



HAL
open science

Nouvelles stratégies de remanufacturing intégrées et multicritères basées sur la performance des produits et les profils des clients

Latifa Belhocine

► **To cite this version:**

Latifa Belhocine. Nouvelles stratégies de remanufacturing intégrées et multicritères basées sur la performance des produits et les profils des clients. Modélisation et simulation. Université de Lorraine, 2022. Français. NNT : 2022LORR0057 . tel-03780721

HAL Id: tel-03780721

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03780721>

Submitted on 19 Sep 2022

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

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



**UNIVERSITÉ
DE LORRAINE**

**BIBLIOTHÈQUES
UNIVERSITAIRES**

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact bibliothèque : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr
(Cette adresse ne permet pas de contacter les auteurs)

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Nouvelles stratégies de remanufacturing intégrées et multicritères basées sur la performance des produits et les profils des clients.

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 03 Mars 2022

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Lorraine

(Automatique, Traitement de signal et des images, Génie informatique)

par

Latifa Belhocine

Composition du jury

| | | |
|----------------------|------------------------------------|---|
| <i>Président :</i> | Maria Di Mascolo | Directrice de Recherche, G-SCOP, Université Grenoble Alpes |
| <i>Rapporteurs :</i> | Evren Sahin Noureddine Zerhouni | Professeure des Universités, LGI, CentraleSupélec Professeur des Universités, FEMTO, ENSMM de Besançon |
| <i>Examineurs :</i> | Wahiba Ramdane | Maîtresse de Conférences, LORIA, Université de Lorraine |
| <i>Invité :</i> | Mohammed Yagouni | Maître de Conférences, USTHB Alger |
| <i>Directeur :</i> | Mohammed Dahane | Maître de Conférences HDR, LGIPM, Université de Lorraine |

Mis en page avec la classe thesul.

Remerciements

Ce travail de recherche a été réalisé au sein de l'équipe management de la production et de la maintenance (MPM) au laboratoire de génie informatique, production et maintenance de Metz (LGIPM).

Je tiens tout d'abord à exprimer mes remerciements à mon directeur de thèse Monsieur Mohammed DAHANE, maître de conférence HDR à l'université de Lorraine, pour son soutien sur tous les plans, pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant de diriger ce travail, pour toutes les heures qu'il m'a consacrées et pour sa patience à mon égard. Je le remercie pour sa bonne humeur contagieuse qui a rendu les jours difficiles meilleurs et pour sa bienveillance.

J'exprime ma gratitude aux membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en évaluant mes travaux:

Je remercie sincèrement Madame E. Sahin, Professeur à CentraleSupélec, et à Monsieur N. Zerhouni, Professeur à l'ENSMM de Besançon, d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ce manuscrit.

J'adresse mes sincères remerciements à Madame M. Di Mascolo, Directrice de recherche à l'Université Grenoble Alpes, d'avoir accepté d'examiner mon travail de recherche et de faire partie du jury de cette thèse.

Je remercie infiniment Madame W. Ramdane, Maître de conférences à l'Université de Lorraine, d'avoir accepté d'examiner ce travail, en plus de son suivi tout au long de la thèse, de ses remarques et suggestions pertinentes lors des réunions de comité de suivi individuel, et de m'avoir donné ma première expérience d'enseignement.

J'exprime mes chaleureux remerciements à Monsieur M. Yagouni, Maître de conférences à l'USTHB Alger, sans qui rien n'aurait été possible. Merci de m'avoir soutenu, d'avoir cru en moi, de m'avoir fait confiance durant toutes ces années. Merci d'avoir accepté de faire partie de mon jury de soutenance en tant qu'invité

Mes remerciements les plus vifs s'adressent également à Monsieur M. Sahnoun pour le suivi de mon avancement tout le long de la thèse, pour ses remarques et suggestions pertinentes lors des réunions avec le comité de suivi individuel.

Je remercie mes amies et sœurs Fahima, Kenza, Lylia, Sarah et Selma pour le soutien qu'elles m'ont apporté durant ces trois dernières années et de m'avoir prêté une oreille attentive. Merci pour tous les bons moments.

Pour finir, je remercie du fond du cœur mes chers parents, mon frère Yacine, ma sœur Asma et ma moitié Abderrahmane pour leur amour et leur soutien inconditionnels. Vous êtes mes piliers, la raison de ma force et de mon courage.

Table des matières

| | |
|--|------------|
| Table des figures | v |
| Liste des tableaux | vii |
| Introduction générale | 1 |
| I État de l’art et contexte général des travaux | 7 |
| 1 Introduction | 8 |
| 2 Les enjeux de l’économie circulaire | 9 |
| 3 Efficacité du remanufacturing | 17 |
| 4 Classification des problématiques liées au remanufacturing | 18 |
| 4.1 Étude de marché pour le remanufacturing | 19 |
| 4.2 Conception pour le remanufacturing | 20 |
| 4.3 Optimisation du processus du remanufacturing | 20 |
| 4.3.1 Optimisation de la chaîne logistique | 20 |
| 4.3.2 Problème de dimensionnement de lots et ses variantes | 22 |
| 4.3.3 Stock, planification et production | 23 |
| 5 Positionnement de la problématique de recherche | 24 |
| 5.1 Politique de récupération | 25 |
| 5.2 Politique de remise à neuf | 25 |
| 6 Conclusion | 26 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| II | Optimisation de la récupération et de la remise à neuf des produits usagés | 28 |
| 1 | Introduction | 29 |
| 2 | Description du problème | 29 |
| 2.1 | Hypothèses | 30 |
| 2.1.1 | L'horizon du plan de remanufacturing | 30 |
| 2.1.2 | Les produits | 30 |
| 2.1.3 | Les clients | 30 |
| 2.2 | Stratégie de remanufacturing | 31 |
| 2.2.1 | Stratégie de récupération | 31 |
| 2.2.2 | Stratégie de remise à neuf | 31 |
| 2.3 | Objectifs | 31 |
| 3 | Formulation mathématique | 32 |
| 3.1 | Notations | 32 |
| 3.2 | Variables de décision | 32 |
| 3.3 | Contraintes du problème | 33 |
| 3.4 | Fonctions objectifs | 33 |
| 3.5 | Taille du problème | 35 |
| 4 | Approche de résolution | 35 |
| 5 | Exemple illustratif | 37 |
| 6 | Conclusion | 39 |
| III | Intégration du profil des clients dans les décisions de récupération et de remise à neuf des produits usagés | 42 |
| 1 | Introduction | 43 |
| 2 | Description du problème | 43 |
| 3 | Formulation mathématique | 48 |
| 3.1 | Notations | 48 |
| 3.2 | Variables de décision | 48 |
| 3.3 | Contraintes du problème | 49 |
| 3.4 | Fonctions objectifs | 52 |
| 3.5 | Taille du problème | 53 |
| 4 | Approche de résolution | 53 |
| 5 | Exemple illustratif | 56 |
| 6 | Conclusion | 57 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| IV | Intégration des contraintes structurelles et fonctionnelles des produits dans les décisions de récupération et de remise à neuf | 60 |
| 1 | Introduction | 61 |
| 2 | Description du problème | 61 |
| 2.1 | Le client | 63 |
| 2.2 | La récupération et le remanufacturing de produits usagés | 64 |
| 3 | Formulation du problème | 65 |
| 3.1 | Notations | 65 |
| 3.2 | Variables de décision | 69 |
| 3.3 | Contraintes | 69 |
| 3.4 | Fonctions objectives | 71 |
| 4 | Approche de résolution | 73 |
| 4.1 | Description de l'approche de résolution | 73 |
| 4.1.1 | Étape I : Génération des données et paramètres | 73 |
| 4.1.2 | Étape II : Génération de population | 73 |
| 4.1.3 | Étape III : Sélection, croisement et mutation | 76 |
| 4.1.4 | Étape IV : Construction de la nouvelle génération | 76 |
| 4.1.5 | Étape V : Condition d'arrêt | 77 |
| 4.2 | Illustration de l'approche de résolution | 77 |
| 4.2.1 | Génération des données et paramètres | 77 |
| 4.2.2 | Génération de la population | 80 |
| 4.2.3 | Croisement et mutation | 86 |
| 5 | Conclusion | 89 |
| V | Expérimentation numérique : cas des smartphones | 92 |
| 1 | Introduction | 93 |
| 2 | Exemple numérique 1 | 94 |
| 3 | Exemple numérique 2 | 97 |
| 3.1 | Données du problème | 98 |
| 3.2 | Discussion des résultats | 100 |
| 3.2.1 | Stratégie de remanufacturing complet | 100 |
| 3.2.2 | Stratégie de remanufacturing minimal | 108 |
| 3.2.3 | Performances économique et environnementale des stratégies SRC et SRM | 116 |
| 4 | Analyse de sensibilité | 118 |

| | | |
|-----|---|------------|
| 4.1 | Impact du niveau de stock initial sur la performance du remanufacturing . . . | 118 |
| 4.2 | Impact du profil des clients sur la stratégie de remanufacturing | 119 |
| 4.3 | Impact de l'horizon et des durées de périodes sur la stratégie de remanufacturing | 121 |
| 5 | Expérience numérique 3 | 123 |
| 6 | Conclusion | 130 |
| | Conclusion générale | 131 |
| | Conclusion générale | 131 |
| | Bibliographie | 138 |

Table des figures

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Synopsis du manuscrit de thèse | 5 |
| I.1 | Quantité de déchets solides générés dans le monde | 9 |
| I.2 | Quantité de déchets électroniques en Europe en kilogrammes par habitant | 10 |
| I.3 | Quantité de déchets provenant du déchetage de véhicules hors d'usage en Europe | 11 |
| I.4 | Système basé sur l'économie linéaire | 12 |
| I.5 | Système basé sur l'économie linéaire | 13 |
| I.6 | Diagramme du processus de réutilisation | 14 |
| I.7 | Diagramme du processus de réparation | 14 |
| I.8 | Le cycle de remanufacturing | 15 |
| I.9 | Perte fonctionnelle et mécanique du Nickel suite aux opérations de recyclage | 16 |
| II.1 | Étapes de l'algorithme NSGA-II | 36 |
| II.2 | Croisement de deux individus | 40 |
| III.1 | Aperçu général de la problématique du remanufacturing des produits | 44 |
| III.2 | Localisation des clients par rapport aux centres de collecte | 45 |
| III.3 | L'impact du profil des clients sur l'évolution dans le temps (t) de la performance des produits | 46 |
| III.4 | Évolution de la performance des produits en fonction des actions de remanufacturing | 47 |
| III.5 | Les étapes de l'heuristique proposée | 54 |
| III.6 | Évolution de la performance d'un produit remis à neuf selon la stratégie complète . | 57 |
| III.7 | Évolution de la performance d'un produit remis à neuf selon la stratégie minimale . | 58 |

| | | |
|------|--|-----|
| IV.1 | Structure d'un smartphone | 62 |
| IV.2 | L'évolution de la performance d'un produit en fonction des profils d'utilisation . . . | 63 |
| IV.3 | Cycle hamiltonien du parent 1 en période 1 | 83 |
| IV.4 | Schéma du croisement | 88 |
| IV.5 | Opération de mutation | 89 |
| | | |
| V.1 | Pourcentage de reconditionnement de différents articles | 93 |
| V.2 | Le grade moyen par client sur les 10 périodes de l'horizon | 97 |
| V.3 | Fonctionnalités d'un smartphone considérées dans notre exemple | 99 |
| V.4 | Exemple de l'évolution de la performance d'un smartphone selon la stratégie de remanufacturing complet | 101 |
| V.5 | Exemple de l'évolution de la performance d'un smartphone selon la stratégie de remanufacturing minimal | 102 |
| V.6 | Performance des téléphones utilisés par le client 1 selon la SRM | 103 |
| V.7 | Performance des téléphones utilisés par le client 3 selon la SRM | 104 |
| V.8 | Performance des téléphones utilisés par le client 6 selon la SRM | 105 |
| V.9 | Performance des téléphones utilisés par le client 18 selon la SRM | 106 |
| V.10 | Performance des téléphones utilisés par le client 31 selon la SRM | 107 |
| V.11 | Performance d'un smartphone utilisé haute et moyenne fréquences | 109 |
| V.12 | Performance d'un smartphone utilisé haute et basse fréquences | 109 |
| V.13 | Performance des téléphones utilisés par le client 1 selon la SRC | 111 |
| V.14 | Performance des téléphones utilisés par le client 3 selon la SRC | 112 |
| V.15 | Performance des téléphones utilisés par le client 6 selon la SRC | 113 |
| V.16 | Performance des téléphones utilisés par le client 18 selon la SRC | 114 |
| V.17 | Performance des téléphones utilisés par le client 31 selon la SRC | 115 |
| V.18 | SRM : Performance des produits - Smartphones utilisés à haute et basse fréquence . | 117 |
| V.19 | Niveau de stock de chaque grade dans la période précédente - Stratégie SRC | 120 |
| V.20 | Niveau de stock de chaque grade dans la période précédente - Stratégie SRM | 121 |
| V.21 | Horizon et répartition des périodes | 121 |
| V.22 | Horizon et périodes profil 1 | 122 |
| V.23 | Horizon et périodes profil 2 | 122 |
| V.24 | Composants et fonctionnalités considérés | 124 |
| V.25 | Évolution des performances des composant du produit 1 | 128 |
| V.26 | Évolution des performances des composant du produit 3 | 128 |
| V.27 | Évolution des performances des composant du produit 7 | 129 |

Liste des tableaux

| | | |
|-------|---|----|
| I.1 | Données sur les déchets issus des équipements électroniques aux États-Unis | 12 |
| II.1 | Notations utilisées | 32 |
| II.2 | Représentation d'un chromosome | 38 |
| II.3 | Interprétation du chromosome | 38 |
| II.4 | Grades des articles récupérés | 38 |
| II.5 | Les grades nécessaires | 39 |
| III.1 | Notations utilisées | 48 |
| III.2 | Fréquences d'utilisation | 56 |
| III.3 | Performances des produits après une période d'utilisation | 57 |
| IV.1 | Notations | 66 |
| IV.2 | Relation grade/performance | 78 |
| IV.3 | Relation composants/fonctionnalité (α_{cf}) | 78 |
| IV.4 | Importance des fonctionnalités (γ_f) | 78 |
| IV.5 | Importance des composants (θ_c) | 78 |
| IV.6 | Durée des périodes d_t | 78 |
| IV.7 | Fréquence d'utilisation (φ_{jt}) | 80 |
| IV.8 | Parent 1 | 80 |
| IV.9 | Parent 2 | 81 |
| IV.10 | Performance du composant après une période d'utilisation pour le parent 1 (β_{ic1}) | 81 |
| IV.11 | affectation clients/produits | 84 |

| | | |
|-------|--|-----|
| IV.12 | Performance des produits | 85 |
| IV.13 | Performance des composants | 85 |
| IV.14 | remise à neuf des produits | 85 |
| IV.15 | Remise à neuf des composants | 86 |
| IV.16 | Coûts économiques | 86 |
| IV.17 | Coûts environnementaux | 86 |
| | | |
| V.1 | Front de Pareto | 94 |
| V.2 | Chromosome de la solution 1 du front de Pareto pour quatre périodes | 95 |
| V.4 | Le nombre de produits récupérés par grade | 95 |
| V.3 | Les grades des produits utilisés par les clients | 96 |
| V.5 | Nombre de produits par grade après remanufacturing | 96 |
| V.6 | Durées des périodes | 98 |
| V.7 | Importance des fonctionnalités | 99 |
| V.8 | Distances entre les centres de collecte | 100 |
| V.9 | Variation de l'état du stock | 108 |
| V.10 | Variation du niveau de stock - Stratégie de remanufacturing minimal | 110 |
| V.11 | Performance économique et environnementale des stratégies SRC et SRM | 116 |
| V.12 | Impact du niveau de stock initial sur la stratégie de remanufacturing complet | 118 |
| V.13 | Impact du niveau de stock initial sur la stratégie de remanufacturing minimal | 118 |
| V.14 | Impact des profils des clients sur la stratégie de remanufacturing complet | 119 |
| V.15 | Impact des profils des clients sur la stratégie de remanufacturing minimal | 119 |
| V.16 | Performance des stratégies de remanufacturing - Horizon et périodes profil 1 | 123 |
| V.17 | Performance des stratégies de remanufacturing - Horizon et périodes profil 2 | 123 |
| V.18 | Impact de répartition des périodes sur l'horizon sur le nombre de récupération du smartphone 1 | 123 |
| V.19 | Impact de répartition des périodes sur l'horizon sur le nombre de récupération du client 1 | 123 |
| V.20 | Paramètres de l'instance | 124 |
| V.21 | Front de Pareto de la première instance | 125 |
| V.22 | Chromosome de la solution 1 | 126 |
| V.23 | État du stock par grade pour chaque période | 126 |
| V.24 | Affectations les smartphones aux clients | 127 |
| V.25 | Évolution de la performance des produits | 127 |
| V.26 | Remanufacturabilités des produits | 129 |

| | |
|--|-----|
| V.27 Cycle Hamiltonien de chaque période | 130 |
|--|-----|

Introduction générale

Avec les réglementations environnementales imposées par les différents pays, dans le cadre de la réduction des déchets de la production, de la consommation de ressources, et des émissions de gaz à effet de serre, les industriels de tous les secteurs se détachent des systèmes linéaires basés sur l'extraction de ressources, la fabrication des produits, l'utilisation/la consommation et la mise en décharge, pour adopter des concepts et modèles économiques circulaires. Dans ce contexte, plusieurs processus industriels sont utilisés pour la gestion des produits en fin de vie tels que le recyclage, et pour la gestion des produits en fin d'utilisation tels que la réutilisation directe, la réparation, le reconditionnement ou encore le remanufacturing. Bien que toutes ces options présentent un avantage commun, celui de prolonger la durée de vie utile d'un produit et de ce fait, réduire les déchets qui lui sont associés, le remanufacturing trouve un parfait équilibre entre les autres options de gestion de produits en fin de vie ou d'utilisation. En effet, le remanufacturing permet d'étendre la durée de vie des produits usagés selon trois étapes principales :

- La récupération et la collecte de produits usagés.
- Les opérations de remise à neuf : désassemblage du produit, inspection, réparation ou remplacement des composants défectueux, mise à niveau, tests, réassemblage des composants, etc.
- La redistribution des produits remis à neuf pour une autre phase de réutilisation.

Nous nous intéressons dans cette thèse à une application du processus de remanufacturing à titre préventif. Il s'agit d'appliquer les étapes du processus de remanufacturing, sur un horizon fini, pour des produits qui sont en cours d'utilisation par des clients, et ce dans le but de prolonger leur durée de vie utile. Nous procédons alors à la récupération de ces produits, à des instants prédéterminés, afin de les remettre à neuf ou améliorer leur état de fonctionnement et les redistribuer à nouveau.

Dans la problématique principale traitée, nous nous intéressons à déterminer les produits à récupérer ainsi que leur nombre, ainsi que le niveau de remise à neuf du produit récupéré. Pour cela, nous considérons comme objectif la minimisation des coûts économique et environnemental (en émission carbone) résultant des étapes du processus de remanufacturing. Ils comprennent les coûts relatifs au transport, au stockage, aux opérations de remise à neuf, à l'utilisation et au traitement des produits ou des composants atteignant leur fin de vie (étant donné que les produits ne sont pas indéfiniment éligibles à une remise à neuf). Nous proposons différentes politiques de récupération et de remise à neuf que nous élargissons au fur et à mesure en considérant de nouveaux paramètres :

- (1) En premier lieu, nous considérons que le produit est caractérisé par un grade que nous améliorons à chaque remise à neuf.
- (2) En deuxième lieu, nous considérons qu'un produit est caractérisé par une performance et qu'il comporte plusieurs fonctionnalités (chacune ayant une importance), et que chaque client correspond à un profil d'utilisation (une fréquence d'utilisation du produit). Chaque profil d'utilisation impacte différemment la qualité d'exécution d'une fonctionnalité, qui à son tour impacte la performance du produit. Nous déterminons le grade du produit à partir de sa performance.
- (3) En dernier lieu, nous considérons qu'en plus des fonctionnalités, un produit comporte plusieurs composants. Chaque composant est caractérisé par une performance et intervient dans l'exécution d'une ou plusieurs fonctionnalités. Le profil d'utilisation impacte la performance du composant, qui à son tour impacte la qualité d'exécution des fonctionnalités et en conséquence la performance totale du produit.

Afin de traiter au mieux la problématique générale abordée ainsi que ses différentes extensions, nous présentons le travail réalisé et réparti en quatre chapitres de ce manuscrit :

Dans le premier chapitre, nous commençons par introduire les motivations et le contexte qui ont favorisé la naissance du processus de remanufacturing, et nous présentons une comparaison avec les autres alternatives de gestion de produits en fin de vie ou d'utilisation associées au concept de l'économie circulaire. Par la suite, nous proposons une classification des problématiques relatives aux trois étapes du processus du remanufacturing traitées dans la littérature, en partant des études de marchés, de la conception des produits, de la gestion d'une chaîne logistique en bouche fermée, de la planification et de l'optimisation des différentes étapes du processus. Nous terminons par le positionnement de notre problématique par rapport à la classification proposées.

Dans le deuxième chapitre, nous adaptons le problème de dimensionnement des lots (lot-sizing) aux étapes du processus de remanufacturing. L'objectif est alors de déterminer les meilleurs décisions de récupération et de remanufacturing. Il s'agit de déterminer le nombre de produits à récupérer de chaque grade, parmi les produits qui sont en cours d'utilisation par des clients, puis de déterminer les grades à atteindre, après les opérations de remise à neuf sur les produits récupérés, durant les différents instants de récupération préalablement déterminés et équitablement répartis sur un horizon temporel donné. Pour ce faire, un modèle mathématique multi-objectif est proposé dans lequel nous considérons le coût total et l'impact carbone total à minimiser. Nous proposons également une adaptation de la métaheuristique NSGA-II (Non dominated sorting genetic algorithm) basée sur un codage des solutions en nombres réels.

Dans le troisième chapitre, comme dans le chapitre précédent, nous nous intéressons à l'optimisation de la récupération et la remise à neuf de produits en cours d'utilisation. A la différence du problème traité précédemment, nous nous intéressons à la structure fonctionnelle des produits à remanufacturer. En effet, nous considérons qu'un produit présente plusieurs fonctionnalités, et qu'il est caractérisé par un indice de performance et un indice de remanufacturabilité. Cette performance est un pourcentage permettant d'exprimer avec exactitude l'état du produit et son calcul est basé sur le comportement du client par rapport à l'utilisation du produit et sur la qualité d'exécution des fonctionnalités des produits. Quant à l'indice de remanufacturabilité, il représente la capacité d'un produit à être remanufacturé. Il est modélisé en un pourcentage qui diminue suite à chaque opération de remise à neuf appliquée au produit. Nous proposons pour cela une modélisation mathématique du problème intégrant les nouveaux paramètres avec les objectifs de minimiser les coûts économiques et environnementaux. Nous proposons également une heuristique qui construit un plan réalisable de récupération et de remise à neuf des produits utilisés. Nous ajoutons, à ce stade, l'optimisation de l'étape de la récupération des produits en appliquant une heuristique.

Dans le quatrième chapitre, et par extension aux deux précédents, nous intégrons la structure physique des produits à remanufacturer. Nous considérons qu'un produit comporte plusieurs composants, chacun d'eux est caractérisé par une performance et intervient dans l'exécution d'une ou plusieurs fonctionnalités du produit. La fréquence d'utilisation d'un client impacte directement la performance du composant et de ce fait la qualité d'exécution des fonctionnalités. Nous présentons une formule qui permet de calculer la performance totale d'un produit en fonction de ces paramètres. Nous intégrons également l'optimisation de l'étape de récupération au problème. Nous proposons alors une modélisation mathématique du problème intégrant les nouveaux paramètres avec les objectifs de minimiser les coûts économiques et environnementaux. Comme méthode de résolution,

nous adaptons la métaheuristique NSGA-II basée sur un codage mixte en nombres entiers et réels, intégrant directement l'optimisation de l'étape de la récupération des produits.

