks de produits

Les contraintes (1.13) et (1.14) décrivent la conservation et l'évolution des stocks des produits ; ceci concerne à la fois les produits entrants et sortants du centre.

La première contrainte calcule les stocks de produits entrants en fonction des quantités des produits reçus ($C_{t,p}$) et traités ($Tr_{t,p}$) à la période courante (t) et de la quantité des produits entrants en stock à la période précédente ($Ste_{t-1,p}$).

La seconde contrainte évalue à chaque période le stock de produits triés de qualité q en fonction :

- de la quantité des produits transférés ($TF_{t,i,q}$) dans le stock ;
- de la quantité des produits livrés ($L_{u,t,i,q}$) vers les diverses destinations ;
- de la quantité des produits sortants en stock à la période précédente ($Sts_{t-1,i,q}$).

$$Ste_{t,p} = Ste_{t-1,p} + C_{t,p} - Tr_{t,p} \quad \forall t, \forall p \quad (1.13)$$

$$Sts_{t,i,q} = Sts_{t-1,i,q} + TF_{t,i,q} - \sum_u L_{u,t,i,q} \quad \forall t, \forall i, \forall q \quad (1.14)$$

- Initialisation des variables

Les contraintes suivantes (1.15 - 1.19) affectent des valeurs initiales aux variables du modèle :

- Les stocks initiaux de produits entrants ;

$$Ste_{0,p} = Ste_{0,p} \quad \forall p \quad (1.15)$$

- Les stocks initiaux de produits sortants ;

$$Sts_{0,i,q} = Sts_{0,i,q} \quad \forall i, \forall q \quad (1.16)$$

- Les quantités initiales des produits en cours de traitement ;

$$Tr_{0,p} = Tr_{0,p} \quad \forall p \quad (1.17)$$

- Les ruptures initiales de stocks ;

$$B_{u,0,i} = B_{u,0,i} \quad \forall u \neq U4, \forall i \quad (1.18)$$

- Les cumuls initiaux de produits ;

$$Cumul_{0,i} = 0 \quad \forall i \quad (1.19)$$

Les contraintes (1.15 à 1.19) ne sont pas définies sur tout l'horizon, mais seulement à une période donnée. Il s'agit plus précisément de la période de temps précédant le début de la simulation (i.e. $t = 0$ pour les stocks, les traitements, les ruptures de stocks et les cumuls).

- Stratégies de contrôle des qualités de produits livrés

Les stratégies de contrôle des qualités de produit consistent à livrer des produits traités aux clients soit avec une politique de livraison sans déclassement, soit avec une politique de livraison avec déclassement. Pour cela, l'un ou l'autre des jeux de contraintes suivants seront activés.

- **Politique de livraison sans-déclassement**

Autorisation d'expédition	Maillon de la chaîne directe (U1)	Maillon de la chaîne inverse (U2)	Marché secondaire (U3)	Centre d'élimination (U4)
<i>Q = A : bon</i>	<i>oui</i>	<i>non</i>	<i>non</i>	<i>Oui</i>
<i>Q = B : moyen</i>	<i>non</i>	<i>oui</i>	<i>non</i>	<i>Oui</i>
<i>Q = C : médiocre</i>	<i>non</i>	<i>non</i>	<i>oui</i>	<i>Oui</i>
<i>Q = D : mauvais</i>	<i>non</i>	<i>non</i>	<i>non</i>	<i>Oui</i>

Tableau 3.2 : Autorisation d'expédition dans une politique sans déclassement

Les contraintes (1.20 à 1.22) représentent l'autorisation de livraison en fonction de la qualité du produit.

- La première contrainte (1.20) assure qu'un produit de qualité A ne peut être expédié que vers un maillon de la chaîne directe (U1) ou être déclassé, en cas de surstock, vers le centre d'élimination (U4). Pour cela, les livraisons des produits sortants de qualité B, C et D vers ce maillon U1 sont interdites.
- La contrainte (1.21) assure qu'un produit de qualité B peut être expédié uniquement vers le maillon aval de la chaîne inverse (U2) ou être déclassé, en cas de surstock, vers

le centre d'élimination (U4). Pour cela, les livraisons des produits sortants de qualité A, C et D vers ce maillon U2 sont interdites.

- La troisième contrainte interdit les livraisons des produits sortants de qualité A, B et D vers le marché secondaire (U3). En cas de surstock, le produit de qualité C peut être déclassé vers le centre d'élimination (U4).

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{U1,t,i,q} = 0 \\ L_{U2,t,i,q} = 0 \\ L_{U3,t,i,q} = 0 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \forall t, \forall i, \forall q \in \{B, C, D\} \\ \forall t, \forall i, \forall q \in \{A, C, D\} \\ \forall t, \forall i, \forall q \in \{A, B, D\} \end{array} \quad \begin{array}{l} (1.20) \\ (1.21) \\ (1.22) \end{array}$$

Politique de livraison avec déclassement

Autorisation d'expédition	Maillon de la chaîne directe (U1)	Maillon de la chaîne inverse (U2)	Marché secondaire (U3)	Centre d'élimination (U4)
Q = A : bon	<i>oui</i>	<i>oui</i>	<i>oui</i>	<i>Oui</i>
Q = B : moyen	<i>non</i>	<i>oui</i>	<i>oui</i>	<i>Oui</i>
Q = C : médiocre	<i>non</i>	<i>non</i>	<i>oui</i>	<i>Oui</i>
Q = D : mauvais	<i>non</i>	<i>non</i>	<i>non</i>	<i>Oui</i>

Tableau 3.3 : Autorisation d'expédition dans une politique de déclassement

Les contraintes (1.20 à 1.22) représentent l'autorisation de livraison en fonction de la qualité de produit.

- La première contrainte assure qu'aucun produit de qualité inférieure à A ne peut être expédié vers un maillon de la chaîne directe (U1). Pour cela, les livraisons des produits sortants de qualité B, C et D sont fixées à zéro.
- La seconde contrainte assure de la même façon que les produits sortants de qualité inférieure à B ne peuvent être envoyés vers un maillon de la chaîne inverse (U2).
- La troisième contrainte interdit les livraisons des produits sortants de qualité D vers le marché secondaire (U3).

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{U1,t,i,q} = 0 \\ L_{U2,t,i,q} = 0 \\ L_{U3,t,i,q=D} = 0 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \forall t, \forall i, \forall q \in \{B, C, D\} \\ \forall t, \forall i, \forall q \in \{C, D\} \\ \forall t, \forall i \end{array} \quad \begin{array}{l} (1.20) \\ (1.21) \\ (1.22) \end{array}$$

- Respect des demandes de livraison

La contrainte (1.23) assure que la somme des produits livrés du niveau de qualité requis vers les clients à chaque période est inférieure ou égale à la demande de clients majorée des ruptures de stock précédentes ($B_{u,t-1,p}$).

$$\sum_q L_{u,t,i,q} \leq Dmde_{u,t,i} + B_{u,t-1,i} \quad \forall u, \forall t, \forall i \quad (1.23)$$

- Evolution des ruptures de stock

La contrainte (1.24) permet d'exprimer l'évolution des ruptures de stock comme la différence entre la demande des clients et la livraison des produits sortants vers ces clients. La variable ($B_{u,t,p}$) exprime le nombre de produits livrés en retard vers les diverses destinations, excepté U4 (centre d'élimination) qui n'a pas de demande associée.

$$B_{u,t,p} = Dmde_{u,t,i} + B_{u,t-1,i} - \sum_q L_{u,t,i,q} \quad \forall u \neq U4, \forall t, \forall i \quad (1.24)$$

Notre modèle déterministe est maintenant complet. Nous allons maintenant passer à la description du modèle stochastique obtenu à partir de ce modèle déterministe.

3.3 Modèle stochastique - *Recourse Problem* (RP)

La modélisation en programmation linéaire stochastique est basée sur la modélisation déterministe et vise à prendre en compte l'incertitude de certains paramètres. Dans notre cas, l'incertitude porte sur le niveau de qualité des produits reçus qui est connu après traitement. Nous avons alors formulé un programme stochastique avec une approche par scénario répondant à ce problème dans laquelle chaque scénario représente un niveau de qualité possible des produits entrants. Cela engendre des variables qui pourront prendre des valeurs différentes en fonction des scénarios. Ainsi, en suivant le processus de traitement d'un maillon depuis l'amont jusqu'à l'aval représenté en figure 3.1, toutes les variables se situant après l'affectation du niveau de qualité se verront affecter d'un nouvel indice s identifiant le scénario. Globalement, il s'agit des plans de stockage des produits sortants, des plans de livraison des produits et des plans de ruptures de stock.

Nous avons choisi de représenter l'incertitude sur la qualité des produits à l'aide d'un certain nombre de scénarios, noté « NbreS ». A titre d'exemple, il est possible, dans notre cas, de considérer 5 scénarios :

- Le scénario 1 correspond à une majorité de produits de très bonne qualité ;
- Le scénario 2 correspond à une majorité de produits de bonne qualité ;
- Le scénario 3 correspond aux produits de qualité moyenne ;
- Le scénario 4 correspond à une majorité de produits de mauvaise qualité ;
- Le scénario 5 correspond à une majorité de produits de très mauvaise qualité.

En référence à l'approche basée sur les scénarios que nous allons utiliser, le modèle stochastique sera aussi appelé, dans la suite de ce travail, **modèle RP** pour *Recourse Problem*, comme cela est souvent le cas dans la littérature.

Notre modèle RP se base sur le modèle déterministe décrit dans la section 3.2. Dans le paragraphe suivant, nous présentons uniquement les modifications apportées au modèle déterministe, c'est-à-dire les éléments spécifiques du modèle RP.

3.3.1 Les ensembles, paramètres et variables

3.3.1.1 Nouvel ensemble représentant les scénarios

$S = \{1..s\}$ Ensemble des scénarios.

Nous associons une probabilité d'occurrence π_s à chaque scénario s .

3.3.1.2 Les nouveaux paramètres

$\alpha_{s,i,n,q}$ Quantité, générée aléatoirement, de produits traités i de niveau de qualité q entre le 1^{er} traitement et le $n^{\text{ième}}$, pour le scénario s . Ce nouveau paramètre permet de définir les scénarios et remplace le paramètre $\alpha_{i,n,q}$ (cf. § 3.2.1.2) du modèle déterministe. Il est généré à l'aide de la clé de répartition $REPs,q$.

π_s Probabilité d'occurrence du scénario s .

3.3.1.3 Les variables

Nous donnons une formulation stochastique du modèle dans laquelle les scénarios indexés par s se distinguent par des plans de stockage de produits sortants, des plans de livraison et de plans de rupture de stocks différents. Ceci se traduit au niveau des variables suivantes du modèle :

$Sts_{s,t,i,q}$ Quantité de produits sortants i associés au niveau de qualité q à stocker dans le scénario s pendant la période t .

$L_{s,u,t,i,q}$ Quantité de produits sortants associés au niveau de qualité q à expédier au destinataire u dans le scénario s pendant la période t .

$B_{s,u\neq 4,t,i}$ Quantité de produits p en rupture de stock à la fin de la période t pour le client u (hors « centre d'élimination ») dans le scénario s .

$TF_{s,t,i,q}$ Quantité de produits sortants de niveau de qualité q à transférer au stockage sortant dans le scénario s pendant la période t . Il convient de rappeler que, contrairement aux précédentes, cette variable ne représente pas directement un plan du processus de planification entre l'approvisionnement et la demande ; il s'agit d'une variable auxiliaire liée à la modélisation sous contraintes linéaires des affectations de qualité.

3.3.2 La fonction objectif du modèle

De manière similaire au modèle WS, le modèle stochastique cherche à maximiser les profits de cette entreprise en prenant en compte l'ensemble des scénarios.

$$Profit = Ventres - Coûts, \text{ où} \quad (1.25)$$

$$Ventes = \sum_s \sum_{u \neq U4} \sum_t \sum_i \sum_q \pi_s * PV_{u,i} * L_{s,u,t,i,q} \quad (1.26)$$

$$\begin{aligned} Coûts = & \sum_s \sum_{u \neq U4} \sum_t \sum_i \sum_q \pi_s * CL_{u,i} * L_{s,u,t,i,q} + \sum_t \sum_p CA_p * C_{t,p} + \sum_t \sum_p CSte_p * Ste_{t,p} \\ & + \sum_t \sum_p CTr_p * Tr_{t,p} + \sum_s \sum_t \sum_i \sum_q \pi_s * CSts_i * Sts_{t,i,q} + \sum_s \sum_{u \neq U4} \sum_t \sum_i \pi_s * Cret_{u,i} * B_{u,t,i} \end{aligned} \quad (1.27)$$

3.3.3 Les contraintes du modèle

Nous remarquons que les nouveaux paramètres et variables dépendants des scénarios remplacent les paramètres et variables correspondants du modèle déterministe. Les contraintes utilisant ces nouveaux éléments sont ainsi mises à jour.

- Relation entre les produits traités et les produits transférés dans les stocks

La contrainte (1.28) est une mise à jour de la contrainte (1.7).

$$\sum_q TF_{s,t,i,q} = \sum_p kc_{p,i} * Tr_{t-d,p} \quad \forall s, \forall t, \forall i \quad (1.28)$$

- Affectation du niveau de qualité des produits traités

La contrainte (1.29) reprend la contrainte (1.5).

$$\sum_{tp=1 \dots t} TF_{s,tp,i,q} - \alpha_{s,i,n,q} \leq M * (1 - y_{t,i,n}) \quad \forall s, \forall t, \forall i, \forall q, \forall n = 1 \dots 100 \quad (1.29)$$

- Respect des capacités de traitement et de transport

La contrainte (1.30) est la mise à jour de la contrainte (1.9).

$$\sum_u \sum_i L_{s,u,t,i,q} \leq CapLiv_t \quad \forall s, \forall t, \forall q \quad (1.30)$$

- Respect des capacités de stockage pour chaque scénario

La contrainte (1.31) adapte la contrainte (1.11) du modèle déterministe.

$$\sum_i \sum_q Sts_{s,t,i,q} \leq MaxSts_t \quad \forall s, \forall t \quad (1.31)$$

- Respect des capacités de ruptures de stock pour chaque scénario

La contrainte (1.32) assure, dans le modèle stochastique, l'équivalent de la contrainte (1.12).

$$\sum_i B_{s,u,t,i} \leq \text{MaxBack}_t \quad \forall s, \forall u \neq U4, \forall t \quad (1.32)$$

- Conservation des stocks de produits pour chaque scénario

La contrainte (1.33) est une mise à jour de la contrainte (1.14).

$$Sts_{s,t,i,q} = Sts_{s,t-1,i,q} + TF_{s,t,i,q} - \sum_u L_{s,u,t,i,q} \quad \forall s, \forall t, \forall i, \forall q \quad (1.33)$$

- Initialisation des variables

Les contraintes (1.34) et (1.35) reprennent respectivement les contraintes (1.16) et (1.18) du modèle déterministe.

- Les stocks initiaux de produits sortants de chaque scénario

$$Sts_{s,0,i,q} = Sts_{0,i,q} \quad \forall s, \forall i, \forall q \quad (1.34)$$

- Les ruptures initiales de stock de chaque scénario

$$B_{s,u,0,i} = B_{0,u,i} \quad \forall s, \forall u \neq U4, \forall i \quad (1.35)$$

- Stratégies de contrôle des qualités des produits livrés dans le scénario

De la même façon que dans le modèle déterministe, nous retrouvons dans le modèle stochastique les deux politiques de livraison : sans ou avec déclassement.

- Les contraintes (1.20 à 1.22) sont reprises en stochastique pour devenir les nouvelles contraintes (1.36 à 1.38) dans le cas sans-déclassement.

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{s,U1,t,i,q} = 0 \\ L_{s,U2,t,i,q} = 0 \\ L_{s,U3,t,i,q} = 0 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \forall s, \forall t, \forall i, \forall q \in \{B, C, D\} \\ \forall s, \forall t, \forall i, \forall q \in \{A, C, D\} \\ \forall s, \forall t, \forall i, \forall q \in \{A, B, D\} \end{array} \quad \begin{array}{l} (1.36) \\ (1.37) \\ (1.38) \end{array}$$

- Les contraintes (1.20 à 1.22) pour la politique de livraison avec déclassement sont aussi reprises par les contraintes (1.36 à 1.38).

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{s,U1,t,i,q} = 0 \\ L_{s,U2,t,i,q} = 0 \\ L_{s,U3,t,i,q=D} = 0 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \forall s, \forall t, \forall i, \forall q \in \{B, C, D\} \\ \forall s, \forall t, \forall i, \forall q \in \{C, D\} \\ \forall s, \forall t, \forall i \end{array} \quad \begin{array}{l} (1.36) \\ (1.37) \\ (1.38) \end{array}$$

- Respect des demandes de livraison

La contrainte (1.23) est aussi mise à jour puisque les livraisons sont désormais définies par des scénarios.

$$\sum_q L_{s,u,t,i,q} \leq Dmde_{u,t,i} + B_{s,u,t-1,i} \quad \forall s, \forall u, \forall t, \forall i \quad (1.39)$$

- Evolution des ruptures de stock pour chaque scénario

La contrainte (1.40) reprend la contrainte (1.24). Elle permet d'exprimer l'évolution des ruptures de stock : différence entre la demande des clients et la livraison des produits sortants vers ces clients dans le scénario considéré. La variable $(B_{s,u,t,p})$ exprime dans le scénario « s », le nombre de produits livrés en retard vers les diverses destinations, excepté U4 (centre d'élimination) qui n'a pas de demande associée.

$$B_{s,u,t,p} = Dmde_{u,t,i} + B_{s,u,t-1,i} - \sum_q L_{s,u,t,i,q} \quad \forall s, \forall u \neq U4, \forall t, \forall i \quad (1.40)$$

Notre modélisation en programmation linéaire stochastique est basée sur la modélisation déterministe et vise à prendre en compte l'incertitude de certains paramètres qui porte sur le niveau de qualité des produits après traitement et son devenir. Tous les autres paramètres restent identiques comme les coefficients de nomenclature, les coûts ou encore les conditions initiales.

Nous allons ensuite passer à la description du modèle d'évaluation stochastique afin de confirmer la démarche de l'approche stochastique.

3.4 Evaluation de la performance de la chaîne logistique inverse

Afin de pouvoir évaluer et comparer les résultats de divers jeux de données (i.e. paramètres) associés à nos modèles, il nous faut mettre en place un système d'indicateurs de performance généraux de la chaîne logistique inverse. Dans la suite de ce travail, nous allons présenter et définir les indicateurs suivants : le niveau de stock, le nombre de rupture de stock, le taux de rupture de stock, le taux de livraison, le taux de déclassement, et le taux d'élimination. Il convient de noter que la plupart de ces indicateurs ont été présentés d'un point de vue général dans le chapitre deux (§ 2.2.1). Il s'agit à ce stade de détailler la mise en œuvre de ces indicateurs sur les modèles spécifiés aux paragraphes 3.2 et 3.3.

3.4.1 Le niveau de stock

Le niveau de stock est sur l'ensemble de l'horizon simplement la somme cumulée des quantités de produits dans les stocks entrants et sortants du maillon. Ce calcul ne différencie pas le type de produits ou composants. Il fait donc un décompte de l'ensemble des produits stockés. Avec les notations utilisées dans notre modèle générique, ce niveau peut s'exprimer comme suit :

$$NS = \sum_t \sum_p Ste_{t,p} + \sum_t \sum_i \sum_q Sts_{t,i,q} \quad (1.41)$$

3.4.2 Le nombre de ruptures

Le nombre de ruptures de stock est sur l'ensemble de l'horizon le cumul effectué des différences, à chaque période, entre les demandes des clients (usine de la chaîne directe et inverse, et marché secondaire) et les livraisons des produits associés au niveau de qualité requis. On peut l'exprimer comme suit :

$$NR = \sum_{u \neq U4} \sum_t \sum_i Dmde_{u,t,i} - \sum_{u \neq U4} \sum_t \sum_i \sum_q L_{u,t,i,q} \quad (1.42)$$

3.4.3 Le taux de rupture de stock

Le taux de rupture de stock, appelé « Tr », est égal au ratio entre le nombre de rupture de stock et les demandes formulées par des clients des usines de la chaîne directe, de la chaîne inverse, et du marché secondaire. Ce taux est ainsi décrit :

$$Tr(\%) = \frac{\sum_{u \neq U4} \sum_t \sum_i Dmde_{u,t,i} - \sum_{u \neq U4} \sum_t \sum_i \sum_q L_{u,t,i,q}}{\sum_{u \neq U4} \sum_t \sum_i Dmde_{u,t,i}} = \frac{NR}{\sum_{u \neq U4} \sum_t \sum_i Dmde_{u,t,i}} \quad (1.43)$$

3.4.4 Le taux de livraison par qualité

Le taux de livraison par qualité, noté « TL_q », permet de connaître la répartition des livraisons par niveau de qualité. Il correspond au ratio entre le nombre de produits livrés de qualité q vers toutes les destinations et le nombre total des livraisons. Le taux de livraison par qualité peut s'exprimer comme suit :

$$TL_q(\%) = \frac{\sum_U \sum_t \sum_i L_{u,t,i,q}}{\sum_U \sum_t \sum_i \sum_{q'} L_{u,t,i,q'}} \times 100 \quad (1.44)$$

3.4.5 Le taux de déclassement

Le taux de déclassement, appelé « Td », est égal au ratio entre les quantités de produits déclassés et l'ensemble des produits livrés aux clients et au centre d'élimination. Pour rappel (cf § 3.1.3.2), un déclassement ne peut se faire que :

- pour satisfaire une demande de l'usine de la chaîne inverse et du marché secondaire en cas de manque de produits de la qualité correspondante ;

- pour envoyer un produit au centre d'élimination, en cas de surstock.

Pour comptabiliser le nombre de produits déclassés, il suffit de compter le nombre de produits d'une certaine qualité, livrés à une destination ne correspondant pas à cette qualité. Par exemple, pour le premier terme du numérateur de la formule suivante (1.45), il est compté, pour chaque période, le nombre de produits de qualité A, donc de très bonne qualité normalement destinés à U1, qui sont livrés vers les destinations U2, U3 et U4. Le second terme compte les produits de qualité B normalement destinés à U2, livrés vers U3 et U4.

$$Td(\%) = \frac{\sum_{\{U2,U3,U4\}} \sum_t \sum_i L_{u,t,i,A} + \sum_{\{U3,U4\}} \sum_t \sum_i L_{u,t,i,B} + \sum_{U4} \sum_t \sum_i L_{u,t,i,C}}{\sum_U \sum_t \sum_i \sum_q L_{u,t,i,q}} \times 100 \quad (1.45)$$

Ce taux permet de mesurer un certain degré d'inadéquation entre la quantité de produits traités et les demandes des clients.

3.4.6 Le taux d'élimination

Le taux d'élimination, appelé « Te » est égal au ratio entre les quantités de produits livrés uniquement au centre d'élimination $U4$ et l'ensemble des livraisons. Ce taux s'exprime ainsi :

$$Te(\%) = \frac{\sum_t \sum_i \sum_q L_{u4,t,i,q}}{\sum_U \sum_t \sum_i \sum_q L_{u,t,i,q}} \times 100 \quad (1.46)$$

Ce taux mesure la part de produits envoyés au centre d'élimination. Un taux important pourrait signifier que la capacité de traitement et/ou de stockage est insuffisante par rapport à l'ensemble des produits reçus. Pour augmenter la capacité de traitement, les décideurs pourraient alors augmenter le nombre d'heures supplémentaires, augmenter le nombre d'équipes, mettre en place une nouvelle ligne de traitement, ou encore implanter un nouveau site de traitement.

3.5 Modèle d'évaluation stochastique (EEV)

Le « modèle d'évaluation stochastique », noté EEV (*Expected result of using the EV solution*) évoqué au chapitre 2 (§ 2.2.2), est défini comme un modèle d'évaluation du modèle stochastique afin de vérifier s'il est pertinent de le mettre en œuvre, notamment par rapport au modèle déterministe.

Ce modèle EEV est semblable au modèle stochastique. On y retrouve donc la notion de scénarios, la même fonction objectif et les mêmes contraintes.

La différence vient du fait que certaines variables sont assignées *a priori* et ne dépendent plus des scénarios. Dans ces conditions, ces « variables » n'en sont plus à proprement parler. Elles sont donc transformées en paramètres. Elles sont instanciées par les résultats du *scénario moyen* issu du modèle déterministe que nous « introduisons » dans le modèle EEV. Le scénario moyen correspond au scénario dans lequel le paramètre définissant le niveau de qualité $\alpha_{i,n,q}$ prend la valeur du tirage aléatoire avec une répartition moyenne $\overline{REP_{s,q}}$.

Le choix des variables à introduire dans le modèle d'évaluation constitue en lui-même un problème délicat. Dans l'exemple de planification stochastique des activités du fermier présenté au chapitre 2 (§ 2.1.2), il s'agissait des variables correspondant à un premier niveau temporel de décision : le choix des cultures sur les sols. Le reste des variables concernaient le second niveau temporel de décision : les quantités de céréales à vendre. Ces décisions respectent l'ordre chronologique : l'une à prendre avant le semis, l'autre après la récolte.

Dans notre problème de logistique inverse, nous avons choisi de prendre comme décision de premier niveau les variables des stocks entrants et des traitements. La décision de second niveau concerne toutes les autres variables qui sont postérieures au traitement : les quantités transférées dans les stocks, les niveaux de stock, les livraisons et les ruptures de stock. Nous suivons donc le séquençement des opérations propre au flux des produits dans l'entreprise, et respectons ainsi également une forme de chronologie.

Une autre solution de modélisation aurait été de choisir comme décision de premier niveau toutes les variables des τ premières périodes, puis, au second niveau de décision, les variables des périodes restantes sur l'horizon. Ce découpage aurait donc été purement chronologique. Cela ne nous a pas paru pertinent car cette procédure imposerait les décisions sur les τ premières périodes, ce qui correspond plus ou moins à mettre en place un horizon gelé dans la décision de planification, ce qui a déjà été étudié dans la littérature. De surcroît, des expérimentations préliminaires et limitées, non reportées dans ce manuscrit, n'ont pas permis de déceler de manière évidente l'intérêt de cette solution alternative. Cette approche resterait toutefois à étudier de manière plus exhaustive.