Le cinquième chapitre est dédié aux expériences numériques basées sur des données relatives aux smartphones afin de montrer l'applicabilité des approches proposées dans les précédents chapitres.

Ce manuscrit se conclut par un résumé des travaux réalisés, des commentaires sur les résultats obtenus et des perspectives de recherches futures.

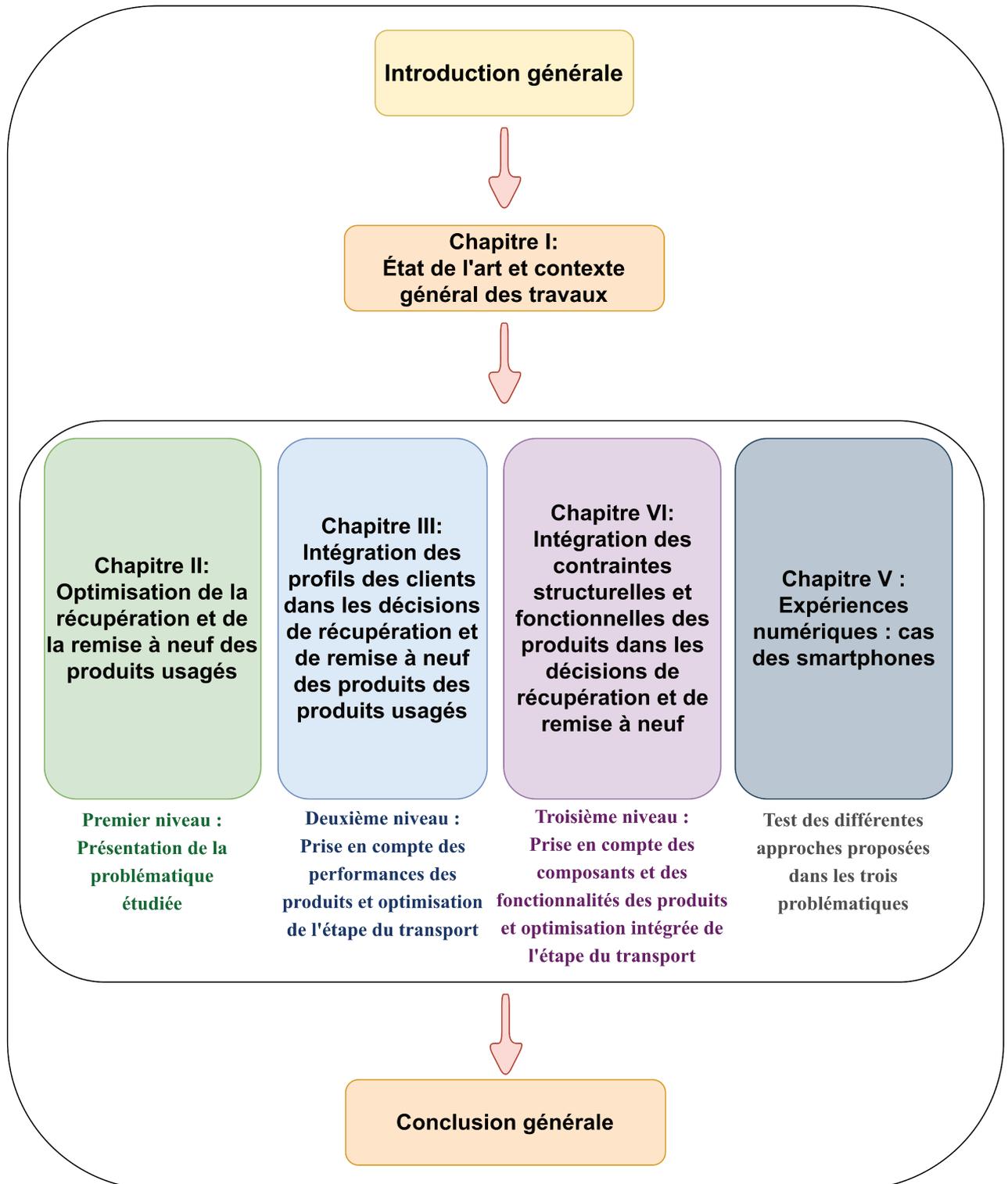


FIGURE 1 – Synopsis du manuscrit de thèse

Chapitre I

État de l'art et contexte général des travaux

Résumé

Dans ce chapitre, nous présentons un état de l'art sur le concept de remanufacturing en se basant sur les différentes thématiques qui lui sont liées dans la perspective de positionner nos travaux de recherche. D'abord, nous introduisons les motivations qui ont permis de donner naissance au processus de remanufacturing, et nous présentons une comparaison avec les autres alternatives de fin de vie associées au concept de l'économie circulaire. Par la suite, nous proposons une classification des problématiques relatives au processus du remanufacturing traitées dans la littérature, en partant des études de marchés et de la conception des produits, jusqu'à la gestion des chaînes logistiques en bouche fermée, et la planification et l'optimisation des différentes étapes du processus du remanufacturing. Nous terminons par la présentation du cadre de cette thèse et le positionnement des travaux réalisés par rapport à la classification proposée.

1 Introduction

Après plusieurs décennies de pratique d'une activité industrielle basée sur une économie linéaire, la croissance alarmante des dommages environnementaux a donné naissance à un concept innovant appelé "économie circulaire". Définie comme étant un modèle économique qui vise principalement à préserver les ressources et réduire les déchets et le gaspillage¹, l'économie circulaire propose plusieurs options (alternatives) de gestion des produits en fin de vie, ou en fin d'utilisation, telles que la réutilisation directe, la réparation, le recyclage et le remanufacturing. Trouvant un équilibre parfait entre les autres options, le remanufacturing est un processus qui permet de remettre à neuf un produit usagé ou en fin de vie et de récupérer partiellement l'énergie et les matériaux utilisés dans la fabrication initiale du produit. Le remanufacturing a ouvert au monde de la recherche et de l'industrie plusieurs axes de prospection et d'étude.

Peu connue du grand public, la remise à neuf des produits en fin d'usage peut susciter une certaine réticence chez les clients lors de l'achat. Pour cela, plusieurs études ont été menées par des entreprises offrant des services de remanufacturing, afin d'évaluer sa rentabilité et estimer l'intérêt de leur clientèle pour l'achat de produits remis à neuf. En se basant sur cet aspect, nous avons une première classe de problématiques à présenter dans notre état de l'art concernant les études de marché, les questionnaires et les sondages menés dans le but d'avoir une vue d'ensemble sur l'opinion des différents clients, à propos de l'achat et de l'utilisation de produits remis à neuf.

La deuxième classe des problématiques étudiées concerne la conception de produits pour le remanufacturing. En effet, les chercheurs se sont intéressés à l'amélioration de la conception des produits afin de faciliter les opérations de remise à neuf et permettre le suivi de l'évolution du produit dans le temps.

Le processus de remanufacturing comprend trois étapes principales : la récupération des produits en fin d'usage, les opérations de remise à neuf et la redistribution des produits après leur remise à neuf. Plusieurs problématiques découlent de ces étapes, elles traitent des problèmes de gestion de stock, de planification, d'ordonnancement, de gestion de chaîne logistique en boucle fermée, d'optimisation du transport, etc. Nous classifions toutes ces problématiques dans la catégorie de la gestion et l'optimisation des étapes du processus de remanufacturing.

Suite à la présentation et l'analyse des différentes problématiques présentées dans l'état de l'art, nous positionnons la problématique principale que nous traitons et nous mettons en évidence la contribution apportée.

1. www.ecologie.gouv.fr/leconomie-circulaire

2 Les enjeux de l'économie circulaire

Les déchets peuvent être répartis en plusieurs groupes : organiques ou inorganiques, solides, liquides ou gazeux, dangereux ou non dangereux, et toxiques ou non toxiques, et ce, en fonction de leurs propriétés physiques et chimiques. Ils sont responsables de la pollution de l'air, du sol et de l'eau. Nous retrouvons la quantité de déchets solides générés dans le monde représentée dans la figure I.1 en millions de tonnes². La plus grande quantité est générée par les États-Unis avec plus de 250 millions de tonnes de déchets, suivi par la Chine et l'Inde avec 220 et 168 millions de tonnes de déchets.

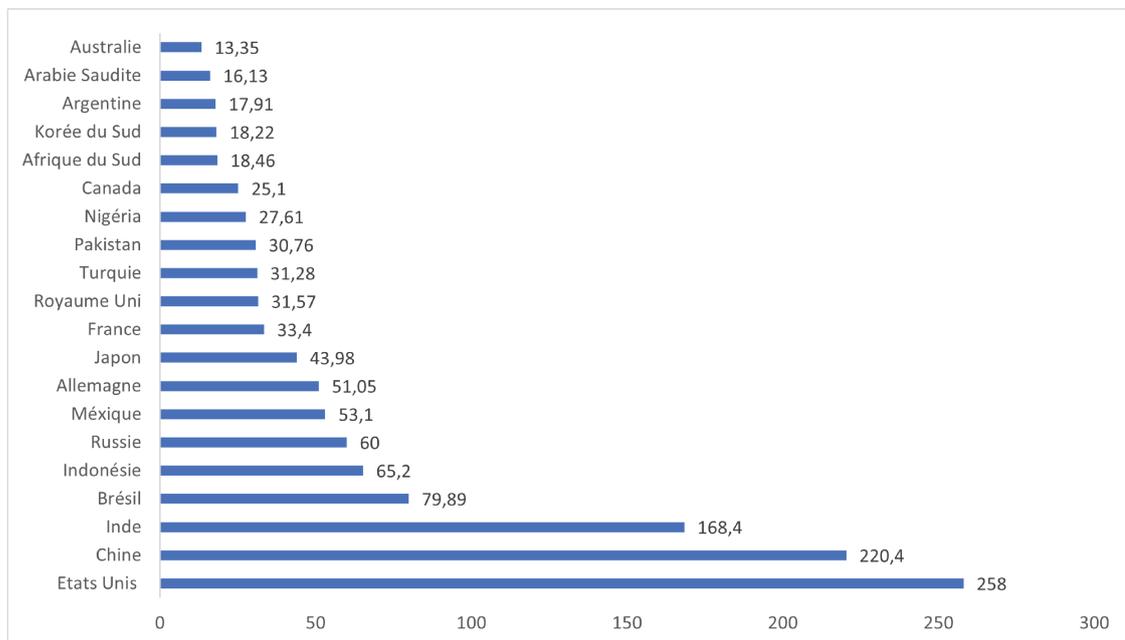


FIGURE I.1 – Quantité de déchets solides générés dans le monde

La fabrication de produits de différents types (électroniques, mécaniques, etc) par un processus industriel engendre une quantité de ressources et d'énergie consommées, de gaz à effet de serre émis ainsi que d'autres déchets (solides, liquides, etc) générés appelés déchets industriels. A titre d'exemple, la quantité totale de déchets industriels aux États-Unis a atteint 7,6 milliards de tonnes en 2017 [37]. La mesure de ces quantités lors de la mise en oeuvre d'un processus industriel permet de définir ce qu'on appelle l'impact environnemental de ce processus.

Chaque produit évolue selon un cycle de vie comportant trois phases principales : le début de vie, le milieu de vie et la fin de vie. Le début de vie d'un produit nécessite l'acquisition des matériaux

2. www.statista.com/statistics/916749/global-generation-of-municipal-solid-waste-by-country/

utilisés dans sa fabrication, sa conception ainsi que l'assemblage de ses pièces. Durant son milieu de vie, un produit est livré et installé pour son utilisation. A sa fin de vie, lorsqu'un produit est mis en décharge, il génère des déchets.

Prenons l'exemple des téléphones intelligents (smartphones) qui sont considérés aujourd'hui comme étant indispensables à la vie quotidienne. Leur durée de vie moyenne est inférieure à 2 ans en général [85]. Selon [39], 14 milliards de téléphones portables ont été vendus en Allemagne entre 2004 et 2014 composés d'une grande quantité de métal. Avec un cycle de vie court dû à leur fragilité, et en raison des nombreuses matières dangereuses contenues dans les déchets, à leur fin de vie les téléphones portables impactent négativement l'environnement.

La figure I.2 représente la quantité de déchets électroniques qui ont été pris en compte en 2018 dans 8 pays européens. Le plus grand nombre de déchets électroniques a été enregistré en Suède avec plus de 14 kg par habitant, suivi de la France avec 12 kg par habitant, puis de l'Allemagne avec 10 kg par habitant, la République Tchèque avec presque 9 kg par habitant, on retrouve ensuite l'Italie, l'Espagne et la Pologne avec environ 7 kg par habitant. Pour finir, nous avons la Roumanie avec la plus basse quantité enregistrée, soit 2,4 kg par habitant.

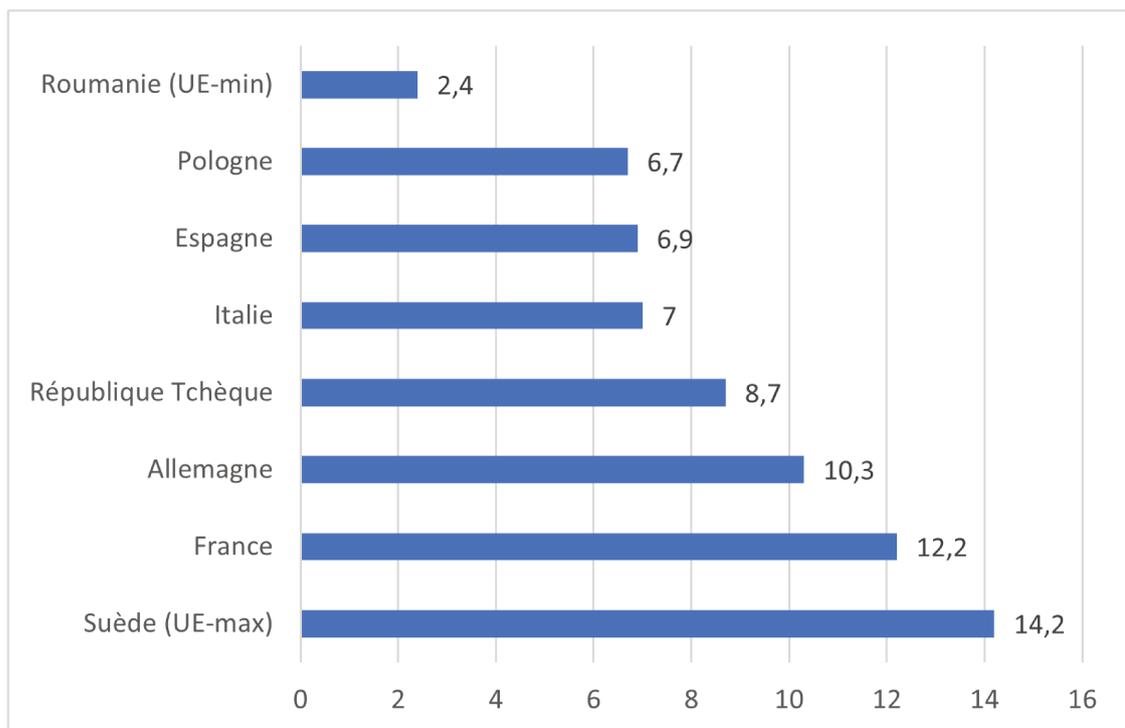


FIGURE I.2 – Quantité de déchets électroniques en Europe en kilogrammes par habitant

D'après les données prélevées du site Eurostat, la figure I.3 présente la quantité en tonnes de

déchets provenant du déchetage de véhicules hors d'usage au Royaume-Uni et dans 6 pays européens entre 2009 et 2018. La plus grande quantité de déchets est provoquée principalement par le Royaume-Uni avec 1 million de tonnes, la France avec 800 milles de tonnes et l'Allemagne avec 500 milles de tonnes en moyenne. La Belgique, la République Tchèque, le Danemark et les Pays-Bas ont en moyenne 100 milles tonnes de déchets. Les industriels et le monde académique sont confrontés à

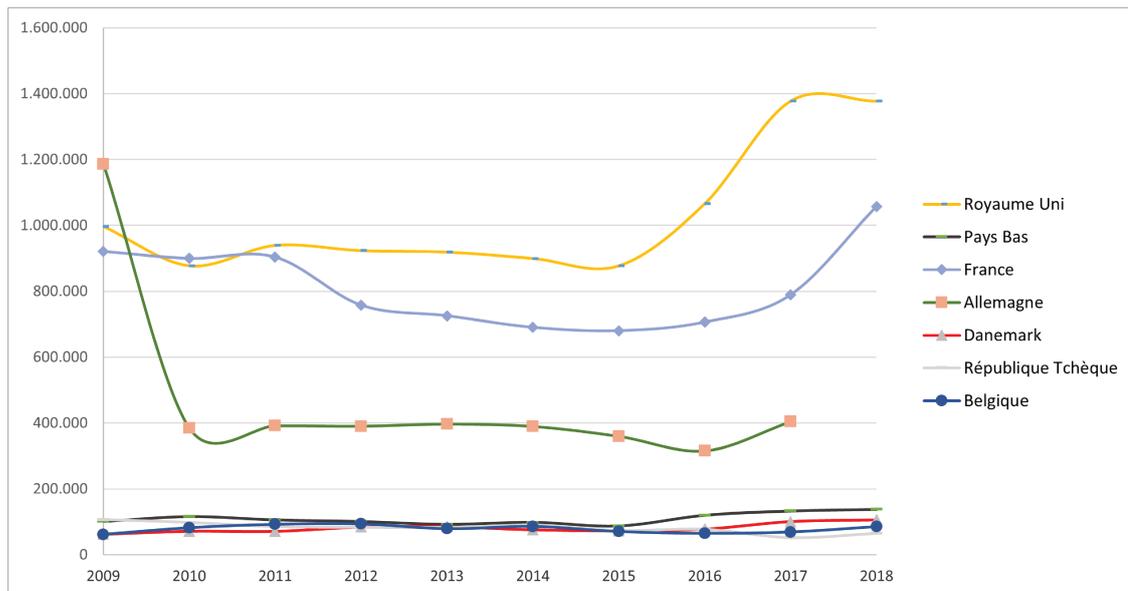


FIGURE I.3 – Quantité de déchets provenant du déchetage de véhicules hors d'usage en Europe

la problématique de réduction des impacts environnementaux issus de leurs procédés industriels, les poussant ainsi à développer des systèmes de production durables, donnant naissance à un concept innovant appelé l'économie circulaire.

L'économie circulaire permet de passer des systèmes linéaires inefficaces, basé sur la production, la consommation puis la mise en décharge (figure I.4), à des systèmes en chaîne qui conservent la valeur intrinsèque des produits.

Selon le rapport de la Fondation Ellen MacArthur [72], l'économie circulaire est considérée comme un jeune modèle industriel permettant la réduction de la consommation de ressource, les quantités de déchets ainsi que la réduction des émissions de gaz à effet de serre. La figure I.5 montre le cycle accompli dans un modèle économique circulaire.

Le tableau I.1 présente une comparaison des quantités d'équipements électroniques mises sur le marché et des quantités de déchets électroniques générés et récupérés entre 2015 et 2019. On re-

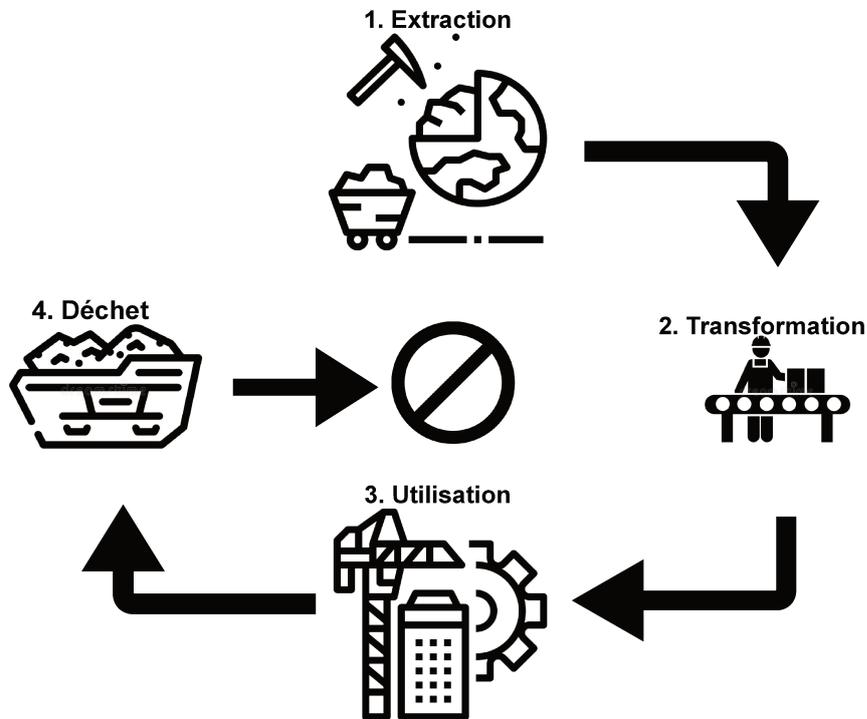


FIGURE I.4 – Système basé sur l'économie linéaire

marque qu'au moins 15% des déchets électroniques sont récupérés pour être traités selon un système circulaire.

| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 |
|---|------|------|------|------|------|
| Déchets électroniques récupéré (%) | 19 | 16 | 15 | 15 | 15 |
| Déchets électroniques récupéré (kilo tonne) | 1230 | 1070 | 1020 | 1020 | 1020 |
| Déchets électroniques générés (kilo tonne) | 6502 | 6618 | 6721 | 6817 | 6918 |
| Produits mis sur le marché (kilo tonne) | 7362 | 7536 | 7912 | 7745 | 8354 |
| Déchets électroniques générés (kg/habitant) | 20,3 | 20,5 | 20,7 | 20,8 | 21 |
| Produits mis sur le marché (kg/habitant) | 22,9 | 23,3 | 24,3 | 23,7 | 25,3 |

TABLEAU I.1 – Données sur les déchets issus des équipements électroniques aux États-Unis

Nous comptons plusieurs processus ayant pour but de maintenir la valeur des produits, tels que la réutilisation direct, la réparation, le reconditionnement et le remanufacturing. Ces processus interviennent dans le milieu de vie d'un produit, il s'agit d'options de gestion de produits à leur fin d'utilisation (de la première utilisation à l'avant dernière). Quand la dernière utilisation du produit prend fin, on arrive à sa fin de vie. Pour la gestion de fin de vie des produits, l'économie circulaire fait appel au recyclage.

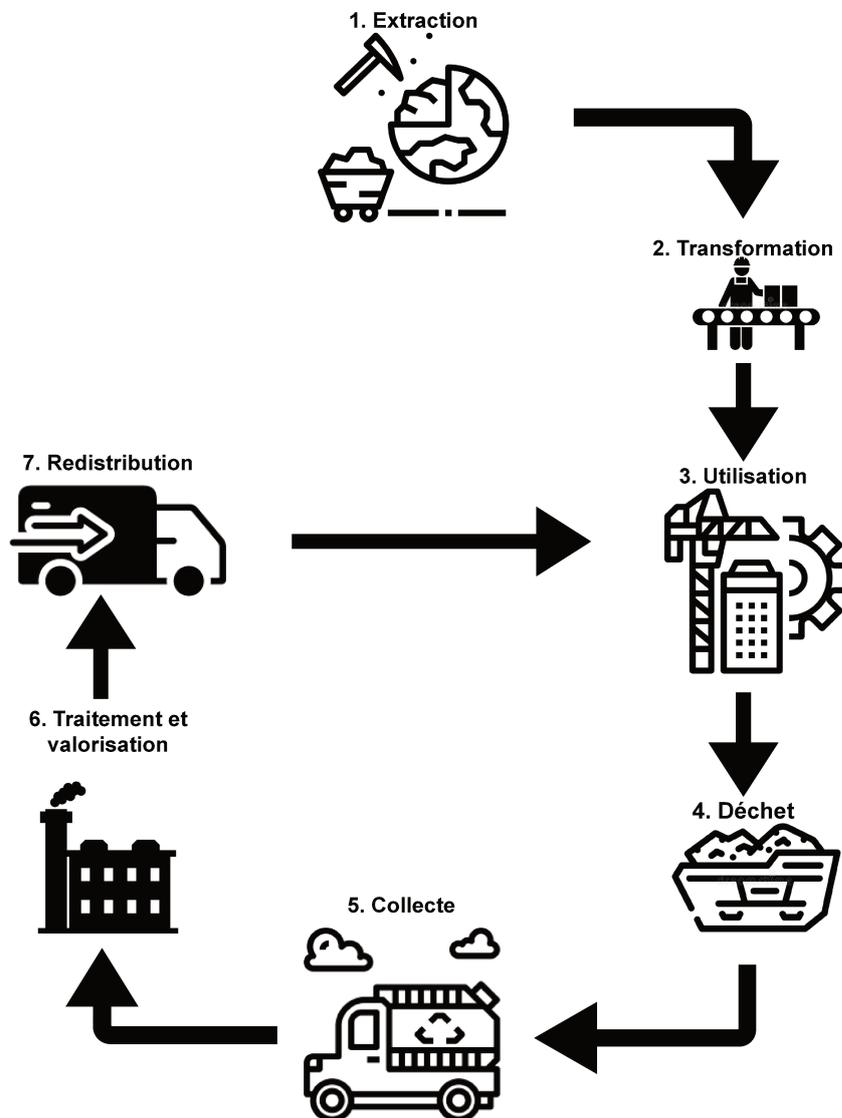


FIGURE I.5 – Système basé sur l'économie linéaire

La réutilisation directe d'un produit passe par plusieurs étapes : la collecte, l'inspection, le test, le nettoyage et la redistribution sur le marché dans des conditions réglementées. Un produit réutilisé directement n'est soumis en aucun cas à un remplacement ou une réparation d'un de ces composants. Pour cela, seuls les produits en bon état de fonctionnement et ne nécessitant que des retouches esthétiques faciles sont concernés. La réutilisation directe permet d'éviter de jeter prématurément des produits en fin d'utilisation. Par exemple, une entreprise est parfois contrainte à changer les ordinateurs ou les téléphones portables utilisés par les employés. Ces appareils sont souvent dans un bon état de fonctionnement et ne nécessitent qu'un simple nettoyage pour les remettre sur le marché,

ce qui permet aux consommateurs d'avoir des produits fonctionnels à des prix plus abordables [46]. Le schéma de la figure I.6 illustre le déroulement du processus de réutilisation d'un produit.

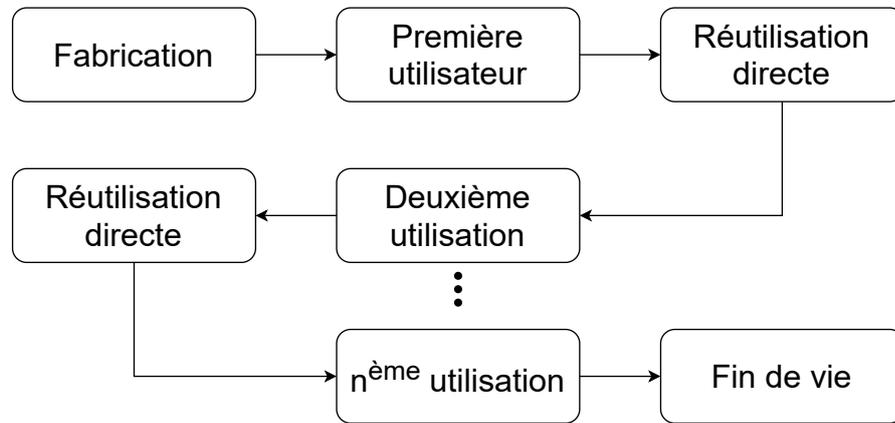


FIGURE I.6 – Diagramme du processus de réutilisation

Le processus de réparation concerne la réparation d'un défaut détecté ou le remplacement d'un des composants d'un produit lorsque ce dernier est défectueux, afin de le restituer à un état fonctionnel et ainsi, permettre au produit d'atteindre sa durée de vie prévisionnelle et voire même la prolonger. Par ce processus, on évite de jeter un produit en entier pour envoyer aux déchets ou au recyclage que les composants endommagés. Le schéma de la figure I.7 illustre le cycle de vie d'un produit soumis plusieurs fois au processus de réparation.

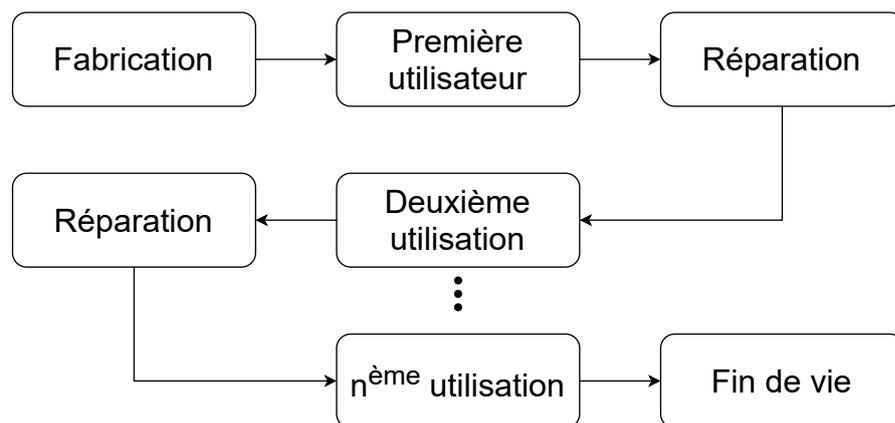


FIGURE I.7 – Diagramme du processus de réparation

Le reconditionnement est une modification d'un produit en fin d'utilisation ayant pour but d'augmenter ou de restaurer ses performances et ses fonctionnalités et en faire un produit entièrement fonctionnel, aussi performant que ce qu'il était initialement. Le processus de reconditionnement se fait par des révisions mineures ou par des mises à niveau, comme il peut nécessiter des opérations

plus lourdes dans une usine ou dans un cadre industriel répondant à des exigences et des normes élevées selon un cahier de charges rigoureux (comme pour les équipements médicaux, les imprimantes,...).

Dans la même idée que le reconditionnement, nous retrouvons le concept de remanufacturing. Plusieurs définitions du remanufacturing ont été données dans la littérature. Il s'agit d'un processus industriel se déroulant en usine, durant lequel les composants d'un produit sont restaurés à leurs performances initiales (celle d'un composant à son état neuf) ou même meilleures. Ce processus engendre l'utilisation de techniques de l'ingénierie spécifiques suivant des normes, ainsi que la soumission des produits à des tests techniques et de qualité.

Le remanufacturing est présenté comme une alternative écologique prometteuse permettant de réduire les déchets à moindre coût [32]. Il est considéré comme la meilleure forme de recyclage, étant donné que le contenu en matières premières est conservé et le produit remis à neuf garde la même valeur qu'un produit nouvellement fabriqué [36].

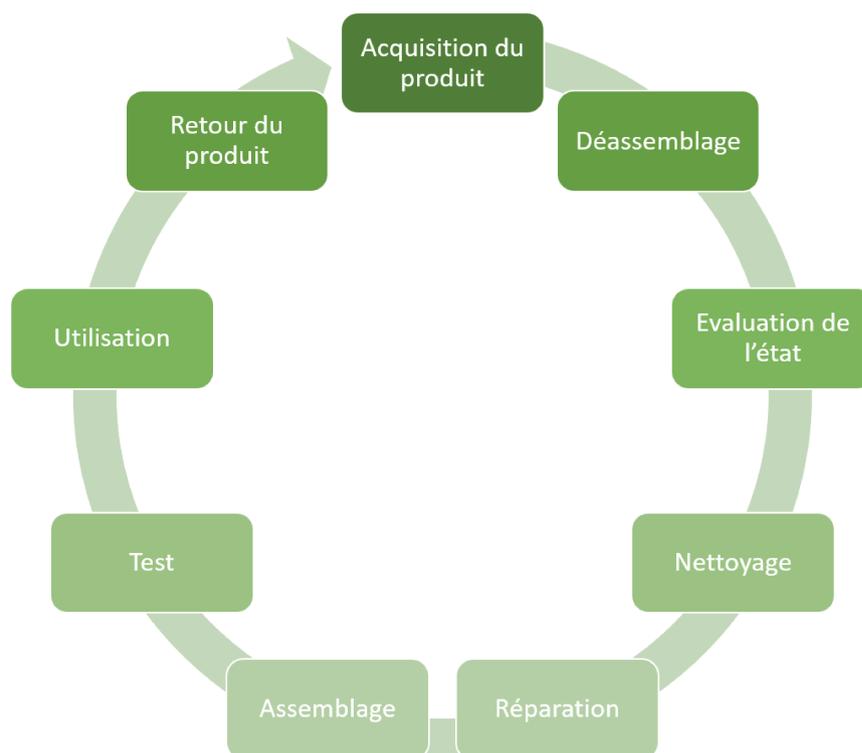


FIGURE I.8 – Le cycle de remanufacturing

Comme le montre la figure I.8, le processus de remanufacturing passe par le désassemblage du produit en composants afin de procéder à l'inspection, au nettoyage, à la réparation ou au remplacement, puis au réassemblage du produit. Afin de s'aligner aux normes souhaitées, certains composants peuvent être modernisés. Bien que les étapes du remanufacturing soient souvent présentées se-

lon un ordre précis, cet ordre dépend des opérations exactes à exécuter et de la structure du produits. Par exemple, certains produits ne nécessitent pas de nettoyage, d'autres requièrent une inspection à grande précision.

Le recyclage est décrit comme le processus qui transforme les composants d'un produit en la matière première avec laquelle ils ont été fabriqués [44].

Le recyclage permet d'éviter l'utilisation de matières premières vierges, et donc les émissions de gaz à effet de serre liées à leur extraction. Par exemple, une comparaison entre les émissions liées à la fabrication de la matière première primaire et secondaire des matériaux d'emballage en France, montre que environ 50 % et 30 % de kg de CO_2 sont économisés pour le verre et l'acier respectivement [22]. Malgré l'efficacité du recyclage à réduire l'impact environnemental des activités industrielles, il peut entraîner une perte fonctionnelle et mécanique du matériau à chaque cycle de recyclage, comme le montre la figure I.9 pour le nickel recyclé. Le pourcentage de perte fonctionnelle et de perte mécanique augmente à chaque cycle de recyclage.

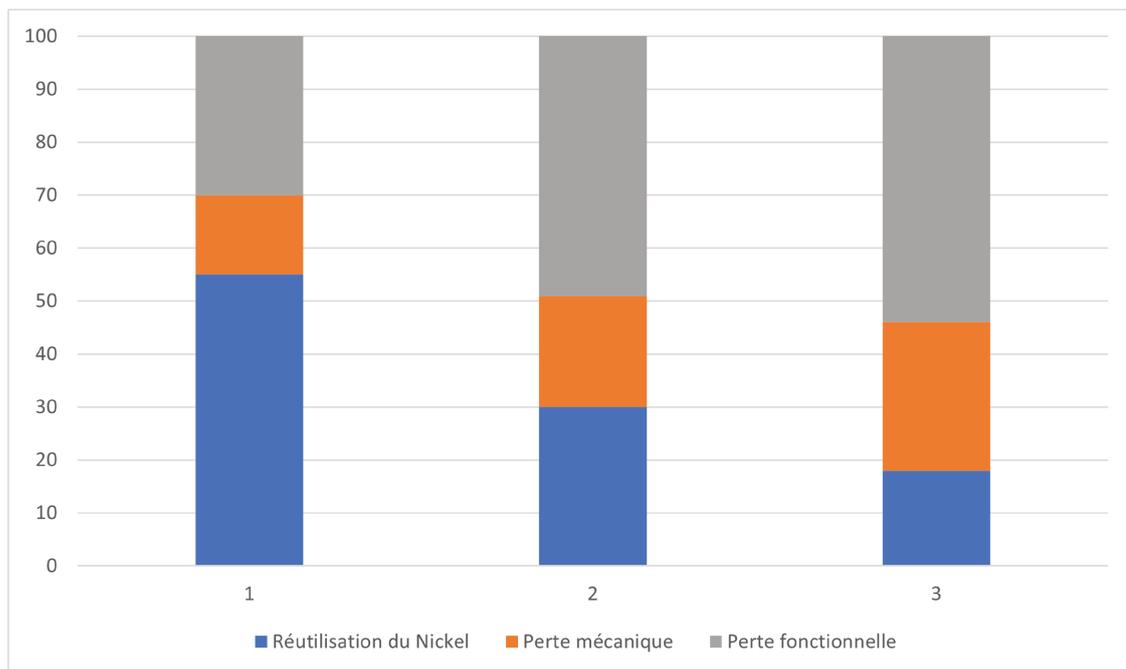


FIGURE I.9 – Perte fonctionnelle et mécanique du Nickel suite aux opérations de recyclage

Bien que, de façon générale, les options de gestion de produits en fin d'utilisation que nous avons décrites contribuent à réduire considérablement l'utilisation de nouveaux matériaux impliquant ainsi une diminution avantageuse de la consommation d'énergie et des émissions issues des extractions de matériaux, il reste difficile d'accéder aux produits en fin d'utilisation, à moins d'assurer leur collecte

via des infrastructures spécialisées, et d'adapter les systèmes économiques pratiquant la collecte des produits en fin de vie pour le recyclage par des services de logistique inverse.

3 Efficacité du remanufacturing

Le processus de remanufacturing est généralement plus efficace que le processus de fabrication classique d'un point de vue écologique, économique et social [62]. En effet, le remanufacturing utilise moins de ressources matérielles et énergétiques, génère moins de gaz à effet de serre et permet d'éviter une certaine quantité de déchets. D'autant plus que les produits remis à neufs coûtent moins chers que les produits nouvellement fabriqués, ce qui donne un large choix de marchés. D'ailleurs, une enquête menée estime que le prix d'un produit remis à neuf est plus bas qu'un produit neuf de 30% à 40% [96]. Ce pourcentage dépend du secteur d'utilisation et du type des produits. D'après les enquêtes menées au sein de différentes entreprises proposant des services de remanufacturing, ce dernier reste très efficace, bien que les entreprises interrogées fabriquent des produits variés [88]. Par exemple, la marque japonaise d'appareils photo à usage unique *FUJI Film* offre un service de remanufacturing qui réduit la consommation de ressources et apporte un bénéfice considérable à l'environnement, puisque près de 90% des 15 modèles différents utilisés sont remis à neuf, le reste étant recyclé.

D'autres entreprises spécialisées dans le remanufacturing de cartouches d'encre pour imprimantes, comme *Greenman* ou *Scandi-Toner*, sont connues pour leur investissement environnemental. *Greenman* propose à ses clients un service de gestion de leurs besoins en cartouches et un système gratuit de récupération des cartouches usagées. Et *Scandi-Toner* fournit à ses clients des cartouches à bas prix et respectueuses de l'environnement. Dans la catégorie informatique, la société *Inrego*, spécialisée dans la remise à neuf d'ordinateurs portables et de smartphones usagés, affirme que 90 % des appareils récupérés sont remis à neuf, ce qui permet à ses clients d'acheter du matériel informatique à un prix très raisonnable. L'entreprise *Swepac*, qui fabrique des compacteurs de sol utilisés dans le secteur de la construction, remet à neuf ses produits afin de prolonger leur durée de vie économique et technique. Dans l'industrie automobile, l'entreprise *UBD Cleantech* affirme que l'utilisation de composants remis à neuf réduit de 50 % le coût de fabrication. Une étude sur l'impact du remanufacturing en Europe dans différents secteurs industriels (automobile, équipement médical, marine, etc.) indique que le remanufacturing a permis d'éviter près de 8,3 millions de tonnes de CO_2 et environ 2,3 millions de métriques de matériaux mis en décharge [94].

Selon une autre étude menée pour comparer les impacts environnementaux d'un produit nouvellement fabriqué et d'un produit usagé remis à neuf, le remanufacturing permet d'économiser 50 % de l'énergie, 30 % de la main-d'oeuvre et 80 % des matières premières [70]. Les produits considérés

sont des moteurs diesel et les données utilisées pour l'étude proviennent de *Sinotruck* (une entreprise de fabrication de camions). Les résultats de l'analyse de la consommation d'énergie montrent que la remise à neuf des moteurs usagés permet d'économiser plus de 2000 MJ d'énergie par rapport à la fabrication d'un nouveau moteur. Trois types de ressources naturelles sont utilisés dans la fabrication des moteurs, le remanufacturing permet d'économiser de 70 % de charbon, 20 % de pétrole brut et 69 % de gaz naturel. Une comparaison de l'impact environnemental de la fabrication et de la rénovation montre que la remise à neuf du moteur diesel a une contribution moindre à l'impact environnemental par rapport à la fabrication des moteurs diesel.

Enfin, le remanufacturing possède également des avantages sur le marché du travail. En effet, et en raison de la complexité du processus de remanufacturing et de la non-automatisation des tâches, des milliers de postes sont créés. Aux États-Unis, le remanufacturing offre 180000 opportunités d'emploi [20].

4 Classification des problématiques liées au remanufacturing

Certaines barrières affectent les entreprises de remanufacturing de mener à bien les étapes du processus. D'après une étude menée par l'ERN³ pour connaître les points de vue des clients, on retrouve dans la plupart des réponses, une certaine réticence des clients à l'égard de produits remis à neuf. Cette méfiance est due principalement à la désinformation sur les produits remis à neuf, l'absence de normes, de certification ou de garantie, ainsi que les mauvaises expériences rapportées et souvent amplifiées par des clients insatisfaits. Ce sont des paramètres qui biaisent l'avis des clients par rapport aux produits remis à neuf qu'ils abordent avec une forte aversion au risque.

D'autre part, du point de vue des industriels, plusieurs difficultés empêchent le bon déroulement du processus de remanufacturing. En effet, l'un des premiers points à améliorer est le manque d'informations techniques et la possibilité d'accès par d'autres entreprises de remise à neuf, autres que les remanufacturiers d'équipements d'origine. Le remanufacturing diffère de la fabrication ordinaire que ce soit au niveau des caractéristiques du processus ou de sa logistique. A titre d'exemple, le nombre de produits qui peuvent être remis à neuf sont généralement en petit nombre comparé à la capacité d'un système industriel de fabrication, et ce, en raison de la complexité de la chaîne logistique et des tâches non automatisées du processus de remanufacturing. Le deuxième point relève des coûts de la logistique inverse et du stockage qui peuvent être élevés, comme pour le cas des produits volumineux, ce qui empêche leur remise à neuf. Le troisième point porte sur la mauvaise conception pour le remanufacturing qui peut bloquer l'exécution du processus sur un produit lorsque ce dernier n'est pas adapté à cet effet. Nous retrouvons également certaines incertitudes pouvant se manifester

3. European Reference Network

lors de l'exécution des étapes du processus de remanufacturing, notamment en ce qui concerne la quantité et la qualité des produits retournés/collectés, la planification, l'ordonnancement des tâches, la gestion de stock, etc, qui peuvent affecter le rendement et l'exécution du processus de remanufacturing.

Nous proposons pour cela une classification des travaux réalisés dans un contexte de remanufacturing basée sur trois thématiques principales : (i) les différentes démarches adaptées pour effectuer une étude de marché, et afin de renseigner les préférences des consommateurs vis à vis des produits remis à neuf, (ii) les techniques d'amélioration de la conception des produits afin de faciliter leur remise à neuf, ainsi que (iii) les outils d'optimisation et d'aide à la décision utilisés dans la gestion des retours dans la chaîne logistique ainsi que les différentes problématiques intervenants dans la gestion des opérations à effectuer dans le cadre d'une remise à neuf.

4.1 Étude de marché pour le remanufacturing

Des produits neufs et remis à neuf appartenant à plusieurs générations coexistent désormais sur le marché. Les clients commencent à accorder une plus grande attention aux produits remis à neuf. En effet, selon les résultats d'une enquête sur les produits remis à neuf, 94 % des personnes interrogées déclarent avoir déjà acheté des produits remis, et plus de 80 % d'entre eux sont satisfaites du fonctionnement du produit et sont susceptibles de recommander à leur entourage d'acheter des produits remis à neuf [84].

L'objectif principal des remanufacturiers est de répondre à la volonté et aux exigences des clients. Dans ce contexte, une étude a proposé d'examiner la position du client par rapport l'achat de produits remis à neuf en Chine, avec la connaissance du coût et de la qualité. Les résultats montrent que les clients sont plus influencés par la qualité que par le coût du produit remis à neuf [105].

Une autre étude propose un modèle intégré basé sur les préférences des clients en matière de prix, de qualité et de durabilité [23], pour déterminer la meilleure stratégie à adopter dans une entreprise dans l'objectif de satisfaire les exigences de ses clients et maximiser son profit.

Dans une autre étude, une enquête sur la perception de la valeur des produits remis à neufs par les clients a été menée pour six types de produits (ordinateurs portables bas de gamme, ordinateurs portables haut de gamme, téléphones intelligents, consoles de jeux, imprimantes et purificateurs d'eau) selon deux modèles commerciaux (le modèle d'achat et le modèle de location), sur un groupe de 95 étudiants d'une université coréenne. L'objectif de cette étude consiste à déterminer le modèle commercial qui correspond le mieux à la remise à neuf. Les résultats montrent que, selon la catégorie, la remise à neuf peut-être avantageuse dans le modèle d'achat comme dans le modèle de location [61].

Dans plusieurs études, des chercheurs ont étudié l'apport d'une politique de garantie dans la réussite d'une politique de remanufacturing. En effet, plusieurs études ont analysé l'offre de garanties sur les produits remis à neuf pour influencer le comportement des clients et les encourager à acheter les produits remis à neuf [5].

4.2 Conception pour le remanufacturing

Dans plusieurs études, les chercheurs s'intéressent à l'intégration des considérations les options de gestion de produits en fin de vie ou d'utilisation dans la phase de conception du produit.

Dans le cadre de l'intégration de la structure et l'architecture du produit pour faciliter sa remise à neuf à sa fin d'utilisation, Zhang et al. [114] ont cherché à identifier les principaux facteurs de conception qui influencent la remise à neuf d'un produit, en faisant appel à la fonction qualité, et en réutilisant les modes de défaillance d'un produit.

Dans un cas d'étude au sein d'une entreprise, les auteurs ont utilisé des méthodes de retour d'information pour les appliquer à la conception des produit dans le but de favoriser leur remise à neuf [42].

Dans d'autres études, des outils de conception pour le remanufacturing ont été développés. Ces outils se basent sur les méthodes d'aide à la décision, comme dans le cas des travaux de Yang et al. [112] qui utilisent la méthode TOPSIS floue (Technique d'ordre de préférence par similitude à la solution idéale) à un stade précoce de la conception du produit.

Dans d'autres cas, il est nécessaire de connaître l'état d'un produit usagé et d'évaluer sa performance des produits. Jiang et al. [49] proposent une évaluation des produits usagés selon deux critères : le niveau de dommage et la durée de vie restante. Les produits doivent être dotés de moyens technologiques pour faciliter l'évaluation de cette performance, comme pour certains smartphones et ordinateurs qui communiquent le nombre de cycles d'utilisation effectués sur une période, ce qui peut faciliter d'une certaine manière l'étape de l'inspection du produit.