Les modifications à apporter au modèle stochastique pour obtenir le modèle EEV sont listées ci-dessous. Il s'agit simplement de la liste des variables du modèle stochastique transformées en paramètres et correspondant aux résultats du scénario moyen issu du modèle déterministe.

Les paramètres du modèle

$Ste_{t,p}$ Quantité de produits entrants p à stocker pendant la période t ;

$Tr_{t,p}$ Quantité de produit p à traiter pendant la période t ;

Les autres variables du modèle stochastique sont inchangées.

3.5.1 Processus d'évaluation

Le processus d'évaluation est un processus permettant de comparer et de valider l'intérêt du modèle stochastique par rapport au résultat du modèle déterministe de planification pour chacun des deux maillons. Il se déroule en trois étapes différentes représentées sur la figure

3.6 et mettant en œuvre successivement : le modèle déterministe (WS), le modèle stochastique (RP) et le modèle d'évaluation stochastique (EEV).

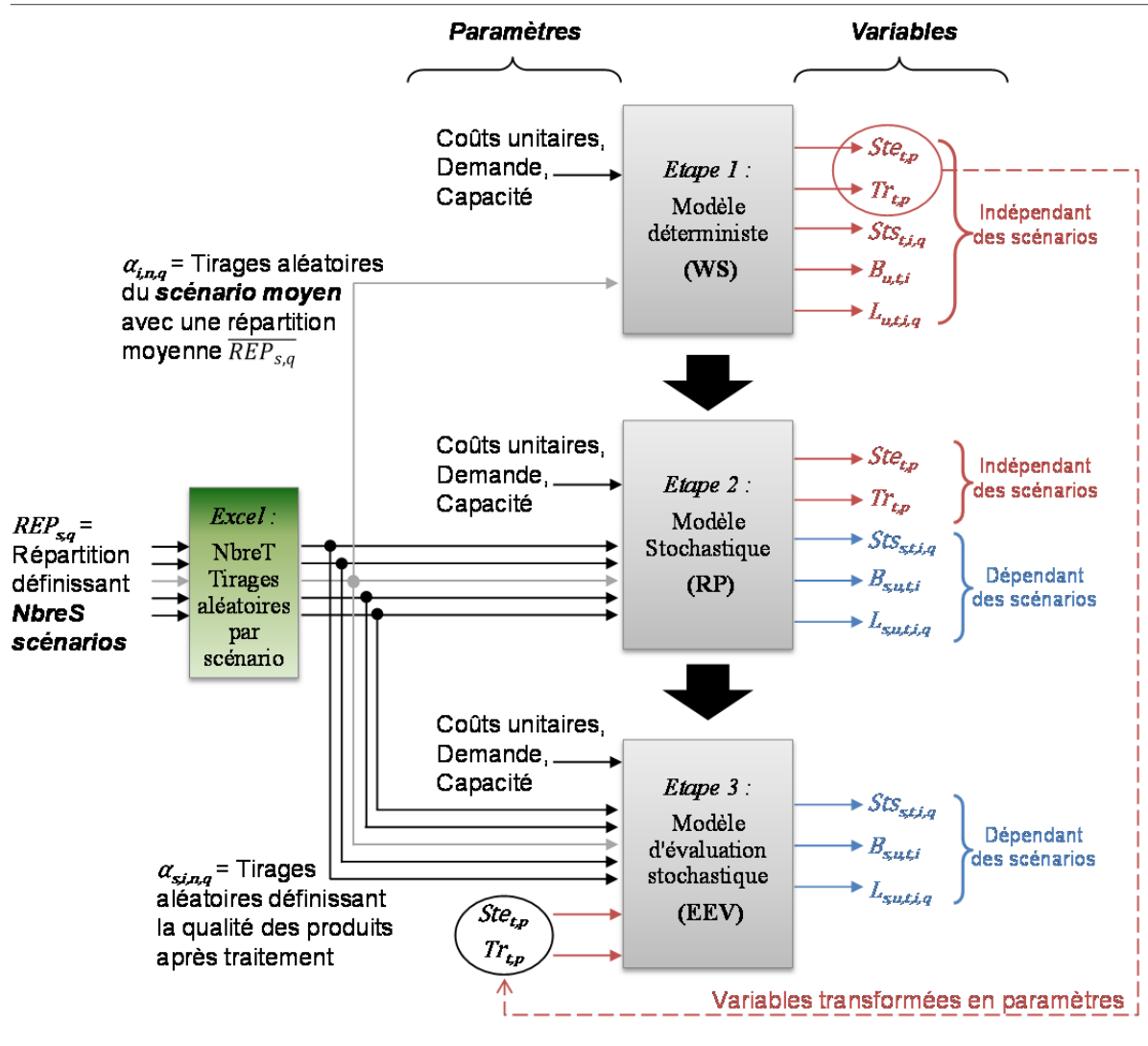


Figure 3.6 : Processus d'exécution des modèles

Le processus d'exécution et d'évaluation des modèles commence par le choix d'un jeu de données correspondant à une instantiation de tous les paramètres du modèle, tels que les coûts, les approvisionnements, les différents paramètres initiaux, mais aussi les paramètres définissant les scénarios du modèle stochastique, c'est-à-dire les répartition des produits suivant la qualité notée $REPs,q$ qui représente les pourcentages de niveau de qualité (%A, %B, %C et %D) pour chacun des « NbreS » scénarios. Ces répartition sont faites de façon à ce que la répartition du scénario moyen corresponde aux valeurs moyennes de l'ensemble des « NbreS » scénarios, et servent notamment de paramètres pour le modèle déterministe (WS).

Par ailleurs, il convient de rappeler que les valeurs du paramètre $\alpha_{s,i,n,q}$, sont obtenues par tirage aléatoire à partir d'une loi statistique uniforme. En conséquence, le processus d'exécution des modèles consiste, pour chaque répartition de qualité ($REPs,q$), à effectuer

NbreT tirages aléatoires, afin d'éviter d'obtenir des résultats ne dépendant que d'un seul tirage qui peut être un tirage non représentatif. Cette répétition d'exécutions de modèles dont les paramètres dépendent de lois statistiques afin d'obtenir des résultats moyens plus robustes est couramment utilisée dans le domaine de la simulation des systèmes à événements discrets et correspond à la notion de « réplication ». Les indicateurs de performance sont alors calculés en faisant la moyenne des résultats issus des NbreT tirages.

De manière détaillée, les différentes étapes d'utilisation des modèles présentées en Figure 3.6 sont les suivantes :

- Une fois les paramètres fixés, il est possible de passer à la première étape qui consiste à lancer le modèle déterministe (WS) et en récupérer les résultats, c'est-à-dire les valeurs des variables, comme indiqué dans la figure 3.6. On rappelle que dans ce modèle, les paramètres (par exemple : coûts, demande, capacité) sont considérés comme fixes ; ils ne font l'objet d'aucune incertitude. On peut lancer le modèle déterministe sur l'ensemble des scénarios et des tirages. Cependant, il est important de résoudre le scénario moyen, afin de récupérer à cette étape les résultats de deux variables qui seront transformées en paramètres pour l'étape 3.
- La seconde étape consiste à lancer le modèle stochastique (RP). Ce modèle tient compte de l'incertitude sur la répartition de la qualité, définie par NbreS scénarios. Certaines variables dépendent des scénarios (variables indicés en « s ») : $Sts_{s,t,i,q}$, $L_{s,u,t,i,q}$ et $B_{s,u \neq U4,t,i}$. Le modèle stochastique est lancé pour les NbreT tirages aléatoires et les indicateurs de performance sont établis par la moyenne des NbreT résultats correspondants.
- La troisième étape correspond au modèle d'évaluation stochastique (EEV). Comme nous l'avons expliqué précédemment, la formulation mathématique du modèle EEV est proche de celle du modèle stochastique. Par contre, nous récupérerons les résultats de deux variables $Ste_{t,p}$ et $Tr_{t,p}$ issues du modèle déterministe à l'étape 1, puis nous les transformons à cette étape 3 en paramètres qui ne dépendent pas des différents scénarios. Comme en étape 2, le modèle EEV est lancé pour les NbreT tirages aléatoires et les indicateurs de performance sont établis par la moyenne des NbreT résultats correspondants.

3.5.2 Mise en œuvre des indicateurs de performance stochastique

Le processus d'évaluation présenté précédemment permet donc de calculer les indicateurs définis dans la section 2.1.2 : l'indicateur EVPI définissant la « Valeur Attendue de l'Information Parfaite » (§2.1.2.1), l'indicateur VSS définissant la « Valeur de la Solution Stochastique » (§2.1.2.2), et les indicateurs connexes définissant la « Valeur de la Solution Déterministe et Stochastique » (VSDS) et la « Valeur de la Solution Déterministe et Evaluation Stochastique » (VSDE).

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une modélisation mathématique en programmation linéaire pour la planification d'activités de deux maillons (*Collecte-tri* et *Désassemblage*) de la chaîne logistique inverse. Ces maillons sont formalisés par des modèles multi-produit et multi-période.

Notre travail se focalise sur la planification d'activités liées à la chaîne inverse, sur un niveau tactique, c'est-à-dire à moyen terme, afin de traiter le problème des deux maillons. Notre modèle cherche à maximiser le profit du maillon considéré. Pour cela, la fonction objectif se décompose en deux grandes parties : les revenus des ventes et les coûts de l'entreprise. Nous évaluons les indicateurs de performance d'un modèle stochastique par rapport au modèle déterministe ainsi que les taux liés au déclassement, aux ruptures de stocks et à l'élimination.

Le chapitre suivant présentera un cas d'application issu de l'industrie pour valider les modèles de planification de ces deux maillons.

Chapitre 4 : Etude expérimentale : application à la planification des activités de *collecte-tri* et de *désassemblage* d'une entreprise de négoce et de démantèlement

Dans ce chapitre, nous présentons les exemples et les applications numériques du modèle de planification de collecte-tri et de désassemblage dans les cas déterministe et stochastique. Pour cela, la société CODIMATRA, que nous avons visitée dans le cadre doctoral, nous a généreusement fourni des informations permettant de générer un jeu de données nécessaires pour nos modèles. Il sera ainsi possible de valider la modélisation mathématique. Pour rappel, cette modélisation « générique » peut s'appliquer pour le maillon de la logistique inverse qui a pour mission la collecte-tri des produits usagés, détériorés ou parfois jamais utilisés et pour le maillon de désassemblage des produits en composant. Pour cela, nous introduisons, en section 4.1, le contexte de l'étude via le cas de la société CODIMATRA. Nous commençons par aborder les études de collecte-tri (section 4.2) en utilisant les données ainsi que les études de maquette de collecte-tri et de désassemblage (section 4.3). Enfin, nous concluons ce chapitre (section 4.4).

4.1 Introduction

Notre modèle générique en programmation linéaire est dédié à la planification d'activités de la logistique inverse. Nous avons construit ce modèle dans le but de réaliser un outil d'aide à la décision pour la planification d'une chaîne logistique inverse en considérant la décision de planification de deux maillons *Collecte-tri* et *Désassemblage*. L'objectif de notre thèse est de tester et d'évaluer nos modèles déterministe et stochastique en multi-période et en multi-produit. Pour cela, nous avons utilisé les données fournies par la société CODIMATRA, et le logiciel GLPK, optimiseur pour des modèles en programmation linéaire, défini dans le paragraphe suivant.

4.1.1 Environnement de résolution pour les modèles

Les modèles (déterministe, stochastique et d'évaluation) de planification de deux maillons collecte-tri et désassemblage, décrits dans le chapitre précédent, ont été programmés et testés à l'aide du logiciel GLPK (GNU Linear Programming Kit). Pour rappel, ce logiciel (solveur) comporte un langage de modélisation mathématique et un moteur de résolution dédiés aux problèmes linéaires. GLPK permet de résoudre de manière exacte des modèles en programmation linéaire en variables mixtes, c'est-à-dire des problèmes dont la fonction à optimiser est linéaire, et où les variables peuvent être soit entières, soit réelles. Afin de valider nos modèles, nous proposons deux applications numériques dédiées aux maillons de *Collecte-tri* et de *Désassemblage*, puis nous exploiterons également le couplage de ces deux applications au sein d'une maquette logicielle couvrant ces deux aspects de la planification. Les solutions optimales obtenues sont discutées dans les paragraphes suivants.

4.1.2 Description de la société CODIMATRA

Dans le cadre de ce travail doctoral, nous avons eu la possibilité de nous appuyer sur le cas d'étude de l'entreprise mécanique CODIMATRA, basée à Agen (47). Le paramétrage des modèles mathématiques présentés au chapitre 3, s'inspire donc directement des processus de fabrication ainsi que des données de planification qui ont été récoltés au sein de cette entreprise.

4.1.2.1 Présentation de l'entreprise

L'activité de cette entreprise concerne l'achat, le démantèlement et la vente de matériel et de pièces détachées d'occasion pour des machines de travaux publics de plus de 10 tonnes. Cette entreprise en effet achète environ 200 machines par an partagées, suivant leur état, entre les machines destinées à la déconstruction pour fournir des pièces détachées et celles destinées à la revente. Son rôle consiste à examiner l'état des machines reçues, à mener des opérations de déconstruction de matériels, à stocker des pièces détachées à l'intérieur ou à l'extérieur de l'atelier, à remonter les machines et/ou pièces détachées, à livrer des pièces reconditionnées et les machines.

Dans l'entreprise CODIMATRA, 8 techniciens sont affectés au démantèlement et à la réparation et au remontage des machines d'occasion dans 5 ateliers :

- mécanique pour les moteurs ;
- hydraulique pour les pompes et les vérins ;
- électricité pour les alternateurs, les climatisations et les faisceaux électriques ;
- soudure pour les godets, les brancards et les reprises de jeu ;
- peinture pour les opérations de ponçage et de peinture.

Par ailleurs un technicien expert a pour rôle essentiel d'effectuer un contrôle de l'état des différents composants de la machine réceptionnée tels que le moteur, la transmission, les commandes électriques, les éléments hydrauliques, en effectuant dans certains cas un test sur une piste d'essai. A l'issue de ces contrôles, l'expert estime financièrement la valeur de la machine ou ces différents composants. Il décide également des opérations de réparation éventuelle ou déconstruction à faire sur cette machine de manière à valoriser au mieux son potentiel et assurer le meilleur profit pour l'entreprise

4.1.2.2 Modélisation des flux/activités

La figure 4.1 présente les différentes activités de l'entreprise.

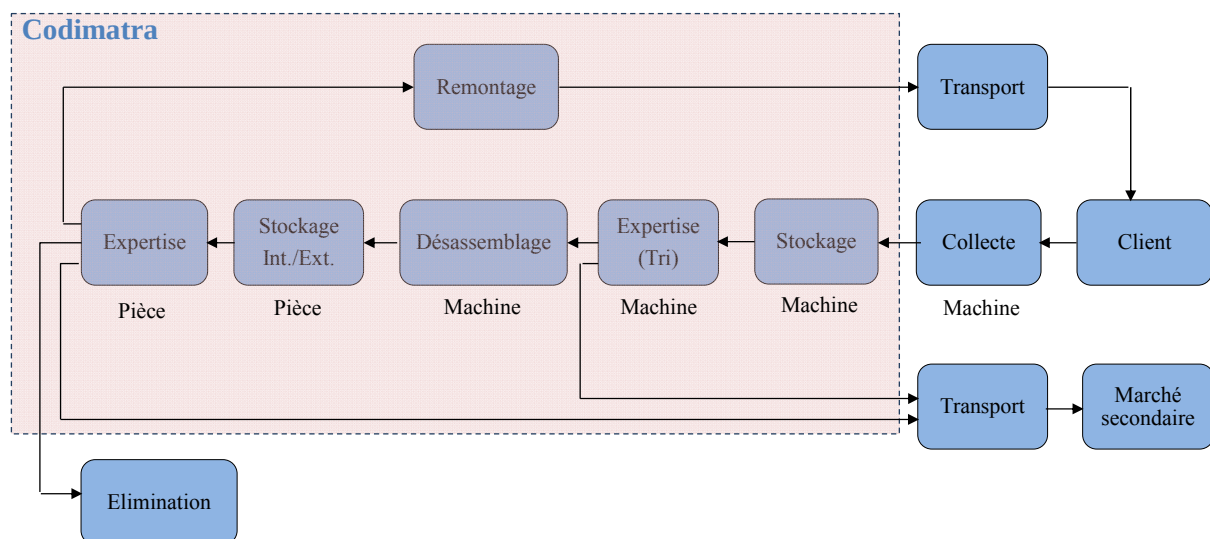


Figure 4.1 : Schéma des activités de CODIMATRA

L'entreprise CODIMATRA s'occupe du retour des machines défectueuses provenant des clients. Après leur collecte et stockage, un expert évalue le devenir de la machine : revente à un client secondaire ou démontage. Dans ce dernier cas, les machines sont désassemblées en pièces par les techniciens. Les éléments des chaînes cinématiques comme le moteur thermique, la pompe hydraulique, la boîte à vitesses, la transmission, sont dépollués et stockés à l'intérieur de l'atelier, puis réparés et repeints. De même pour les organes lourds comme les godets, balanciers, trains de chaîne qui sont stockés à l'extérieur de l'atelier. Tous ces

éléments pourront être réutilisés ou revendus à des clients secondaires ou éliminés suivant l'avis de l'expert.

4.1.3 Démarche expérimentale

Cette entreprise couvre donc une majeure partie du processus de la logistique inverse. Notre étude expérimentale (figure 4.2) qui vise à évaluer les modèles élaborés au chapitre trois, se focalisera quant à elle plus particulièrement sur les étapes de *Collecte-tri* et de *Désassemblage*.

Dans un premier temps, nous étudions plus particulièrement l'étape de *Collecte-tri* en appliquant le modèle générique déterministe (WS) à partir d'un scénario de référence. Des variations sont alors explorées :

- la variation des approvisionnements ;
- la variation de la politique de livraison.

Dans le scénario de référence, la politique de livraison avec déclassement a été choisie pour cette première expérimentation car c'est le fonctionnement « standard » de la chaîne logistique inverse en adéquation avec le principe de valorisation maximum des produits.

Puis le modèle stochastique (RP) et le modèle d'évaluation (EEV) sont exploités en se basant sur le même scénario de référence et faisant varier la politique de livraison.

Ce travail sur l'étape de *Collecte-tri* vise à valider notre modèle générique de planification et à comparer des situations avec ou sans incertitude.

Pour la suite, nous intégrons l'étape de *Désassemblage* dans une maquette logicielle de simulation couplant les deux étapes (*Collecte-tri* et *Désassemblage*). Cette maquette est utilisée pour les modèles déterministe et stochastique en exploitant à nouveau le scénario de référence et en considérant des variations de la politique de livraison. Cette maquette donne ainsi une vision plus globale du « début » de la logistique inverse.

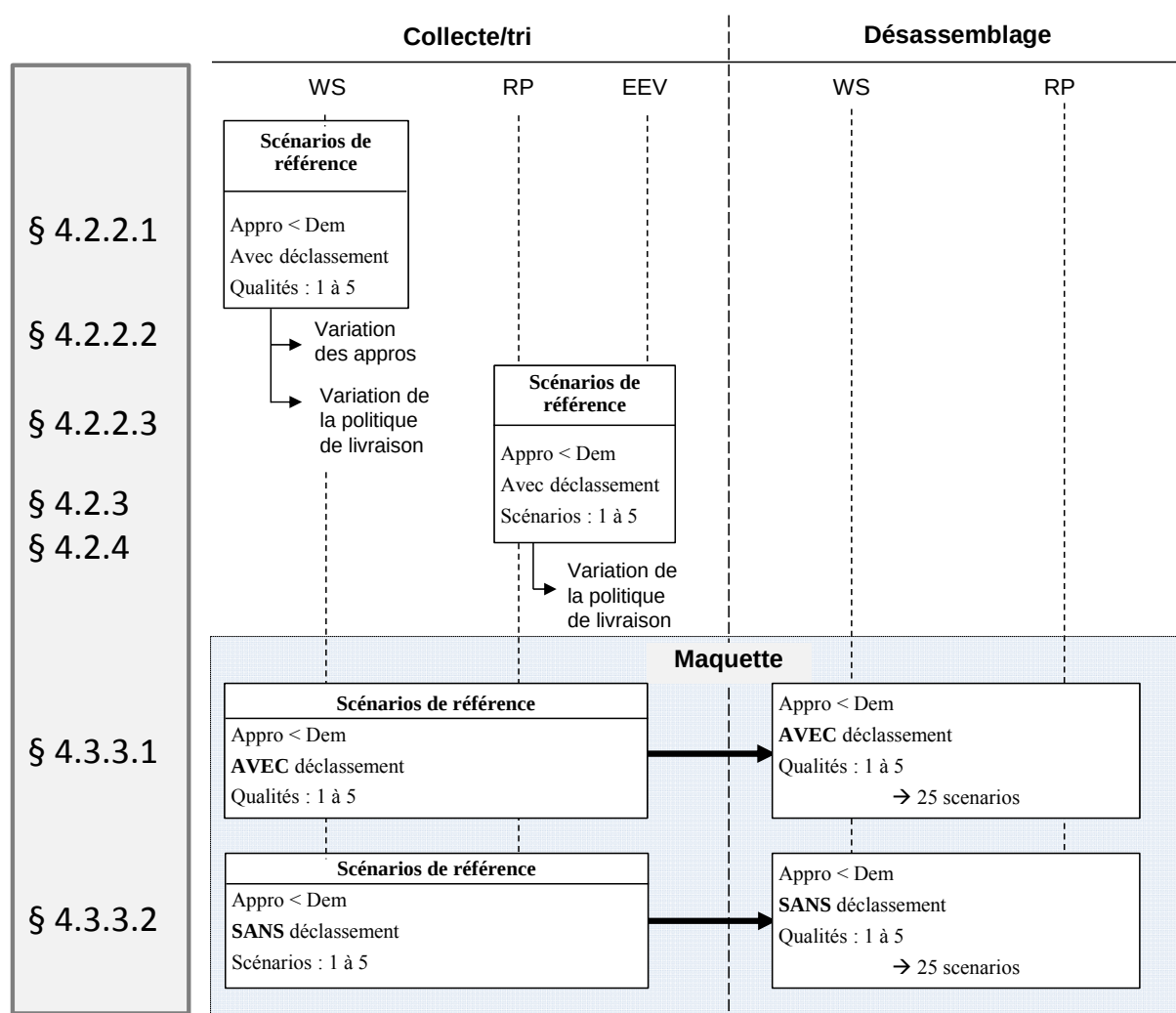


Figure 4.2 : Démarche expérimentale

4.2 Etude de l'étape de *Collecte-tri*

La première analyse consiste à travailler sur l'étape de *Collecte-tri* avec notre modèle de planification. Pour cela, nous allons paramétrer notre modèle et l'utiliser sur divers scénarios.

4.2.1 La génération des données

Nous présentons, dans le tableau 4.1, le paramétrage global des modèles. Par exemple, nous considérons deux références de produit pour limiter la complexité du modèle et de l'analyse. Cela correspondrait à des machines de type pelleteuse, chargeur sur chenilles. L'horizon de planification de collecte-tri est constitué de dix périodes. Chaque période correspondra à une demi-journée de l'entreprise. Les dix périodes permettent ainsi de faire une planification sur une semaine de travail ce qui représenterait déjà une évolution par rapport à l'existant dans l'entreprise. Notre modèle est donc bien un modèle multi-produit et multi-période. D'autres

tests ont été faits pour dix périodes correspondant à dix jours, mais n'apportant rien de particulier, ils ne sont pas exposés dans ce manuscrit de thèse. Par ailleurs, l'expert fait un tri des produits collectés suivant 4 niveaux de qualité A, B, C et D. Enfin, pour le modèle stochastique, nous mettons en place un ensemble de 5 scénarios.

Intitulé	Paramètre	Valeurs
Nombre de références de produit	p'	2 références {P1, P2}
Nombre de périodes de l'horizon (en demi-journée)	h	10 périodes
Nombre de niveau de qualité	q	4 qualités {A, B, C, D}
Nombre de scénario	$NbreS$	5 scénarios {S1, S2, S3, S4, S5}

Tableau 4.1 : Ensemble des produits, des périodes de temps, des qualités et des scénarios

Le tableau 4.2 donne des informations sur les flux des produits P1 et P2. Le nombre de produits collectés correspond au cumul sur l'horizon de temps de tous les produits reçus. Ce nombre est faible compte tenu d'une faible capacité de l'entreprise. Pour le paramétrage de notre modèle générique, les coefficients de nomenclature sont ici binaires (1 produit entrant donne 1 produit sortant) car les opérations de désassemblage sont exclues du modèle de *Collecte-tri*. Les clés de répartition des qualités sont aussi mentionnées pour 5 scénarios S1 à S5.

Intitulé	Paramètre	Valeurs					
Nombre de produits collectés	$\sum C_{t,p}$	P1 = 3 P2 = 2					
Délai du tri	d	1 période					
Coefficients de nomenclature	$kc_{p,i}$	Produit	P1		P2		
		P1	1		0		
		P2	0		1		
Niveau de qualité des produits	REP_q	Qualité	S1	S2	S3	S4	S5
		A : Bonne	60%	36%	35%	21%	23%
		B : Moyenne	40%	50%	50%	52%	58%
		C : Médiocre	0%	13%	13%	24%	15%
		D : Mauvaise	0%	1%	2%	3%	4%

Tableau 4.2 : Paramètres décrivant le centre de *Collecte-tri*

Les valeurs des paramètres décrivant les capacités maximums relatifs au stockage de collecte, de tri, de rupture de stocks et de livraison sont présentées dans ce tableau 4.3. Cela traduit les limites d'utilisation des produits.