4.3 Optimisation du processus du remanufacturing

4.3.1 Optimisation de la chaîne logistique

Les chaînes logistiques inverses comprennent généralement l'ensemble des activités, des organisations et des informations qui facilitent le flux de produits usagés du client vers le producteur⁴. L'intégration du remanufacturing dans la conception de la chaîne logistique inverse ou la chaîne logistique en boucle fermée, conduit à la gestion des opérations induites par le processus, telles que la gestion des retours de produits en fin d'utilisation et l'optimisation de la chaîne logistique de façon générale. Dans ce contexte, un modèle de chaîne logistique en boucle fermée à plusieurs échelons qui

4. www.apics.org

fournit des services de transport et de collecte est présenté par Sakrar et al. [89] dans le but d'étudier l'impact des coûts de transport et d'émission de carbone.

Dans le cadre de l'optimisation du coût total d'une chaîne logistique en boucle fermée, une méthode d'optimisation basée sur un algorithme génétique par essaim de particules a été proposée [120].

Les travaux réalisés dans le cadre d'une étude des perspectives managériales [4], proposent une approche basée sur la théorie des jeux pour minimiser le coût économique de la chaîne logistique, en déterminant les montants d'équilibre des principaux composants, tels que la stratégie de prix, les approches de remanufacturing, le délai de livraison etc.

De nombreuses organisations ont intégré les opérations de fabrication et de remanufacturing afin d'optimiser l'efficacité de leurs processus de chaîne logistique en amont et en aval. Aminipour et al. [6] se sont intéressés à intégrer des politiques de planification de la production cyclique dans une chaîne logistique en boucle fermée à deux étapes. Le problème est formulé sous la forme d'un programme linéaire en nombres entiers mixtes visant à générer un calendrier de production cyclique optimal sans pénurie de la demande qui minimise la somme des coûts de maintien et de mise en place dans le cadre d'un calendrier de livraison cyclique donné exigé par le client.

Hassanov et al. [41] traite de la coordination des quantités commandées dans une chaîne logistique en boucle fermée à quatre niveaux avec remanufacturing. Les niveaux sont des acheteurs multiples et des fournisseurs de niveau 1 et 2, ainsi qu'un fabricant. Le canal inverse est constitué d'un centre d'inspection et de désassemblage et d'un centre de remanufacturing. La demande des clients est satisfaite soit par des articles nouvellement fabriqués, soit par le remanufacturing d'articles usagés collectés auprès des clients pour être récupérés, soit par les deux. Des modèles mathématiques sont développés pour trouver les politiques de production (fabrication et remanufacturing) qui minimisent le coût total de la chaîne logistique en boucle fermée. L'un des modèles prend en compte les émissions provenant de la production et du transport et tient compte de la consommation d'énergie. Les résultats montrent qu'un taux de collecte plus élevé des articles usagés réduit les coûts de la chaîne d'approvisionnement et améliore sa performance environnementale. Une stratégie mixte de fabrication et de remanufacturing s'est avérée être la meilleure pour la chaîne.

Dans les travaux de thèse de Boudhar [17], l'axe principal est d'intégrer un flux d'approvisionnement hybride (flux direct et flux inverse). Deux problématiques principales ont été traitées afin d'étudier l'impact et l'influence de la politique de remanufacturing adoptée sur les performances d'un système de production à une machine puis à plusieurs machines. Un outil d'aide a été développé permettant de sélectionner le meilleur ensemble de machine pour construire système de production capable de satisfaire les contraintes de production définies par le décideur.

4.3.2 Problème de dimensionnement de lots et ses variantes

Avec l'émergence du remanufacturing comme opportunité de fin d'utilisation, les chercheurs ont commencé à étudier les problématiques visant à améliorer ses différentes étapes liées à du processus de remise à neuf des produits concernés.

Parmi les problématiques traitées, on retrouve le dimensionnement de lots et ses différentes variantes pour la récupération des produits usagés et la fabrication de nouveaux produits.

Le problème de dimensionnement économique des lots avec retours de produits et remanufacturing consiste à déterminer à chaque période les quantités à produire et à remettre à neuf afin de satisfaire la demande, et ce avec l'objectif de minimiser tous les coûts impliqués [82].

Parsopoulos et al. [81] abordent les retours de produits et leur remise à neuf dans un problème de dimensionnement de lot dynamique à un seul produit. Les auteurs ont proposé un algorithme métaheuristique d'évolution différentielle pour résoudre le problème étudié.

Dans les systèmes dits hybrides, combinant les activités de fabrication et de remanufacturing, Zouadi et al. [122] ont proposé une formulation mathématique pour le problème de dimensionnement de lot sous la contrainte des émissions de carbone et deux approches de solution utilisant un algorithme exact basé sur le modèle hybridé avec un algorithme génétique.

Roshani et al. [86] ont utilisé une approche de recuit simulé avec une génération efficace de voisinage pour résoudre le problème de dimensionnement de lots avec retours de produits et ont comparé les résultats avec les solutions exactes de leur modèle proposé en utilisant un solveur.

Pour le problème de dimensionnement de lots économiques avec retours de produits et récupération, Sifaleras et al. [91] ont proposé deux variantes de l'algorithme de recherche de voisinage variable et un nombre de voisinages adaptés au problème et une nouvelle recherche locale.

Les auteurs de [7] ont considéré un problème de dimensionnement de lot avec l'option de remanufacturing sous des incertitudes de paramètres imposées sur les demandes et les retours.

Un problème de dimensionnement de lot multi-éléments et multi-échelon, considérant trois échelons de production (désassemblage, remise à neuf et réassemblage) est abordé par Quezada et al. [83].

Une approche de programmation stochastique en nombres entiers multi-étapes et un algorithme de brunch and cut sont proposés.

Kilic et al. [55] ont étudié un problème économique de dimensionnement de lot avec des demandes et des retours stochastiques dans une planification à horizon fini pour minimiser le coût total composé des coûts de production et de stock, afin que l'offre réponde aux demandes, les auteurs ont proposé des politiques heuristiques basées sur une stratégie d'incertitude dynamique et statique-dynamique.

Cunha et al. [24] ont considéré un problème de dimensionnement de lot avec contraintes de capacités multi-articles, afin de déterminer la planification optimale pour la production et le remanufacturing

de plusieurs articles pour satisfaire les demandes dynamiques déterministes sur un horizon à temps discret, une heuristique de génération de colonnes suivie d'une programmation linéaire et d'une méthode relax-and-fix sont proposées pour la construction de solutions, puis une procédure de recherche locale fix-and-optimize est appliquée pour améliorer la qualité des solutions obtenues par la technique constructive. Koken et al. [56] ont étudié un problème de dimensionnement de lot dynamique avec des retours et des produits hybrides. Les auteurs ont proposé une heuristique basée sur un algorithme génétique pour résoudre le problème.

4.3.3 Stock, planification et production

Le processus de remanufacturing est confronté à plusieurs incertitudes dans la programmation des opérations, la qualité et la quantité des produits retournés à différents niveaux comme le contrôle des stocks et surtout la planification de la production.

Dans ce contexte, Zhang et al. [113] ont proposé de construire un modèle de planification de la production pour le remanufacturing et comme approche de solution pour le modèle, une hybridation d'un algorithme flou double, d'un réseau neurones et d'un algorithme génétique.

Un modèle mathématique pour le remanufacturing prenant en compte les problèmes de planification et d'ordonnement du processus est proposé par Gong et al. [38] et un algorithme évolutionnaire multi-objectif hybride efficace est présenté pour résoudre le problème.

Les travaux de Ouaret et al. [78] visent à trouver le taux de production des machines fabriquées et remises à neuf et le taux de remplacement des machines remises à neuf pour minimiser le coût total sur un horizon de planification infini. Les auteurs ont proposé un modèle mathématique comprenant l'extension de l'espace d'état conduisant à un modèle de décision de Markov et les équations des conditions d'optimalité de Hamilton-Jacobi-Bellman ont été développées. Liu et al. [68] ont abordé une fabrication/remanufacturing hybride stochastique avec substitution de la demande pour optimiser la planification de la production qui minimise le coût total. Ils ont proposé un modèle de programmation mixte en nombres entiers multi-périodes et un algorithme de système de colonies de fourmis avec la méthode d'échantillonnage aléatoire.

Une approche multi-agent est utilisée pour minimiser le coût total et l'empreinte carbone tout en analysant l'impact de la stratégie de remanufacturing des composants de rechange sur la performance d'un parc d'éoliennes offshore par Dahane et al. [25].

Des travaux ont été menés dans le but de développer une approche intégrée pour optimiser conjointement le plan de production, le plan de remise à neuf et la qualité des pièces de rechange utilisées dans les actions de remise à neuf d'un produit [14]. Wen et al. [107] proposent d'optimiser, dans des conditions incertaines, un système intégré de planification et d'ordonnement de la production de

remanufacturing afin d'obtenir le temps de remanufacturing minimal des pièces de recyclage en utilisant des variables bi-aléatoires. Un modèle d'optimisation est établi et un algorithme d'intelligence hybride comprenant une technique de simulation aléatoire, un réseau neuronal et un algorithme génétique est développé.

Selon les travaux menés par Fang et al. [29], quatre paramètres sont pris en compte pour déterminer une stratégie d'exploitation optimale dans un système de production hybride : les coûts connexes, l'incertitude sur le recyclage, la substitution de la demande et la durabilité des composants. Pour maximiser le profit, un modèle mathématique qui prend en compte plusieurs scénarios possibles pour estimer les coûts connexes et le revenu attendu est proposé et résolu à l'aide d'une matrice hessienne et de méthodes d'optimisation multivariées.

5 Positionnement de la problématique de recherche

Dans les travaux cités dans la section précédente, plusieurs des problématiques traitées ayant pour but d'optimiser le processus de remanufacturing. Ces problématiques prennent en compte les études de marché effectuées afin d'analyser les habitudes et préférences des consommateurs, et ainsi adapter la bonne stratégie qui permet de favoriser les ventes de produits remis à neuf. Nous retrouvons également des problématiques qui visent à améliorer la conception d'un produit pour faciliter l'accès aux informations relatives aux produits et afin de mener à bien les opérations de remise à neuf.

D'autres travaux concernent l'optimisation des étapes du processus de remise à neuf considérant la chaîne logistique et la gestion des retours des produits, les quantités et les qualités des produits récupérés, la planification de remise à neuf, etc.

La problématique générale traitée dans cette thèse se base sur l'application du processus de remanufacturing à titre préventif (appelé *preventive remanufacturing*, ou *active remanufacturing*) dans un contexte particulier avec les objectifs de minimiser le coût économique et environnemental. En effet, nous considérons que la remise à neuf s'appliquera à des produits qui sont en cours d'utilisation et qui n'ont pas encore atteint leur fin d'utilisation. Cette remise à neuf aura pour but de prolonger leur durée de vie utile.

Dans ce même contexte, étant donné que les produits sont en cours d'utilisation par des clients, il faut déterminer une politique de récupération des produits ainsi qu'une politique de remise à neuf.

5.1 Politique de récupération

La politique de récupération des produits entre principalement dans le cadre de l'optimisation de la gestion des retours.

Nous considérons des produits conçus à faciliter l'accès aux informations relatives à l'évolution de leur grade (état) dans le temps.

Les produits à récupérer étant en cours d'utilisation par des clients, nous considérons que nous disposons d'un stock de produits dédiés à remplacer les produits récupérés, pour ainsi assurer la continuité de service.

Nous répondons à ce stade aux questions suivantes :

- Combien de produits pouvons-nous récupérer ?
- Quels sont les produits à récupérer ?
- Quels sont les produits affectés aux clients pour remplacer les produits récupérés ?
- Comment faire parvenir les produits récupérés au centre de remanufacturing ?

5.2 Politique de remise à neuf

La politique de remise à neuf dépend de la structure du produit et de son grade au moment de sa récupération.

Nous répondons à ce stade aux questions suivantes :

- Quelle est la structure du produit considéré ?
- Quel grade devons-nous atteindre à chaque remise à neuf ?
- Peut-on indéfiniment remettre à neuf un produit ?
- Comment évolue le grade du produit dans le temps ?

Au fil des chapitres de ce manuscrit, nous proposons des hypothèses sur lesquels nous nous basons pour répondre au mieux aux questions précédentes, que ce soit au niveau de la récupération ou au niveau de la remise à neuf.

Nous commençons par la problématique de base qui consiste à déterminer les produits à récupérer, les produits pour les remplacer ainsi que le grade à atteindre à chaque remise à neuf.

Nous étendons en deux temps la problématique en considérant une structure du produit détaillée et définie selon plusieurs paramètres permettant de calculer son grade selon une méthode proposée à cet effet.

En répondant aux questions précédentes sous certaines hypothèses, nous proposons comme solutions aux différents problèmes traités, une planification de récupération et de remise à neuf à moindre coût économique et environnemental.

6 Conclusion

Ce premier chapitre nous a permis d'introduire le remanufacturing, comme étant une des activités de la chaîne logistique à boucle fermée. L'objectif était de bien expliquer les particularités de ce concept, et la différence avec les autres options de gestion de fin de vie des produits. A travers ce chapitre, nous avons aussi présenté un état de l'art regroupant les problématiques traitées dans la littérature, dans le cadre de l'amélioration de l'exécution du processus de remanufacturing malgré sa complexité. Nous avons également positionné la problématique générale traitée.

Nous poursuivons avec le deuxième chapitre de ce manuscrit portant sur une contribution à l'optimisation de la récupération des produits et de leur remise à neuf.

Chapitre II

Optimisation de la récupération et de la remise à neuf des produits usagés

Résumé

Dans ce chapitre, il s'agira d'adapter le problème de dimensionnement des lots (lot-sizing) aux principales étapes du processus de remanufacturing, soit la récupération des produits utilisés, l'application des opérations de remise à neuf, et la redistribution des produits remis à neuf. Les produits considérés sont caractérisés par un grade qui donne une estimation de son état. L'objectif est alors de déterminer le nombre de produits de chaque grade à récupérer, parmi les produits qui sont en cours d'utilisation par des clients, puis de prendre les décisions du grade à atteindre, après les opérations de remise à neuf sur les produits récupérés. Ces deux décisions interviennent durant les différents instants de récupération préalablement déterminés et équitablement répartis sur un horizon temporel donné, dans le but de prolonger la durée de vie de ces produits. Pour ce faire, un modèle mathématique multi-objectif est proposé dans lequel nous considérons le coût total à minimiser incluant les coûts de récupération, de remise à neuf et de stockage, ainsi que l'impact carbone total à minimiser incluant les impacts carbones de récupération, de remise à neuf, de stockage et d'utilisation. Nous proposons également une adaptation de la métaheuristique NSGA-II basée sur un codage des solutions en nombres réels. Pour faciliter le choix de la solution à adopter, les solutions obtenues au front de Pareto sont ensuite classées avec la technique TOPSIS.

1 Introduction

Introduit initialement par Wagner et Whitin [102], le problème de lot-sizing consiste à déterminer la taille des lots à produire ou à distribuer, sur un horizon décomposé en plusieurs périodes, en veillant à satisfaire la demande de chaque période, dans le but de déterminer un plan de production optimal. Le problème de lot-sizing a été largement étudié dans la littérature et plusieurs variantes ont vu le jour, notamment celles qui intègrent le concept de remanufacturing.

Dans ce contexte, nous abordons dans ce chapitre le problème qui consiste à déterminer les produits à récupérer, ainsi que leur nombre, afin d'y appliquer une remise à neuf permettant de prolonger leur durée de vie.

Sur un horizon décomposé en plusieurs périodes homogènes, les produits faisant l'objet de l'étude sont caractérisés par un grade permettant d'exprimer l'état du produit comparé à un produit neuf. Ce grade décroît linéairement par rapport aux périodes d'utilisation. Nous retrouvons alors le problème de lot-sizing dans la résolution du problème du nombre de produit de chaque grade à récupérer à chaque période. De plus, nous nous intéressons également à la prise de décision concernant les grades à atteindre après les opérations de remise à neuf pour les produits récupérés.

Le présent chapitre est organisé comme suit : la section suivante est dédiée à la description détaillée du problème. Ensuite, nous détaillons le modèle mathématique du problème étudié. Il s'agit d'un modèle multi-objectifs permettant la minimisation du coût total composé des coûts de récupération (transport), de stockage et de remise à neuf, et la minimisation de l'impact carbone total composé des impacts carbone relatifs à la récupération, au stockage, à la remise à neuf et à l'utilisation. La section 4 présente l'approche de résolution, dans laquelle nous proposons une adaptation d'un algorithme évolutionnaire multi-objectif NSGA-II (*Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*) en utilisant un codage en nombres réels. Nous présenterons par la suite un exemple d'illustration de l'approche proposée puis nous terminerons le chapitre par une conclusion.

2 Description du problème

Le processus de remanufacturing est généralement appliqué sur des produits en d'utilisation dans le but d'allonger leurs durées de vie. Reposant sur la logistique inverse et verte, le remanufacturing comprend la récupération des produits en fin de vie et/ou d'utilisation, l'inspection de leur état, leur remise à neuf et leur remise sur le marché.

Les stratégies de récupération, de remise à neuf et de redistribution diffèrent d'une entreprise à une

autre et dépendent de leurs objectifs, leurs services et leurs capacités liées à cette activité de remanufacturing.

Dans ce chapitre, nous nous mettons dans le contexte d'une entreprise qui prend en charge le remanufacturing de produits en cours d'utilisation par des clients avec l'objectif de réduire le coût et l'impact carbone résultants des étapes du processus. Afin de décrire de manière détaillée le problème traité, nous présentons les hypothèses des principales composantes du problème.

2.1 Hypothèses

Nous considérons trois composantes principales dans notre problème. La première composante représente l'horizon temporel de l'étude, la deuxième composante concerne les produits qui font l'objet de l'étude ainsi que leurs caractéristiques, la troisième et dernière composante concerne les clients qui utilisent ces produits.

2.1.1 L'horizon du plan de remanufacturing

Nous considérons un horizon temporel décomposé en plusieurs périodes ayant toutes la même durée (périodes homogènes). La durée totale de l'horizon et le nombre de périodes qui le décomposent dépendent du type de produit et de ses caractéristiques.

2.1.2 Les produits

Nous supposons que nous disposons de plusieurs unités (articles) d'un même type de produits. Le produit est caractérisé par un grade qui détermine l'état du produit (en comparaison avec un produit neuf) où le grade 1 représente un produit neuf, et plus le grade est élevé plus le produit est détérioré.

Nous supposons également qu'au début de l'horizon, tous les produits sont dans un état neuf (grade égal à 1).

2.1.3 Les clients

Nous supposons que le nombre d'articles est plus élevé que le nombre de clients. Tout au long des périodes, chaque client est en possession d'un article parmi ceux disponibles, les articles restants sont alors stockés.

Au début de l'horizon, étant donné que tous les produits sont neufs, tous les clients sont en possession d'un article neuf. Nous supposons alors qu'après une période d'utilisation par un client, le grade d'un article augmente d'une unité. Par exemple, au début de la première période, un client utilise un article neuf dont le grade est égal à 1, ce grade passe à 2 au début de la deuxième période.

2.2 Stratégie de remanufacturing

En se basant sur les hypothèses décrites précédemment, nous nous intéressons essentiellement dans ce problème : (1) à déterminer, à chaque période de l'horizon, parmi l'ensemble des produits qui sont en cours d'utilisation par les clients, le nombre d'articles à récupérer de chaque grade, puis en connaissance des grades des produits récupérés, on cherche (2) à prendre la décision du grade à atteindre par la remise à neuf des articles récupérés. Nous présentons donc les stratégies sur lesquelles nous nous basons pour la récupération et la remise à neuf des produits.

2.2.1 Stratégie de récupération

Afin d'assurer un bon service aux clients, chaque article récupéré sera remplacé par un autre article présentant un meilleur grade, parmi les articles disponibles en stock.

Concernant le moyen de récupération des produits qui sont en cours d'utilisation par les clients, nous supposons à chaque période, qu'il y a autant de véhicules que de produits à récupérer, un véhicule se chargera donc de la récupération d'un article.

Lorsque nous parlons de période de récupération, nous faisons référence à l'instant correspondant à la fin d'une période.

2.2.2 Stratégie de remise à neuf

Les articles récupérés seront classés et stockés en fonction de leur grade. Chaque article récupéré sera remis à neuf selon une gamme spécifique de remanufacturing qui permettra de passer du grade initial de l'article, correspondant au grade de l'article à sa récupération, au grade cible, correspondant au grade obtenu après la remise à neuf du produit. Le grade visé à la remise à neuf doit être meilleur que le grade initial. Nous supposons que les articles peuvent être remis à neuf indéfiniment.

2.3 Objectifs

La minimisation du coût total et de l'impact carbone total sont les deux objectifs directement considérés dans la résolution de notre problème.

Le coût total comprend les coûts relatifs au transport (récupération), les coûts engendrés par les opérations de remise à neuf réalisées à chaque période, et les coûts de stockage.

L'impact carbone total comprend l'impact carbone relatif au transport, celui engendré par les opérations de remise à neuf réalisées à chaque période, l'impact carbone lié au stockage, et l'impact carbone relatif à l'utilisation des produits.

3 Formulation mathématique

Dans cette partie, nous présentons une formulation mathématique multi-objectif au problème tel qu'il a été décrit dans la section précédente.

3.1 Notations

Nous commençons par présenter toutes les notations utilisées dans la formulation mathématique du problème dans le tableau II.1.

| Notation | Définition |
|----------------|---|
| h | Nombre de périodes |
| p | Nombre d'articles |
| n | Nombre de clients |
| g | Nombre de grades |
| t | Indice pour les périodes |
| i | Indice pour les articles |
| j | Indice pour les clients |
| k, k' et l | Indices pour les grades |
| S_{kt} | Le nombre d'article de qualité k disponible en fin de la période t |
| CS_k | Le coût de stockage d'un article de grade k par période |
| CT_j | Le coût de récupération du client j |
| $CR_{kk'}$ | Le coût de remise à neuf d'un article passant du grade k au grade k' |
| IS_k | L'impact carbone de stockage d'un article de grade k par période |
| IT_j | L'impact carbone de récupération du client j |
| $IR_{kk'}$ | L'impact carbone de remise à neuf d'un article passant du grade k au grade k' |
| IU | L'impact carbone de l'utilisation d'un article par période |

TABLEAU II.1 – Notations utilisées

3.2 Variables de décision

Dans la formulation mathématique proposée, nous considérons trois groupes de variables de décisions :

— Variables pour renseigner le grade de l'article en possession des clients :

$$x_{jkt} = \begin{cases} 1 & \text{Si le grade de l'article en possession du client } j \text{ est } k \text{ à la période } t \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

$$\forall j = 1, \dots, n \quad \forall k = 1, \dots, g \quad \forall t = 1, \dots, h$$

— Variables pour renseigner le grade de l'article remis :

$$y_{jlt} = \begin{cases} 1 & \text{Si on remet un article de grade } l \text{ de chez le client } j \text{ à} \\ & \text{la période } t \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

$$\forall j = 1, \dots, n \quad \forall l = 1, \dots, g \quad \forall t = 1, \dots, h$$

— Variables pour renseigner les opérations de remise à neuf effectuées :

$$z_{ikk't} = \begin{cases} 1 & \text{Si le produit } i \text{ est remis à neuf du grade } k \text{ au grade } k' \text{ à la période } t \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

$$\forall i = 1, \dots, p \quad \forall k = 1, \dots, g \quad \forall k' = 1, \dots, k-1 \quad \forall t = 1, \dots, h$$

3.3 Contraintes du problème

— Contraintes relatives à la récupération :

Le grade d'article remis au client est meilleur que le grade de l'article récupéré :

$$l \times y_{jlt} \leq k \times x_{jk,t-1} \quad (\text{II.1})$$

$$\forall j = 1, \dots, n \quad \forall l = 1, \dots, g \quad \forall k = 1, \dots, g \quad \forall t = 1, \dots, h$$

— Contraintes relatives à la remise à neuf :

Un produit est remis à neuf au plus une fois durant une période

$$\sum_{k=1}^g \sum_{k'=1}^g z_{ikk't} \leq 1 \quad (\text{II.2})$$

$$\forall i = 1, \dots, p \quad \forall t = 1, \dots, h$$

— Contraintes de stockage :

$$\sum_{j=1}^n x_{jkt} \leq S_{kt} \quad (\text{II.3})$$

$$\forall k = 1, \dots, g \quad \forall t = 1, \dots, h$$

3.4 Fonctions objectifs

— La première fonction objectif est la minimisation du coût total composé des coûts suivants :

— Coût de récupération :

$$TCT = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^g \sum_{t=1}^h CT_j \times x_{jkt} \quad (\text{II.4})$$

— Coût de stockage :

$$TCS = \sum_{k=1}^g \sum_{t=1}^h CS_k \times S_{kt} \quad (\text{II.5})$$

— Coût de remanufacturing :

$$TCR = \sum_{i=1}^p \sum_{k=1}^g \sum_{k'>k}^h \sum_{t=1}^h CR_{kk'} z_{ikk't} \quad (\text{II.6})$$

— La seconde fonction objectif est la minimisation de l'impact carbone total composé de :

— Impact carbone de récupération :

$$TIT = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^g \sum_{t=1}^h IT_j \times x_{jkt} \quad (\text{II.7})$$

— Impact carbone de stockage :

$$TIS = \sum_{k=1}^g \sum_{t=1}^h IS_k \times S_{kt} \quad (\text{II.8})$$

— Impact carbone de remanufacturing :

$$TIR = \sum_{i=1}^p \sum_{k=1}^g \sum_{k'>k}^h \sum_{t=1}^h IR_{kk'} \times z_{ikk't} \quad (\text{II.9})$$

— Impact carbone d'utilisation :

$$TIU = \sum_{i=1}^p \sum_{k=1}^g \sum_{k'>k}^h \sum_{t=1}^h (1 - z_{ikk't}) \quad (\text{II.10})$$

Nous cherchons donc à :

— Minimiser Coût total = $(TCT + TCS + TCR)$

— Minimiser Impact carbone total = $(TIT + TIS + TIR + TIU)$.

3.5 Taille du problème

— Nombre de variables de décision :

$$2n \times g \times h + n \times g^2 \times h \quad (\text{II.11})$$

— Nombre de contraintes :

$$n \times g^2 \times h + n \times h + g \times h + p \times h + p \quad (\text{II.12})$$

4 Approche de résolution

Il est complexe d'obtenir une solution exacte dans un problème multi-objectif, nous avons pour cela, proposer une application de la métaheuristique évolutionnaire multi-objectif NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*). Le NSGA-II a été présenté pour la première fois par Deb et al. en [26], pour obtenir un ensemble de solutions aussi proches que possible des solutions Pareto-optimales.

Les différentes étapes de l'approche que nous proposons sont résumées dans la "Fig. II.1".

Les étapes se déroulent comme suit :

— On commence par générer aléatoirement une population initiale de N chromosomes (solutions), N étant la taille de la population choisie par l'utilisateur. Nous utilisons un codage en nombres réels où chaque chromosome est une matrice de dimension $n \times h$ de de nombres réels (n est le nombre de clients, et h est le nombre de périodes de l'horizon considéré). La génération d'un chromosome suit les étapes suivantes :

1. Pour chaque élément la ligne j et de la colonne t , nous utilisons d'abord une distribution de Bernoulli pour déterminer si un article sera récupéré auprès du client j au cours de la période t , de sorte que s'il n'y a pas de récupération, la valeur 0 est attribuée à cet élément de la matrice et sinon nous générons aléatoirement un nombre réel entre 0 et 1 ;
2. La matrice résultante sera décodée en utilisant une fonction d'interprétation (décodage). Puisque nous savons que tous les clients ont un nouvel article dans la première période, nous pouvons déduire le grade des articles qui sont utilisés par les clients dans chaque période à partir de la matrice précédente.

Dans la première période, tous les clients ont un nouvel article (comme indiqué dans les hypothèses de notre problème).

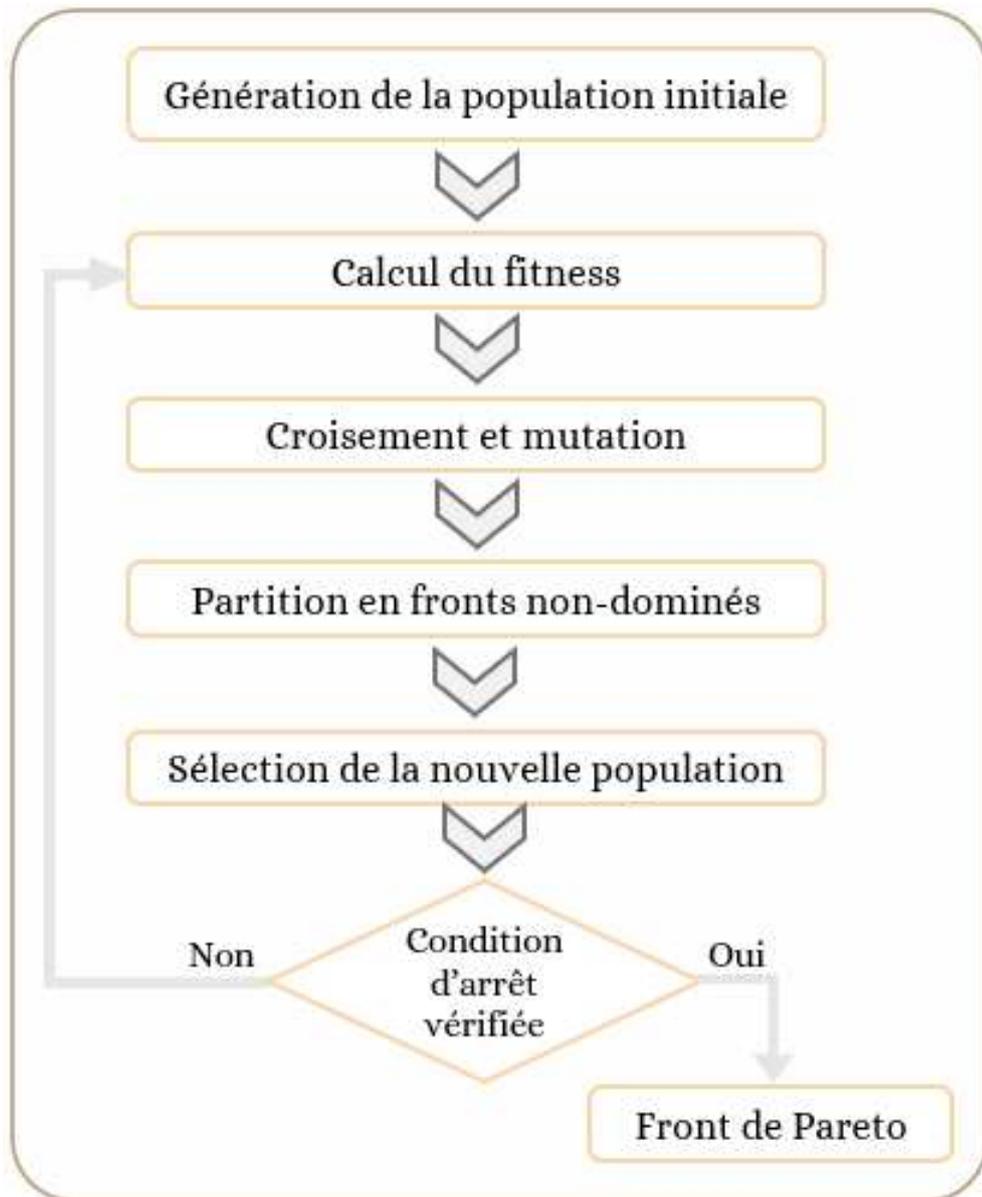


FIGURE II.1 – Étapes de l'algorithme NSGA-II

3. Ensuite, à partir de l'interprétation du chromosome, nous pouvons déduire le nombre d'articles de chaque grade dont nous avons besoin à chaque période.

Nous supposons que nous avons un stock suffisant contenant des produits de tous les grades. Cette hypothèse permet de construire des solutions réalisables à notre problème suivant le codage que nous avons défini.

4. Pour les opérations de remise à neuf, à chaque récupération d'un produit, on génère un nombre aléatoire compris entre 0 et 1, on multiplie le grade du produit à sa récupération

par ce nombre pour obtenir le grade à atteindre à sa remise à neuf.

- Selon l’algorithme original, le NSGA-II partitionne les solutions de la population en un certain nombre de fronts non dominés tels que les solutions du premier front ne sont pas du tout dominées, les solutions du deuxième front ne sont dominés que par les solutions du premier front, etc.
- Ensuite, nous attribuons à toutes les solutions un fitness égal à leur niveau de non-dominance (1 est le meilleur, 2 est le niveau suivant, et ainsi de suite).
- Puis, les opérateurs de croisement et de mutation sont appliqués pour créer une population d’enfants de taille N .
- Nous combinons les populations des parents et des enfants et obtenons une population de taille $2N$ qui est partitionnée en fronts non-dominés.
- Enfin, nous sélectionnons les solutions pour la génération suivante de sorte que, si la taille du premier front est inférieure à N , nous choisissons tous ses éléments pour la nouvelle population. Le chromosome restant est choisi parmi les fronts non dominés suivants. Ainsi, les solutions du deuxième front sont choisies ensuite, suivies des solutions du troisième front, et ainsi de suite. Cette procédure s’arrête lorsqu’aucun front entier ne puisse plus être ajouté. Supposons que ce front soit le l^e (en général, le nombre de solutions du premier au l^e front serait plus grand que la taille de la population). Pour choisir exactement N solutions, nous trions la solution du dernier front en utilisant l’opérateur de comparaison de "foule" (*crowding distance*) dans l’ordre décroissant et nous choisissons les meilleures solutions nécessaires pour compléter la taille de la population.
- Une fois que la nouvelle population est complétée, nous passons à la vérification de la condition d’arrêt. Si elle n’est pas vérifiée, nous répétons les étapes en partons du calcul du fitness. Si elle est vérifiée, on arrête l’algorithme. On aura alors le front de Pareto avec les valeurs des fonctions objectifs et le plan de récupération et de remise à neuf des produits.

5 Exemple illustratif

Nous allons présenter pour chaque étape un exemple de son déroulement.

- Le “Tableau V.7” présente la matrice de nombres réels générée pour représenter un individu de la population.

| | Période 1 | Période 2 | Période 3 | Période 4 |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Client 1 | 0 | 0.45 | 0.67 | 0.15 |
| Client 2 | 0 | 0.33 | 0 | 0 |
| Client 3 | 0 | 0 | 0 | 0.59 |

TABLEAU II.2 – Représentation d'un chromosome

- A la première période, tous les produits sont neufs et les valeurs attribuées aux éléments de la colonne correspondante sont de 1 (meilleur grade).

Les valeurs obtenues sont résumées dans le "Tableau II.3". Nous rappelons que le grade d'un produit décroît d'une unité près chaque période d'utilisation.

| | Période 1 | Période 2 | Période 3 | Période 4 |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Client 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Client 2 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| Client 3 | 1 | 2 | 3 | 2 |

TABLEAU II.3 – Interprétation du chromosome

- Si, par exemple, nous voulons calculer le grade de l'article en possession du premier client dans la deuxième période, nous devons multiplier le nombre réel généré dans la matrice à la même période et pour le même client (dans notre exemple, le nombre correspondant est 0.45), par le grade de l'article utilisé par le même client dans la période précédente (qui est la qualité 1 dans l'exemple). Ensuite, on arrondit l'article obtenu à la partie entière supérieure.
- A ce stade, nous appliquons les différentes étapes de l'heuristique proposée de décodage. D'abord, nous établissons, dans chaque période, le nombre d'articles de chaque grade qui ont été récupérés "Tableau II.4". Nous remarquons qu'il n'y a pas de récupération dans la première période car il s'agit d'une période fictive de démarrage.

| | Période 1 | Période 2 | Période 3 | Période 4 |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Grade 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Grade 2 | 0 | 2 | 1 | 1 |
| Grade 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Grade 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |

TABLEAU II.4 – Grades des articles récupérés

- les résultats des grades des produits en possession des clients sont présentés dans le "Tableau II.5".

| | Période 1 | Période 2 | Période 3 | Période 4 |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Grade 1 | 0 | 2 | 1 | 1 |
| Grade 2 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Grade 3 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Grade 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |

TABLEAU II.5 – Les grades nécessaires

- Nous passons par la suite à l'étape du calcul des fonctions objectifs (pour déterminer le fitness de chaque solution). Pour cela, nous utilisons les tableaux obtenus après l'étape de l'interprétation. Nous pouvons calculer les coûts environnementaux et économiques liés au transport, à la remise à neuf et de stockage. Par exemple, nous savons que nous récupérons le produits en possession du client 1 à la période 2, nous ajoutons alors le coût de transport relatif au client 1 aux coûts totaux. Nous pouvons également déduire les coûts relatifs au remanufacturing à partir des grades des articles récupérés après leur remise à neuf. Dans notre exemple, en période 2 nous avons deux articles de grade 2 qui ont été récupérés, obligatoirement ses articles seront remis à neuf au grade 1 (pour avoir un grade meilleur que le grade 2). Nous ajoutons alors le coût de remise à neuf de ses deux produits aux coûts totaux. Concernant les coûts de stockage, en période 2 nous avons remis à neuf deux produits au grade 1, nous pouvons alors ajouter leur coût de stockage aux coûts totaux.
- Selon les valeurs des fonctions objectifs, nous procédons au partitionnement des individus en fronts.
- Par la suite, on passe à l'étape du croisement. Pour cela, nous choisissons deux individus au hasard dans la population, sachant que les individus appartenant au premier front ont une probabilité plus élevée d'être choisi pour le croisement.
Lorsque les deux parents (individus) sont sélectionnés pour un croisement, nous choisissons aléatoirement un point de croisement entre 1 et h (le nombre de périodes de l'horizon), puis le croisement se fait entre les deux parents selon le schéma de la figure II.2.
- On poursuit avec les étapes de l'algorithme NSGA-II pour sélectionner les individus de la nouvelle population, et répéter les étapes jusqu'à atteindre la condition d'arrêt.

6 Conclusion

L'objectif principal de ce chapitre est d'étudier conjointement le problème du dimensionnement des lots et les décisions liés au processus de remanufacturing. Il s'agit de déterminer pour chaque

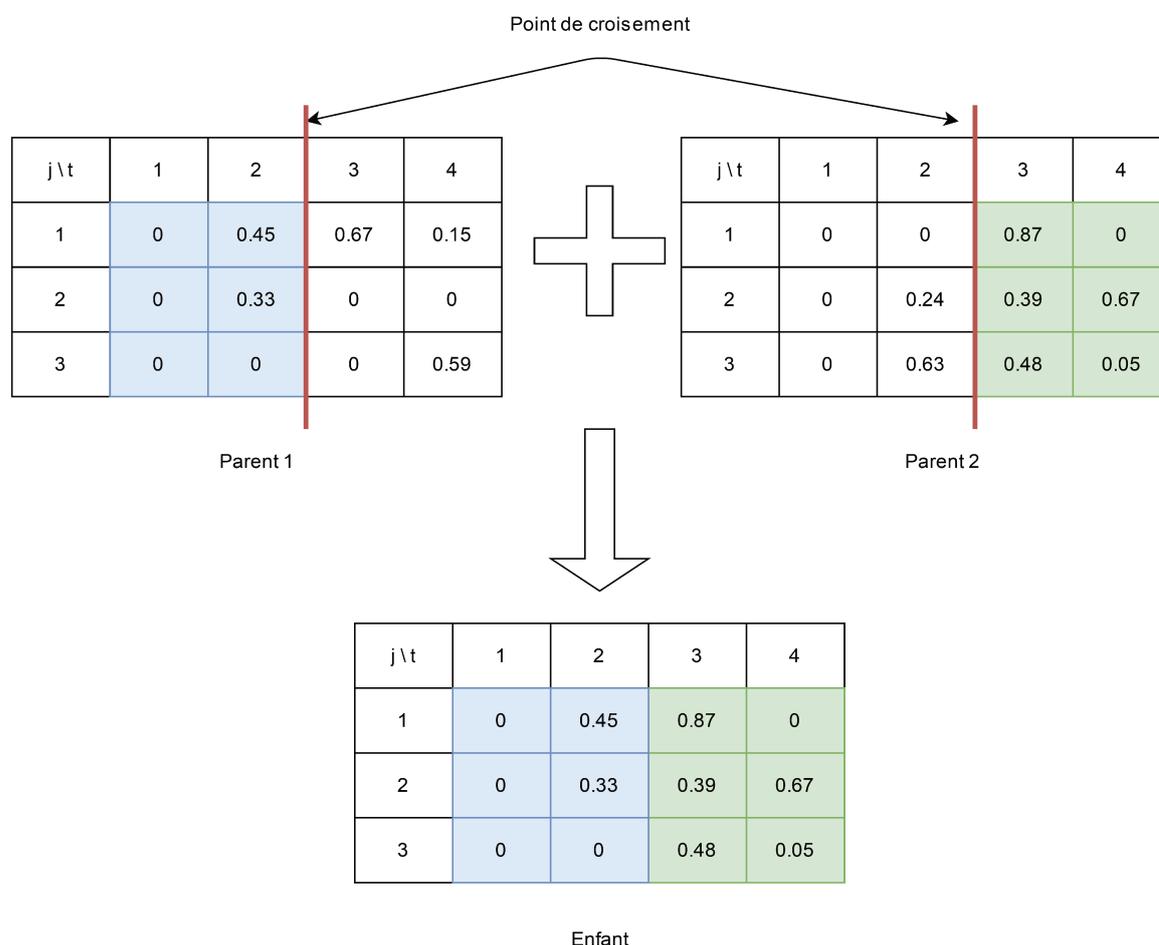


FIGURE II.2 – Croisement de deux individus

période de l'horizon considéré, le nombre de produits à récupérer et le grade de remise à neuf à atteindre.

Nous avons d'abord proposé une formulation mathématique en considérant la récupération des articles en usage, et la deuxième étape est liée aux décisions de remanufacturing des articles récupérés. Nous avons considéré deux fonctions objectives à minimiser, le coût total comprenant les coûts de récupération, de stockage, de maintenance et de remise à neuf, et l'empreinte carbone liée à la récupération, au stockage, à la remise à neuf et à l'utilisation des articles. Nous avons proposé une approche de solution hybride basée sur la NSGA-II comme métaheuristique pour résoudre le problème global, et une heuristique gloutonne pour déterminer les décisions de remise à neuf. Nous verrons une application de l'approche de résolution dans le chapitre dédié aux exemples numériques.

Chapitre III

Intégration du profil des clients dans les décisions de récupération et de remise à neuf des produits usagés

Résumé

Comme dans le chapitre précédent, nous nous intéressons dans ce chapitre à l'optimisation de la récupération et la remise à neuf de produits utilisés qui constituent deux étapes principales du processus de remanufacturing. A la différence du problème traité précédemment, nous considérons à ce stade qu'un produit présente plusieurs fonctionnalités, et est caractérisé par un indice de performance et un indice de remanufacturabilité. Cette performance est un taux permettant d'exprimer avec exactitude l'état du produit et son calcul est basé sur le comportement du client dans l'utilisation du produit et de ses fonctionnalités. Quant à l'indice de remanufacturabilité, il représente un taux qui diminue en fonction des opérations de remise à neuf appliquées. Nous proposons pour cela une modélisation mathématique du problème intégrant les nouveaux paramètres avec les objectifs de minimiser les coûts économiques et environnementaux. Nous proposons également une heuristique qui construit un plan réalisable de récupération et de remise à neuf des produits utilisés.

1 Introduction

Les produits électroniques et mécaniques sont très utilisés dans la vie quotidienne et atteignent leur fin de vie après quelques mois ou quelques années d'utilisation. En effet, les utilisateurs sont amenés à les changer en fin de vie, et à acheter des nouveaux produits de générations plus récentes, augmentant ainsi les déchets. Afin de réduire les impacts environnementaux qui en découlent, nous nous intéressons dans ce chapitre à étendre la durée de vie des produits en les récupérant puis en les remettant à neuf.

Dans ce contexte, nous avons pour but d'optimiser et les décisions de récupération et les décisions de remise à neuf des produits en considérant les fonctionnalités proposées par l'appareil et les profils des clients les utilisant.

Le défi relevé dans ce chapitre est de répondre simultanément aux questions suivantes :

1. Comment intégrer le profil et le comportement des clients (utilisateurs des produits) dans la stratégie de remanufacturing ?
2. Comment prendre en considération la performance des produits dans les décisions de remanufacturing ?
3. Comment prendre en considération l'optimisation du transport ?

Avec l'objectif de minimiser les coûts économiques et environnementaux, nous présentons un modèle mathématique intégrant les différentes contraintes liées au comportement du client, à la récupération et au remanufacturing.

Afin de répondre au mieux aux points abordés dans ce chapitre, nous proposons deux stratégies de remanufacturing sous forme d'heuristiques, auxquelles nous ajoutons l'optimisation du transport avec l'heuristique le "plus proche voisin" utilisée pour le problème du voyageur de commerce.

Nous terminerons le chapitre par une conclusion résumant les points clés de cette partie de nos travaux.