Intitulé	Paramètre	Valeurs
Capacité de stockage de collecte	$MaxSte_t$	5 produits
Capacité de tri	$CapTr_t$	2 produits
Capacité de stockage de tri	$MaxSts_t$	5 produits
Capacité de livraison	$CapLiv_t$	5 produits
Maximum de rupture de stocks	$MaxBack_t$	10 produits

Tableau 4.3 : Paramètres relatifs aux capacités du centre de *Collecte-tri*

Les différents coûts nécessaires pour les modèles sont présentés dans ce tableau 4.4 ainsi que les prix de vente.

Intitulé	Paramètre	Valeurs		
Coût d'achat de produit	CA_p	P1 = 9000€ P2 = 11000€		
Coût de stockage de collecte	$CSte_p$	P1 = 510€ P2 = 450€		
Coût de tri	CTr_p	P1 = 33€ P2 = 35€		
Coût de stockage de tri	$CSts_i$	P1 = 170€ P2 = 150€		
Coût de transport	$CL_{u,i}$	Destination	P1	P2
		Réutilisation	1000€	1100€
		Désassemblage	0€	0€
		Marché secondaire	800€	900€
		Elimination	600€	500€
Coût de rupture	$Cret_{u,i}$	Destination	P1	P2
		Réutilisation	340€	300€
		Désassemblage	300€	280€
		Marché secondaire	270€	260€
Prix de vente de produit	$PV_{u,i}$	Destination	P1	P2
		Réutilisation	17000€	15000€
		Désassemblage	15000€	14000€
		Marché secondaire	13500€	13000€

Tableau 4.4 : Paramètres de coûts et de prix de vente par unité de produit

Le tableau 4.5 indique l'initialisation des variables à $t=0$ du modèle.

Intitulé	Paramètre	Valeurs				
Stockage initial de collecte	$Ste0_p$	P1 = 1 P2 = 0				
Tri initial de produit	$Tr0_p$	P1 = 2 P2 = 0				
Stockage initial de tri	$Sts0_{i,q}$	Produit	A	B	C	D
		P1	0	1	0	0
		P2	1	0	0	0
Rupture de stock initial	$BO_{u \neq U 4,i}$	Destination	P1	P2		
		Réutilisation	0	0		
		Désassemblage	0	0		
		Marché secondaire	0	0		

Tableau 4.5 : Initialisation des variables du centre de *Collecte-tri*

Le cumul sur l'horizon des demandes des clients par produit est décrit dans le tableau 4.6. Les clients sont représentés par les sites destinataires, à savoir la réutilisation, le désassemblage et le marché secondaire.

Intitulé	Paramètre	Valeurs		
Demande des clients	$Dmde_{u \neq U 4,t,i}$	Destination	P1	P2
		Réutilisation	2	3
		Désassemblage	3	2
		Marché secondaire	3	2

Tableau 4.6 : Paramètres relatifs aux demandes

L'ensemble des paramètres présentés dans cette partie est valable pour l'application de l'étape de *Collecte-tri* pour les modèles déterministe, stochastique et d'évaluation.

4.2.2 Résultats du modèle déterministe WS

Le modèle déterministe WS a été lancé pour ce jeu de données précis avec dix tirages aléatoires pour caractériser les niveaux de qualité des produits. Cela correspond aux *données de références*. D'autres jeux de données, avec quelques variantes pour certains paramètres autour de ce jeu de données de références sont testés afin de valider la robustesse du modèle et d'étudier le comportement du modèle par rapport aux variations de certains paramètres.

Les annexes 2, 3 et 4 présentent les résultats détaillés, obtenus à partir du modèle déterministe WS, pour les différents tirages aléatoires (NbreT=10) effectués pour un même scénario.

4.2.2.1 Analyse de la variation des niveaux de qualité des produits collectés

L'analyse effectuée consiste à modifier les niveaux de qualité des produits collectés. Pour rappel, ces niveaux sont définis avec les clés de répartition de la qualité REP_q qui caractérisent chaque scénario.

Les expérimentations sont menées avec une politique de livraison avec déclassement, et dans le cas où les quantités approvisionnées sont globalement inférieures aux quantités demandées. Ce cas qui est noté « *Appro < Dem* » fait l'objet d'une description plus précise au paragraphe suivant (§). Ce jeu de données précis constitue les *données de référence*. Afin d'identifier rapidement les résultats associés, ils sont colorés en vert comme dans le tableau 4.7. Dans ce tableau, les résultats de chaque ligne représentent la moyenne des profits des différents tirages aléatoires (NbreT=10). Le détail des résultats pour chaque tirage aléatoire est indiqué dans l'annexe 2.

Numéro du scénario	Cas avec déclassement
	<i>Appro < Dem</i>
S1	84 442 €
S2	80 597 €
S3	79 574 €
S4	78 047 €
S5	76 885 €
Moyenne des scénarios	79 516 €

Tableau 4.7 : Evolution des profits en fonction des scénarios

4.2.2.1.1 Analyse détaillée des résultats par scénario

Dans l'objectif d'évaluer le comportement du maillon *Collecte-tri*, nous avons testé cinq scénarios où nous avons fait varier le paramètre correspondant à la clé de répartition des produits suivant la qualité notée REP_q . Après calcul avec notre modèle déterministe, nous avons constaté que le profit moyen des scénarios est de **79 516 €**.

Scénario 1 : Le profit de ce scénario est de 84 442 €. Dans ce scénario, les produits triés sont tous de bonnes ou moyennes qualités (qualités A et B), et donc les demandes de la réutilisation, du désassemblage et du marché secondaire sont complètement satisfaites. De ce fait, les ventes sont plutôt favorables ce qui apporte un gain important. Comme nous sommes dans un cas où les approvisionnements sont inférieurs aux demandes, il existe quelques ruptures de stock et donc des coûts de pénalité associés. Aucun produit des niveaux de qualité C et D destinés au marché secondaire et au centre d'élimination n'est livré, car ces produits sont conservés dans le stock de tri. Le coût de transport vers le centre d'élimination est nul car aucun produit de mauvaise qualité n'y est livré.

Scénario 2 : le profit de ce scénario représente 80 597 €. Les ventes sont moins importantes qu'au scénario précédent. Lors du tri, le niveau de qualité B est plus important que celui de qualité A. Le nombre de ruptures est identique au scénario précédent. Enfin, les produits de qualité C et D appellent la même remarque.

Scénario 3 : Le tableau 4.8 représente le détail des résultats associés au scénario 3 qui correspond à la moyenne de l'ensemble des scénarios (valeurs arrondies en nombre entier). Dans ce scénario, le profit est de 79 574 €, les ventes sont légèrement moins importantes qu'au scénario précédent. De plus, les coûts de transport augmentent légèrement. A partir de ce scénario, on observe des livraisons de produits de niveau de qualité C destinés au marché secondaire. Le coût d'élimination est nul car il n'y a aucun produit à éliminer.

Indicateurs	Résultats associés au scénario 3 (scénario moyen)
Niveau de stocks	28
Nombre de rupture	5
Nombre de demande	15
Taux de rupture	35%
Nombre de livraison	10
Nombre de livraison de qualité A	4
Nombre de livraison de qualité B	5
Nombre de livraison de qualité C	1
Nombre de livraison de qualité D	0
Taux de livraison de qualité A	37%
Taux de livraison de qualité B	49%
Taux de livraison de qualité C	12%
Taux de livraison de qualité D	2%
Livraison sans déclassement	7
Livraison avec déclassement	3
Taux de liv. sans déclassement	74%
Taux de déclassement	26%
Livraison à l'élimination	0
Taux d'élimination	2%

Tableau 4.8 : Le détail des résultats de scénario 3 (scénario moyen)

Scénario 4 : Le profit de ce scénario est de 78 047 €. Les ventes sont plus faibles qu'aux scénarios précédents car la livraison de produits de niveau qualité C destiné au marché secondaire est un peu plus importante qu'au scénario précédent. Le centre de *Collecte-tri* n'a toujours que quelques produits défectueux à éliminer. Par ailleurs, les demandes pour la réutilisation, le désassemblage et le marché secondaire sont de moins en moins satisfaites.

Scénario 5 : Le profit de ce scénario est de 76 885 €. La livraison de produits de bonne qualité de type B est beaucoup plus importante que celle des produits de qualités A et C. Par conséquent, le nombre de rupture augmente pour la réutilisation qui nécessite des produits de qualité A.

4.2.2.1.2 Synthèse de la variation des niveaux de qualité

L'évolution des profits du centre de *Collecte-tri* en fonction des scénarios est représentée sur la figure 4.3.

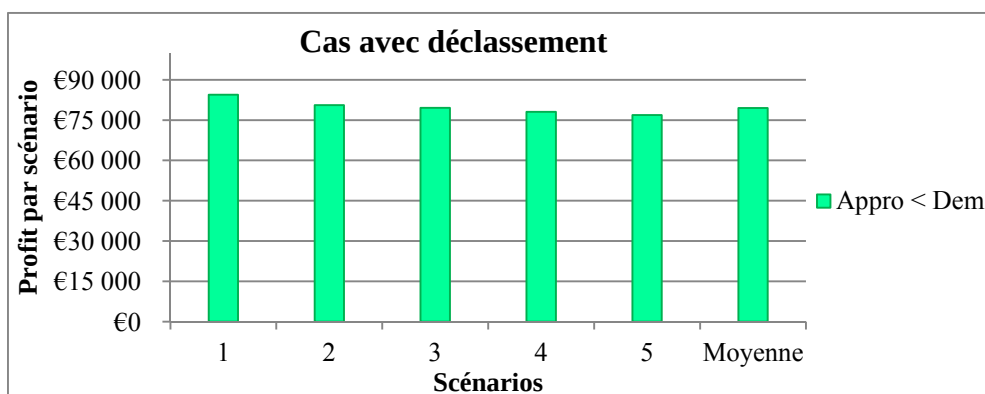


Figure 4.3 : Evolution des profits en fonction des scénarios dans les cas avec déclassement

Nous constatons que ces profits sont décroissants en suivant les scénarios des meilleures qualités aux moins bonnes. La solution optimale (84 442 €) est le profit maximal avec le scénario 1 contenant exclusivement des produits de bonne et moyenne qualité. Ceci semble totalement logique, et cela vient notamment de l'évolution du prix de vente évoluant suivant la destination (cf tableau 4.4).

4.2.2.2 Analyse de la variation des approvisionnements par rapport à la demande

Pour caractériser ce rapport entre l'approvisionnement et la demande, nous définissons : (i) les quantités globales de produits livrables sur l'horizon, notées « Appro », correspondant aux quantités de produits collectées plus tous les produits en stock ou en cours de traitement dans le centre de *Collecte-tri* ; (ii) le total des produits demandés, noté « Dem ». Nous avons alors défini 3 cas afin de vérifier le comportement du modèle dans de telles situations :

- l'approvisionnement est inférieur à la demande : Appro (10 produits) < Dem (15 produits) ;

- l'approvisionnement est égal à la demande : Appro (15 produits) = Dem (15 produits) ;
- l'approvisionnement est supérieur à la demande : Appro (20 produits) > Dem (15 produits).

Les variations se situent donc sur le paramètre des approvisionnements de produits. Ces trois cas sont étudiés avec une politique de livraison avec déclassement. Cela servira surtout à comparer les différences entre les profits de chaque scénario, dont notre cas de référence.

4.2.2.1 Résultats de variation sur les approvisionnements

Numéro du scénario	Cas avec déclassement		
	Appro < Dem	Appro = Dem	Appro > Dem
S1	84442€	89522€ +6,02%	52853€ -37,41%
S2	80597€	82435€ +2,28%	47683€ -40,84%
S3	79574€	80156€ +0,73%	47604€ -40,18%
S4	78047€	74446€ -4,61%	29658€ -62,00%
S5	76885€	72855€ -5,24%	38613€ -49,78%
Moyenne des scénarios	79516€	79426€ -0,11%	43333€ -45,50%

Tableau 4.9 : Comparaison des profits moyens des scénarios en fonction de la variation des approvisionnements

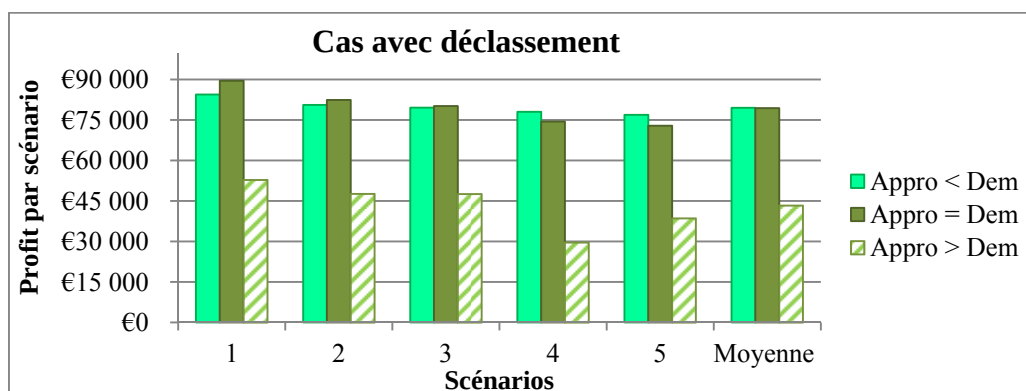


Figure 4.4 : Evolution des profits en fonction des scénarios ; modèle WS

D'après les résultats obtenus présentés dans le tableau 4.9, on remarque qu'une variation de l'approvisionnement a une influence qui peut être, dans certains cas, très importante sur les profits du centre de *Collecte-tri*. La 2nde colonne présente les résultats de la simulation avec un approvisionnement inférieur à la demande, correspondant à notre jeu de données de référence. On constate que le profit de référence donné par le modèle WS est de **79 516 €** : le centre de *Collecte-tri*, en effet, a acheté cinq produits qui s'avèrent être de plutôt bonne qualité, donc les demandes pour la réutilisation, le désassemblage et le marché secondaire sont presque satisfaites. L'étape de tri ne connaît pas de surcharge de produits car la charge reste inférieure à la capacité de tri (2 produits par période).

Dans la 3^{ème} colonne, le profit moyen des scénarios est de **79 426 €**. Cela correspond à une diminution de profit par rapport au jeu de données de référence de 0,11%. Cela signifie que ce profit baisse légèrement car les coûts d'achat augmentent avec les quantités de produits reçus,

contrebalancés par une augmentation des ventes. Dans ce cas, il y a donc globalement plus d'activité dans le centre de *Collecte-tri*. Dans la dernière colonne, le cas où l'approvisionnement est supérieur à la demande représente un gain de **43 333 €**. Cependant, cela correspond à une chute de **45,5%** du profit par rapport au jeu de données de référence. Cela s'explique par des quantités plus importantes de produits collectés, donc des coûts d'achat en hausse, mais ces produits supplémentaires ne correspondant pas à un besoin des clients, sont stockés, générant davantage de coûts. Tout cela entraîne alors une baisse de profit. De plus, les stocks peuvent s'accumuler jusqu'à la capacité maximum de stockage de collecte. Si besoin, le surstock devra être évacué vers l'élimination impliquant encore des coûts de transport supplémentaires.

4.2.2.2 Synthèse de la variation des approvisionnements

Les conditions initiales des stocks et des en-cours de tri, ainsi que les quantités de produits achetées influencent beaucoup le profit global du centre de *Collecte-tri*. Il s'avère que le cas d'un approvisionnement égal à la demande est presque équivalent au cas où l'approvisionnement est inférieur à la demande. Cela signifie que dans le premier cas, il y a plus d'activité pour un gain quasi identique. Nos jeux de données sont donc caractérisés par le fait que pour obtenir un profit maximum il vaut mieux ne pas satisfaire la demande complètement et limiter les achats.

4.2.2.3 Analyse de la politique de livraison avec et sans déclassement

Dans le paragraphe 3.1.3, nous avons évoqués deux politiques de livraison : l'une, sans déclassement, n'autorise les livraisons des produits d'un certain niveau de qualité que vers la destination correspondante ou vers l'élimination, l'autre, avec déclassement, autorise en outre des livraisons vers une destination demandant un niveau de qualité moindre.

4.2.2.3.1 Résultats des simulations Avec / Sans déclassement

Le tableau 4.10 présente les résultats obtenus avec le modèle déterministe (WS) associé aux cas avec et sans déclassement, et pour un approvisionnement inférieur à la demande, sur 5 scénarios, correspondant au jeu de données de référence.

Numéro du scénario	Appro < Dem	
	Avec déclassement	Sans déclassement
S1	84442€	52166€ -38,22%
S2	80597€	54342€ -32,58%
S3	79574€	53478€ -32,79%
S4	78047€	68632€ -12,06%
S5	76885€	52287€ -31,99%
Moyenne des scénarios	79516€	57135€ -28,15%

Tableau 4.10 : Comparaison des profits moyens des scénarios associés aux cas avec/sans déclassement : modèle WS

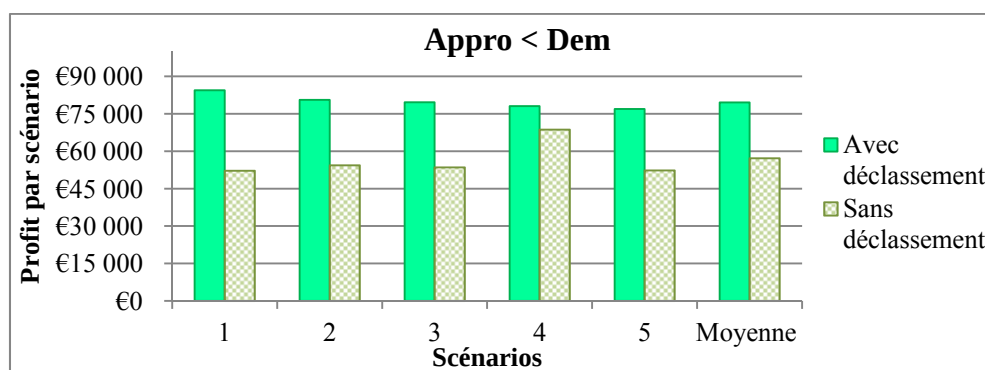


Figure 4.5 : Evolution des profits en fonction des scénarios pour les cas avec et sans déclasserment : modèle WS

Les résultats d'une politique de livraison avec déclasserment, présentés dans la 2nde colonne, ont déjà été analysés dans la section 4.2.2.1 (jeu de données de référence). Par contre, on peut noter que l'application d'une politique de livraison sans déclasserment amène à une baisse des profits d'environ 28%.

L'observation détaillée indique que la baisse la plus importante correspond au scénario 1 (-38%), c'est-à-dire le scénario où le plus grand nombre de produits est de très bonne qualité A. En fait, dans la politique sans déclasserment, ces produits de qualité A ne peuvent être livrés qu'à la destination « réutilisation ». Or si la demande est trop faible, ces produits peuvent être stockés, ce qui engendre des coûts jusqu'à la capacité maximum de stockage. Au-delà, ils doivent être envoyés au centre d'élimination, ce qui implique de nouveaux coûts de transport. Paradoxalement, il peut s'avérer aussi que les autres clients désirant une qualité moindre puissent se trouver confrontés à une situation de rupture de stock. Par contre, avec une politique de déclasserment, ces produits de qualité A peuvent être substitués aux produits de qualité B ou C si besoin. Cela permet donc de satisfaire au mieux les besoins des clients, de réduire les coûts du centre de *Collecte-tri* et surtout d'éviter de nouveaux gâchis en envoyant des bons produits au centre d'élimination.

Il en est de même pour les produits de qualité B qui peuvent être déclassés en qualité C, respectivement destinés à la demande du désassemblage et du marché secondaire.

4.2.2.3.2 Synthèse de l'analyse de la politique de livraison

La figure 4.5 représente l'évolution des profits en fonction des scénarios. On peut en conclure clairement qu'il faut favoriser une politique de livraison avec déclasserment afin d'augmenter le profit du centre de *Collecte-tri*.

4.2.3 Résultats du modèle stochastique RP

Après avoir étudié le comportement du centre de *Collecte-tri* dans un cas déterministe, c'est-à-dire en connaissant à l'avance le scénario qui sera joué, nous en avons déduit le paramétrage

global le plus intéressant pour le centre de *Collecte-Tri*. Les modèles suivants seront donc testés avec la condition suivante : un approvisionnement inférieur à la demande.

Nous allons à présent étudier le modèle stochastique (RP) qui prend en compte l'incertitude sur les scénarios en les intégrant dans un seul modèle. Il est ici rappelé que les incertitudes sur la qualification d'un produit traduite par des tirages aléatoires sont toujours réalisées. Les résultats sont donc toujours des moyennes sur 10 tirages aléatoires (NbreT=10).

Les résultats obtenus sur les 5 scénarios en fonction du choix de la politique de livraison sont donnés dans le tableau 4.11. La case rouge clair est le nouveau résultat de référence du modèle stochastique RP.

Numéro du scénario	Appro < Dem	
	Avec déclassement	Sans déclassement
S1	84442€	52030€ -38,38%
S2	80529€	54206€ -32,69%
S3	79489€	53325€ -32,92%
S4	77968€	68621€ -11,99%
S5	76772€	52140€ -32,08%
Moyenne des scénarios	79438€	57020€ -28,22%

Tableau 4.11 : Comparaison des profits moyens des scénarios associés aux cas avec / sans déclassement : modèle stochastique RP

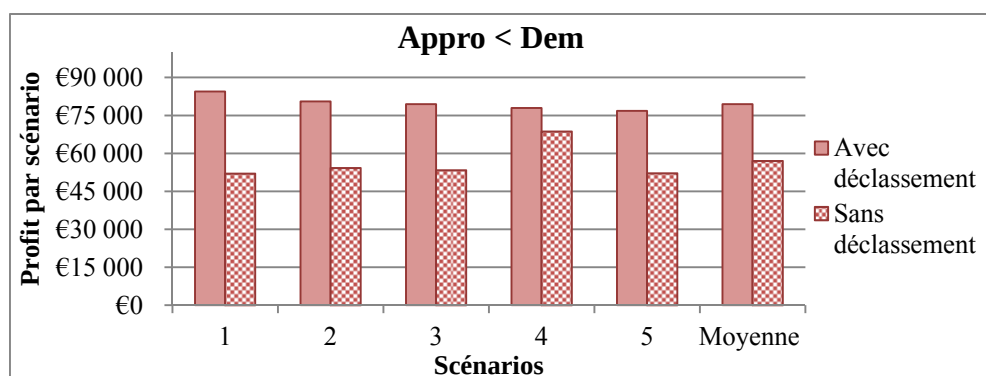


Figure 4.6 : Evolution du profit en fonction des scénarios pour les cas avec/sans déclassement : modèle stochastique RP

Le tableau 4.11 montre qu'avec une politique sans déclassement, le profit diminue de nouveau d'environ 28% par rapport au profit de référence RP.

Le nouveau profit de référence, avec une politique de livraison avec déclassement, donné par le modèle stochastique RP est de **79 438 €**. Il est à comparer à celui obtenu par le modèle déterministe WS de **79 516 €** d'après le tableau 4.11. La différence entre les deux modèles est donc ici relativement faible.

On remarque qu'en tenant compte des incertitudes portant sur le niveau de qualité des produits, les résultats obtenus présentés dans les tableaux 4.10 et 4.11 sont cohérents car, en général, les résultats du modèle déterministe WS sont supérieurs ou égaux à ceux du modèle stochastique RP dans le cas d'une maximisation des profits (Ramezani *et al.*, 2013). En effet

l'incertitude présente dans le modèle stochastique, génère logiquement une perte de profit par rapport à une situation dans laquelle tout est connu de manière certaine. Le paragraphe suivant vise à approfondir cette différence entre les performances des deux types de modèle et d'environnement (certain ou incertain).

4.2.4 Résultats du modèle d'évaluation EEV

Nous avons établi les mêmes scénarios (i.e. S1 à S5) pour ce modèle d'évaluation. Le tableau 4.12 qui suit présente les résultats obtenus par ce modèle d'évaluation EEV, qui, pour rappel, intègre certains résultats du scénario moyen du modèle déterministe. Ces variables sont donc transformées en paramètres. La case orange est le nouveau résultat de référence de modèle EEV.

Numéro du scénario	Appro < Dem	
	Avec déclassement	Sans déclassement
S1	81970€	52166€ -36,36%
S2	79261€	54342€ -31,44%
S3	79574€	53478€ -32,79%
S4	76700€	63149€ -17,67%
S5	74283€	52276€ -29,63%
Moyenne des scénarios	78718€	55873€ -29,02%

Tableau 4.12 : Comparaison des profits moyens des scénarios associés aux cas avec et sans déclassement : modèle d'évaluation EEV

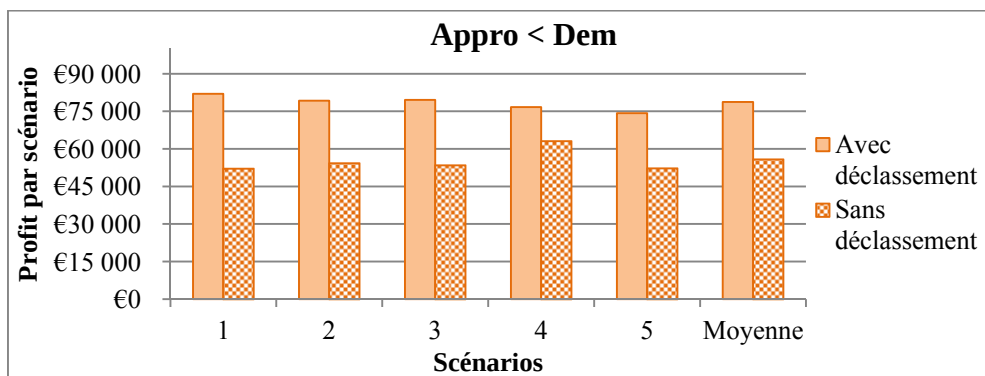


Figure 4.7 : Evolution du profit en fonction des scénarios pour les cas avec et sans déclassement : modèle d'évaluation EEV

Suite aux résultats obtenus par le modèle EEV, il est possible de déterminer les écarts de performance avec le modèle RP. On constate que le nouveau profit de référence donné par le modèle EEV est de **78 718 €** à comparer à celui du modèle RP **79 438 €**. Pour le cas sans déclassement, le profit a diminué d'environ 29%. De même que pour le modèle stochastique RP, ces résultats montrent que les résultats du modèle d'évaluation EEV sont cohérents avec les résultats des modèles précédents : en effet, le modèle stochastique RP est, en général, supérieur ou égal au modèle d'évaluation EEV.