2 Description du problème

Nous considérons un fabricant de produits qui s'engage à améliorer les impacts environnementaux de sa production par le biais d'une stratégie de remanufacturing décrite comme suit :

1. **Étape initiale : fabrication de produits neufs**

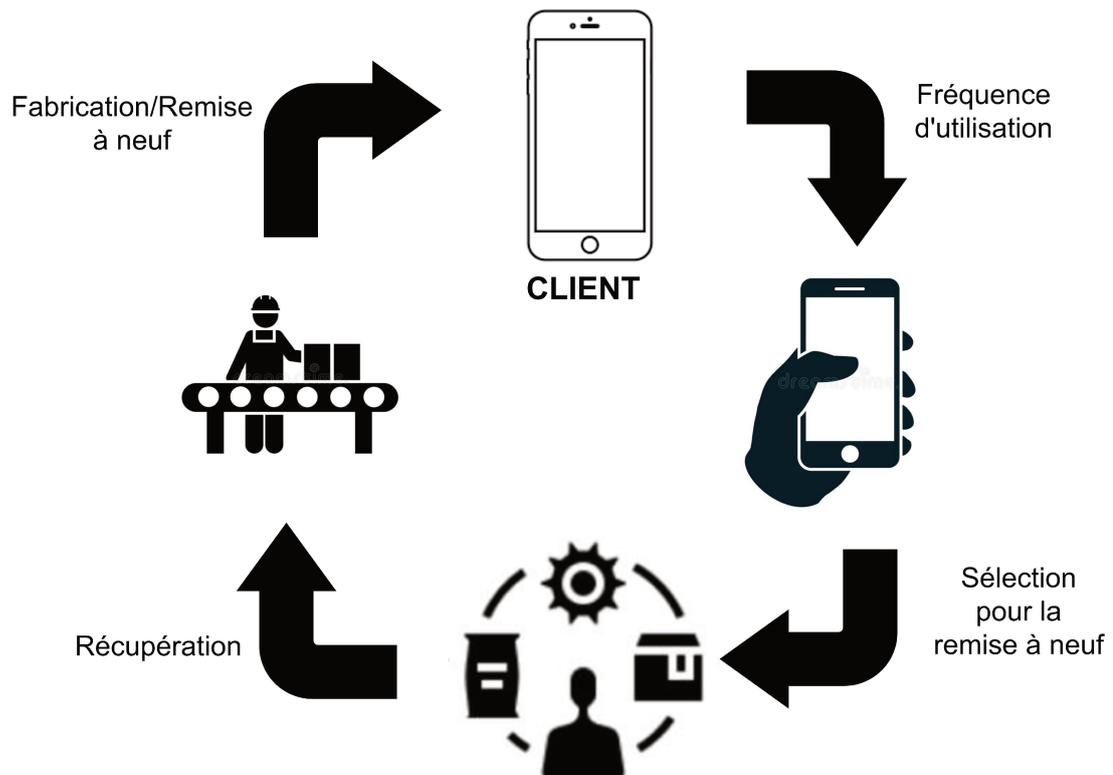


FIGURE III.1 – Aperçu général de la problématique du remanufacturing des produits

- L'entreprise (le fabricant) vend les produits nouvellement fabriqués à différents clients, dans le cadre d'une stratégie d'engagement sur le remanufacturing de ces produits. L'objectif est de prolonger leur durée de vie, sur un horizon fixe divisé en plusieurs périodes (pas forcément de durées égales).
- Les produits offrent plusieurs fonctionnalités, chacune ayant son importance dans le fonctionnement global du produit. On associe à chaque fonctionnalité un indice représentant sa qualité d'exécution, ce qui permet de calculer la performance totale du produit.
- L'entreprise assure un suivi régulier (inspection) de l'état des produits. Ce suivi est effectué via une application installée sur le produit, et fournit une information complète sur la qualité d'exécution des fonctionnalités de chaque produit.
- Le suivi du niveau de performance des produits se fait dans le temps, à des instants précis entre le début de l'utilisation des produits par les clients et la fin de l'horizon. Par exemple,

si nous avons un horizon de 24 mois, nous pouvons déterminer les instants du suivi : 6 mois, 12 mois, 16 mois, 20 mois et 24 mois. Nous avons 5 instants de suivi. Ces instants correspondent à la fin des périodes d'utilisation.

- Cette première étape génère une carte des clients, qui permet à l'entreprise de définir l'emplacement des centres de collecte et d'affecter chaque client au centre le plus proche. (Figure III.2).

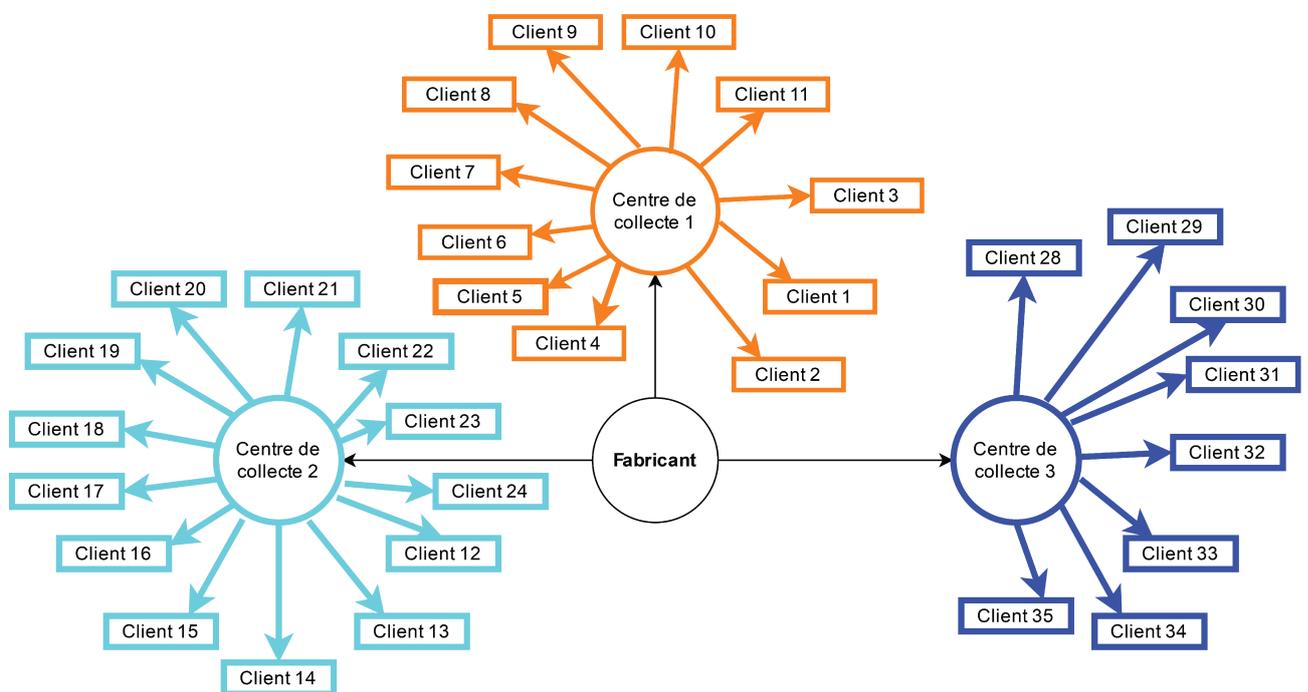


FIGURE III.2 – Localisation des clients par rapport aux centres de collecte

2. Comportement des clients

- Chaque client se distingue par un comportement défini par le niveau d'utilisation (fréquence). Ce comportement détermine le profil du client : très élevé, élevé, moyen, faible et très faible. Le profil du client est basé sur ses habitudes et est donc supposé rester inchangé tout au long de l'horizon considéré. La figure III.3 montre l'évolution de la performance d'un produit en fonction du comportement de cinq clients.

3. Performance des produits

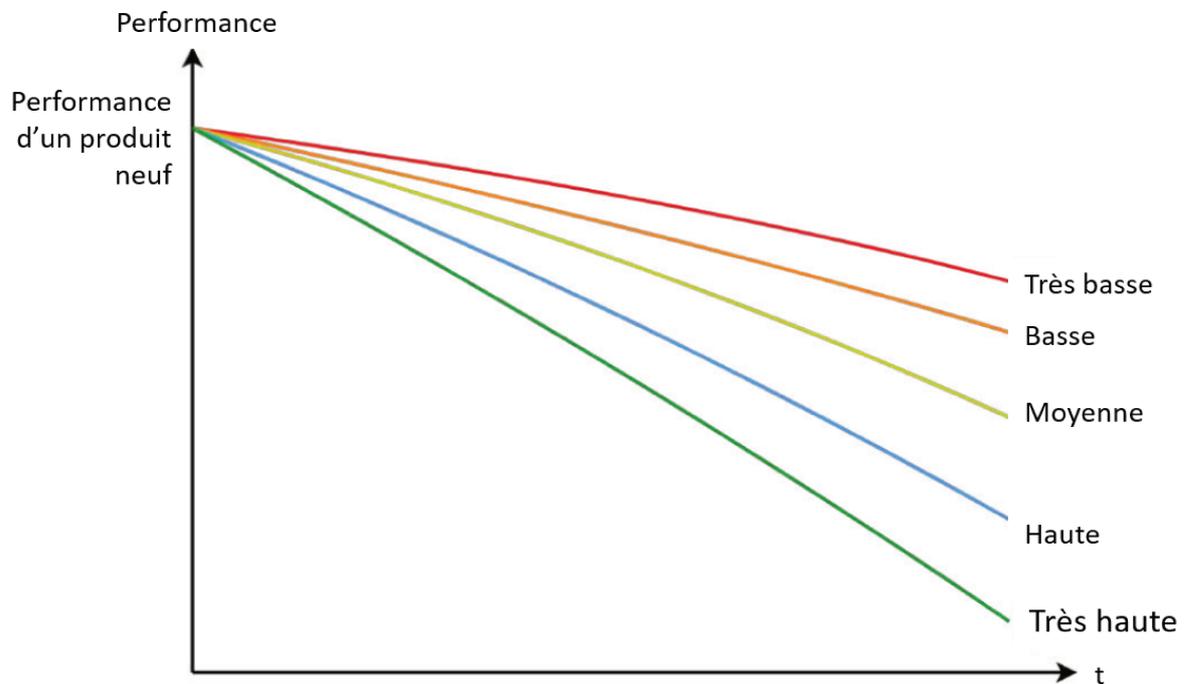


FIGURE III.3 – L’impact du profil des clients sur l’évolution dans le temps (t) de la performance des produits

- Un produit est composé d’un ensemble de F fonctionnalités. Chaque fonctionnalité f ($f = 1, \dots, F$) est caractérisée par son importance dans la performance globale du produit. L’importance d’une fonctionnalité donnée reflète l’impact de cette fonctionnalité sur le bon fonctionnement du produit.
- La mesure de l’impact du profil d’un client, c’est-à-dire de la fréquence d’utilisation sur les performances du produit, est basée sur l’équation suivante :

$$Performance = \sum_{f=1}^F (\gamma_f \times \pi_f) \quad (III.1)$$

où π_f est la performance de la caractéristique f et γ_f son importance.

- La performance du produit est mise à jour à la fin de chaque période en fonction du profil du client.

4. Sélection des produits pour la remise à neuf

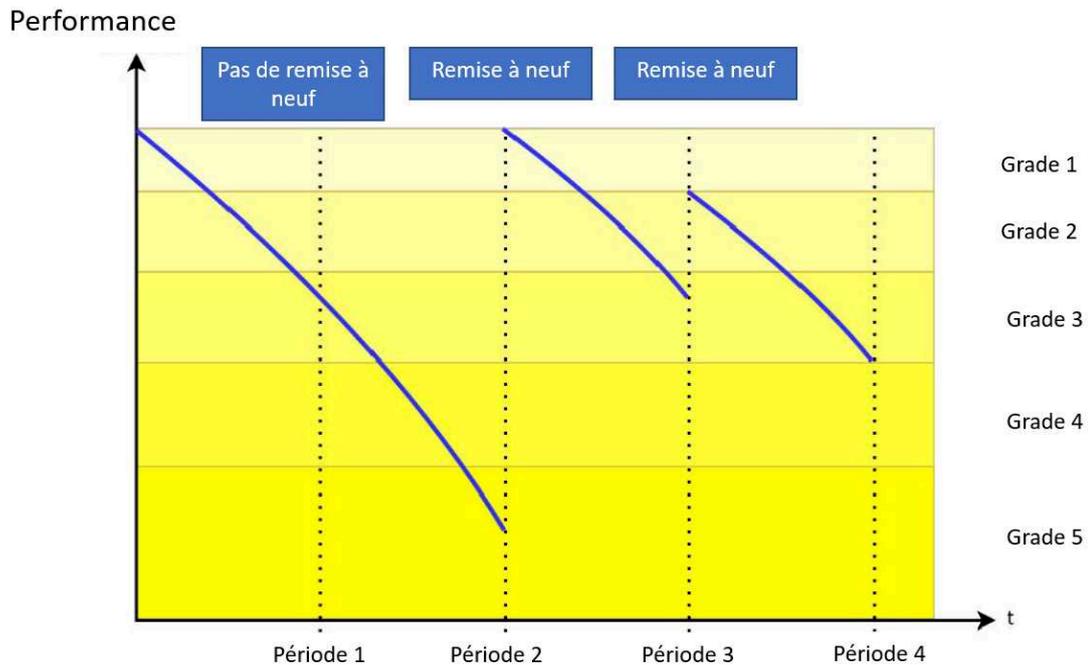


FIGURE III.4 – Évolution de la performance des produits en fonction des actions de remanufacturing

- A la fin de chaque période de l'horizon considéré, les décisions de remanufacturing à prendre sont basées sur les performances calculées des produits en service, et le nombre de produits disponibles (stockés). Ainsi, la stratégie de remanufacturing consiste à :
 - (a) Sélectionner parmi les produits usagés, ceux qui doivent être récupérés afin de les remettre à neuf.
 - (b) Déterminer le niveau de performance à atteindre pour chaque produit récupéré après sa remise à neuf.
- Lorsqu'un produit est sélectionné pour le processus de récupération et de remanufacturing, le client concerné reçoit un autre produit afin d'assurer la continuité du service, et d'éviter d'impacter ses activités.

L'objectif de la stratégie de remanufacturing proposée est de minimiser les coûts générés et l'empreinte carbone liés à la récupération (transport), au stockage, à l'utilisation du produit et aux actions de remanufacturing.

La figure III.4 montre l'impact des actions de remise à neuf effectuées à la fin de la période 2 et de la période 3. La première action améliore le grade du produit du grade 4 au grade 1. La deuxième action améliore son grade de 3 à 2.

3 Formulation mathématique

Le travail réalisé est applicable à tout produit offrant un ensemble des fonctionnalités, et dont la performance peut être calculée en fonction du temps et de l'usage.

3.1 Notations

Nous commençons par présenter toutes les notations utilisées dans la formulation mathématique du problème dans le tableau 3.1.

| Notation | Définition |
|----------------|---|
| h | Nombre de périodes |
| p | Nombre d'articles |
| n | Nombre de clients |
| g | Nombre de grades |
| t | Indice pour les périodes |
| i | Indice pour les articles |
| j | Indice pour les clients |
| k, k' et l | Indices pour les grades |
| d_t | Durée de la période t |
| S_{kt} | Le nombre d'articles de qualité k disponible en fin de la période t |
| CS_k | Le coût de stockage d'un article de grade k par période |
| CT_j | Le coût de récupération du client j |
| $CR_{kk'}$ | Le coût de remise à neuf d'un article passant du grade k au grade k' |
| IS_k | L'impact carbone de stockage d'un article de grade k par période |
| IT_j | L'impact carbone de récupération du client j |
| $IR_{kk'}$ | L'impact carbone de remise à neuf d'un article passant du grade k au grade k' |
| IU | L'impact carbone de l'utilisation d'un article par période |
| ρ_{it} | Indice de remanufacturabilité de l'article i en période t |

TABLEAU III.1 – Notations utilisées

3.2 Variables de décision

Une solution au problème considéré est basée sur un ensemble d'informations importantes. Ainsi, à chaque période, il est nécessaire de savoir :

1. Les clients sélectionnés pour la récupération, et les grades des articles récupérés et remplacés.
2. L'article attribué à chaque client.
3. Les opérations de remanufacturing à effectuer sur chaque article.

En fonction de cela, nous définissons les variables de décision suivantes :

— Variables de remplacement des produits :

$$x_{jkt} = \begin{cases} 1 & \text{Si le grade du produit remis au client } j \text{ est } k \text{ à la période } t \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

$$\forall j = 1, \dots, n \quad \forall k = 1, \dots, g \quad \forall t = 1, \dots, h$$

— Variables de récupération :

$$y_{jlt} = \begin{cases} 1 & \text{Si le grade du produit récupéré de chez le client } j \text{ est } l \text{ à la période } t \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

$$\forall j = 1, \dots, n \quad \forall l = 1, \dots, g \quad \forall t = 1, \dots, h$$

— Variable d'affectation :

$$v_{ijt} = \begin{cases} 1 & \text{Si le produit } i \text{ est utilisé par le client } j \text{ durant la période } t \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

$$\forall j = 1, \dots, n \quad \forall i = 1, \dots, p \quad \forall t = 1, \dots, h$$

— Variables de remanufacturing :

$$z_{ikk't} = \begin{cases} 1 & \text{Si le produit } i \text{ est remis à neuf du grade } k \text{ au grade } k' \text{ à la période } t \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

$$\forall i = 1, \dots, p \quad \forall k = 1, \dots, g \quad \forall k' = 1, \dots, k-1 \quad \forall t = 1, \dots, h$$

3.3 Contraintes du problème

— Un article récupéré doit être remplacé au client j

$$\sum_{k=1}^g x_{jkt} = \sum_{l=1}^g y_{jlt} \tag{III.2}$$

$$\forall j = 1, \dots, n \quad \forall t = 1, \dots, h$$

Cette équation peut être expliquée comme suit : s'il n'y a pas de récupération pour le client j à la période t , la valeur de $\sum_{l=1}^g y_{jlt}$ sera de 0 et aucun article ne sera donné au j^{th} client, alors $\sum_{k=1}^g x_{jkt}$ prendra aussi la valeur 0. Dans le cas d'une récupération pour le client j , un article d'une certaine performance (grade) sera récupéré de sorte que la valeur de $\sum_{l=1}^g y_{jlt}$ sera 1, et un article d'une certaine performance sera donné au client j , alors $\sum_{k=1}^g x_{jkt}$ prendra aussi la valeur 1.

- Le grade d'un article remplacé est meilleur que celui de l'article récupéré, ce qui signifie qu'une action de remanufacturing améliore le grade de l'article :

$$\sum_{k=1}^g k \times x_{jkt} \leq \sum_{l=1}^g l \times y_{jlt} \quad (\text{III.3})$$

$$\forall j = 1, \dots, n \quad \forall k = 1, \dots, g \quad \forall l = 1, \dots, g \quad \forall t = 1, \dots, h$$

Ce groupe de contraintes est complémentaire du premier. Puisque le premier grade est le meilleur, s'il y a une récupération pour le $j^{\text{ème}}$ client, le grade de l'article donné doit être meilleur que celui récupéré.

Nous supposons que lorsqu'un client a plus d'un produit en même temps, il est dupliqué en nombre de ses produits. Par exemple, si un client a deux produits, il sera dupliqué en deux clients différents.

- Contraintes sur le stock

$$\sum_{j=1}^n x_{jkt} \leq S_{kt} \quad (\text{III.4})$$

$$\forall k = 1, \dots, g \quad \forall t = 1, \dots, h$$

Cela signifie que pour une période donnée, le nombre d'articles remplacés d'un grade spécifique ne peut pas dépasser le nombre d'articles de même grade disponibles en stock.

- Un article est remis à neuf au maximum une fois au cours de la même période :

$$\sum_{k=1}^g \sum_{k'=1}^g z_{ikk't} \leq 1 \quad (\text{III.5})$$

$$\forall i = 1, \dots, p \quad \forall t = 1, \dots, h$$

— Contraintes sur la remanufacturabilité

$$\rho_{it} \geq 0 \quad (\text{III.6})$$

$$\forall i = 1, \dots, p \quad \forall t = 1, \dots, h$$

L'indice de remanufacturabilité est un taux (pourcentage) calculé à partir d'une fonction décroissante dépendant des variables des opérations de remise à neuf ($z_{ikk't}$). Ces contraintes déterminent la limite des actions de remanufacturing à effectuer sur un article (i.e. un produit ne peut pas être remanufacturé un nombre infini de fois).

Comme spécifié dans ces contraintes, le taux de l'indice de remanufacturabilité doit être positif et doit vérifier la condition suivante :

$$\rho_{it} \leq \rho_{i,t-1} \quad \forall i = 1, \dots, p \quad \forall t = 2, \dots, h$$

A la période d'initialisation nous avons :

$$\rho_{i1} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, p$$

— Au cours d'une période, un article est utilisé par au plus un client :

$$\sum_{j=1}^n v_{ijt} \leq 1 \quad (\text{III.7})$$

$$\forall i = 1, \dots, p \quad \forall t = 1, \dots, h$$

— Si un article est utilisé par un client, il ne peut être remis à neuf au cours de la même période :

$$v_{ijt} = 1 \Rightarrow z_{ikk't} = 0 \quad (\text{III.8})$$

$$\forall i = 1, \dots, p \quad \forall t = 1, \dots, h \quad \forall j = 1, \dots, n \quad \forall k = 1, \dots, g \quad \forall k' = 1, \dots, g$$

— La mise à jour de l'état de stock

L'état du stock des produits de grade k' sur la période t est calculé en se basant sur l'état du stock de la période précédente pour le même grade (k'), en ajoutant le nombre de produits atteignant le même grade après remise à neuf en période t , puis nous enlevons le nombre de produits de grade k' distribués durant la période t comme indiqué dans l'équation III.9.

$$S_{k't} = S_{k',t-1} + \sum_{i=1}^p \sum_{k=1}^g z_{ikk't} - \sum_{j=1}^n x_{jk't} \quad (\text{III.9})$$

3.4 Fonctions objectifs

— La première fonction objectif est la minimisation du coût total composé des coûts suivants :

— Coût de récupération :

$$TCT = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^g \sum_{t=1}^h CT_j \times x_{jkt} \quad (\text{III.10})$$

— Coût de stockage :

$$TCS = \sum_{t=1}^h \sum_{k=1}^g CS_k \times d_t \times S_{kt} \quad (\text{III.11})$$

— Coût de remanufacturing :

$$TCR = \sum_{i=1}^p \sum_{k=1}^g \sum_{k'=k+1}^g \sum_{t=1}^h CR_{kk'} z_{ikk't} \quad (\text{III.12})$$

— La seconde fonction objectif est la minimisation de l'impact carbone total composé de :

— Impact carbone de récupération :

$$TIT = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^g \sum_{t=1}^h IT_j \times x_{jkt} \quad (\text{III.13})$$

— Impact carbone de stockage :

$$TIS = \sum_{t=1}^h \sum_{k=1}^g IS_k \times d_t \times S_{kt} \quad (\text{III.14})$$

— Impact carbone de remanufacturing :

$$TIR = \sum_{i=1}^p \sum_{k=1}^g \sum_{k'>k}^g \sum_{t=1}^h IR_{kk'} \times z_{ikk't} \quad (\text{III.15})$$

— Impact carbone d'utilisation :

$$TIR = \sum_{i=1}^p \sum_{k=1}^g \sum_{k'=k+1}^g \sum_{t=1}^h IR_{kk'} z_{ikk't} \quad (\text{III.16})$$

Nous cherchons donc à :

- Minimiser Coût total = $(TCT + TCS + TCR)$
- Minimiser Impact carbone total = $(TIT + TIS + TIR + TIU)$.

3.5 Taille du problème

- Nombre de variables de décision :

$$2n \times g \times h + n \times g^2 \times h \quad (\text{III.17})$$

- Nombre de contraintes :

$$n \times g^2 \times h + n \times h + g \times h + p \times h + p \quad (\text{III.18})$$

4 Approche de résolution

Cette section vise à proposer une stratégie de récupération et de remanufacturing de produits afin d'étendre leur durée de vie sur un horizon fini. Comme détaillé ci-dessus, la stratégie proposée inclut le comportement des clients, modélisé par la fréquence d'utilisation, et la performance du produit, basée sur ses fonctionnalités. Ainsi, l'objectif de la stratégie de remanufacturing est de déterminer la planification des opérations de récupération et de remanufacturing des produits sur l'horizon de l'étude.

En se basant sur les données relatives aux clients, aux fonctionnalités des produits et au niveau de stock des produits disponibles, l'approche génère la localisation des clients et l'importance de chaque fonctionnalité des produits et vérifie les profils des clients pour déterminer les fréquences d'utilisation.

L'heuristique est ensuite exécutée afin de déterminer le meilleur ensemble de produits à récupérer et le grade à atteindre pour chacun d'eux après leur remise à neuf. Les résultats obtenus et décisions prises permettent de mettre à jours l'état global du système comprenant les nouveaux grades des produits remanufacturés, les grades des autres produits en cours d'utilisation, et les niveaux de stocks. Ce processus est réitéré à la fin de chaque période de l'horizon fixé par le fabricant pour assurer la remise à neuf des produits.

Pour atteindre cet objectif, nous proposons une nouvelle heuristique multi-objectifs qui détermine les décisions de remanufacturing sur la base d'une minimisation conjointe des coûts économiques et

environnementaux.

La figure III.5 illustre un aperçu général des étapes heuristiques proposées, décrites comme suit.