4.2.5 Analyses détaillées par scénario des indicateurs stochastiques

Cette analyse porte sur la comparaison entre les trois modèles déterministe, stochastique et d'évaluation en s'appuyant sur les indicateurs définis au chapitre 2. Elle vise à comparer les résultats obtenus avec une variation de la politique de livraison pour le cas de l'approvisionnement inférieur à la demande.

4.2.5.1 Résultats comparés d'une politique de livraison avec déclassement

Le tableau 4.13 récapitule les indicateurs de comparaison entre les trois profits de référence des modèles WS (*Wait and See*), RP (*Recourse Problem*) et EEV (*Expected result of using the EV solution*).

Numéro du scénario	Cas avec déclassement, Appro < Dem						
	Profits			Ecart Indicateurs de comparaison			
	WS	RP	EEV	EVPI	VSS	VSDE	VSDE
S1	84442€	84442€	81970€	0€ 0,00%	2472€ 3,02%	0€ 0,00%	2472€ 3,02%
S2	80597€	80529€	79261€	68€ 0,08%	1268€ 1,60%	68€ 0,08%	1336€ 1,69%
S3	79574€	79489€	79574€	85€ 0,11%	-85€ -0,11%	85€ 0,11%	0€ 0,00%
S4	78047€	77968€	76700€	79€ 0,10%	1268€ 1,65%	79€ 0,10%	1347€ 1,76%
S5	76885€	76772€	74283€	113€ 0,15%	2489€ 3,35%	113€ 0,15%	2602€ 3,50%
Moyenne	79516€	79438€	78718€	78€ 0,10%	720€ 0,91%	78€ 0,10%	798€ 1,01%

Tableau 4.13 : Résultats globaux associés à une politique de livraison avec déclassement

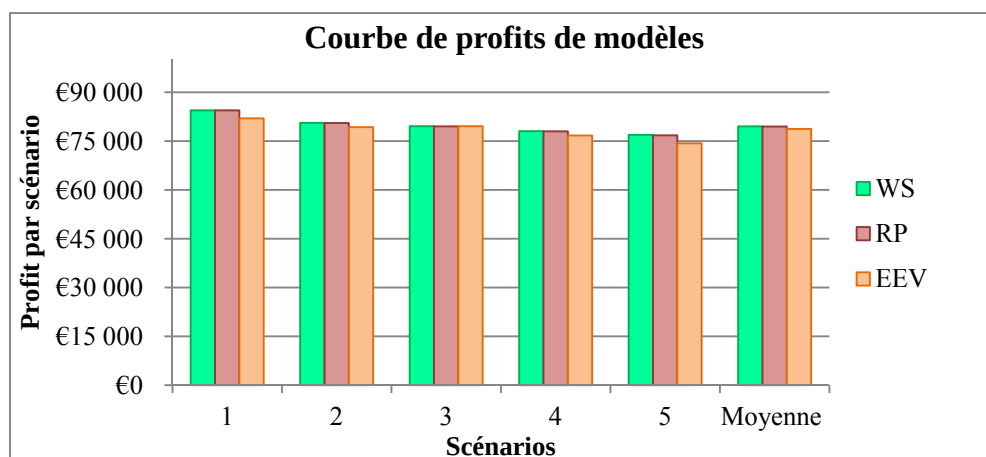


Figure 4.8 : Evolution des trois profits en fonction des scénarios dans les cas avec une politique avec déclassement

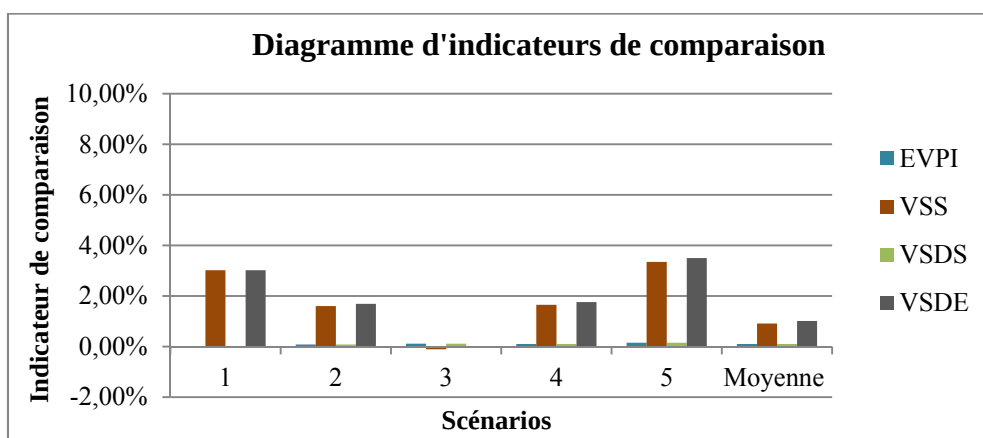


Figure 4.9 : Evolution des quatre indicateurs pour chaque scénario dans le cas avec déclassement

Dans le tableau 4.13 qui précède, les résultats obtenus associés à une politique de livraison avec déclassement, pour un approvisionnement inférieur à la demande, sont les trois profits de référence (WS, RP, EEV). Pour rappel, ce sont plus exactement des profits moyens sur 10 tirages aléatoires des niveaux de qualité des produits, présentés dans l'annexe 2. La valeur attendue de l'information parfaite (EVPI) et la valeur de la solution stochastique (VSS) sont présentées dans la figure 4.9 ainsi que la valeur de la solution déterministe et stochastique (VSDS) et la valeur de la solution déterministe et évaluation (VSDE).

Dans la figure 4.8, il est clair que la plus grande valeur de l'EVPI, qui représente la plus grande différence de profit entre les solutions WS et RP, est de 113 € soit 0,15% du profit WS pour le scénario 5, ce qui explique une perte très légère de profit due à l'incertitude portant sur le niveau de qualité des produits. La plus grande valeur de VSS, qui mesure la différence de profits entre les solutions RP et EEV, est de 2 489 € soit 3,35% du profit RP dans le scénario 5. Les scénarios S1 et S5 sont les seuls scénarios sur lesquels on trouve un écart « important ».

En observant la figure 4.9, on remarque que plus on s'éloigne du niveau de qualité du scénario 3 (scénario moyen), plus les écarts se creusent entre les résultats du modèle déterministe et du modèle EEV. En effet, par principe même de construction du modèle d'évaluation, cela est dû aux données imposées issues des résultats de scénario moyen du modèle déterministe. L'indicateur VSDS sur chaque scénario suit la même évolution que l'indicateur EVPI. Enfin, l'indicateur VSDE, qui représente la différence de profit entre les solutions WS et EEV, est de 2 602 € soit 3,50% du profit WS.

Pour conclure, l'analyse de ces résultats montre que notre centre de *Collecte-tri* est stable puisque son profit n'est finalement que peu impacté par l'incertitude sur la qualité des produits collectés. Ignorer l'incertitude n'a qu'un très faible coût et l'intérêt du modèle stochastique n'est que très peu justifié sur le jeu de données particulier que nous avons utilisé.

4.2.5.2 Résultats comparés d'une politique de livraison sans déclassement

Nous présentons, de la même manière, les indicateurs de comparaison avec une politique de livraison sans déclassement.

Numéro du scénario	Cas sans déclassement, Appro < Dem						
	Profits			Ecart Indicateurs de comparaison			
	WS	RP	EEV	EVPI	VSS	VSDS	VSDE
S1	52166€	52030€	52166€	136€ 0,26%	-136€ -0,26%	136€ 0,26%	0€ 0,00%
S2	54342€	54206€	54342€	136€ 0,25%	-136€ -0,25%	136€ 0,25%	0€ 0,00%
S3	53478€	53325€	53478€	153€ 0,29%	-153€ -0,29%	153€ 0,29%	0€ 0,00%
S4	68632€	68621€	63149€	11€ 0,02%	5472€ 8,67%	11€ 0,02%	5483€ 8,68%
S5	52287€	52140€	52276€	147€ 0,28%	-136€ -0,26%	147€ 0,28%	11€ 0,02%
Moyenne	57135€	57020€	55873€	115€ 0,20%	1147€ 2,05%	115€ 0,20%	1262€ 2,26%

Tableau 4.14 : Résultats globaux associés à une politique de livraison sans déclassement

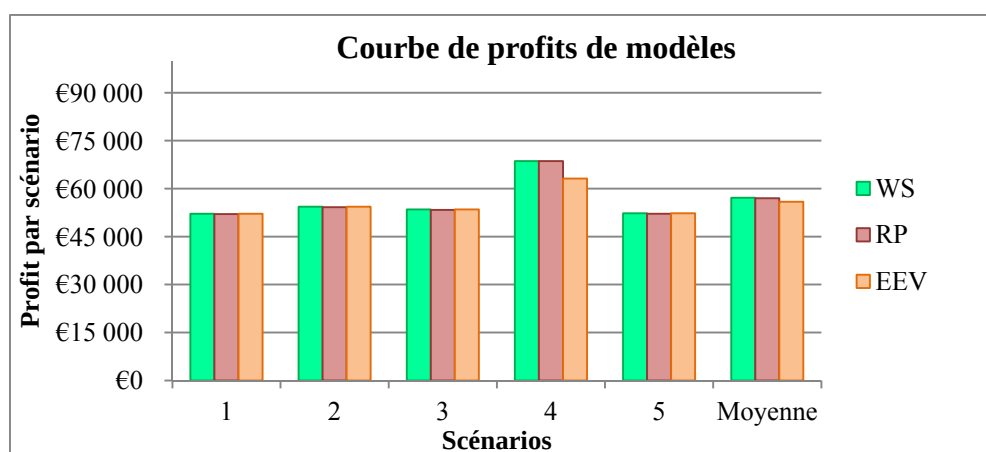


Figure 4.10 : Evolution des trois profits sur les scénarios avec une politique sans déclassement

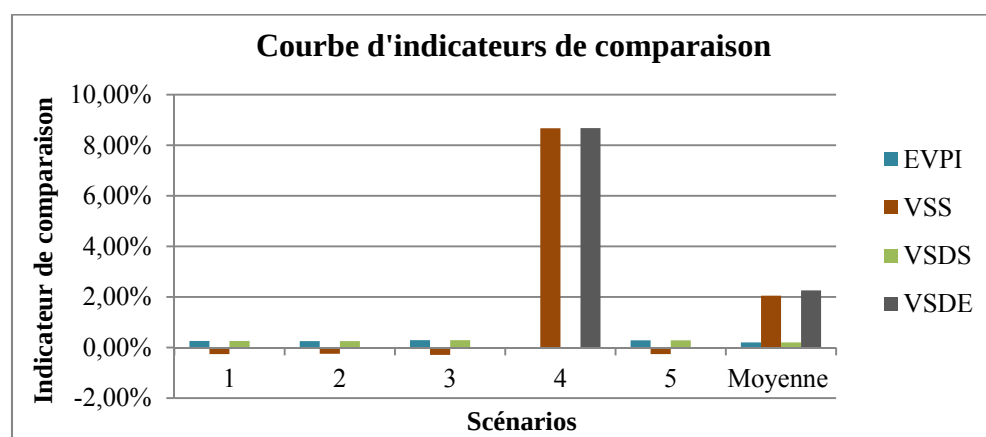


Figure 4.11 : Evolution des quatre indicateurs pour chaque scénario dans le cas sans déclassement

Le tableau 4.14 montre les profits et les indicateurs dans le cas d'une politique de livraison sans déclassement, pour un approvisionnement inférieur à la demande. On remarque que par rapport à une politique avec déclassement, tous les profits de tous les scénarios ont diminué, ce qui signifie qu'un manque de flexibilité dans les livraisons des produits peut amener rapidement à une baisse de profit importante, due notamment aux ruptures de stock de certains produits, au surstock d'autres produits, à des livraisons vers le centre d'élimination. Dans les figures 4.10 et 4.11, on constate que l'ensemble des indicateurs EVPI, VSS, VSDS et VSDE est faible pour les scénarios 1, 2, 3 et 5. Pour l'indicateur VSS, il faut noter qu'il est négatif car le profit RP est supérieur ou égal au profit WS. L'indicateur VSDE, quant à lui, a une valeur nulle car le profit WS est égal au profit EEV. Le scénario 4 est le seul scénario à avoir un écart maximal sur les indicateurs VSS et VSDE. Cela est dû à un tirage aléatoire particulier.

4.2.5.3 Synthèse de l'analyse des indicateurs stochastiques

En comparant les profits de référence avec une politique de livraison avec ou sans déclassement, on voit nettement les différences de ces deux politiques de livraison. La flexibilité apportée par la possibilité de déclasser les produits amène un gain certain, que ce soit dans les cas déterministe, stochastique ou d'évaluation. Dans les deux cas concernés et avec le jeu de données utilisé, l'intérêt du modèle stochastique n'est pas prouvé.

4.3 Etude d'une maquette logicielle de *Collecte-tri* et de *Désassemblage*

La seconde analyse consiste à étudier la plateforme logicielle (ou maquette) qui permet de simuler deux entités de la logistique inverse : le centre de *Collecte-tri* et le centre de *Désassemblage*. Cette maquette utilise le modèle de planification générique que nous avons développé et présenté dans le chapitre 3. Il sera utilisé deux fois : une fois pour la *Collecte-tri* et la seconde fois pour le *Désassemblage*. Cela signifie que le centre de *Collecte-tri*, déjà étudié dans la partie précédente, est désormais en lien en aval avec le *Désassemblage* afin d'analyser un sous-ensemble de la chaîne logistique inverse aux fonctionnalités plus étendues.

4.3.1 Génération des données

Les données du centre de *Collecte-tri* ont déjà été présentées dans la partie précédente. Voici à présent les données du centre de désassemblage. Le tableau 4.15 mentionne le nombre de références des produits et de composants manipulés dans le centre de *Désassemblage*, ainsi que l'horizon de planification de ce dernier. Ce modèle exploite aussi avec 4 niveaux de qualité et 5 scénarios.

Nombre de références de produit	p'	2 références {P1, P2}
Nombre de références de composant	i	4 composants {C1, C2, C3, C4}
Nombre de périodes de l'horizon (en demi-journée)	h	10 périodes
Nombre de niveau de qualité	q	4 qualités {A, B, C, D}
Nombre de scénario	$NbreS$	5 scénarios {S1, S2, S3, S4, S5}

Tableau 4.15 : Ensemble des produits, composants, temps, scénarios et qualités

Le tableau 4.16 présente les plans d'approvisionnement : deux références de produits P1 et P2 sont livrés par le centre de *Collecte-tri*, puis sont désassemblés en composants. Les coefficients de nomenclatures, sont des entiers : 1 produit peut être composé de plusieurs exemplaires de différents composants. Nous avons la même définition de la clé de répartition du niveau de qualité des produits traités que celle de la *Collecte-tri*.

Quantité de produits livrés par le centre de <i>Collecte-tri</i>	P1 $\rightarrow [Liv_{U2,t,i,q}]_{Collecte/i=P1}$ P2 $\rightarrow [Liv_{U2,t,i,q}]_{Collecte/i=P2}$					
Délai du désassemblage	1 période					
Coefficient de nomenclatures	Produit	C1	C2	C3	C4	
	P1	4	2	3	2	
	P2	3	2	2	1	
Niveau de qualité de composant	Qualité	S1	S2	S3	S4	S5
	A : Bonne	60%	36%	35%	21%	23%
	B : Moyenne	40%	50%	50%	52%	58%
	C : Médiocre	0%	13%	13%	24%	15%
	D : Mauvaise	0%	1%	2%	3%	4%

Tableau 4.16 : Paramètres décrivant le centre de *Désassemblage*

Les valeurs des capacités relatives au stockage de produit, au désassemblage, au stockage de composant, aux ruptures de stock et aux livraisons sont présentées dans le tableau 4.17.

Capacité de stockage de produit	3 produits
Capacité de désassemblage	3 produits
Capacité de stockage de composant	20 composants
Capacité de livraison	18 composants
Maximum de rupture de stocks	110 composants

Tableau 4.17 : Paramètres relatifs aux capacités du centre de *Désassemblage*

L'ensemble des coûts unitaires est présenté dans le tableau 4.18 ainsi que les prix de ventes.

Coût d'achat de produit	P1 = 2000€		P2 = 1500€		
Coût de stockage de produit	P1 = 15€		P2 = 20€		
Coût de désassemblage de produit	P1 = 33€ ;		P2 = 35€		
Coût de stockage de composant	C1 = 20€	C2 = 20€	C3 = 20€	C4 = 20€	
Coût de transport	Destination	C1	C2	C3	C4
	Refabrication	0€	0€	0€	0€
	Marché secondaire	200€	300€	500€	300€
	Recyclage	500€	300€	200€	300€
	Elimination	200€	250€	150€	300€
Coût de rupture	Destination	C1	C2	C3	C4
	Refabrication	20€	30€	10€	20€
	Marché secondaire	20€	10€	20€	20€
	Recyclage	20€	20€	20€	10€
Prix de vente de composant	Destination	C1	C2	C3	C4
	Refabrication	2250€	1440€	1500€	200€
	Marché secondaire	1230€	2450€	2230€	300€
	Recyclage	1500€	1220€	650€	350€

Tableau 4.18 : Paramètres de coûts et de prix de vente par unité de composant

Les paramètres indiqués dans le tableau 4.19 correspondent à l'initialisation des variables permettant de caractériser l'état initial du centre de *Désassemblage*.

Stockage initial de produit	P1 = 0		P2 = 1		
Désassemblage initial de produit	P1 = 1		P2 = 0		
Stockage initial de composant	Composant	A	B	C	D
	C1	2	1	1	1
	C2	1	0	2	0
	C1	1	1	1	0
	C2	1	1	0	1
Rupture de stock initial	Destination	C1	C2	C3	C4
	Refabrication	0	0	0	0
	Marché secondaire	0	0	0	0
	Recyclage	0	0	0	0

Tableau 4.19 : Initialisation des variables du centre de *Désassemblage*

Les demandes cumulées sur l'horizon en composant par destination « client » sont décrites dans le tableau 4.20.

Demande cumulée par destination-client	Destination	C1	C2	C3	C4
	Refabrication	11	13	13	13
	Marché secondaire	11	13	12	14
	Recyclage	13	11	12	14

Tableau 4.20 : Paramètres relatifs aux demandes

4.3.2 Les flux des produits d'un centre à l'autre

- Fonctionnement de la maquette de *Collecte-tri* et de *Désassemblage*

La figure 4.12 montre un schéma général de la maquette logicielle. Cette maquette donne une vue plus globale de la chaîne logistique inverse, même si ici elle se contente de ne prendre en compte que les deux maillons *Collecte-tri* et *Désassemblage*. Avec cette maquette, nous allons pouvoir simuler les flux sur un morceau de la chaîne logistique inverse. Il est à noter que les calculs pour le centre de *Collecte-tri* ont déjà été réalisés dans la partie précédente.

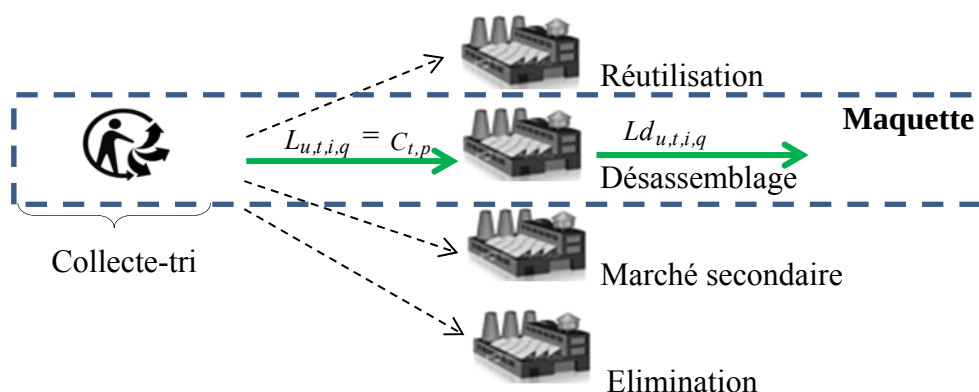


Figure 4.12 : Fonctionnement de la maquette de *Collecte-tri* et de *Désassemblage* $u = U2$

Concernant les flux, on rappelle que les produits collectés arrivent à la réception du centre de *Collecte-tri*. C'est le point de départ de cette chaîne logistique inverse. Ce centre trie les produits en fonction de leur niveau de qualité. Certains de ces produits sont livrés au cours du temps vers le centre de *Désassemblage* : $L_{U2,t,i,q}$. Ce dernier les réceptionne : $C_{t,p}$. Puis il les désassemble en composants et les livre selon leur niveau de qualité aux centres de refabrication, de redistribution vers le marché secondaire, de recyclage et d'élimination. Cette livraison est notée $Ld_{u,t,i,q}$. Le « profit total » considéré par la suite est la somme du profit du maillon *Collecte-tri* et du profit du maillon *Désassemblage*.

- Utilisation

Dans notre modélisation, nous distinguons 5 scénarios principaux (S1 à S5) pour la *Collecte-tri* et chacun de ces scénarios va provoquer 5 nouveaux scénarios au niveau du *Désassemblage*, soit au total 25 scénarios secondaires (S11 à S15, puis S21 à S25, etc.) tels que représentés en figure 4.13.

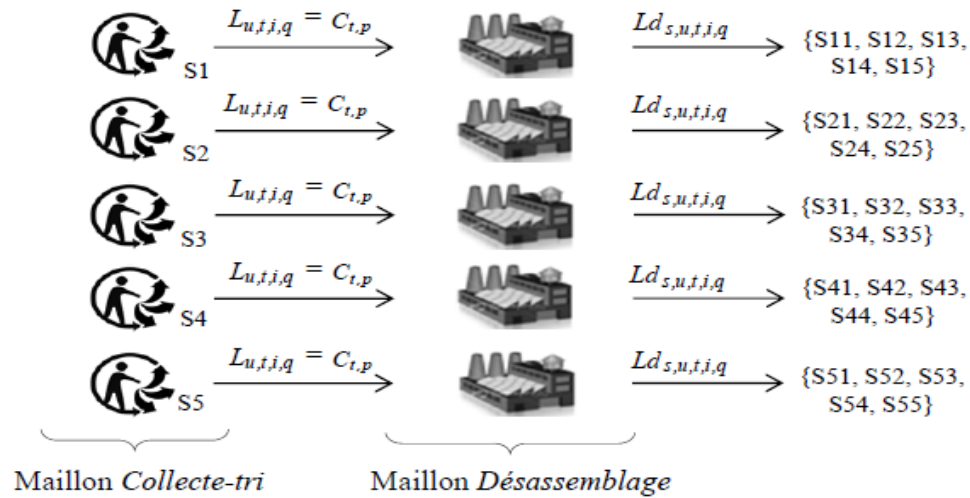


Figure 4.13 : Utilisation de la maquette de *Collecte-tri* et de *Désassemblage*

Dans le maillon *Collecte-tri*, les quantités de produits livrés sont très variées sur les 5 scénarios.

4.3.3 Analyse des performances de la maquette logicielle *Collecte-tri* et *Désassemblage*

Pour cette maquette, afin de limiter le nombre des combinaisons des tests, nous n'avons conservé qu'un seul tirage aléatoire (NbreT=1) au lieu de dix auparavant. Pour le centre de *Collecte-tri*, le tirage aléatoire n°2 de l'annexe 2 a été choisi. Il n'est donc pas nécessaire de refaire les calculs du centre *Collecte-tri*. En conservant l'hypothèse d'un approvisionnement inférieur à la demande, nos tests ont été effectués avec le modèle générique de planification du chapitre 3, en déterministe (WS) et en stochastique (RP). Bien que les calculs de planification soient propres à chaque centre, l'objectif est de chercher à maximiser le profit total de ces deux maillons avec des options comme le choix de la politique de livraison avec ou sans déclassement. L'ensemble de ces combinaisons de tests avec cette maquette compte déjà 100 tests (i.e. exécution de modèles).

4.3.3.1 Résultats de la maquette logicielle pour une politique avec déclassement

Le tableau 4.21 présente les valeurs des paramètres associés aux conditions initiales par scénario pour le centre de *Désassemblage*. Dans ce tableau, la seconde colonne intitulée « Profit_{Col.} », présente le résultat du profit du maillon *Collecte-tri* ; la colonne suivante indique les livraisons pour le centre de *Désassemblage*. Ces quantités de produits livrés ont alors été converties en quantités équivalentes de composants dans les colonnes relatives au maillon *Désassemblage*. On rappelle que les coefficients de nomenclatures de désassemblage sont de 11 composants pour le produit P1 et de 8 composants pour le produit P2.

Chapitre 4 : Etude expérimentale : application à la planification des activités de *collecte-tri* et de *désassemblage* d'une entreprise de négoce et de démantèlement

Numéro de scénario	Maillon <i>Collecte-tri</i>		Maillon <i>Désassemblage</i>					
	ProfitCol.	$L_{u,t,i,q}$ (produits)	$C_{t,p}$ (équiv. composant)	$Ste0_p$ (équiv. composant)	$Tr0_p$ (équiv. composant)	$Sts0_{i,q}$ (composant)	Total (comp.)	Dem (comp.)
S1	80930€	5	49	8	11	14	82	150
S2	65350€	5	49	8	11	14	82	150
S3	67040€	4	41	8	11	14	74	150
S4	80930€	3	33	8	11	14	66	150
S5	65500€	4	41	8	11	14	74	150

Tableau 4.21 : Résultat de la *Collecte-tri*, et initialisation du *Désassemblage* avec une livraison avec déclassement

L'intérêt de faire une équivalence en composant est de pouvoir ensuite comparer la demande en composant par rapport au niveau d'approvisionnement incluant la quantité de produits qui vont arriver à la réception $C_{t,p}$. Ainsi par exemple, pour le scénario S1, l'équivalence est calculée comme suit : la livraison $L_{u,t,i,q}$ de 5 produits (3xP1 et 2xP2) équivalent à 49 composants, le stockage initial de produit $Ste0_p$ (1 produit P2) équivaut à 8 composants, le désassemblage initial de produit $Tr0_p$ (1 produit P1) équivaut à 11 composants, le stockage initial de composant avec le niveau de qualité $Sts0_{i,q}$ est fixé à 14. Au total, il y a donc 82 composants en « Approvisionnement ». La demande est fixée à 150 composants. Le centre de *Désassemblage* est donc, comme dans les résultats de référence du centre de *Collecte-tri*, dans la même configuration, à savoir un approvisionnement inférieur à la demande.