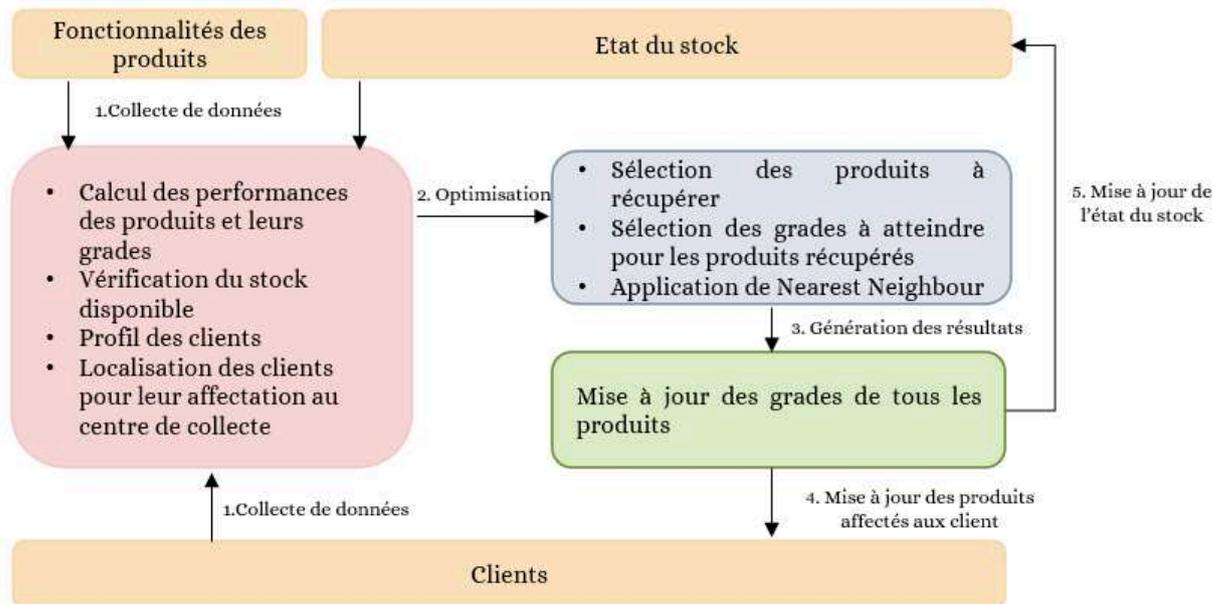


FIGURE III.5 – Les étapes de l'heuristique proposée

1. Étape I : La collecte des données du problème

Dans cette première étape, l'approche proposée vérifie les données du problème, à savoir :

- Les données relatives au produit considéré (le nombre de grades, le nombre de fonctionnalités et leur importance),
- Les données relatives aux clients (le nombre de clients et les fréquences d'utilisation (comportements des clients)),
- Les données relatives à l'engagement de remanufacturing (le nombre de périodes et la durée de l'horizon), les coûts économiques et environnementaux du transport et du stockage.

2. Étape II : Initialisation

La période 0 est une période fictive pour représenter la période d'initialisation avant l'horizon considéré, où les articles sont vendus aux clients. Notons que les articles sont vendus en même temps. Ainsi, nous attribuons aux clients (un par un) les articles qu'ils ont achetés. Les articles sont neufs, et les performances des composants sont initialisées à 100% (ce qui signifie que les

performances des produits sont initialisées à 100%). L'indice de remanufacturabilité est également initialisé à 100% (puisque aucune action de remanufacturing n'a encore été appliquée sur les articles).

Nous initialisons l'état du stock avec le nombre de nouveaux articles stockés (le stock initial est composé de nouveaux articles). Ensuite, la période est fixée à 1.

3. **Étape III : Condition d'arrêt**

Avant de lancer l'étape principale de l'algorithme (la première période), et après chaque période, l'heuristique vérifie si la fin de l'horizon n'a pas encore été atteinte.

4. **Étape IV : Calcul des nouvelles performances**

Dans la période en cours, pour chaque article attribué à un client, nous calculons la décroissance des performances sur la base du comportement du client qui a utilisé cet article depuis la période précédente, en utilisant l'équation [III.1](#).

5. **Étape V : Le tri des clients**

Après avoir calculé la performance totale des articles pour chaque client, nous effectuons un tri par ordre croissant des clients en fonction de la performance de leurs articles.

6. **Étape VI : Récupération et remplacement des articles**

Le nombre de récupérations est limité au nombre d'articles stockés disponibles. On commence par parcourir l'ensemble des clients en fonction du tri résultant de l'étape précédente.

Pour chaque client, s'il existe un article stocké avec un meilleur grade que celui de l'article qu'il détient, alors :

- Le client est invité à déposer son article au centre de collecte auquel il est affecté,
- Une fois l'article déposé au centre de collecte, un autre article (de meilleur grade) est remis au client correspondant pour lui remplacer son appareil, et
- Le nombre d'articles stockés est mis à jour en retirant l'article donné de du grade correspondant.

Après l'étape de dépôt/remplacement, chaque centre de collecte rassemble les articles déposés. Ensuite, tous les articles collectés seront transportés vers le centre de remanufacturing, nous appliquons une heuristique de construction (plus proche voisin) pour le sous-problème correspondant à un problème de voyageur de commerce, où les villes sont les centres de collecte et le

centre de remanufacturing représente le point de départ et d'arrivée du cycle hamiltonien.

7. Étape VII : Opérations de remanufacturing

Une fois le transfert des articles récupérés vers le centre de remanufacturing effectué, nous procédons aux opérations de remanufacturing de telle sorte que, pour chaque article récupéré, nous remettons à neuf le produit afin d'atteindre le grade approprié. Le grade est choisi en fonction de la politique appliquée dans le processus de remanufacturing. Par exemple, nous pouvons choisir de remettre à neuf les articles récupérés au meilleur grade ou au grade supérieur.

8. Étape VIII : Progression dans le temps

Après l'exécution des étapes précédentes, l'heuristique progresse pour la période suivante de l'horizon considéré.

9. Étape IX : Fin de l'algorithme et sorties

Dans cette dernière étape, l'heuristique donne toutes les sorties attendues : les valeurs de la fonction objectif, le planning de remise à neuf, la performance des articles, l'indice de remanufacturabilité des articles, et le niveau de stock.

5 Exemple illustratif

Nous allons présenter pour les étapes principales un exemple de leur déroulement.

- Nous avons le tableau suivant III.2 qui représente les fréquences d'utilisation de deux clients sur 4 périodes de l'horizon :

| | Période 1 | Période 2 | Période 3 | Période 4 |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Client 1 | 0,27 | 0,16 | 0,31 | 0,08 |
| Client 2 | 0,69 | 0,85 | 0,96 | 0,73 |

TABLEAU III.2 – Fréquences d'utilisation

- Après une période d'utilisation, les performances des produits en possession des clients 1 et 2 passent d'une performance égale à 1 aux performances présentées dans le tableau III.3 :
- Nous procédons ensuite au tri des clients dans l'ordre croissant des performances de leurs produits, nous obtenons alors que le client 2 est en première position et le client 1 en seconde position. Le client 2 est prioritaire dans la récupération de son produit.

| | Performance |
|----------|-------------|
| Client 1 | 0.94 |
| Client 2 | 0.77 |

TABLEAU III.3 – Performances des produits après une période d'utilisation

- Nous supposons que nous possédons qu'un seul produit en stock, nous sélectionnons le client 2 pour la récupération de son produit, nous lui remettons le produit disponible en stock et nous récupérons son produit pour une remise à neuf.
- Pour la remise à neuf du produit récupéré, nous avons le choix d'appliquer une des deux stratégies de remanufacturing que nous proposons. La première stratégie, dite stratégie complète, consiste à remettre à neuf au meilleur grade (figure ??). La seconde stratégie, dite minimale, consiste à remettre à neuf à un grade supérieur (figure III.7).

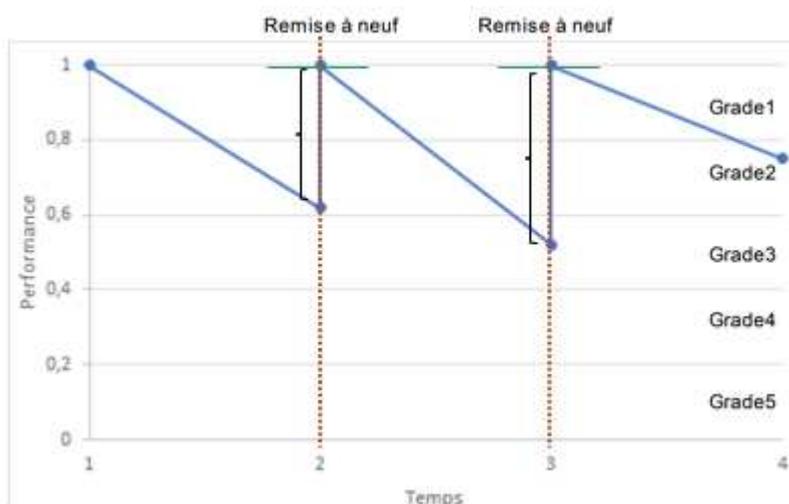


FIGURE III.6 – Évolution de la performance d'un produit remis à neuf selon la stratégie complète

- Nous ajoutons à chaque étape les différents coûts générés. Nous appliquons par la suite les étapes restantes de l'heuristique jusqu'à atteindre la condition d'arrêt.

6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé une stratégie de remanufacturing intégrant les contraintes de récupération, pour sélectionner l'ensemble des produits à récupérer et à remanufacturer pendant chaque période d'un horizon temporel fini. La stratégie de remanufacturing développée est basée sur la performance des produits et leurs fonctionnalités. La performance du produit dépend du com-

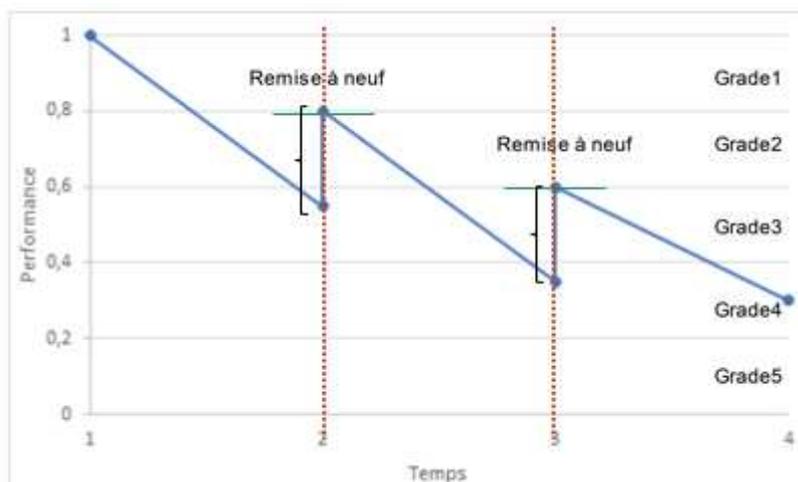


FIGURE III.7 – Évolution de la performance d'un produit remis à neuf selon la stratégie minimale

portement des clients en termes de fréquence d'utilisation du produit.

Nous avons présenté une formulation mathématique détaillée du problème et une heuristique pour construire une solution réalisable au problème. L'heuristique développée est composée de deux parties. La première partie est consacrée aux opérations de récupération, en utilisant l'heuristique constructive du plus proche voisin du problème du voyageur de commerce. La deuxième partie donne les décisions sur les opérations de remanufacturing des articles récupérés. Nous avons analysé deux variantes de la stratégie de remanufacturing, basées sur les décisions de remanufacturing. La première variante, nommée stratégie de remanufacturing complet (SRC) consiste à remettre à neuf les articles récupérés au meilleur grade. Pour la seconde stratégie, appelée stratégie de remanufacturing minimal (SRM), les articles sont remis à neuf à un grade supérieur. Nous verrons une application de l'approche de résolution dans le chapitre dédié aux exemples numériques.

Chapitre IV

Intégration des contraintes structurelles et fonctionnelles des produits dans les décisions de récupération et de remise à neuf

Résumé

Dans ce chapitre, et par extension aux deux précédents, nous considérons qu'un produit comporte plusieurs composants. Chaque composant est caractérisé par une performance et intervient dans l'exécution, (réalisation) d'une ou plusieurs fonctionnalités. La fréquence d'utilisation d'un client impacte directement la performance du composant et de ce fait la qualité d'exécution des fonctionnalités. Nous présentons une formule qui permet de calculer la performance totale d'un produit en fonction de ces paramètres. Nous intégrons également l'optimisation de l'étape de récupération au problème. Nous proposons alors une modélisation mathématique du problème intégrant les nouveaux paramètres avec les objectifs de minimiser les coûts économiques et environnementaux. Comme méthode de résolution, nous adaptons la métaheuristique NSGA-II basée sur un codage en nombres entiers et réels en parallèle, intégrant directement l'optimisation de l'étape de la récupération des produits.

1 Introduction

Dans le cadre de l'allongement de la durée de vie des produits, nous nous intéressons dans ce chapitre à l'optimisation des décisions de récupération et des décisions de remise à neuf pour des appareils correspondant à une structure particulière. En effet, les produits considérés contiennent plusieurs composants caractérisés par une performance et interviennent dans l'exécution de différentes fonctionnalités. Comme dans le chapitre précédent, nous considérons que le produit est utilisé par le client selon un profil défini représenté par une fréquence. Cette dernière agit directement sur la performance du composant et en conséquence sur la performance du produit en sa globalité. Il s'agira alors de prendre des décisions de :

1. Sélection des produits à récupérer
2. L'ordre de récupération des produits sélectionnés
3. Remise à neuf au niveau des composants

Avec l'objectif de minimiser les coûts économiques et environnementaux, nous présentons un modèle mathématique intégrant les décisions présentées ci-haut avec la prise en compte des différents paramètres relatifs aux produits et aux clients. Nous proposons comme méthode de résolution du problème, une adaptation de la métaheuristique NSGA-II en utilisant un codage mixte en nombre entiers et réels. Les solutions du front de Pareto sont classées par l'application de la méthode TOPSIS. Nous illustrons par une expérience numérique l'applicabilité de l'approche proposée. Nous terminons le chapitre par une conclusion.

2 Description du problème

Un produit électronique (*e.g.* les smartphones, les téléviseurs, etc.) peut être défini par une structure et des fonction qu'il offre (ou réalise). La structure est caractérisée par un ensemble de composants, tandis que la fonction est basée sur un ensemble de fonctionnalités exécutées par le produit. La figure IV.3 illustre l'exemple d'un smartphone, constitué de plusieurs composants, tels que l'unité centrale, l'appareil photo, la batterie, . . . Cette structure permet de garantir plusieurs fonctionnalités, telles que l'affichage, la capture d'images et de vidéos, le son, etc. L'ensemble des fonctionnalités permet l'utilisation de l'appareil dans de bonnes conditions.

Sur la base de la structure et des fonctions d'un produit, les relations entre composants et fonctionnalités peuvent être définies comme suit :

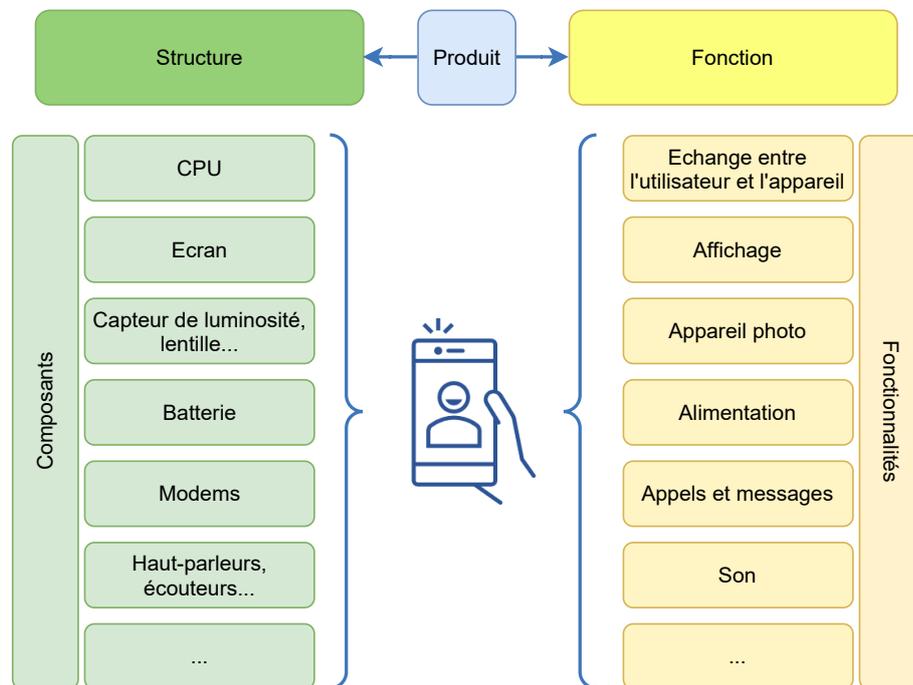


FIGURE IV.1 – Structure d'un smartphone

- Un produit est caractérisé par une performance qui diminue selon le niveau et le profil d'utilisation. La performance totale du produit peut être exprimée en grades. L'indice de performance étant un pourcentage, nous considérons un certain nombre de sous-intervalles (entre 0 et 100%), chacun correspondant à un grade.
- Chaque composant du produit est caractérisé par une performance qui permet d'estimer l'état du composant par rapport à un composant neuf.
- L'assemblage des composants suit un certain schéma pour l'exécution des fonctionnalités. Chaque fonctionnalité est caractérisée par une importance.
- Nous considérons également un autre paramètre qui permet de lier les composants aux fonctionnalités appelé paramètre d'implication. Il s'agit d'un paramètre qui mesure le niveau d'implication d'un composant dans l'exécution d'une fonctionnalité.
- L'importance des fonctionnalités et le paramètre d'implication des composants dans l'exécution d'une fonctionnalité permet d'obtenir l'importance des composants.

Prenons l'exemple du smartphone, il possède plusieurs composants comme la batterie. Comme le smartphone ne peut pas être allumé sans la batterie, l'importance de cette dernière est ma-

jeure. D'autres composants comme le capteur de lumière, l'objectif et le processeur d'image contribuent à la fonction appareil photo, chacun d'entre eux a une performance, estimée par rapport à un composant à l'état neuf, et un taux d'implication dans la réalisation de la fonction appareil photo. Le moindre dysfonctionnement d'un des composants aura un impact sur son indice de performance et donc sur la performance globale du produit.

2.1 Le client

Dans le problème étudié, nous considérons qu'un client est l'utilisateur du produit. Il est caractérisé par un profil d'utilisation représenté par la fréquence avec laquelle le client utilise son produit. Ce profil impacte la décroissance des performances des composants (plus le profil est sévère, plus la décroissance est importante).

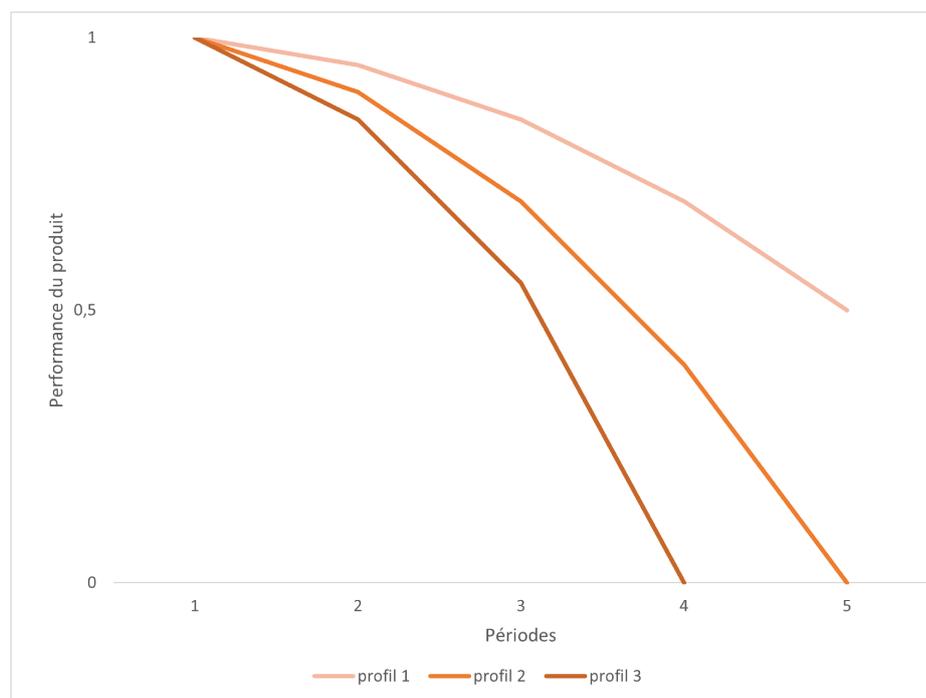


FIGURE IV.2 – L'évolution de la performance d'un produit en fonction des profils d'utilisation

A partir des caractéristiques présentées ci-dessus, nous allons présenter une méthode de calcul de la performance globale d'un produit (estimation de l'état du produit en fonction de l'état de ses composants et du profil d'usage). Si nous prenons l'exemple d'une batterie de smartphone, plus le smartphone est utilisé par un client au profil sévère, plus l'indice de performance de sa batterie diminue rapidement. Comme le montre IV.2, les performances du produit diminuent différemment lorsque l'utilisation suit le profil 1, 2 et 3. Le profil 1 correspond à une faible fréquence d'utilisation

et nous remarquons que dans la dernière période, le produit peut encore être utilisé, contrairement aux profils 2 et 3 où le produit atteint sa fin de vie à la quatrième et dernière période respectivement.

2.2 La récupération et le remanufacturing de produits usagés

Nous considérons le problème de la récupération et de la remise à neuf de produits sur un horizon fini. L'objectif est de déterminer un plan optimal de remanufacturing, qui minimise le coût économique et environnemental, en intégrant les trois décisions principales suivantes :

1. **La sélection des clients** : cette décision vise à déterminer parmi l'ensemble des clients, ceux pour lesquels les produits sont collectés et remplacés par d'autres produits (disponibles en stock) ayant de meilleurs grades.
2. **Le transport des produits** : cette décision consiste à trouver le plan de transport optimal pour la récupération des produits utilisés par les clients sélectionnés par la décision précédente.
3. **Les produits remis à neuf** : après la sélection des clients et l'optimisation du transport, dans cette décision, nous nous concentrons sur les opérations de remise à neuf appliquées aux composants des produits récupérés pour améliorer leurs performances, en déterminant pour chaque composant la performance à atteindre après remise à neuf. La performance décidée doit être meilleure que celle prélevée à sa récupération.

Soit n le nombre de clients, chacun détenant l'un des p produits (articles) disponibles, avec $p > n$. Chaque produit est composé de composants et exécute des fonctionnalités. Chaque composant est caractérisé par une performance utilisée pour calculer la performance totale et la note (de 1 à g). Le plan de remanufacturing est considéré sur un horizon fini, composé de h périodes. La reprise a lieu au dernier instant d'une période.

Ainsi, pendant cet horizon, les trois décisions susmentionnées relatives au plan de remanufacturing sont basées sur les paramètres suivants :

1. **Les caractéristiques du produit** : le produit est caractérisé par une structure et une fonction. La structure du produit est un ensemble de C composants, tandis que la fonction du produit est l'ensemble de F fonctionnalités définissant son fonctionnement.
2. **Le comportement des clients** : il s'agit de la fréquence d'utilisation des produits par les clients. Cette fréquence a un impact sur l'évolution de la performance des composants et par conséquent sur la performance et le grade du produit. Ainsi, en fonction de la fréquence d'utilisation, la performance du produit diminue et passe d'un grade g à un autre grade g' , tel que g est meilleur que g' .