Dans ce même contexte ($Appro < dem$) pour les deux maillons le tableau 4.22 ci-dessous présente les résultats du centre de *Désassemblage* en appliquant pour chacun des scénarios de l'étape *Collecte-tri*, le modèle de planification en déterministe (WS) et en stochastique (RP).

Chapitre 4 : Etude expérimentale : application à la planification des activités de *collecte-tri* et de *désassemblage* d'une entreprise de négoce et de démantèlement

Numéro de scénario		Avec déclassement						
		Modèle WS			Modèle RP			Indicateur
		Col.	Dés.	Total	Col.	Dés.	Total	
S1	S11	80930€	81004€	161934€	80930€	80969€	161899€	35€
	S12		76014€	156944€		75979€	156909€	35€
	S13		70084€	151014€		70069€	150999€	15€
	S14		69349€	150279€		69349€	150279€	0€
	S15		68684€	149614€		68629€	149559€	55€
S2	S21	65350€	81004€	146354€	65010€	80969€	145979€	375€
	S22		76014€	141364€		75979€	140989€	375€
	S23		70084€	135434€		70069€	135079€	355€
	S24		69349€	134699€		69349€	134359€	340€
	S25		68684€	134034€		68629€	133639€	395€
S3	S31	67040€	71614€	138654€	66530€	71514€	138044€	610€
	S32		65564€	132604€		65504€	132034€	570€
	S33		61494€	128534€		61494€	128024€	510€
	S34		60874€	127914€		60874€	127404€	510€
	S35		59334€	126374€		59334€	125864€	510€
S4	S41	80930€	60689€	141619€	80930€	60479€	141409€	210€
	S42		54599€	135529€		54539€	135469€	60€
	S43		53209€	134139€		53209€	134139€	0€
	S44		52559€	133489€		52559€	133489€	0€
	S45		51064€	131994€		51059€	131989€	5€
S5	S51	65500€	71614€	137114€	65050€	71514€	136564€	550€
	S52		65564€	131064€		65504€	130554€	510€
	S53		61494€	126994€		61494€	126544€	450€
	S54		60874€	126374€		60874€	125924€	450€
	S55		59334€	124834€		59334€	124384€	450€
Moyenne des scénarios		70010	63143€	133153€	69675€	63124€	132799€	354€

Tableau 4.22 : Résultats de la maquette de *Collecte-tri* et de *Désassemblage* avec une livraison avec déclassement

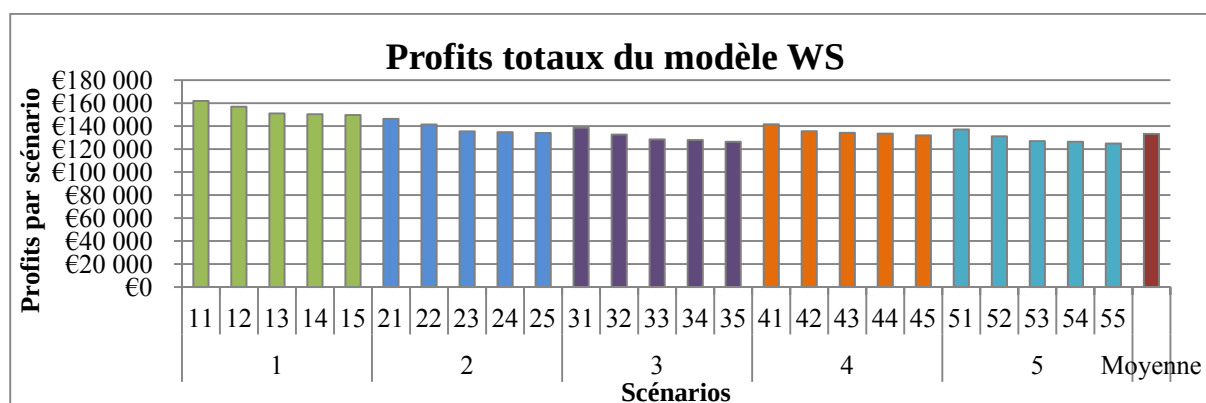


Figure 4.14 : Evolution du profit total par scénario dans le cas avec déclassement

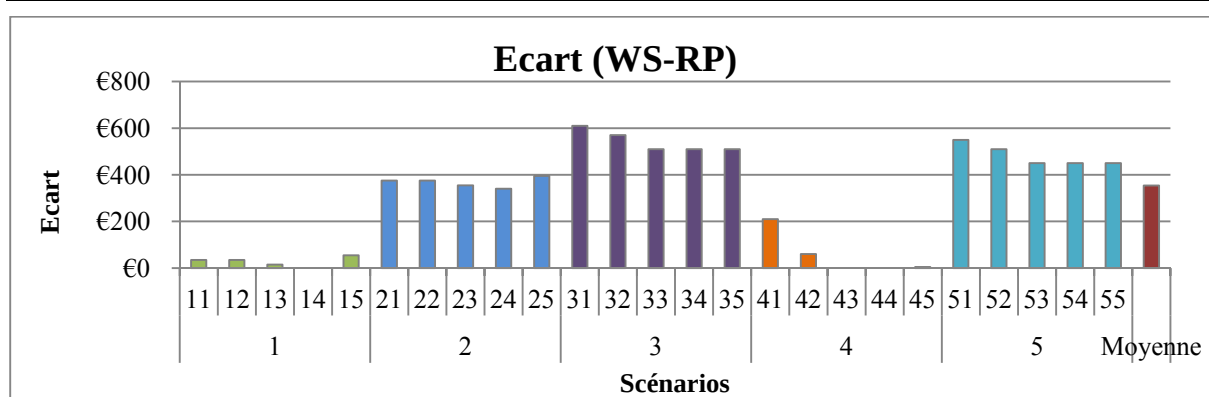


Figure 4.15 : Evolution par scénario de l'écart entre les résultats stochastique et déterministe

La figure 4.14 illustre, d'après le tableau 4.22, le profit total de chaque scénario, somme des profits des centres de *Collecte-tri* (scénarios primaires) et *Désassemblage* (scénarios secondaires). La même tendance se retrouve pour chaque scénario primaire avec un profit de *Collecte-tri* constant et donc pour chaque ensemble afférent des 5 scénarios secondaires : on peut observer une réduction quasi régulière du profit total dans l'ordre des scénarios croissants. Ces variations du profit total proviennent de celles du *Désassemblage*.

De plus, globalement, les profits globaux diminuent. Ceci implique que les résultats du centre de *Collecte-tri* ont un impact sur les performances du centre de *Désassemblage*. Cela peut se constater en comparant les résultats des « bons » scénarios du centre de *Désassemblage* : S11, S21, S31, S41 et S51. Ainsi le profit du centre de *Désassemblage* du scénario S11 est plus important que celui du S51. Pourtant, dans ces deux cas, le centre de *Désassemblage* semble récupérer des bons produits. La différence vient du lien entre les deux centres : en effet, les livraisons du centre de *Collecte-tri* vers le centre de *Désassemblage* sont différentes : les quantités sont différentes, ainsi que les périodes de livraison. Ceci a alors un impact important sur les performances du centre de *Désassemblage*, tributaire des livraisons du centre de *Collecte-tri*.

On note également que le profit total moyen des scénarios du modèle déterministe WS (**133 153 €**) est supérieur à celui du modèle stochastique RP (**132 799 €**). La différence entre ces 2 moyennes est relativement faible (354 €). On peut la retrouver sur la figure 4.15 qui montre l'évolution de l'écart entre les modèle WS et RP en fonction des divers scénarios. D'après cette figure, on se rend compte que dans certains scénarios (S11 à S15 et S41 à S45), les écarts sont très faibles, voire nuls. Cela indique que le modèle RP est performant car il parvient à retrouver les résultats optimaux du modèle WS.

4.3.3.2 Résultats de la maquette logicielle pour une politique sans déclassement

De la même façon qu'au paragraphe précédent, nous présentons dans le tableau suivant les conditions initiales du centre de *Désassemblage* dans le cas où le centre de *Collecte-tri* a aussi une politique de livraison sans déclassement.

Chapitre 4 : Etude expérimentale : application à la planification des activités de *collecte-tri* et de *désassemblage* d'une entreprise de négoce et de démantèlement

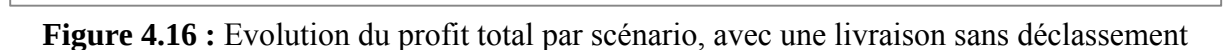
Numéro du scénario	Maillon <i>Collecte-tri</i>		Maillon <i>Désassemblage</i>					
	Col.	$L_{u,t,i,q}$ (produits)	$C_{t,p}$ (équiv. composant)	$Ste0_p$ (équiv. composant)	$Tr0_p$ (équiv. composant)	$Sts0_{i,q}$ (composant)	Total (comp.)	Dem (comp.)
S1	41150€	4	41	8	11	14	74	150
S2	52430€	5	49	8	11	14	82	150
S3	67040€	4	41	8	11	14	74	150
S4	80930€	3	33	8	11	14	66	150
S5	53460€	4	41	8	11	14	74	150

Tableau 4.23 : Résultat de la *Collecte-tri*, et initialisation du *Désassemblage* avec une livraison sans déclassement

Dans le tableau 4.23, les valeurs dans les cases grises ne sont pas identiques à celles du précédent tableau 4.21 car la politique de livraison sans déclassement du centre de *Collecte-tri* étant plus contraignante, ce dernier ne parvient pas à livrer la même quantité de produits. Cette information globale porte sur le total des produits livrés, mais il est possible d'aller plus en détail, en observant notamment le calendrier de livraison. On pourrait alors observer des différences sur les dates de livraison.

Le tableau 4.24 et les figures 4.16 et 4.17 exposent les résultats obtenus en appliquant la même démarche : appliquer pour le centre de *Désassemblage* les modèles WS et RP pour chaque scénario primaire (S1 à S5) obtenu avec le centre de *Collecte*.

Tableau 4.24 : Résultats de la maquette de *Collecte-tri* et de *Désassemblage* avec une livraison sans déclassement



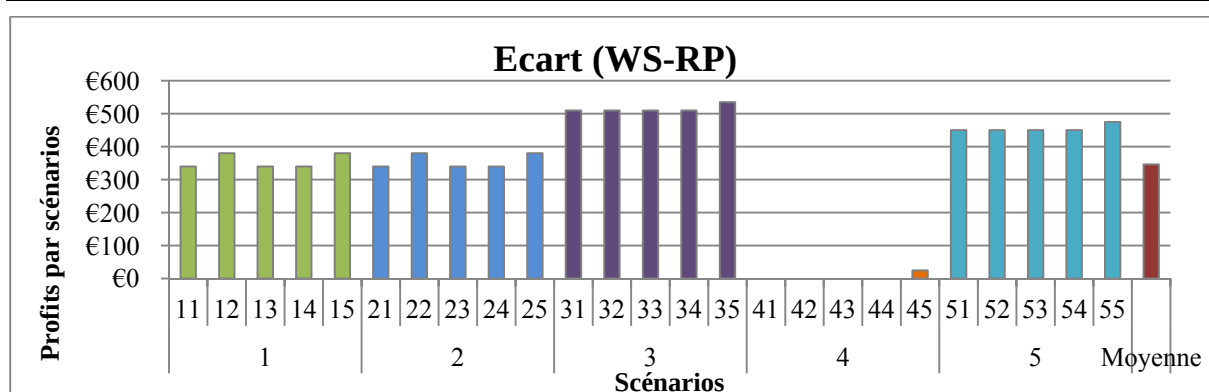


Figure 4.17 : Evolution par scénario de l'écart entre les résultats stochastique et déterministe

D'après le tableau 4.24 et la figure 4.17, on peut remarquer que pour le cas sans déclassement, les profits totaux ont diminué par rapport à ceux de cas avec déclassement. Ceci est logique car les livraisons de composant de qualité A correspondent uniquement à la demande de refabrication. En cas de surstock, ces produits peuvent être expédiés vers le centre d'élimination. Il en est de même pour les composants de qualité B et C, respectivement destinés à la demande du recyclage et au marché secondaire, tout cela entraîne une diminution de ces profits totaux sur des scénarios secondaires. Par ailleurs, les graphiques montrent que dans les scénarios S13, S23, S33, S34, S53, les profits ont diminué car beaucoup de composants ont été expédiés vers le centre d'élimination à cause de la capacité de stockage. Dans le scénario 4 sur la figure 4.17, l'écart est très faible, car ces deux modèles ont les mêmes résultats.

4.4 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté les deux exemples numériques afin de pouvoir appliquer et valider nos modèles de planification sur deux maillons de la chaîne logistique inverse. Le cas d'application provient d'une entreprise de démantèlement, réparation et remontage d'engins de chantier.

Dans un premier temps, nous avons travaillé uniquement sur le centre de *Collecte-tri* en appliquant les modèles déterministes (WS), stochastique (RP) et d'évaluation (EEV). Ils ont été appliqués aussi en faisant varier certains paramètres du jeu de données : les approvisionnements, la politique de livraison avec ou sans déclassement.

Dans un second temps, nous avons mis en relation dans une maquette de simulation le centre de *Collecte-tri* et le centre de *Désassemblage*. De la même façon, nous avons simulé divers cas, par exemple le cas où ces 2 maillons travaillent avec une politique de livraison avec déclassement et tous les deux avec un modèle déterministe.

Nous avons alors pu constater les évolutions des profits de chaque maillon sur les divers scénarios et jeux de données. Concernant le choix de la politique de livraison, il apparaît que des livraisons sans déclassement conduisent à des profits moins importants et à davantage de ruptures de livraison. Dans le cas de la maquette logicielle couplant les étapes de *Collecte-tri* et de *Désassemblage*, on constate que les tendances observées précédemment sur le maillon de *Collecte-tri* s'amplifient.

Il convient de remarquer que ces conclusions sont limitées aux études qui ont été faites. Des plans d'expériences peuvent être faits sur des variations de capacités, de coûts... Concernant la modélisation stochastique, nous rappelons que notre étude est restreinte à l'utilisation de cinq scénarios seulement, ce qui constitue une restriction par rapport à une étude plus complète. Enfin, les résultats observés sont liés à la façon dont nous avons modélisé l'incertitude.

Cependant les résultats du modèle stochastique sont très proches du modèle déterministe. On peut donc conclure à un intérêt limité du modèle stochastique relativement à notre jeu de données.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

La logistique inverse qui permet de traiter nos produits usagés est en plein essor. Elle existe dans certaines filières comme le verre ou le papier, mais beaucoup de travail reste à faire pour éviter que nos déchets finissent éliminés, c'est-à-dire enfouis ou incinérés. Notre travail de thèse vise la réalisation d'un outil d'aide à la décision pour la planification d'une chaîne logistique inverse en tenant compte des incertitudes portant sur le niveau de qualité des produits.

Dans le chapitre 1, nous avons tout d'abord présenté une étude bibliographique qui touche aux différents domaines liés aux travaux de cette thèse, c'est-à-dire : le contexte de la chaîne logistique, les définitions de la chaîne logistique inverse, ses flux, ses étapes, ses niveaux décisionnels. Bien sûr, notre recherche n'est pas exhaustive mais nous avons essayé d'être le plus complet possible pour permettre à tous, de pouvoir comprendre l'environnement global de l'étude. Nous avons jugé utile d'introduire les notions liées à la logistique directe et à l'optimisation pour élargir le champ de vision du lecteur afin d'avoir une idée globale sur les enjeux et les objectifs de réalisation d'outils d'optimisation au niveau de décision tactique.

Nous avons présenté dans le chapitre 2 un état de l'art sur les problématiques liées aux logistiques inverses telles que le problème de conception d'un réseau, le problème de localisation, le problème de sélection de sites, le problème de transport. Pour une meilleure présentation de celui-ci, nous avons proposé une classification des approches concernant la logistique inverse : les domaines d'études des articles, les niveaux décisionnels, les activités de retour, le type de produit, le type de modèle et d'application, la fonction « objectif » du modèle et le type de contrainte.

D'après cette littérature dédiée aux chaînes logistiques inverses, nous nous sommes focalisés sur le problème de planification au niveau tactique. Nous nous sommes intéressés notamment à certains problèmes d'optimisation de la planification de deux sous-ensembles (maillons) *collecte-tri* et *désassemblage*, où la collecte récupère et trie les produits usagés et où le désassemblage est un système capable de démonter des produits en composants. Cette notion de chaîne avec plusieurs maillons (entreprises) est importante afin de mieux comprendre les débouchés possibles d'un produit collecté. Pour un maillon donné, et pour chaque référence de produit, nous avons défini quatre niveaux de qualité (A, B, C, D) qui ciblent alors la(les) destination(s) possible(s) d'un produit parmi les suivantes : le maillon de la chaîne directe, le maillon aval de la chaîne inverse, le marché secondaire ou l'élimination.

L'objectif de cette thèse est d'apporter une modélisation et une résolution de ces problèmes de planification. Ce problème a été formulé à l'aide d'un **modèle générique en programmation linéaire** qui maximise le profit d'un maillon. Il est générique dans le sens où il peut s'adapter à plusieurs maillons de la logistique inverse. Il a été implanté avec le solveur de programmation linéaire GLPK. Nous avons opté pour deux approches : i) la première est **déterministe**, elle permet d'obtenir une planification optimale en supposant tout connaître sur les produits ; ii) la seconde est **stochastique**, elle prend en compte une incertitude sur le niveau de qualité des produits collectés. Pour cela, nous avons défini cinq scénarios dans lesquels le niveau de qualité des produits approvisionnés varie pour simuler une arrivée de produits plutôt plus ou moins bons. Cette dernière approche est plus réaliste car il est difficile, pour ne pas dire impossible, de prévoir le niveau de qualité d'un produit éliminé par un utilisateur et donc son devenir. Par ailleurs, il convient de préciser que les jeux de données utilisées sont constitués pour un même scénario de plusieurs tirages aléatoires successifs (dix tirages) afin de s'approcher de la variabilité des qualités existantes dans une situation réelle.

Par ailleurs, un certain nombre d'indicateurs de performance ont été mis en place afin de pouvoir comparer les résultats obtenus dans différentes situations. En effet, nous avons testé un jeu de données, dit « scénario de références », puis nous avons effectué des variations à partir de ce scénario de base en modifiant certains paramètres, comme la quantité de produits approvisionnés en regard de la quantité de demandes, ou encore la politique de livraison : avec ou sans déclassement des produits afin de pouvoir satisfaire ou non les demandes avec des produits surclassés. Cela permet d'évaluer le comportement d'un maillon pour trouver les « réglages » optimaux de ce dernier. Enfin, comme cela est évoqué dans la littérature, nous avons mis en place un modèle d'évaluation stochastique qui mesure l'intérêt de faire une modélisation stochastique.

De plus, afin de simuler deux maillons de la logistique inverse, nous avons développé une maquette couplant les maillons de *collecte-tri* et de *désassemblage*.

La validation du modèle en programmation linéaire a été faite au chapitre 4 avec un jeu de données issues d'une entreprise de négoce et de démantèlement de machines de travaux publics. Les résultats obtenus amènent certaines conclusions qui dépendent de notre jeu de données et qui ne sont pas donc forcément généralisables. Ces résultats montrent clairement qu'il vaut mieux, pour un maillon donné, opter pour une politique de livraison avec déclassement. Cette dernière donne plus de marge de manœuvre dans les décisions de livraison de produits afin de satisfaire au mieux les demandes des clients en évacuant si besoin des produits surclassés en attente dans les stocks plutôt que de devoir les expédier à l'élimination faute de place due à une capacité de stockage limitée. Concernant les tests avec des variations des quantités approvisionnées, il s'avère qu'il est préférable, pour un maillon, de limiter ses approvisionnements et ainsi de travailler plutôt avec des ruptures de stock. Il est clair que ce bilan dépend directement des coûts de stockage et de rupture de stock. Ces deux premières remarques sont valables pour nos tests déterministes et stochastiques.

Le modèle d'évaluation stochastique montre cependant un intérêt limité à une modélisation stochastique pour notre jeu de données car les écarts entre les résultats déterministe, stochastique et d'évaluation sont faibles.

La simulation des deux maillons de logistique inverse via notre maquette aboutit aux mêmes conclusions qui s'amplifient lorsque l'on regarde le bilan global de ces deux maillons.

Perspectives

Les travaux réalisés dans la cadre de cette thèse ouvrent des perspectives de recherche prometteuses. Nous décrivons brièvement ci-dessous quelques pistes qui nous semblent intéressantes pour la logistique inverse. Ces perspectives peuvent se décliner à différents niveaux :

Les données d'entrées des différents modèles:

- il serait judicieux d'étendre le nombre de périodes de 10 à 30 périodes par exemple afin de représenter un horizon de planification plus proche d'une situation réelle. Cela permettrait certainement d'avoir plus d'écart entre les résultats déterministes et stochastiques.
- pour la même raison, il serait bon d'avoir un jeu de données avec plus de flux de produits et plus de références augmentant les capacités de traitement par exemple.

La modélisation d'un maillon :

- Il semblerait utile l'intégration de nouvelles décisions tactiques telles que : la planification des critères d'acceptation d'un retour, le choix des moyens de transport, la définition de stock de sécurité.
- Il conviendrait également d'étudier prise en compte d'autres incertitudes portant sur le carnet de demandes des clients ou les approvisionnements des produits en quantité et date, car tout comme la qualité, il est difficile de prévoir quand et combien de produits seront collectés.
- L'utilisation d'une technique dite de planification à « horizon glissant » permettrait également de s'approcher davantage des besoins réels d'une entreprise dans ce domaine.

L'analyse des résultats :

- il serait également pertinent d'analyser les résultats sur les profits certes, mais aussi sur d'autres indicateurs de performance tels que le taux de déclassement, le taux de livraison par qualité, le stock de sécurité, le taux de rejet ou encore le taux de retour, afin d'avoir une vision élargie de la situation.

Le réseau de logistique inverse :

- il semble intéressant également d'étudier l'impact de l'organisation des flux de retour des produits en entreprise. Dans notre modélisation, nous avons supposé que les entreprises traitant les déchets étaient des entreprises indépendantes des entreprises de la logistique directe ayant fabriqué ces produits. Qu'en serait-il, en terme de transport notamment, si on avait un réseau avec des entreprises qui fabriquent et retraitent leurs propres produits ?
- il serait aussi envisageable de distinguer d'autres destinations possibles des produits pour augmenter les débouchés possibles d'un déchet. Par exemple, concernant la notion de marché secondaire, deux cas sont possibles : (i) un marché secondaire dans le sens géographique du terme qui vise le marché des pays en voie de développement où le niveau de qualité peut être moins exigeant que les marchés des pays développés) ; (ii) un marché secondaire dans lequel les produits seraient destinés à la fabrication d'autres produits (recyclage). Par exemple, les pneus usagés peuvent servir pour la réalisation de bitume.
- Enfin, on pourrait imaginer réaliser une maquette qui lie tous les maillons d'une chaîne inverse, mais aussi les entreprises de la logistique directe et pourquoi pas aussi des utilisateurs qui pourraient avoir un comportement plus ou moins « consommateur ». Cette maquette permettrait de simuler diverses configurations pour une aide notamment au dimensionnement des chaînes logistiques directes et inverses.
- Des aspects collaboratifs pourraient aussi être étudiés entre différents maillons de logistique inverse pour par exemple se « partager » les produits collectés afin d'éviter des surstocks ou ruptures de stock et ainsi collectivement mieux répondre aux besoins des clients.

Toutes ces perspectives permettraient de mieux appréhender les réseaux logistiques directs et inverses. Cependant, n'oublions pas que, certes il y a des optimisations à chercher en logistique dans lequel s'insère ces travaux de thèse, mais le frein principal à la logistique inverse reste la recherche de solution technique de traitement...

Bibliographie

- Achillas, C., Vlachokostas, C., Aidonis, D., Moussiopoulos, N., Lakovou, E., & Banias, G. (2010). Optimising reverse logistiquie network to support policy-making in the cas of Electrical and Electronic Equipment. (Elsevier, Éd.) *Waste Management*, 30, 2592-2600.
- Agrawal, S., Singh, R., & Murtaza, Q. (2015). A literature review and perspective in reverse logistics. (Elsevier, Éd.) *Resources, Conservation and recycling*, 97, 76-92.
- Ahiska, S., & King, R. (2010). Life cycle inventory policy characterizations for a single-product recoverable system. (Elsevier, Éd.) *Int. J. Production Economics*, 124, 51-61.
- Aitken, J., Childerhouse, P., & Towill, D. (2003). The impact of product life cycle on supply chain strategy. (Elsevier, Éd.) *Int. J. Production Economics*, 85, 127-140.
- Alfonso-Lizarazo, E., Montoya-Torres, J., & Gutiérrez-Franco, E. (2013). Modeling reverse logistics process in the agro_industrial sector: The case of the palm oil supply chain. (Elsevier, Éd.) *Applied Mathematical Modelling*, 37, 9652-9664.
- Alshamsi, A., & Diabat, A. (2015). A reverse logistics network design. (Elsevier, Éd.) *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 589-598.
- Alumur, S. A., Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F., & Verter, V. (2012). Multi-périod reverse logistics network design. (Elsevier, Éd.) *European Journal of Operational Research*, 220, 67-78.
- Alumur, S., Kara, B., & Melo, M. (2015). Location and Logistics. (S. I. Publishing, Éd.) *Location Science*, 419-441.
- Ashfari, H., Sharifi, M., ElMekkawy, T. Y., & Peng, Q. (2014a). Facility Location Decisions Within Integrated Forward/Reverse Logistics under Uncertainty. (Elsevier, Éd.) *Procedia CIRP*, 17, 606-610.
- Ashfari, H., Sharifi, M., ElMekkawy, T. Y., & Peng, Q. (2014b). Optimizing multi-objective dynamic facility location decisions within green distribution network design. (Elsevier, Éd.) *Procedia CIRP*, 17, 675-679.
- Assavapokee, T., & Wongthatsanekorn, W. (2012). Reverse production system infrastructure design for electronic products in the state of Texas. (Elsevier, Éd.) *Computers & Industrial Engineering*, 62, 129-140.
- Ayvaz, B., & Bolat, B. (2014). Proposal of a Stochastic Programming Model for Reverse Logistic Network Design under Uncertainties. *International Journal of Supply Chain Management*, 3, 33-42.

- Ayvaz, B., Bolat, B., & Aydin, N. (2015). Stochastic reverse logistics network design for waste of electrical and electronic equipment. (Elsevier, Éd.) *Resources, Conservation and Recycling*, 104, 391-404.
- Azadi, M., & Saen, R. (2011). A new chance-constrained data envelopment analysis for selecting third-party reverse logistics providers in the existence of dual-role factors. (Elsevier, Éd.) *Expert Systems with Applications*, 38, 12231-12236.
- Balmana, G., & Balmes, R. (2001). Pilotage des flux. (T. d. l'ingénieur, Éd.) *Génie industriel | Logistique*, AG 5 105: 1-13.
- Bastin, F. (2011). Programmation stochastique. *IFT-6512 - Hiver 2011*. Montréal: Département d'informatique et de recherche opérationnelle.
- Beasley, J. (2002). *Operation Research-Notes*.
<http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/or/sp.html>
- Bennekrouf, M. (2013). *Modélisation et simulation d'une chaîne logistique inverse en tenant compte de la robustesse*. Thèse de doctorat, Université de Tlemcen.
- Birge, J., & Louveaux, F. (2011). *Introduction to Stochastic Programming*. (S. S. Engineering, Éd.) New York.
- Blumberg, D. F. (2005). *Introduction to management and closed Loop Supply Chain Processus*. (C. PRESS, Éd.) Whashington.
- Cetin, M., & List, G. F. (2006). Integrated modeling of information and physical flows in transportation systems. (Elsevier, Éd.) *Transportation Research Part C*, 14, 139-156.
- Choudhary, A., Sarkar, S., Settur, S., & Tiwari, M. (2015). A carbon market sensitive optimization model for integrated forward-reverse logistics. (Elsevier, Éd.) *Int. J. Production Economics*, 164, 433-444.
- Chouinard, M. (2007). *Modélisation et conception de boucles d'approvisionnement: contexte multi-produit, multi-état et multi-alternative de traitement*. Thèse de doctorat, Université de Laval.
- Codimatra. (s.d.). <http://www.codimatra.fr/entreprise/presentation>
- CPLEX. (s.d.). <http://www-01.ibm.com/software/commerce/optimization/cplex-optimizer/>
- Cruz-Rivera, R., & Ertel, J. (2009). Reverse logistics network design for the collection of End-of-Life Vehicles in Mexico. (Elsevier, Éd.) *European Journal of Operational Research*, 196, 930-939.
- Das, A., Gupta, A., & Mazumder, T. (2012). Vulnerability assessment using hazard potency for regions generating industrial hazardous waste. (Elsevier, Éd.) *Journal of Hazardous Materials*, 209-210, 308-317.
- Das, K., & Chowdhury, A. H. (2012). Designing a reverse logistics network for optimal collection, recovery and quality-based product-mix planning. (Elsevier, Éd.) *Int. J. Production Economics*, 135, 209-221.

- Dat, L. Q., Linh, D. T., Chou, S.-Y., & Yu, V. F. (2012). Optimizing reverse logistic costs for recycling end-of-life electrical and electronic products. (Elsevier, Éd.) *Expert Systems with Applications*, 39, 6380-6387.
- Delaney, B. (1998). *Ninth Annual State of Logistics Report*. Saint Louis.
- Demirel, E., Demirel, N., & Gökçen, H. (2014). A mixed integer linear programming model to optimize reverse logistics activities of end-of-life vehicles in Turkey. (Elsevier, Éd.) *Journal of Cleaner Production*, 112, 2101-2113.
- Dhuoib, D., & Elloumi, S. (2011). A new multi-criteria approche dealing with dependent and heterogeneous creteria for end-of-life product strategy. (Elsevier, Éd.) *Applied Mathematics and Computation*, 218, 1668-1681.
- El-Sayed, M., Afia, N., & El-Kharboly, A. (2010). A stochastic model for forward-reverse logistics network design under risk. (Elsevier, Éd.) *Computers & Industrial Engineering*, 58, 423-431.
- Ene, S., & Öztürk, N. (2015). Network modeling for reverse flows of end-of-life vehicles. (Elsevier, Éd.) *Waste Management*, 38, 284-296.
- Ferri, G., Chaves, G., & Ribeiro, G. (2015). Reverse Logistics network for municipal solid waste management: The inclusion of waste pickers as a Brazilian legal requirement. (Elsevier, Éd.) *Waste Management*, 40, 173-191.
- Florie, G. (2005). *Reverse logistics et déchet déquipements électriques et électroniques*. http://www.memoireonline.com/04/10/3319/m_Reverse-logistics-et-dechets-dequipements-electriques-et-electroniques-3.html
- François, J. (2007). *Planification des chaînes logistiques: Modélisation du système decisionnel et performance*. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux.
- Françoise. (s.d.). *Françoise Louis*. http://francoise.louisdelv.free.fr/fld/recyclage_au_quotidien.html
- Gautrin, P. (2013). *Group GCL Conseil Logistique*. <http://www.faq-logistique.com/GCL-Logiguide-Vol08Num01-Gestion-Chaine-Logistique.htm>
- GLPK. (s.d.). <https://en.wikibooks.org/wiki/GLPK>
- Gonzalez-Torre, P., Adenso-Diaz, B., & Artiba, H. (2004). Environmental and reverse logistics policies in Enropean bottling and packaging firms. (Elsevier, Éd.) *International Journal of Production Economics*, 88, 95-104.
- Gou, Q., Liang, L., Huang, Z., & Xu, C. (2008). A joint inventory model for open-loop reverse supply chain. (Elsevier, Éd.) *Int. J. Production Economics*, 116, 28-42.
- Govindan, K., Palaniappan, M., Zhu, Q., & Kannan, D. (2012). Analysis of third party reverse logistics provider using interpretive structural modeling. (Elsevier, Éd.) *Int. J. Production Economics*, 140, 204-211.

- Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain : A comprehensive review to explore the future. (Elsevier, Éd.) *European Journal of Operational Research*, 240, 603-626.
- Guide, V. D., & Wassenhove, L. N. (2009). The Evolution of Closed-Loop Supply Chain Research. (Informs, Éd.) *Operations Research*, 57, 10-18.
- Hatefi, S., & Jolai, F. (2014). Robust and reliable forward–reverse logistics network design under demand uncertainty and facility disruptions. (Elsevier, Éd.) *Applied Mathematical Modelling*, 38, 2630-2647.
- Henrion, R. (2004). *Introduction to Chance-Constrained Programming*.
<http://stopprog.org/SPIntro/intro2ccp.php>
- Hu, T.-L., Sheu, J.-B., & Huang, K.-H. (2002). A reverse logistics cost minimization model for the treatment of hazardous wastes. (Elsevier, Éd.) *Transportation Research Part E*, 38, 457-473.
- Jamshidi, M. (2011). Reverse Logistics. *Logistics Operations and Management*.
- Kannan, D., Diabat, A., Alrefaei, M., Govindan, K., & Yong, G. (2012). A carbon footprint based reverse logistics network design model. (Elsevier, Éd.) *Resources, Conservation and Recycling*, 67, 75-79.
- Kara, S., & Onut, S. (2010). A two-stage stochastic and robust programming approach to strategic planning of a reverse supply network : The case of paper recycling. (Elsevier, Éd.) *Expert Systems with Applications*, 37, 6029-6137.
- Kenné, J.-P., Dejax, P., & Gharbi, A. (2012). Production planning of hybrid manufacturing-remanufacturing system under uncertainty within a closed-loop supply chain. (Elsevier, Éd.) *Int J. Production Economics*, 135, 81-93.
- Keyvanshokoo, E., Fattahi, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). A dynamic pricing approach for returned products in integrated forward/reverse logistics network design. (Elsevier, Éd.) *Applied Mathematical Modelling*, 37, 10182-10202.
- Kilic, H., Cebeci, U., & Ayhan, M. (2015). Reverse logistics system design for the waste of electrical and electronic equipment (WEEE) in Turkey. (Elsevier, Éd.) *Ressources, Conservation and Recycling*, 95, 120-132.
- Kim, K., Song, I., Kim, J., & Jeong, B. (2006). Supply planning model for remanufacturing system in reverse logistics environment. (Elsevier, Éd.) *Computers & Industrial Engineering*, 51, 279-287.
- Lambert, S., & Riopel, D. (2003). *Logistique inverse : revue de littérature*. Montreal: Les cahiers du GERAD.
- Lambert, S., & Riopel, D. (2004). *Modèle intégrateur de la logistique inverse*. Montréal: Edition, Août 2004 (G-2004-69).

- Lambert, S., Riopel, D., & Abdul-Kader, W. (2011). A reverse logistics decisions conceptual framework. (Elsevier, Éd.) *Computers & Industrial Engineering*, 61, 561-581.
- Landrieu, A. (2001). *Logistique inverse et collecte des produits techniques en fin de vie*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble.
- Langella, I., & Kleber, R. (2006). The Use of Chance Constrained Programming for Disassemble-to-Order Problems with Stochastic Yields. *Operations Research Proceedings, 2006*, 473-478.
- Lee, C.-Y., & Johnson, A. (2014). Proactive data envelopment analysis: Effective production and capacity expansion in stochastic environments. (Elsevier, Éd.) *European Journal of Operational Research*, 232, 537-548.
- Lee, D.-H., & Dong, M. (2009). Dynamic network design for reverse logistics operations under uncertainty. (Elsevier, Éd.) *Transportation Research Part E*, 45, 61-71.
- Lee, J.-E., Gen, M., & Rhee, K.-G. (2009). Network model and optimization of reverse logistics by hybrid genetic algorithm. (Elsevier, Éd.) *Computers & Industrial Engineering*, 56, 951-964.
- Logozar, K., Radonjic, G., & Bastic, M. (2006). Incorporation of reverse logistics model into in-plant recycling process: A case of aluminium industry. (Elsevier, Éd.) *Resources Conservation & Recycling*, 49, 49-67.
- Mahmoudzadeh, M., Mansour, S., & Karimi, B. (2013). To develop a third-party reverse logistics network for end of life vehicles in Iran. (Elsevier, Éd.) *Resources, Conservation and Recycling*, 78, 1-14.
- Misra, V., & Pandey, S. (2005). Hazardous waste, impact on health and environment for development of better waste management strategies in future in India. *Environment international*, 31, 417-431.
- Mudgal, S., Tinetti, B., Faninger, T., Lockwood, S., & Anderson, G. (2012). Etude sur la durée de vie des équipements électriques et électroniques. (Ademe, Éd.)
- Orloff, K., & Falk, H. (2003). An international perspective on hazardous waste practices. (Elsevier, Éd.) *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 206, 291-302.
- Östlin, J., Sundin, E., & Björkman, M. (2009). Product life-cycle implications for remanufacturing strategies. *Journal of Cleaner Production*, 17, 999-1009.
- Pishvae, M. S., Jolai, F., & Razmi, J. (2009). A stochastic aptimization model for integrated forward/reverse logistics network design. (Elsevier, Éd.) *Journal of Manufacturing systems*, 28, 107-114.
- Ramezani, M., Bashiri, M., & Tavakkoli-Mogaddam, R. (2013). A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level. (Elsevier, Éd.) *Applied Mathematical Modelling*, 37, 328-344.

- Riopel, D., Chouinard, M., Marcotte, S., & Aït-Kady, D. (2011). *Ingénierie et gestion de la logistique inverse*. (Lavoisier, Éd.) Paris.
- Ripert, C. (2000). Les transports de déchets. (Ademe, Éd.)
- Roghanian, E., & Pazhoheshfar, P. (2014). An optimization model for reverse logistic network under stochastic environment by using genetic algorithm. (Elsevier, Éd.) *Journal of Manufacturing Systems*, 33, 348-356.
- Salema, M. I., Barbosa-Povoa, A. P., & Novais, A. Q. (2007). An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty. (Elsevier, Éd.) *European Journal of Operational Research*, 179, 1063-1077.
- Salema, M. I., Barbosa-Povoa, A. P., & Novais, A. Q. (2010). Simultaneous design and planning of supply chains with reverse flows: A generic modelling framework. (Elsevier, Éd.) *European Journal of Operational Research*, 203, 336-349.
- Sen, S., & Higle, J. (1999). An Introductory Tutorial on Stochastic Linear Programming Models. *Institute for Operations Research and the Management Sciences*, 29, 33-61.
- Slack, R., Gronow, J., & Voulvoulis, N. (2009). The management of household hazardous waste in the United Kingdom. (Elsevier, Éd.) *Journal of Environmental Management*, 90, 36-42.
- Soleimani, H., & Govindan, K. (2014). Reverse logistics network design and planning utilizing conditional value at risk. (Elsevier, Éd.) *European Journal of Operational Research*, 237, 487-497.
- Stock, J. (2001). The 7 deadly sins of reverse logistics. *Material Handling Management*, 56, 5-11.
- Supply Chain Management. (1996). *Indicateur de Performance dans les Fonction du Supply Chain Management*. <http://www.agroalimentaire-lr.com/sites/aria.choosit.eu/files/fichiers/documents%20de%20rubrique/guide-logistique.pdf>
- Vahdani, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., Modarres, M., & Baboli, A. (2012). Reliable design of forward/reverse logistics network under uncertainty: A robust-M/M/c queuing model. (Elsevier, Éd.) *Transportation Research Part E*, 48, 1152-1168.
- Varmatin. (2009). *Varmatin*. <http://www.varmatin.com/article/frejus/saint-raphael-les-vetements-usages-des-raphaelois-seront-recycles-0.38434.html>
- Wan, H.-d., & Gonnuru, V. K. (2013). Disassembly planning and sequencing for end-of-life products with RFID enriched information. (Elsevier, Éd.) *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29, 112-118.
- Wen-hui, X., Dian-yan, J., & Yu-ying, H. (2011). The remanufacturing reverse logistics management based on Closed-loop supply chain management processes. (Elsevier, Éd.) *Procedia Environmental Sciences*, 11, 351-354.

- Zaarour, N., Melachrinoudis, E., Solomon, M., & Min, H. (2014). A reverse logistics network model for handling returned products. (O. access, Éd.) *International Journal of Engeneering Business Management*, 6, 1-10.
- Zang, W., Liu, Y., & Li, Z. (2012). Optimizing Supplier Selection with Disruptions by Chance-Constrained Programming. (S. Link, Éd.) *Lecture Notes in Computer Science*, 7332, 108-116.
- Zanjani, M., & Nourelfath, M. (2014). Integrated spare parts logistics and operations planning for maintenance service providers. (Elsevier, Éd.) *International Journal of Production Economics*, 158, 44-53.
- Zhang, Y., Huang, G., & He, L. (2011). An inexact reverse logistics model for municipal solid waste management systems. (Elsevier, Éd.) *Journal of Environmental Management*, 92, 522-530.
- Zhou, X., & Zhou, Y. (2015). Designing a multi-echelon reverse logistics operation and network: A case study of office paper in Beijing. (Elsevier, Éd.) *Resources, Conservation and Recycling*, 100, 58-69.
- Zhou, Y., & Wang, S. (2008). Generic Model of Reverse Logistics Network Design. (Elsevier, Éd.) *Journal of transportation systems engineering and information technology*, 8, 71-78.

Annexes

Annexe 1 : Le tableau récapitulatif de la durée de vie (Mudgal <i>et al.</i> , 2012).....	138
Annexe 2 : La typologie et quantification des déchets en « France 1998 », (Ripert, 2000) ..	139
Annexe 3 : Les déchets dangereux dans différents pays.....	141
Annexe 4 : La modélisation déterministe (WS).....	143
Annexe 5 : La modélisation stochastique (RP)	149
Annexe 6 : La modélisation d'évaluation stochastique (EEV)	152
Annexe 7 : L'évaluation de la performance de la chaîne inverse	153
Annexe 8 : Référence des familles de machines	155
Annexe 9 : Demandes des clients.....	156
Annexe 10 : Résultats de l'approvisionnement inférieur à la demande	157
Annexe 11 : Résultats de l'approvisionnement égal à la demande	159
Annexe 12 : Résultats de l'approvisionnement supérieur à la demande.....	161

Annexe 1 : Le tableau récapitulatif de la durée de vie (Mudgal *et al.*, 2012)

Catégorie de produit	Durée de vie utilisée	Type de durée de vie
Téléviseur	- scénario actuel : 10 ans en primaire et 5 ans en secondaire - scénario futur (après 2010) : 8 ans en primaire et 4 ans en secondaire	Durée totale d'usage
Imprimante	- 3 ans (100 pages imprimées/jour) - 4 ans (25000 pages imprimées/mois) - 6 ans pour imprimante marquée laser - 4 ans pour imprimante marquée jet d'encre	Durée totale d'usage
Ordinateur portable	- 5 ans pour les ordinateurs domestiques et professionnels (réutilisation non incluse) d'où 5,6 ans (réutilisation incluse) - 3 ans (utilisation de 8 heures par jour, 230 jours par an)	Durée totale d'usage Durée d'usage pour le premier utilisateur
Téléphone mobile	- 2 ans (utilisation en communication 5,5 heures par mois) - 2 ans (utilisation d'un téléphone mobile Nokia 3G)	Durée d'usage
Ampoule électrique traditionnelle	- 1000 à 70000 heures selon l'ampoule	Temps de demi-vie ¹³
Aspirateur	- 8 ans en moyenne (entre 6 et 10 ans)	Durée d'usage totale
Lave-linge	- 15 ans (Masse de linge lavé par cycle et sachant le nombre de cycles par an et la durée de vie d'une machine).	Durée d'usage totale

¹³ Durée au terme de laquelle 50% des lampes arrêtent de fonctionner dans les conditions de test.

Annexe 2 : La typologie et quantification des déchets en « France 1998 », (Ripert, 2000)

Le tableau a.2 rassemble les matières décomposées, les quantités (en millions de tonnes) et les filières d'élimination en France.

Déchets	Matières décomposées	Millions de t/an	Filières d'élimination
Déchets ménagers et assimilés	- Ordures ménagères - Encombrants - Déchets issus du jardinage - Déchets issus du bricolage - Déchets des artisans, commerçants et établissements divers collectés mélangés avec les ordures ménagères	22 5 5	- Incinération - Recyclage - Compostage - Mise en décharge (classe n° 2)
<i>Total déchets ménagers et assimilés</i>		32 3.6%	
Déchets des collectivités locales	- Boues de station d'épuration - Matières de vidanges - Déchets des espaces verts - Déchets des marchés - Déchets issus du nettoyage de la voirie	1.5 3.5 6.5	- Incinération - Recyclage - Compostage - Mise en décharge (classe n° 3 pour les déchets inertes et n° 2 pour les autres)
<i>Total déchets des collectivités locales</i>		25 2.9%	
Déchets industriels	- Déchets industriels banals (DIB collectés séparément des déchets ménagers et assimilés : verre, métaux, plastiques, caoutchoucs, textiles, papiers, cartons, bois, cuir et mélanges) - Déchets industriels spéciaux (DIS ou déchets dangereux)	51 7	- Incinération - Recyclage - Mise en décharge (classe n°2) - Incinération - Mise en décharge contrôlée (Classe n°1) - Traitement chimique
<i>Total déchets industriels</i>		58 6.5%	
Déchets bâtiment et travaux publics	- Déchets du bâtiment . déchets inertes . déchets banals . déchets spéciaux - Déchets des travaux publics	24	- Mise en décharge - Remblais pour chantiers de

Annexes

	. remblais . déblais . déchets de pierres	330	terrassament - Remblais pour carrières en fin d'exploitation
<i>Total déchets bâtiment et travaux publics</i>		354	40%
Déchets agricoles et des industries agro-alimentaires	- Déchets produits par l'exploitation fermière - Déchets produits par l'exploitation forestière - Déchets produits par la pêche - Déchets produits par les IAA	375 45	- Incinération - Mise en décharge - Alimentation animale - Épandage fertilisant - Recyclage - Incinération
<i>Total déchets agricoles et des industriels agroalimentaires</i>		420	47%
Total déchets "France 1998"		889	100%

Annexe 3 : Les déchets dangereux dans différents pays

Les sources de déchets dangereux, l'élimination, et les préoccupations environnementales dans les pays¹⁴ du monde (Orloff & Falk, 2003)

Pays	Sources de déchets dangereux	Méthode d'élimination	Préoccupation sur la santé et l'environnement
Brésil	Procédés industriels, Exploitation minière et extraction, Agriculture,	Mise en décharge (municipales et industrielles)	Pollution de l'air
Colombie	Centrales électriques, Industrie des métaux, Nourriture, boisson, tabac, Industrie chimique	Recyclage, Centre d'enfouissement	Contamination de l'eau, Résidus de pesticides alimentaires, Pollution de l'air
Costa Rica	Déchets hospitaliers, Industrie chimique	Décharges à ciel ouvert	Pollution de l'air et des eaux, Contamination par les pesticides du sol
Egypte	Agriculture, Industrie chimique, Autre industrie	Centre d'enfouissement	Pesticides, Pollution de l'air (grandes villes)
Honduras	Déchets hospitaliers, Industrie minière, Agriculture, Déchets de laboratoire	Centre d'enfouissement, Décharge dans les égouts, Décharge dans les rivières	Elimination des déchets dangereux, Contamination de l'eau potable, Pollution de l'air
Inde	Exploitation minière, Métallurgie, Produits chimiques Pâtes et papiers, Galvanoplastie,	Centre d'enfouissement, Incinération, Recyclage, Elimination des puits profonds	Contamination de l'eau potable, Pollution de l'air

¹⁴ Cette information a été fournie par des représentants gouvernementaux et universitaires compétents des pays, mais n'est pas destinée à être divulguée dans un discours de politique officielle. De même, le motif du choix des pays n'est pas donné dans la source bibliographique.

Annexes

Pologne	Exploitation minière, Centrales électriques, Industrie métallurgique, chimique et alimentaire,	Recyclage ou réutilisation, Centre d'enfouissement, Incinération	Pollution de l'air et des eaux, Elimination des déchets municipaux et dangereux
Espagne	Fabrication, Exploitation minière	Incinération, Centre d'enfouissement, Recyclage	Pollution de l'air, Expositions aux pesticides
Taiwan	Industrie électronique, Industrie chimique, Industrie des métaux	Incinération, Recyclage, Solidification et mise en décharge (métaux)	Pollution des eaux, Élimination des déchets dangereux
Trinidad et Tobago	Industrie pétrochimique, Déchets hospitaliers, Exploration pétrolière et raffinage, Pesticides	Bio-remédiation, Incinération, Stabilisation au ciment et mise en décharge, Centre d'enfouissement	Eaux usées, Émissions des véhicules, Déforestation

Annexe 4 : La modélisation déterministe (WS)

Les ensembles et indices du modèle

Voici la liste des indices et des ensembles utilisés dans ce modèle.

- Les indices :

t	indice identifiant la période
p	indice identifiant un produit entrant
i	indice identifiant un produit sortant
u	indice identifiant la destination du produit ou le client
q	indice identifiant le niveau de qualité d'un produit sortant
n	indice identifiant le numéro de traitement

- Les ensembles de temps, de produits et de qualités :

$T = \{1..h\}$	Ensemble de périodes de l'horizon
$T0 = \{(1-d)..h\}$	Ensemble de périodes de l'horizon en tenant compte du délai de traitement d
$P = \{1..p'\}$	Ensemble de produits entrants
$I = \{1..i'\}$	Ensemble de produits sortants
$Q = \{1..q'\}$	Ensemble des niveaux de qualité. Dans ce travail, nous utiliserons 4 niveaux de qualité q : A = bonne qualité, B = qualité moyenne, C = qualité médiocre et D = mauvaise qualité.
U	Ensemble de sites de destination des produits sortants. Dans ce travail, nous utiliserons 4 destinations :
U1	Maillon de la chaîne directe
U2	Maillon aval de la chaîne inverse
U3	Marché secondaire
U4	Centre d'élimination
$NumP = \{1..100\}$	Numéro de traitement du produit.

Les paramètres du modèle

Voici la liste des paramètres utilisés dans le modèle.

- Les paramètres décrivant le centre de traitement :

$kc_{p,i}$	Coefficient de nomenclature liant le produit entrant p et le produit sortant i
$C_{t,p}$	Quantité de produits p arrivés à la réception à la période t
$a_{i,n,q}$	Quantité, générée aléatoirement, de produits traités i de niveau de qualité q entre le 1 ^{er} traitement et le n ^{ième} .

- Les paramètres relatifs aux capacités maximales de traitement, de livraison, de stockage et de ruptures :

$CapTr_t$	Capacité de traitement pendant la période t
$CapLiv_t$	Capacité de livraison pendant la période t
$MaxSte_t$	Maximum de stocks entrant pendant la période t
$MaxSts_t$	Maximum de stocks sortant pendant la période t
$MaxBack_t$	Maximum de rupture de stocks pendant la période t.

- Les paramètres économiques :

CA_p	Coût d'achat unitaire du produit entrant p
$CSte_p$	Coût de stockage unitaire du produit entrant p
CTr_p	Coût de traitement unitaire du produit entrant p
$CSts_i$	Coût de stockage unitaire du produit sortant i
$Cret_{u,i}$	Coût de rupture de stock unitaire du produit sortant i auprès du client u
$CL_{u,i}$	Coût de transport unitaire du produit sortant i entre le centre de traitement et la destination u
$PV_{u,i}$	Prix de vente unitaire du produit sortant i pour le client u.

- Les paramètres définissant l'état initial :

$Ste0_p$	Quantité initiale de stock du produit entrant p
$Sts0_{i,q}$	Quantité initiale de stock du produit sortant i avec le niveau de qualité q
$Tr0_p$	Quantité initiale de produit p en cours de traitement
$B0_{u \neq U4,i}$	Quantité initiale de rupture de stock du produit sortant i auprès du client u (hors « centre d'élimination »)
$Cumul0_i$	Quantité initiale de produits sortis i.

- Les paramètres relatifs aux demandes :

$Dmde_{u \neq U4,t,i}$	Demande de produit i du client de type u au centre de traitement pendant la période t. Pour rappel, ces demandes concernent tous les sites destinataires à l'exception le centre d'élimination.
------------------------	---

Les variables du modèle

- Les variables décrivant les quantités de produits :

$Ste_{t,p}$	Quantité de produits entrants p à stocker pendant la période t
$Tr_{t,p}$	Quantité de produits p à traiter pendant la période t
$Sts_{t,i,q}$	Quantité de produits sortants i de qualité q à stocker pendant la période t

$L_{u,t,i,q}$	Quantité de produits sortants i de qualité q à expédier à la destination u pendant la période t
$B_{u \neq U4, t, i}$	Quantité de produits i en rupture de stock à la fin de la période t pour le client u (hors « centre d'élimination »).

- Les variables relatives aux cumuls et aux transferts de produits, nécessaires pour la modélisation sous contraintes linéaires des affectations de la qualité :

$Cumul_{t,i}$	Quantité cumulée de produits i traités jusqu'à la période t
$TF_{t,i,q}$	Quantité de produits sortants i à transférer au stockage sortant de niveau q pendant la période t
$y_{t,i,n=1...100}$	Variable binaire qui vaut 1 si, à la période t , un produit i est traité en $n^{ième}$ position ; et 0 sinon.

La fonction objectif du modèle

La fonction objectif de notre modèle de planification pour un maillon s'exprime ainsi :

$$Profit = Ventres - Coûts, \text{ où} \quad (1.1)$$

$$Ventres = \sum_{u \neq U4} \sum_t \sum_i \sum_q PV_{u,i} * L_{u,t,i,q} \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned} Coûts = & \sum_u \sum_t \sum_i \sum_q CL_{u,i} * L_{u,t,i,q} + \sum_t \sum_p CA_p * C_{t,p} + \sum_t \sum_p CSte_p * Ste_{t,p} \\ & + \sum_t \sum_p CTr_p * Tr_{t,p} + \sum_t \sum_i \sum_q CSts_i * Sts_{t,i,q} + \sum_{u \neq U4} \sum_t \sum_i Cret_{u,i} * B_{u,t,i} \end{aligned} \quad (1.3)$$

Les contraintes du modèle

- Calcul du cumul

$$Cumul_{t,i} = Cumul_{t-1,i} + \sum_p kc_{p,i} * Tr_{t-d,p} \quad \forall t, \forall i \quad (1.4)$$

- Affectation du niveau de qualité des produits traités

$$\sum_{tp=1...t} TF_{tp,i,q} - \alpha_{i,n,q} \leq M * (1 - y_{t,i,n}) \quad \forall t, \forall i, \forall q, \forall n = 1...100 \quad (1.5)$$

- Cohérence de la variable « Cumul »

$$M * y_{t,i,n} = (n + 1) - Cumul_{t,i} \quad \forall t, \forall i, \forall n = 1...100 \quad (1.6)$$

- Relation entre les produits traités et les produits transférés dans les stocks

$$\sum_q TF_{t,i,q} = \sum_p kc_{p,i} * Tr_{t-d,p} \quad \forall t, \forall i \quad (1.7)$$

- Respect des capacités de traitement et de transport

$$\sum_p Tr_{t,p} \leq CapTr_t \quad \forall t \quad (1.8)$$

$$\sum_u \sum_i L_{u,t,i,q} \leq CapLiv_t \quad \forall t, \forall q \quad (1.9)$$

- Respect des capacités de stockage

$$\sum_p Ste_{t,p} \leq MaxSte_t \quad \forall t \quad (1.10)$$

$$\sum_i \sum_q Sts_{t,i,q} \leq MaxSts_t \quad \forall t \quad (1.11)$$

- Respect des capacités de ruptures de stocks

$$\sum_i B_{u,t,i} \leq MaxBack_t \quad \forall u \neq U4, \forall t \quad (1.12)$$

- Conservation des stocks de produits

$$Ste_{t,p} = Ste_{t-1,p} + C_{t,p} - Tr_{t,p} \quad \forall t, \forall p \quad (1.13)$$

$$Sts_{t,i,q} = Sts_{t-1,i,q} + TF_{t,i,q} - \sum_u L_{u,t,i,q} \quad \forall t, \forall i, \forall q \quad (1.14)$$

- Initialisation des variables

- Les stocks initiaux de produit entrant

$$Ste_{0,p} = Ste_{0,p} \quad \forall p \quad (1.15)$$

- Les stocks initiaux de produit sortant

$$Sts_{0,i,q} = Sts_{0,i,q} \quad \forall i, \forall q \quad (1.16)$$

- Les quantités initiales des produits en-cours de traitement

$$Tr_{0,p} = Tr_{0,p} \quad \forall p \quad (1.17)$$

- Les ruptures initiales de stocks

$$B_{u,0,i} = B0_{u,i} \quad \forall u \neq U4, \forall i \quad (1.18)$$

- Les cumuls initiaux de produits

$$Cumul0_i = 0 \quad \forall i \quad (1.19)$$

- Stratégies de contrôle des qualités de produits livrés

Les stratégies de contrôle des qualités de produit consistent à livrer des produits traités aux clients soit avec une politique de livraison sans déclassement, soit avec une politique de livraison avec déclassement

- **Politique de livraison sans-déclassement**

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{U1,t,i,q} = 0 \end{array} \right. \quad \forall t, \forall i, \forall q \in \{B, C, D\} \quad (1.20)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{U2,t,i,q} = 0 \end{array} \right. \quad \forall t, \forall i, \forall q \in \{A, C, D\} \quad (1.21)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{U3,t,i,q} = 0 \end{array} \right. \quad \forall t, \forall i, \forall q \in \{A, B, D\} \quad (1.22)$$

Autorisation d'expédition	Maillon de la chaîne directe (U1)	Maillon de la chaîne inverse (U2)	Marché secondaire (U3)	Centre d'élimination (U4)
Q = A : bon	<i>oui</i>	<i>non</i>	<i>non</i>	<i>oui</i>
Q = B : moyen	<i>non</i>	<i>oui</i>	<i>non</i>	<i>oui</i>
Q = C : médiocre	<i>non</i>	<i>non</i>	<i>oui</i>	<i>oui</i>
Q = D : mauvais	<i>non</i>	<i>non</i>	<i>non</i>	<i>oui</i>

- **Politique de livraison avec déclassement**

Autorisation d'expédition	Maillon de la chaîne directe (U1)	Maillon de la chaîne inverse (U2)	Marché secondaire (U3)	Centre d'élimination (U4)
Q = A : bon	<i>oui</i>	<i>oui</i>	<i>oui</i>	<i>oui</i>
Q = B : moyen	<i>non</i>	<i>oui</i>	<i>oui</i>	<i>oui</i>
Q = C : médiocre	<i>non</i>	<i>non</i>	<i>oui</i>	<i>oui</i>
Q = D : mauvais	<i>non</i>	<i>non</i>	<i>non</i>	<i>oui</i>

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{U1,t,i,q} = 0 \end{array} \right. \quad \forall t, \forall i, \forall q \in \{B, C, D\} \quad (1.20)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{U2,t,i,q} = 0 \end{array} \right. \quad \forall t, \forall i, \forall q \in \{C, D\} \quad (1.21)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{U3,t,i,q=D} = 0 \end{array} \right. \quad \forall t, \forall i \quad (1.22)$$

- Respect des demandes de livraison

$$\sum_q L_{u,t,i,q} \leq Dmde_{u,t,i} + B_{u,t-1,i} \quad \forall u, \forall t, \forall i \quad (1.23)$$

- Evolution des ruptures de stock

$$B_{u,t,p} = Dmde_{u,t,i} + B_{u,t-1,i} - \sum_q L_{u,t,i,q} \quad \forall u \in U, \forall t, \forall i \quad (1.24)$$

Annexe 5 : La modélisation stochastique (RP)

Nouvel ensemble représentant les scénarios

$S = \{1..s\}$ Ensemble des scénarios.

Nous associons une probabilité d'occurrence π_s à chaque scénario s .

Les nouveaux paramètres

$\alpha_{s,i,n,q}$ Quantité, générée aléatoirement, de produits traités i de niveau de qualité q entre le 1^{er} traitement et le $n^{\text{ième}}$, pour le scénario s . Ce nouveau paramètre permet de définir les scénarios et remplace le paramètre $\alpha_{i,n,q}$ (cf. § 3.2.1) du modèle déterministe. Il est généré par les répartitions $REPs_{s,q}$.

π_s Probabilité d'occurrence du scénario s .

Les variables

Nous donnons une formulation stochastique du modèle dans laquelle les scénarios indexés par s se distinguent par des plans de stockages de produits sortants, des plans de livraisons et des plans ruptures de stocks différents. Ceci se traduit au niveau des variables suivantes du modèle :

$Sts_{s,t,i,q}$ Quantité de produits sortants i associé au niveau de qualité q à stocker dans le scénario s pendant la période t

$L_{s,u,t,i,q}$ Quantité de produits sortants associé au niveau de qualité q à expédier au destinataire u dans le scénario s pendant la période t

$B_{s,u \notin U4,t,i}$ Quantité de produits p en rupture de stock à la fin de la période t pour le client u (hors « centre d'élimination ») dans le scénario s

$TF_{s,t,i,q}$ Quantité de produits sortants de niveau de qualité q à transférer au stockage sortant dans le scénario s pendant la période t .

La fonction objectif du modèle

Le modèle stochastique cherche à maximiser les profits de cette entreprise en prenant en compte l'ensemble des scénarios.

$$\text{Profit} = \text{Ventes} - \text{Coûts}, \text{ où} \quad (1.25)$$

$$\text{Ventes} = \sum_s \sum_{u \notin U4} \sum_t \sum_i \sum_q \pi_s * PV_{u,i} * L_{s,u,t,i,q} \quad (1.26)$$

$$\begin{aligned}
Coûts = & \sum_s \sum_u \sum_t \sum_i \sum_q \pi_s * CL_{u,i} * L_{s,u,t,i,q} + \sum_t \sum_p CA_p * C_{t,p} + \sum_t \sum_p CSte_p * Ste_{t,p} \\
& + \sum_t \sum_p CTr_p * Tr_{t,p} + \sum_s \sum_t \sum_i \sum_q \pi_s * CSts_i * Sts_{t,i,q} + \sum_s \sum_{u \neq U4} \sum_t \sum_i \pi_s * Cret_{u,i} * B_{u,t,i}
\end{aligned}
\tag{1.27}$$

Les contraintes du modèle

Nous remarquons que les nouveaux paramètres et variables dépendants des scénarios remplacent les paramètres et variables correspondant du modèle déterministe. Les contraintes utilisant ces nouveaux éléments sont ainsi mises à jour.

- Relation entre les produits traités et les produits transférés dans les stocks

$$\sum_q TF_{s,t,i,q} = \sum_p kc_{p,i} * Tr_{t-d,p} \quad \forall s, \forall t, \forall i \tag{1.28}$$

- Affectation du niveau de qualité des produits traités

$$\sum_{tp=1...t} TF_{s,tp,i,q} - \alpha_{s,i,n,q} \leq M * (1 - y_{t,i,n}) \quad \forall s, \forall t, \forall i, \forall q, \forall n = 1...100 \tag{1.29}$$

- Respect des capacités de traitement et de transport

$$\sum_u \sum_i L_{s,u,t,i,q} \leq CapLiv_t \quad \forall s, \forall t, \forall q \tag{1.30}$$

- Respect des capacités de stockage pour chaque scénario

$$\sum_i \sum_q Sts_{s,t,i,q} \leq MaxSts_t \quad \forall s, \forall t \tag{1.31}$$

- Respect des capacités de ruptures de stock pour chaque scénario

$$\sum_i B_{s,u,t,i} \leq MaxBack_t \quad \forall s, \forall u \neq U4, \forall t \tag{1.32}$$

- Conservation des stocks de produits pour chaque scénario

$$Sts_{s,t,i,q} = Sts_{s,t-1,i,q} + TF_{s,t,i,q} - \sum_u L_{s,u,t,i,q} \quad \forall s, \forall t, \forall i, \forall q \tag{1.33}$$

- Initialisation des variables

- Les stocks initiaux de produit sortant de chaque scénario

$$Sts_{s,0,i,q} = Sts_{0,i,q} \quad \forall s, \forall i, \forall q \quad (1.34)$$

- Les ruptures initiales de stocks de chaque scénario

$$B_{s,u,0,i} = B_{0,u,i} \quad \forall s, \forall u \neq U4, \forall i \quad (1.35)$$

- Stratégies de contrôle des qualités des produits livrés dans le scénario

De la même façon que dans le modèle déterministe, nous retrouvons dans le modèle stochastique les deux politiques de livraison : sans ou avec déclassement.

- **Politique de livraison sans-déclassement**

$$\left[\begin{array}{ll} L_{s,U1,t,i,q} = 0 & \forall s, \forall t, \forall i, \forall q \in \{B, C, D\} \\ L_{s,U2,t,i,q} = 0 & \forall s, \forall t, \forall i, \forall q \in \{A, C, D\} \\ L_{s,U3,t,i,q} = 0 & \forall s, \forall t, \forall i, \forall q \in \{A, B, D\} \end{array} \right. \quad (1.36)$$

$$\left[\begin{array}{ll} L_{s,U1,t,i,q} = 0 & \forall s, \forall t, \forall i, \forall q \in \{B, C, D\} \\ L_{s,U2,t,i,q} = 0 & \forall s, \forall t, \forall i, \forall q \in \{A, C, D\} \end{array} \right. \quad (1.37)$$

$$\left[\begin{array}{ll} L_{s,U1,t,i,q} = 0 & \forall s, \forall t, \forall i, \forall q \in \{B, C, D\} \\ L_{s,U2,t,i,q} = 0 & \forall s, \forall t, \forall i, \forall q \in \{A, C, D\} \\ L_{s,U3,t,i,q} = 0 & \forall s, \forall t, \forall i, \forall q \in \{A, B, D\} \end{array} \right. \quad (1.38)$$

- **Politique de livraison sans-déclassement**

$$\left[\begin{array}{ll} L_{s,U1,t,i,q} = 0 & \forall s, \forall t, \forall i, \forall q \in \{B, C, D\} \\ L_{s,U2,t,i,q} = 0 & \forall s, \forall t, \forall i, \forall q \in \{C, D\} \\ L_{s,U3,t,i,q=D} = 0 & \forall s, \forall t, \forall i \end{array} \right. \quad (1.36)$$

$$\left[\begin{array}{ll} L_{s,U1,t,i,q} = 0 & \forall s, \forall t, \forall i, \forall q \in \{B, C, D\} \\ L_{s,U2,t,i,q} = 0 & \forall s, \forall t, \forall i, \forall q \in \{C, D\} \end{array} \right. \quad (1.37)$$

$$\left[\begin{array}{ll} L_{s,U1,t,i,q} = 0 & \forall s, \forall t, \forall i, \forall q \in \{B, C, D\} \\ L_{s,U2,t,i,q} = 0 & \forall s, \forall t, \forall i, \forall q \in \{C, D\} \\ L_{s,U3,t,i,q=D} = 0 & \forall s, \forall t, \forall i \end{array} \right. \quad (1.38)$$

- Respect des demandes de livraison

La contrainte (1.23) est aussi mise à jour puisque les livraisons sont désormais définies par scénario.

$$\sum_q L_{s,u,t,i,q} \leq Dmde_{u,t,i} + B_{s,u,t-1,i} \quad \forall s, \forall u, \forall t, \forall i \quad (1.39)$$

- Evolution des ruptures de stock pour chaque scénario

La contrainte (1.40) reprend la contrainte (1.24).

$$B_{s,u,t,p} = Dmde_{u,t,i} + B_{s,u,t-1,i} - \sum_q L_{s,u,t,i,q} \quad \forall s, \forall u \neq U4, \forall t, \forall i \quad (1.40)$$

Annexe 6 : La modélisation d'évaluation stochastique (EEV)

Les modifications à apporter au modèle stochastique pour obtenir le modèle EEV sont listées ci-dessous. Il s'agit simplement de la liste des variables du modèle stochastique transformées en paramètres pour récupérer les résultats du scénario moyen issu du modèle déterministe.

Les paramètres du modèle

$Ste_{t,p}$ Quantité de produit entrant p à stocker pendant la période t ;

$Tr_{t,p}$ Quantité de produit p à traiter pendant la période t ;

Les autres variables du modèle stochastique sont inchangées

Annexe 7 : L'évaluation de la performance de la chaîne inverse**Le niveau de stock**

Il peut s'exprimer comme suit :

$$NS = \sum_t \sum_p Ste_{t,p} + \sum_t \sum_i \sum_q Sts_{t,i,q} \quad (1.41)$$

Le nombre de ruptures

On peut l'exprimer comme suit :

$$NR = \sum_{u \neq U4} \sum_t \sum_i Dmde_{u,t,i} - \sum_{u \neq U4} \sum_t \sum_i \sum_q Lu_{t,i,q} \quad (1.42)$$

Le taux de rupture de stock

Il est ainsi décrit :

$$Tr(\%) = \frac{\sum_{u \neq U4} \sum_t \sum_i Dmde_{u,t,i} - \sum_{u \neq U4} \sum_t \sum_i \sum_q Lu_{t,i,q}}{\sum_{u \neq U4} \sum_t \sum_i Dmde_{u,t,i}} = \frac{NR}{\sum_{u \neq U4} \sum_t \sum_i Dmde_{u,t,i}} \quad (1.43)$$

Le taux de livraison par qualité

Il peut s'exprimer comme suit :

$$TL_q(\%) = \frac{\sum_U \sum_t \sum_i Lu_{t,i,q}}{\sum_U \sum_t \sum_i \sum_{q'} Lu_{t,i,q'}} \times 100 \quad (1.44)$$

Le taux de déclassement

Il est ainsi décrit :

$$Td(\%) = \frac{\sum_{\{U2,U3,U4\}} \sum_t \sum_i L_{u,t,i,A} + \sum_{\{U3,U4\}} \sum_t \sum_i L_{u,t,i,B} + \sum_{U4} \sum_t \sum_i L_{u,t,i,C}}{\sum_U \sum_t \sum_i \sum_q L_{u,t,i,q}} \times 100 \quad (1.45)$$

Ce taux permet de mesurer un certain degré d'inadéquation entre les produits traités et les demandes des clients.

Le taux d'élimination

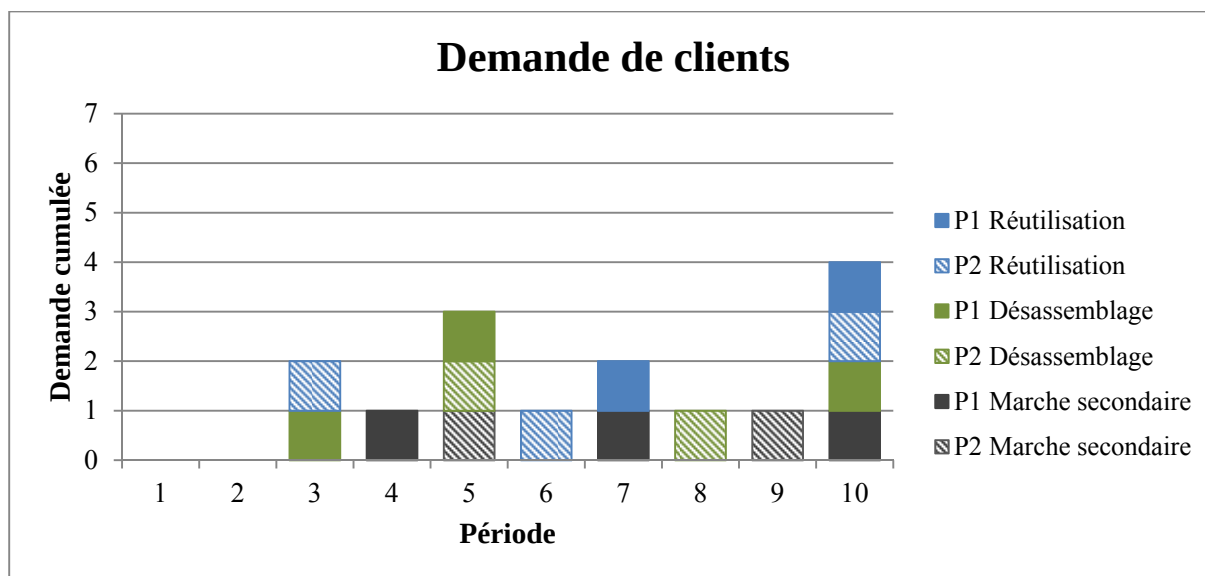
On peut l'exprimer comme suit :

$$TL_q(\%) = \frac{\sum_U \sum_t \sum_i L_{u,t,i,q}}{\sum_U \sum_t \sum_i \sum_{q'} L_{u,t,i,q'}} \times 100 \quad (1.44)$$

Annexe 8 : Référence des familles de machines

 Pelle sur chenilles	 Pelle sur pneus
 Chargeur sur chenilles	 Chargeur sur pneus
 Bulldozer	 Compacteur
 Niveleuse	 Tractopelle

Annexe 9 : Demandes des clients



Annexe 10 : Résultats de l'approvisionnement **inférieur** à la demande

L'approvisionnement inférieur à la demande			Tirage aléatoire 1	Tirage aléatoire 2	Tirage aléatoire 3	Tirage aléatoire 4	Tirage aléatoire 5	Tirage aléatoire 6	Tirage aléatoire 7	Tirage aléatoire 8	Tirage aléatoire 9	Tirage aléatoire 10	Moy.
Avec déclassement	Résultat de modèle WS	Profit de scénario 1	85320	80930	85320	85320	85320	85320	85320	80930	85320	85320	84442
		Profit de scénario 2	85320	65350	85320	83360	85320	65350	85320	81950	85320	83360	80597
		Profit de scénario 3	85320	67040	79930	85320	81950	80930	83300	83300	85320	63330	79574
		Profit de scénario 4	81950	80930	83360	54170	85320	78970	82990	82990	84440	65350	78047
		Profit de scénario 5	79930	65500	65350	55790	83300	81950	81950	85320	84440	85320	76885
		Profit moyen	84383	70010	81845	76740	83743	76391	83774	82877	85091	70302	79516
		Niveau de stocks	29	23	29	29	29	30	29	29	29	23	28
		Nombre de rupture	5	6	5	5	5	5	5	5	5	6	5
		Nombre de demande	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
		Taux de rupture	33,3%	40,0%	33,3%	33,3%	33,3%	33,3%	33,3%	33,3%	33,3%	40,0%	34,7%
		Nombre de livraison	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
		Nombre de livraison de qualité A	5	2	2	4	2	6	3	5	6	2	4
		Nombre de livraison de qualité B	5	4	7	6	7	2	6	3	4	5	5
		Nombre de livraison de qualité C	0	3	1	0	1	2	1	2	0	2	1
		Nombre de livraison de qualité D	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
		Taux de livraison de qualité A	50,0%	20,0%	20,0%	40,0%	20,0%	60,0%	30,0%	50,0%	60,0%	20,0%	37,0%
		Taux de livraison de qualité B	50,0%	40,0%	70,0%	60,0%	70,0%	20,0%	60,0%	30,0%	40,0%	50,0%	49,0%
		Taux de livraison de qualité C	0,0%	30,0%	10,0%	0,0%	10,0%	20,0%	10,0%	20,0%	0,0%	20,0%	12,0%
		Taux de livraison de qualité D	0,0%	10,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	10,0%	2,0%
		Livraison sans-déclassement	6	10	7	7	8	7	8	8	6	7	7
		Livraison avec déclassement	4	0	3	3	2	3	2	2	4	3	3
		Taux de livraison sans-déclassement	60,0%	100%	70,0%	70,0%	80,0%	70,0%	80,0%	80,0%	60,0%	70,0%	74,0%
		Taux de déclassement	40,0%	0,0%	30,0%	30,0%	20,0%	30,0%	20,0%	20,0%	40,0%	30,0%	26,0%
		Livraison à l'élimination	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
		Taux d'élimination	0,0%	10,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	10,0%	2,0%
	Résultat de modèle RP	Profit de scénario 1	85320	80930	85320	85320	85320	85320	85320	80930	85320	85320	84442
		Profit de scénario 2	85320	65010	85320	83360	85320	65010	85320	81950	85320	83360	80529
		Profit de scénario 3	85320	66530	79930	85320	81950	80930	83300	83300	85320	62990	79489
		Profit de scénario 4	81950	80930	83360	53720	85320	78970	82990	82990	84440	65010	77968
		Profit de scénario 5	79930	65050	65010	55450	83300	81950	81950	85320	84440	85320	76772
		Profit moyen	84383	69675	81834	76627	83743	76299	83774	82877	85091	70071	79438
	Résultat de modèle EEV	Profit de scénario 1	85320	69230	85320	85320	85320	85320	85320	80930	85320	72300	81970
		Profit de scénario 2	85320	65350	85320	83360	85320	65010	85320	81950	85320	70340	79261
		Profit de scénario 3	85320	67040	79930	85320	81950	80930	83300	83300	85320	63330	79574
		Profit de scénario 4	81950	67910	83360	53720	85320	78970	82990	82990	84440	65350	76700
		Profit de scénario 5	79930	53350	65010	55450	83300	81950	81950	85320	84440	72130	74283
		Profit moyen	84383	66417	81834	76627	83743	76299	83774	82877	85091	66131	78718
	Indicateurs de performances	EVPI = WS - RP	0	335	10	114	0	92	0	0	0	231	78
		EVPI %	0,00%	0,48%	0,01%	0,15%	0,00%	0,12%	0,00%	0,00%	0,00%	0,33%	0,11%
		VSS = RP - EEV	0	3258	0	0	0	0	0	0	0	3940	720
		VSS%	0,00%	4,91%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	5,96%	1,09%
		VSDS = WS - RP	0	335	10	114	0	92	0	0	0	231	78
		VSDS%	0,00%	0,48%	0,01%	0,15%	0,00%	0,12%	0,00%	0,00%	0,00%	0,33%	0,11%
		VSDE = WS - EEV	0	3593	10	114	0	92	0	0	0	4172	798
		VSDE%	0,00%	5,13%	0,01%	0,15%	0,00%	0,12%	0,00%	0,00%	0,00%	5,93%	1,13%

Annexes

Sans déclassement	Résultat de modèle WS	Profit de scénario 1	57190	41150	56080	57410	42180	57580	57450	39820	55780	57020	52166
		Profit de scénario 2	57190	52430	56840	69910	57110	24200	56250	56250	57580	55660	54342
		Profit de scénario 3	56720	67040	39550	56720	56420	38690	55130	70240	57020	37250	53478
		Profit de scénario 4	70250	80930	82930	54170	57720	53910	82990	66180	84440	52800	68632
		Profit de scénario 5	39720	53460	38110	55790	55430	41740	41570	57620	70060	69370	52287
		Profit moyen	59458	65365	54483	59681	56591	38748	61480	64542	63844	47156	57135
		Niveau de stocks	22	23	13	22	15	13	21	23	22	10	18
		Nombre de rupture	7	6	8	7	7	8	7	6	7	8	7
		Nombre de demande	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
		Taux de rupture	46,7%	40,0%	53,3%	46,7%	46,7%	53,3%	46,7%	40,0%	46,7%	53,3%	47,3%
		Nombre de livraison	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
		Nombre de livraison de qualité A	5	2	2	4	2	6	3	5	6	2	4
		Nombre de livraison de qualité B	5	4	7	6	7	2	6	3	4	5	5
		Nombre de livraison de qualité C	0	3	1	0	1	2	1	2	0	2	1
		Nombre de livraison de qualité D	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
		Taux de livraison de qualité A	50,0%	20,0%	20,0%	40,0%	20,0%	60,0%	30,0%	50,0%	60,0%	20,0%	37,0%
		Taux de livraison de qualité B	50,0%	40,0%	70,0%	60,0%	70,0%	20,0%	60,0%	30,0%	40,0%	50,0%	49,0%
		Taux de livraison de qualité C	0,0%	30,0%	10,0%	0,0%	10,0%	20,0%	10,0%	20,0%	0,0%	20,0%	12,0%
		Taux de livraison de qualité D	0,0%	10,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	10,0%	2,0%
		Livraison sans-déclassement	8	10	7	8	8	7	8	9	8	8	8
		Livraison avec déclassement	2	0	3	2	2	3	2	1	2	2	2
		Taux de livraison sans-déclassement	80,0%	100,0%	70,0%	80,0%	80,0%	70,0%	80,0%	90,0%	80,0%	80,0%	81,0%
		Taux de déclassement	20,0%	0,0%	30,0%	20,0%	20,0%	30,0%	20,0%	10,0%	20,0%	20,0%	19,0%
		Livraison à l'élimination	2	1	3	2	2	3	2	1	2	3	2
		Taux d'élimination	20,0%	10,0%	30,0%	20,0%	20,0%	30,0%	20,0%	10,0%	20,0%	30,0%	21,0%
	Résultat de modèle RP	Profit de scénario 1	57190	40810	55740	57410	42180	57580	57110	39820	55440	57020	52030
		Profit de scénario 2	57190	52090	56500	69910	57110	24200	55910	56250	57240	55660	54206
		Profit de scénario 3	56720	66530	39210	56720	56420	38690	54790	70240	56680	37250	53325
		Profit de scénario 4	70250	80930	82930	54060	57720	53910	82990	66180	84440	52800	68621
		Profit de scénario 5	39720	53010	37770	55790	55430	41740	41230	57620	69720	69370	52140
		Profit moyen	59458	65023	54221	59655	56591	38748	61218	64542	63582	47156	57020
	Résultat de modèle EEV	Profit de scénario 1	57190	41150	56080	57410	42180	57580	57450	39820	55780	57020	52166
		Profit de scénario 2	57190	52430	56840	69910	57110	24200	56250	56250	57580	55660	54342
		Profit de scénario 3	56720	67040	39550	56720	56420	38690	55130	70240	57020	37250	53478
		Profit de scénario 4	70250	67910	69030	54060	57720	53910	69530	66180	70100	52800	63149
		Profit de scénario 5	39720	53350	38110	55790	55430	41740	41570	57620	70060	69370	52276
		Profit moyen	59458	62367	51286	59655	56591	38748	58384	64542	60546	47156	55873
	Indicateurs de performances	EVPI = WS - RP	0	342	262	25	0	0	262	0	262	0	115
		EVPI %	0,00%	0,53%	0,48%	0,04%	0,00%	0,00%	0,43%	0,00%	0,41%	0,00%	0,19%
		VSS = RP - EEV	0	2656	2935	0	0	0	2834	0	3036	0	1146
		VSS%	0,00%	4,26%	5,72%	0,00%	0,00%	0,00%	4,85%	0,00%	5,02%	0,00%	1,99%
		VSDS = WS - RP	0	342	262	25	0	0	262	0	262	0	115
		VSDS%	0,00%	0,52%	0,48%	0,04%	0,00%	0,00%	0,43%	0,00%	0,41%	0,00%	0,19%
		VSDE = WS - EEV	0	2998	3197	25	0	0	3096	0	3298	0	1261
		VSDE%	0,00%	4,59%	5,87%	0,04%	0,00%	0,00%	5,04%	0,00%	5,17%	0,00%	2,07%

Annexe 11 : Résultats de l'approvisionnement égal à la demande

L'approvisionnement égal à la demande			Tirage aléatoire 1	Tirage aléatoire 2	Tirage aléatoire 3	Tirage aléatoire 4	Tirage aléatoire 5	Tirage aléatoire 6	Tirage aléatoire 7	Tirage aléatoire 8	Tirage aléatoire 9	Tirage aléatoire 10	Moy.
Avec déclassement	Résultat de modèle WS	Profit de scénario 1	90160	90160	88320	89300	90160	88320	90160	90160	88320	90160	89522
		Profit de scénario 2	88320	73220	90160	88320	87440	56580	90160	87420	88320	74410	82435
		Profit de scénario 3	88320	74580	86930	88320	86930	71240	72980	86130	88320	57810	80156
		Profit de scénario 4	57400	72980	88320	72530	90160	57310	90160	88150	72580	54870	74446
		Profit de scénario 5	72980	57570	71380	56720	87870	72980	57570	85680	75810	89990	72855
		Profit moyen	80785	73646	87683	83760	87903	64472	81451	87010	84325	63228	79426
		Niveau de stocks	28	20	31	28	31	28	24	39	28	13	27
		Nombre de rupture	1	2	1	1	1	2	2	1	1	3	2
		Nombre de demande	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
		Taux de rupture	6,7%	13,3%	6,7%	6,7%	6,7%	13,3%	13,3%	6,7%	6,7%	20,0%	10,0%
		Nombre de livraison	15	15	15	15	15	15	15	14	15	15	15
		Nombre de livraison de qualité A	6	5	4	5	4	7	3	5	6	4	5
		Nombre de livraison de qualité B	8	5	9	10	9	5	11	6	8	8	8
		Nombre de livraison de qualité C	1	4	2	0	2	3	1	3	1	2	2
		Nombre de livraison de qualité D	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
		Taux de livraison de qualité A	40,0%	33,3%	26,7%	33,3%	26,7%	46,7%	20,0%	35,7%	40,0%	26,7%	32,9%
		Taux de livraison de qualité B	53,3%	33,3%	60,0%	66,7%	60,0%	33,3%	73,3%	42,9%	53,3%	53,0%	53,0%
		Taux de livraison de qualité C	6,7%	26,7%	13,3%	0,0%	13,3%	20,0%	6,7%	21,4%	6,7%	13,3%	12,8%
		Taux de livraison de qualité D	0,0%	6,7%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	6,7%	1,3%
		Livraison sans-déclassement	9	13	11	8	11	7	8	11	9	9	10
		Livraison avec déclassement	6	2	4	7	4	8	7	3	6	6	5
		Taux de livraison sans-déclassement	60,0%	86,7%	73,3%	53,3%	73,3%	46,7%	53,3%	78,6%	60,0%	60,0%	64,5%
		Taux de déclassement	40,0%	13,3%	26,7%	46,7%	26,7%	53,3%	46,7%	21,4%	40,0%	40,0%	35,5%
		Livraison à l'élimination	1	2	1	1	1	2	2	0	1	3	1
		Taux d'élimination	6,7%	13,3%	6,7%	6,7%	6,7%	13,3%	13,3%	0,0%	6,7%	20,0%	9,3%
	Résultat de modèle RP	Profit de scénario 1	90160	90160	88320	89300	90160	88280	90120	89520	88320	90160	89450
		Profit de scénario 2	88320	73220	90160	88320	87440	56540	90120	86780	88320	74410	82363
		Profit de scénario 3	88320	74580	86930	88320	86930	71240	72980	86130	88320	57810	80156
		Profit de scénario 4	57290	72870	88320	72420	90160	57270	90120	87510	72580	54870	74341
		Profit de scénario 5	72870	57460	71380	56610	87870	72980	57570	85680	75810	89990	72822
		Profit moyen	80756	73618	87683	83731	87903	64451	81431	86677	84325	63228	79380
	Résultat de modèle EEV	Profit de scénario 1	90160	90160	88320	89300	90160	88280	90120	89520	88320	90160	89450
		Profit de scénario 2	88320	73220	90160	88320	87440	56540	90120	86780	88320	74410	82363
		Profit de scénario 3	88320	74580	86930	88320	86930	71240	72980	86130	88320	57810	80156
		Profit de scénario 4	57290	72870	88320	72420	90160	57270	90120	87510	72580	54870	74341
		Profit de scénario 5	72870	57460	71380	56610	87870	72980	57570	85680	75810	89990	72822
		Profit moyen	80756	73617	87683	83731	87903	64451	81431	86677	84325	63228	79380
	Indicateurs de performances	EVPI = WS - RP	29	29	0	29	0	21	21	333	0	0	46
		EVPI %	0,04%	0,04%	0,00%	0,03%	0,00%	0,03%	0,03%	0,38%	0,00%	0,00%	0,06%
		VSS = RP - EEV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		VSS%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
		VSDS = WS - RP	29	29	0	29	0	21	21	333	0	0	46
		VSDS%	0,04%	0,04%	0,00%	0,03%	0,00%	0,03%	0,03%	0,38%	0,00%	0,00%	0,05%
		VSDE = WS - EEV	29	29	0	29	0	21	21	333	0	0	46
		VSDE%	0,04%	0,04%	0,00%	0,03%	0,00%	0,03%	0,03%	0,38%	0,00%	0,00%	0,05%

Annexes

Sans déclassement	Résultat de modèle WS	Profit de scénario 1	35250	35350	34030	33430	34800	33950	33740	20320	34420	35250	33054
		Profit de scénario 2	33130	46620	48930	61510	72550	90	18920	34740	34250	33230	38397
		Profit de scénario 3	46080	59290	45830	33570	47340	29810	18180	61370	33590	15000	39006
		Profit de scénario 4	30580	59270	75810	59390	48930	43810	73860	45380	72580	29470	53908
		Profit de scénario 5	19280	17910	30630	3700	59580	17790	-11150	44530	60630	61990	30489
		Profit moyen	37998	54144	52870	46154	54629	24728	30618	49176	43564	25065	41894
		Niveau de stocks	30	23	19	31	17	21	24	24	20	17	23
		Nombre de rupture	4	3	4	5	4	5	6	3	5	6	5
		Nombre de demande	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
		Taux de rupture	26,7%	20,0%	26,7%	33,3%	26,7%	33,3%	40,0%	20,0%	33,3%	40,0%	30,0%
		Nombre de livraison	14	14	15	13	15	14	13	14	14	13	14
		Nombre de livraison de qualité A	6	4	4	5	4	7	3	5	6	3	5
		Nombre de livraison de qualité B	7	5	9	8	9	4	9	6	7	7	7
		Nombre de livraison de qualité C	1	4	2	0	2	3	1	3	1	2	2
		Nombre de livraison de qualité D	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
		Taux de livraison de qualité A	42,9%	28,6%	26,7%	38,5%	26,7%	50,0%	23,1%	35,7%	42,9%	23,1%	33,8%
		Taux de livraison de qualité B	50,0%	35,7%	60,0%	61,5%	60,0%	28,6%	69,2%	42,9%	50,0%	53,8%	51,2%
		Taux de livraison de qualité C	7,1%	28,6%	13,3%	0,0%	13,3%	21,4%	7,7%	21,4%	7,1%	15,4%	13,5%
		Taux de livraison de qualité D	0,0%	7,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	7,7%	1,5%
		Livraison sans-déclassement	11	13	11	10	11	10	9	12	10	10	11
		Livraison avec déclassement	3	1	4	3	4	4	4	2	4	3	3
		Taux de livraison sans-déclassement	78,6%	92,9%	73,3%	76,9%	73,3%	71,4%	69,2%	85,7%	71,4%	76,9%	77,0%
		Taux de déclassement	21,4%	7,1%	26,7%	23,1%	26,7%	28,6%	30,8%	14,3%	28,6%	23,1%	23,0%
		Livraison à l'élimination	3	2	4	3	4	4	4	2	4	4	3
		Taux d'élimination	21,4%	14,3%	26,7%	23,1%	26,7%	28,6%	30,8%	14,3%	28,6%	30,8%	24,5%
		Profit de scénario 1	35250	35350	34030	33430	34760	33910	33740	20280	34420	35250	33042
	Résultat de modèle RP	Profit de scénario 2	33130	46620	48930	61510	72510	50	18920	34740	34250	33230	38389
		Profit de scénario 3	46080	59290	45830	33570	47340	29810	18180	61330	33590	15000	39002
		Profit de scénario 4	30470	59270	75810	59280	48890	43770	73720	45340	72580	29470	53860
		Profit de scénario 5	19280	17800	30630	3590	59540	17790	-11260	44530	60630	61990	30452
		Profit moyen	37973	54141	52870	46125	54607	24707	30582	49148	43564	25065	41878
	Résultat de modèle EEV	Profit de scénario 1	35250	35350	34030	33430	34760	33910	33740	20320	34420	35250	33046
		Profit de scénario 2	33130	46620	48930	61510	72510	50	18920	34630	34250	33230	38378
		Profit de scénario 3	46080	59290	45830	33570	47340	29810	18180	61370	33590	15000	39006
		Profit de scénario 4	30470	59270	75810	59280	48890	43770	73720	45380	72580	29470	53864
		Profit de scénario 5	19280	17800	30630	3590	59540	17790	-11260	44420	60630	61990	30441
		Profit moyen	37973	54141	52870	46125	54607	24707	30582	49143	43564	25065	41878
	Indicateurs de performances	EVPI = WS - RP	25	3	0	29	22	21	36	28	0	0	16
		EVPI %	0,07%	0,01%	0,00%	0,06%	0,04%	0,08%	0,12%	0,06%	0,00%	0,00%	0,04%
		VSS = RP - EEV	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	1
		VSS%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
		VSDS = WS - RP	25	3	0	29	22	21	36	28	0	0	16
		VSDS%	0,07%	0,01%	0,00%	0,06%	0,04%	0,08%	0,12%	0,06%	0,00%	0,00%	0,04%
		VSDE = WS - EEV	25	3	0	29	22	21	36	33	0	0	17
		VSDE%	0,07%	0,01%	0,00%	0,06%	0,04%	0,08%	0,12%	0,07%	0,00%	0,00%	0,04%

Annexe 12 : Résultats de l'approvisionnement **supérieur** à la demande

L'approvisionnement supérieur à la demande			Tirage aléatoire 1	Tirage aléatoire 2	Tirage aléatoire 3	Tirage aléatoire 4	Tirage aléatoire 5	Tirage aléatoire 6	Tirage aléatoire 7	Tirage aléatoire 8	Tirage aléatoire 9	Tirage aléatoire 10	Moy.
Avec déclassement	Résultat de modèle WS	Profit de scénario 1	53080	52890	52080	52890	52630	52420	53300	53080	53080	53080	52853
		Profit de scénario 2	38240	52890	52490	52210	52490	18710	53080	52200	52080	52440	47683
		Profit de scénario 3	52080	52780	52850	53080	52040	52420	52400	51810	37460	19120	47604
		Profit de scénario 4	6200	23050	38390	22940	51960	22920	51870	52320	22540	4390	29658
		Profit de scénario 5	37580	23050	52490	21280	51810	52400	6260	37590	51500	52170	38613
		Profit moyen	37376	45082	49401	44955	52148	36533	51096	51631	38709	26399	43333
		Niveau de stocks	25	17	16	15	25	17	17	28	29	15	20
		Nombre de rupture	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0
		Nombre de demande	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
		Taux de rupture	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	6,7%	13,3%	2,0%
		Nombre de livraison	19	20	20	20	19	20	20	19	18	19	19
		Nombre de livraison de qualité A	7	8	7	7	6	10	6	6	7	4	7
		Nombre de livraison de qualité B	10	7	11	13	11	7	12	9	10	11	10
		Nombre de livraison de qualité C	2	4	2	0	2	3	2	3	1	3	2
		Nombre de livraison de qualité D	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0
		Taux de livraison de qualité A	36,8%	40,0%	35,0%	35,0%	31,6%	50,0%	30,0%	31,6%	38,9%	21,1%	35,0%
		Taux de livraison de qualité B	52,6%	35,0%	55,0%	65,0%	57,9%	35,0%	60,0%	47,4%	55,6%	57,9%	52,1%
		Taux de livraison de qualité C	10,5%	20,0%	10,0%	0,0%	10,5%	15,0%	10,0%	15,8%	5,6%	15,8%	11,3%
		Taux de livraison de qualité D	0,0%	5,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	5,3%	0,0%	5,3%	1,6%
		Livraison sans-déclassement	12	10	11	10	10	11	11	14	8	10	11
		Livraison avec déclassement	7	10	9	10	9	9	9	5	10	9	9
		Taux de livraison sans-déclassement	63,2%	50,0%	55,0%	50,0%	52,6%	55,0%	55,0%	73,7%	44,4%	52,6%	55,2%
		Taux de déclassement	36,8%	50,0%	45,0%	50,0%	47,4%	45,0%	45,0%	26,3%	55,6%	47,4%	44,8%
		Livraison à l'élimination	4	5	5	5	4	5	5	4	4	6	5
		Taux d'élimination	21,1%	25,0%	25,0%	25,0%	21,1%	25,0%	25,0%	21,1%	22,2%	31,6%	24,2%
	Résultat de modèle RP	Profit de scénario 1	53080	52890	52040	52780	52590	52890	53300	53080	53080	53080	52881
		Profit de scénario 2	38240	52890	52450	52210	52450	18500	53040	52090	52080	52440	47639
		Profit de scénario 3	52080	52720	52850	53080	52030	52420	52400	51810	37460	19120	47597
		Profit de scénario 4	6090	23050	38350	22940	51960	22920	51870	52320	22470	4280	29625
		Profit de scénario 5	37470	23050	52450	21170	51800	52400	6200	37480	51500	52170	38569
		Profit moyen	37347	45055	49379	44950	52132	36485	51083	51598	38693	26374	43310
	Résultat de modèle EEV	Profit de scénario 1	53080	52780	52040	52780	52630	52890	53300	53080	53080	53080	52874
		Profit de scénario 2	38240	52780	52450	52210	52490	18500	53040	52090	52080	52440	47632
		Profit de scénario 3	52080	52780	52850	53080	52040	52420	52400	51810	37460	19120	47604
		Profit de scénario 4	6090	22940	38350	22940	51850	22920	51870	52320	22470	4280	29603
		Profit de scénario 5	37470	22940	52450	21170	51810	52400	6200	37480	51500	52170	38559
		Profit moyen	37347	45022	49379	44950	52123	36485	51083	51598	38693	26374	43305
	Indicateurs de performances	EVPI = WS - RP	29	27	22	6	16	47	13	33	16	25	23
		EVPI %	0,08%	0,06%	0,04%	0,01%	0,03%	0,13%	0,02%	0,06%	0,04%	0,10%	0,06%
		VSS = RP - EEV	0	34	0	0	9	0	0	0	0	0	4
		VSS%	0,00%	0,07%	0,00%	0,00%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%
		VSDS = WS - RP	29	27	22	6	16	47	13	33	16	25	23
		VSDS%	0,08%	0,06%	0,04%	0,01%	0,03%	0,13%	0,02%	0,06%	0,04%	0,10%	0,06%
		VSDE = WS - EEV	29	61	22	6	25	47	13	33	16	25	28
		VSDE%	0,08%	0,13%	0,04%	0,01%	0,05%	0,13%	0,02%	0,06%	0,04%	0,10%	0,07%

Annexes

Sans déclassement	Résultat de modèle WS	Profit de scénario 1	-16940	-16710	-15930	-16590	-15500	-16500	-16950	-16020	-16350	-15930	-16342
		Profit de scénario 2	9250	13220	51230	11870	26650	-38290	-16230	-1840	-17220	10490	4913
		Profit de scénario 3	10920	38060	10430	-16100	11970	10640	11390	24290	-15990	-9220	7639
		Profit de scénario 4	-8290	7670	37370	22370	37070	22360	24520	24710	21450	-9390	17984
		Profit de scénario 5	-4790	-4460	25330	-19780	37230	-2850	-63130	-3150	38430	24220	2705
		Profit moyen	5022	21993	27562	180	21915	-823	4150	15702	-6086	-3068	8655
		Niveau de stocks	19	23	16	9	17	9	12	29	15	14	16
		Nombre de rupture	3	1	3	5	3	3	3	2	5	4	3
		Nombre de demande	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
		Taux de rupture	20,0%	6,7%	20,0%	33,3%	20,0%	20,0%	20,0%	13,3%	33,3%	26,7%	21,3%
		Nombre de livraison	19	20	19	20	19	20	20	18	18	19	19
		Nombre de livraison de qualité A	7	8	6	7	6	10	6	6	7	4	7
		Nombre de livraison de qualité B	10	7	11	13	11	7	12	8	10	11	10
		Nombre de livraison de qualité C	2	4	2	0	2	3	2	3	1	3	2
		Nombre de livraison de qualité D	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0
		Taux de livraison de qualité A	36,8%	40,0%	31,6%	35,0%	31,6%	50,0%	30,0%	33,3%	38,9%	21,1%	34,8%
		Taux de livraison de qualité B	52,6%	35,0%	57,9%	65,0%	57,9%	35,0%	60,0%	44,4%	55,6%	57,9%	52,1%
		Taux de livraison de qualité C	10,5%	20,0%	10,5%	0,0%	10,5%	15,0%	10,0%	16,7%	5,6%	15,8%	11,5%
		Taux de livraison de qualité D	0,0%	5,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	5,6%	0,0%	5,3%	1,6%
		Livraison sans-déclassement	12	15	12	10	12	12	12	14	10	12	12
		Livraison avec déclassement	7	5	7	10	7	8	8	4	8	7	7
		Taux de livraison sans-déclassement	63,2%	75,0%	63,2%	50,0%	63,2%	60,0%	60,0%	77,8%	55,6%	63,2%	63,1%
		Taux de déclassement	36,8%	25,0%	36,8%	50,0%	36,8%	40,0%	40,0%	22,2%	44,4%	36,8%	36,9%
		Livraison à l'élimination	7	6	7	10	7	8	8	5	8	8	7
		Taux d'élimination	36,8%	30,0%	36,8%	50,0%	36,8%	40,0%	40,0%	27,8%	44,4%	42,1%	38,5%
	Résultat de modèle RP	Profit de scénario 1	-16940	-16710	-15930	-16590	-15500	-16610	-16950	-16020	-16350	-15930	-16353
		Profit de scénario 2	9250	13220	51230	11870	26650	-38290	-16230	-1840	-17330	10490	4902
		Profit de scénario 3	10920	38060	10430	-16100	11970	10530	11390	24290	-15990	-9220	7628
		Profit de scénario 4	-8400	7670	37370	22260	37070	22360	24410	24710	21450	-9390	17951
		Profit de scénario 5	-4790	-4570	25330	-19890	37230	-2850	-63130	-3260	38430	24110	2661
		Profit moyen	4997	21989	27562	151	21915	-875	4125	15699	-6115	-3072	8638
	Résultat de modèle EEV	Profit de scénario 1	-16940	-16710	-15930	-16590	-15500	-16500	-16950	-16020	-16350	-15930	-16342
		Profit de scénario 2	9250	13220	51230	11870	26650	-38500	-16230	-1840	-17330	10490	4881
		Profit de scénario 3	10920	38060	10430	-16100	11970	10640	11390	24290	-15990	-9220	7639
		Profit de scénario 4	-8400	7670	37370	22260	37070	22300	24410	24710	21450	-9390	17945
		Profit de scénario 5	-4790	-4570	25330	-19890	37230	-2910	-63130	-3260	38430	24110	2655
		Profit moyen	4997	21989	27562	151	21915	-895	4125	15699	-6115	-3072	8636
	Indicateurs de performances	EVPI = WS - RP	25	3	0	29	0	52	25	3	30	3	17
		EVPI %	0,51%	0,02%	0,00%	18,92%	0,00%	-5,91%	0,61%	0,02%	-0,49%	-0,11%	1,36%
		VSS = RP - EEV	0	0	0	0	0	21	0	0	0	0	2
		VSS%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-2,30%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,23%
		VSDS = WS - RP	25	3	0	29	0	52	25	3	30	3	17
		VSDS%	0,50%	0,02%	0,00%	15,91%	0,00%	-6,28%	0,61%	0,02%	-0,49%	-0,11%	1,02%
		VSDE = WS - EEV	25	3	0	29	0	72	25	3	30	3	19
		VSDE%	0,50%	0,02%	0,00%	15,91%	0,00%	-8,78%	0,61%	0,02%	-0,49%	-0,11%	0,77%