3. **Le profil des périodes :** La durée de chaque période de l'horizon considéré affecte l'évolution des performances des produits dans le temps et leur grades et par conséquent, la décision de remanufacturing.

En résumé, pendant une période, un client utilise son produit avec une fréquence représentée par un taux (de 0% à 100%), en fonction de cette fréquence d'utilisation et de la durée de la période, la performance du produit utilisé diminue, ce qui a un impact, outre la décision de transport, sur la sélection des produits usagés à récupérer et donc sur les grades que les produits récupérés atteindront après les actions de remise à neuf.

3 Formulation du problème

3.1 Notations

Le tableau IV.1 détaille les données, paramètres et fonctions utilisés pour la formulation mathématique.

- α_{cf} est le taux d'implication du composant c dans la qualité d'exécution de la fonctionnalité f , sa valeur est un nombre réel compris entre 0 et 1, et chaque composant doit être vérifié :

$$\sum_{f=1}^F \alpha_{cf} = 1 \quad (\text{IV.1})$$

- β_{ict} est la performance du composant c dans le produit i sur la période t , et sa valeur est un nombre réel compris entre 0 et 1.
- λ_{ict} est l'indice de remise à neuf du composant c dans le produit i sur la période t , et sa valeur est un nombre réel compris entre 0 et 1.
- γ_f est l'importance de la f caractéristique, et sa valeur est un nombre réel compris entre 0 et 1.
- θ_c est l'importance de la c composante, elle est calculée selon l'équation suivante :

$$\theta_c = \sum_{f=1}^F \alpha_{cf} \times \gamma_f \quad (\text{IV.2})$$

Si la somme des θ_c n'est pas égale à 1, on peut normaliser chaque θ_c en le divisant par la somme des θ_c avant normalisation.

Selon l'équation IV.2, l'importance d'un composant c a pour valeur un nombre réel compris entre 0 et 1.

TABLEAU IV.1 – Notations

| Notation | |
|--|---|
| p | nombre de produits |
| n | nombre de clients |
| g | nombre de grades |
| h | nombre de périodes |
| C | nombre de composants |
| F | nombre de fonctionnalités |
| i | indice représentant les produits |
| j, j' | indice représentant les clients |
| k | indice représentant les grades |
| t | indice représentant les périodes |
| c | indice représentant les composants |
| f | indice représentant les fonctionnalités |
| α_{cf} | pourcentage avec lequel le composant c intervient dans l'exécution de la fonctionnalité f |
| β_{ict} | performance du composant c dans le produit i sur la période t |
| λ_{ict} | indice de remise à neuf du composant c dans le produit i sur la période t |
| $s \gamma_f$ | importance de la fonctionnalité f |
| θ_c | importance du composant c |
| d_t | durée de la période t |
| S | nombre initial des nouveaux articles disponibles dans le stock |
| S_{kt} | niveau de stock des articles de grade k sur la période t |
| CS_k | coût de stockage pour un article de grade k pour une unité de temps |
| IS_k | empreinte carbone du stockage d'un article de grade k pour une unité de temps |
| ε | l'ensemble des clients et du centre de remise à neuf |
| E_t | sous-ensembles de ε |
| $\Delta = (\delta_{jj'})_{j,j' \in \varepsilon}$ | matrice des distances entre les éléments de ε |
| φ_{jt} | fréquence d'utilisation du $j^{\text{ème}}$ client à la période t |
| m and m' | coût de transport et empreinte carbone par unité de distance |
| $\mathfrak{F}(v)$ | fonction à une variable |
| $\mathfrak{H}(v, v')$ | fonction à deux variables |
| π_{it} | performance de l'article i sur la période t |
| ρ_{it} | indice de remise à neuf de l'article i sur la période t |
| $\mathfrak{G}(v)$ | fonction à une variable |
| $\psi(v, v')$ and $\psi'(v, v')$ | fonction du coût de remise à neuf et de l'empreinte carbone |
| $\sigma(v, v')$ and $\sigma'(v, v')$ | fonction du coût de la mise en décharge |
| $\mu(v, v')$ | fonction de l'empreinte carbone de l'utilisation |

— ε est l'ensemble des clients auquel s'ajoute le centre de remanufacturing. Les clients sont représentés par un nombre entier positif compris entre 1 et n , nous désignons le centre de remanu-

facturing par $n + 1$.

Alors, $\varepsilon = \{1, \dots, n + 1\}$.

- E_t est un sous-ensemble de ε pour la période t . Ce sous-ensemble doit contenir au moins deux éléments, l'un d'eux doit être le centre de remanufacturing (élément $n + 1$), et le second peut être l'un des clients (un élément choisi dans l'ensemble des clients $1, \dots, n$). E_t peut être l'un des 2^n sous-ensembles possibles construits à partir de ε .
- Δ est une matrice $(n + 1) \times (n + 1)$. Chaque élément de la matrice $\delta_{jj'}$ représente la distance entre les éléments j et j' de ε . Lorsque $j = j'$ la distance est égale à $+\infty$.
- φ_{jt} est la fréquence avec laquelle le $j^{\text{ième}}$ client utilise son produit sur la période t .
- $\mathfrak{F}(v)$ et $\mathfrak{H}(v)$ sont des fonctions ayant comme ensemble de départ $[0, 1]$ et $[0, 1] \times [0, 1]$ respectivement, et comme ensemble d'arrivée l'intervalle $[0, 1]$:

$$\begin{aligned} \mathfrak{F} &: [0, 1] \rightarrow [0, 1] \\ v &\mapsto \mathfrak{F}(v) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathfrak{H} &: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1] \\ (v, v') &\mapsto \mathfrak{H}(v, v') \end{aligned}$$

La fonction $\mathfrak{F}(v)$ sera utilisée pour calculer le taux de diminution de la performance des composants où v représente une fréquence d'utilisation.

La fonction $\mathfrak{H}(v, v')$ sera utilisée pour calculer le taux de diminution des performances des composants où v et v' représentent deux performances successives des composants.

- π_{it} est la performance du $i^{\text{ième}}$ produit sur la période t . La performance est calculée selon l'équation IV.3. La performance de chaque composant diminue lorsque le produit est utilisé par un client, et le pourcentage de diminution dépend de la fréquence d'utilisation du client qui utilise le produit :

$$\pi_{it} = \sum_{c=1}^C \theta_c \times \beta_{ict} \quad (\text{IV.3})$$

π_{it} a pour valeur un nombre réel compris entre 0 et 1.

- ρ_{it} est l'indice de remanufacturabilité du $i^{\text{ième}}$ produit sur la période t . L'indice de remanufacturabilité est calculé selon l'équation IV.4. L'indice de remanufacturabilité de chaque composant diminue lorsque le produit est remis à neuf, et le pourcentage de diminution dépend des performances des i^e composants du produit avant et après les opérations de remise à neuf :

$$\rho_{it} = \sum_{c=1}^C \theta_c \times \lambda_{ict} \quad (\text{IV.4})$$

- $\psi(v, v')$ et $\psi'(v, v')$ sont respectivement les fonctions de coût et d'empreinte carbone de remanufacturing. Ces fonctions calculent le coût et l'empreinte carbone résultant des opérations de remise à neuf appliquées à un produit.

Soit G l'ensemble des grades possibles pour les produits tels que $G = 1, \dots, g$. Les fonctions ψ et ψ' ont pour ensemble de départ le produit cartésien $[0, 1] \times G$ et pour ensemble d'arrivée \mathbb{R}_+^* :

$$\begin{aligned} \psi & : [0, 1] \times G \rightarrow \mathbb{R}_+^* \\ & (v, v') \mapsto \psi(v, v') \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \psi' & : [0, 1] \times G \rightarrow \mathbb{R}_+^* \\ & (v, v') \mapsto \psi'(v, v') \end{aligned}$$

- $\mathfrak{G}(v)$ a pour ensemble de départ l'intervalle $[0, 1]$ et pour ensemble d'arrivée G . On peut définir la fonction comme suit :

$$\begin{aligned} \mathfrak{G} & : [0, 1] \rightarrow G \\ & v \mapsto \mathfrak{G}(v) \end{aligned}$$

Cette fonction sera utilisée pour déduire grade correspondant à une performance donnée du produit v .

- $\sigma(v, v')$ et $\sigma'(v, v')$ sont respectivement les fonctions de coût et d'empreinte carbone de la mise en décharge.

Soit H l'ensemble des périodes telles que $H = 1, \dots, h$. Les fonctions σ et σ' ont pour ensemble de départ le produit cartésien $[0, 1] \times H$ et pour ensemble d'arrivée \mathbb{R}_+^* :

$$\begin{aligned} \sigma & : [0, 1] \times H \rightarrow \mathbb{R}_+^* \\ & (v, v') \mapsto \sigma(v, v') \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma' & : [0, 1] \times H \rightarrow \mathbb{R}_+^* \\ & (v, v') \mapsto \sigma'(v, v') \end{aligned}$$

- μ est la fonction d'empreinte carbone d'usage ayant comme domaine le produit cartésien $[0, 1] \times [0, 1]$ et comme codomaine \mathbb{R}_+^* :

$$\begin{aligned} \mu & : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}_+^* \\ & (v, v') \mapsto \mu(v, v') \end{aligned}$$

3.2 Variables de décision

1. Variables d'affectation des produits/clients

$$x_{ijt} = \begin{cases} 1 & \text{produit } i \text{ est affecté au client } j \text{ sur la période } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\forall i = 1, \dots, p \quad \forall j = 1, \dots, n \quad \forall t = 1, \dots, h$$

2. Variables de remise à neuf

$$y_{ikt} = \begin{cases} 1 & \text{Si le grade choisi pour le remise à neuf du produit } i \text{ est } k \text{ sur la période } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\forall i = 1, \dots, p \quad \forall k = 1, \dots, g \quad \forall t = 1, \dots, h$$

3. Variables de transport

$$z_{jj't} = \begin{cases} 1 & \text{Si le chemin entre les points } j \text{ et } j' \text{ est pris sur la période } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\forall j, j' \in E_t \quad (j \neq j') \quad \forall t = 1, \dots, h$$

3.3 Contraintes

1. Contraintes d'affectation des produits/clients

— A chaque période, chaque client reçoit un seul produit.

$$\sum_{i=1}^p x_{ijt} = 1 \tag{IV.5}$$

$$\forall j = 1, \dots, n \quad \forall t = 1, \dots, h$$

— A chaque période, chaque article est affecté à un client au plus (un produit peut être le centre de remise à neuf).

$$\sum_{j=1}^n x_{ijt} \leq 1 \tag{IV.6}$$

$$\forall i = 1, \dots, p \quad \forall t = 1, \dots, h$$

2. Contraintes de remise à neuf

— Un produit est remis à neuf au plus une fois par période.

$$\sum_{k=1}^g y_{ikt} \leq 1 \quad (IV.7)$$

$$\forall i = 1, \dots, p \quad \forall t = 1, \dots, h$$

— Si un produit est remis à neuf sur la période t alors sa performance augmente.

$$\sum_{k=1}^g y_{ikt} = 1 \implies \beta_{ict} \geq \beta_{ic,t-1} \quad (IV.8)$$

$$\forall i = 1, \dots, p \quad \forall c = 1, \dots, C \quad \forall t = 1, \dots, h$$

La performance d'un composant décroît selon l'équation IV.9.

$$\beta_{ict} = \beta_{ic,t-1} - \theta_c \times \mathcal{D}(d_t) \sum_{j=1}^n \mathfrak{F}(\varphi_{jt}) \times x_{ijt} \quad (IV.9)$$

avec :

$$\beta_{ic0} = 1$$

La fonction $\mathcal{D}(d_t)$ lorsque les périodes ne sont pas homogènes.

— Les contraintes de remise à neuf assurent que l'indice de remanufacturabilité soit positif.

$$\lambda_{ict} \geq 0 \quad (IV.10)$$

$$\forall i = 1, \dots, p \quad \forall c = 1, \dots, C \quad \forall t = 1, \dots, h$$

— Une action de remise à neuf du produit i sur la période t si et seulement si l'indice de remise à neuf décroît.

$$\sum_{k=1}^g y_{ikt} = 1 \iff \lambda_{ict} \leq \lambda_{ic,t-1} \quad (IV.11)$$

$$\forall i = 1, \dots, p \quad \forall c = 1, \dots, C \quad \forall t = 1, \dots, h$$

La remise à neuf d'un composant décroît selon l'équation IV.12.

$$\lambda_{ict} = \lambda_{ic,t-1} - \theta_c \times \sum_{k=1}^g \mathfrak{H}(\beta_{ic,t-1}, \beta_{ikt}) \times y_{ikt} \quad (IV.12)$$

avec :

$$\lambda_{ic0} = 1$$

3. Contraintes de transport

— On entre dans un élément de l'ensemble E une fois par période.

$$\sum_{j \in E_t, j \neq j'} z_{jj't} = 1 \quad (\text{IV.13})$$

$$\forall j' \in E_t \quad \forall t = 1, \dots, h$$

— On sort d'un élément de l'ensemble E une fois par période.

$$\sum_{j' \in E_t, j' \neq j} z_{jj't} = 1 \quad (\text{IV.14})$$

$$\forall j \in E_t \quad \forall t = 1, \dots, h$$

— Elimination des sous-tours.

$$\sum_{j, j' \in A, j' \neq j} z_{jj't} \leq |A| - 1 \quad (\text{IV.15})$$

$$\forall A \subset E_t, |A| \geq 2 \quad \forall t = 1, \dots, h$$

4. Contraintes de liaison

— Si un produit est utilisé, alors il ne peut pas être remis à neuf sur la même période.

$$\sum_{j=1}^n x_{ijt} = 1 \implies \sum_{k=1}^g y_{ikt} = 0 \quad (\text{IV.16})$$

$$\forall i = 1, \dots, p \quad \forall t = 1, \dots, h$$

— Le client j est sélectionné pour récupération si et seulement si son produit change.

$$j \in E_t \iff \exists i \in \{1, \dots, p\} \mid x_{jk,t-1} = 1 \wedge x_{jkt} = 0 \quad (\text{IV.17})$$

$$\forall j = 1, \dots, n \quad \forall t = 1, \dots, h$$

3.4 Fonctions objectives

Comme premier objectif, nous considérons le coût économique à minimiser, constitué des coûts de récupération et de remanufacturing, décrits comme suit :

— Coût de récupération :

$$TCT = m \times \sum_{t=1}^h \sum_{j \in E_t, j \neq j'} \delta_{jj'} \times z_{jj't} \quad (\text{IV.18})$$

— Coût de remise à neuf :

$$TCR = \sum_{i=1}^p \sum_{k=1}^g \sum_{t=1}^h \psi(\pi_{i,t-1}, k) \times y_{ikt} \quad (IV.19)$$

— Coût de stockage :

$$TCS = \sum_{k=1}^g \sum_{t=1}^h CS_{kt} \times d_t \times S_{kt} \quad (IV.20)$$

Comme deuxième objectif, nous considérons le coût environnemental à minimiser, constitué de l’empreinte carbone de la récupération, de le remanufacturing et de l’usage (utilisation), décrit comme suit :

— L’empreinte carbone de récupération :

$$TIT = m' \times \sum_{t=1}^h \sum_{j \in E_t, j \neq j'} \delta_{jj'} \times z_{jj't} \quad (IV.21)$$

— L’empreinte carbone de remise à neuf :

$$TIR = \sum_{i=1}^p \sum_{k=1}^g \sum_{t=1}^h \psi'(\pi_{i,t-1}, k) \times y_{ikt} \quad (IV.22)$$

— L’empreinte carbone de stockage :

$$TIS = \sum_{k=1}^g \sum_{t=1}^h IS_{kt} \times d_t \times S_{kt} \quad (IV.23)$$

— L’empreinte carbone d’utilisation :

$$TIU = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^h \mu(\varphi_{jt}, \pi_{it}) \quad (IV.24)$$

L’objectif est de minimiser le coût total cost (TC) et l’empreinte carbone totale (TI) :

— Minimiser Coût total $TC = TCT + TCR + TCS + TCD$

— Minimiser Impact carbone total $TI = TIT + TIR + TIS + TID + TIU$

4 Approche de résolution

4.1 Description de l'approche de résolution

Conformément à la description du problème, une solution consiste à planifier les récupérations de produits à chaque période sur l'ensemble de l'horizon. En plus de l'étape de récupération, nous nous intéressons également aux opérations de remise à neuf qui seront appliquées aux produits récupérés. En même temps, nous considérons l'optimisation du transport vers le sous-ensemble de clients potentiellement sélectionnés pour la récupération à chaque période. L'objectif du problème est la minimisation des coûts économiques et environnementaux. Puisque nous avons affaire à un problème à deux objectifs, nous avons choisi d'adopter un algorithme évolutionnaire multi-objectif : NSGA-II en raison de son efficacité reconnue. L'algorithme se déroule suivant les étapes ci-dessous :

4.1.1 Étape I : Génération des données et paramètres

Dans cette étape, les données et les paramètres du problème définis dans le tableau IV.1 sont générés, ainsi que les paramètres de l'algorithme NSGA-II, tels que la taille de la population, la probabilité de mutation, la condition d'arrêt, etc.

Le nombre de produits, de clients, de périodes, de composants et de caractéristiques ainsi que le stock initial sont déterminés par l'utilisateur.

Les paramètres α et γ dépendent du type de produits utilisés par les clients et sont donc spécifiques à chaque type de produit (nous considérons dans notre problème un seul type de produit). Le paramètre β est initialisé à 100% pour tous les produits (car nous considérons que tous les produits sont neufs).

La durée des périodes est choisie en fonction du type de produits considérés dans l'étude, par exemple, les délais de récupération pour les téléviseurs seront différents de ceux des smartphones.

La matrice des distances symétriques entre un client et un autre, et entre les clients et le centre de remanufacturing est générée.

Les fonctions \mathfrak{F} , \mathfrak{H} , ψ , ψ' et μ sont également déterminées.

En ce qui concerne les paramètres de l'algorithme NSGA-II, la taille de la population, la probabilité de mutation et la condition d'arrêt sont d'abord définies.

4.1.2 Étape II : Génération de population

Dans cette étape, la première population de parents est construite (notée $Parents_0$). Cette population va contenir plusieurs individus, et chaque individu est généré selon un codage précis.

Le codage que nous avons choisi pour construire un individu (une solution à notre problème) est défini comme suit :

1. On considère un tableau de $3 \times n$ lignes et h colonnes. Où n est le nombre de clients et h le nombre de périodes;
2. Dans la première partie du tableau (de la ligne 1 à la ligne n et incluant toutes les colonnes), pour chaque colonne, nous générons un ordre aléatoire pour les clients selon l'algorithme suivant :

Algorithme 1 : Première partie de la génération de la table de codage

Résultat : Ordre aléatoire pour les clients

$t = 1;$

tant que $t \leq h$ **faire**

$j = 1;$

tant que $j \leq n$ **faire**

 Affecter un nombre entre 1 et n non encore utilisé sur la période actuelle ;

$j++;$

fin

$t++;$

fin

3. Dans la deuxième partie du tableau (de la ligne $n + 1$ à la ligne $2 \times n$ et incluant toutes les colonnes), pour chaque élément, nous générons aléatoirement un nombre réel entre 0 et 1 ;
4. Dans la troisième partie du tableau (de la ligne $2n + 1$ à la ligne $3 \times n$ et incluant toutes les colonnes), pour chaque colonne, nous générons un ordre aléatoire pour les clients comme expliqué dans l'algorithme 1.

L'interprétation du tableau généré selon les étapes précédentes, permet de construire une solution réalisable au problème. La procédure de décodage est traitée selon les étapes décrites ci-dessous :

1. L'interprétation est traitée colonne par colonne (période par période).
2. Dans la première partie du tableau (de la 1^{ère} ligne à la $n^{\text{ème}}$ ligne), on commence par calculer la performance de chacun des produits utilisés par les clients, puis, on visite les clients un par un selon l'ordre attribué lors du codage. Pour le $j^{\text{ème}}$ ($j = 1, \dots, n$) client visité, en parcourant

l'ensemble des produits disponibles en stock, le premier produit, qui a une performance plus élevée que le produit qui est en cours d'utilisation par le client, sera attribué à ce client et ainsi on met à jour le niveau de stock (en retirant une unité du niveau de stock correspondant au grade du produit donné au client), on récupère le produit en sa possession, on l'ajoute à la liste des produits à remettre à neuf, et on ajoute le client j à l'ensemble E_t . S'il n'y a pas de produit disponible pour le client actuel, on passe ensuite au client suivant. Il faut noter que nous ne pouvons récupérer au maximum le nombre de produits disponibles en stock. Nous pouvons nous arrêter lorsqu'il n'y a plus de produits disponible en stock.

3. La deuxième partie du tableau (de la $(n+1)^{st}$ ligne à la $(2 \times n)^{th}$ ligne) est dédiée aux opérations de remise à neuf. Après avoir déterminé la liste des produits récupérés dans la période en cours, nous calculons le grade (performance) à atteindre après les opérations de remanufacturing. Pour ce faire, pour chaque article de la liste des produits récupérés, on désigne par j le client qui possédait ce produit avant sa récupération. Le grade à atteindre pour le produit traité est la fonction plancher inférieure du résultat de la multiplication de l'élément de la table de codage correspondant à la ligne $(n+j)$ et à la colonne t (période courante) avec le grade de ce produit avant sa remise à neuf (formule IV.25). Nous calculons la nouvelle performance, mettons à jour l'indice de remanufacturabilité des composants de chaque produit remis à neuf, et mettons à jour le niveau de stock (en ajoutant une unité au niveau de stock correspondant au grade du produit remanufacturé). Nous nous arrêtons lorsque nous avons parcouru tous les éléments de la liste des produits récupérés.

$$\lfloor (\text{grade actuel}) \times \text{élément}_{jt} \rfloor \quad (\text{IV.25})$$

4. La troisième partie du tableau de codage est utilisée pour construire le cycle hamiltonien pour la période courante en ne considérant que les clients contenus dans l'ensemble E_t . Pour ce faire, nous allons procéder comme suit : nous commençons par initialiser le cycle hamiltonien en ajoutant le centre de remanufacturing comme "ville" de départ. Puisque la table de codage indique un ordre des clients pour la période t en cours, sur la base de cet ordre, nous visiterons les clients contenus dans l'ensemble E_t de sorte que le client d'ordre le plus bas soit ajouté au cycle hamiltonien. Nous passons ensuite au client d'ordre suivant jusqu'à ce que nous ayons visité tous les clients appartenant à l'ensemble E_t . Le cycle hamiltonien est complété par l'ajout du centre de remanufacturing à la fin.

L'ensemble du processus est répété pour toutes les colonnes (périodes) du tableau de codage.

4.1.3 Étape III : Sélection, croisement et mutation

Dans cette partie, nous allons décrire les opérations de sélection, de croisement et de mutation.

— Sélection

Pour chacune des solutions obtenues, nous calculons les valeurs des fonctions objectifs (coût total et empreinte carbone totale). Les solutions sont triées en fronts non dominés en fonction des valeurs des fonctions objectifs. Ainsi, chaque front contient des solutions qui ne sont pas dominées les unes par les autres. Dans le premier front, nous avons des solutions qui ne sont pas du tout dominées, dans le deuxième front, nous avons des solutions qui ne sont dominées que par des solutions du premier front, et ainsi de suite. Un rang est ensuite attribué à chaque individu de la population de telle sorte que les individus du front de Pareto (premier front) sont classés 1, les individus du second front sont classés 2, et ainsi de suite. La fitness est ensuite attribuée aux individus de manière inversement proportionnelle à leur rang respectif. Plus la fitness est élevée, plus l'individu est susceptible d'être sélectionné pour une reproduction ultérieure (à l'aide de l'opération de crossover).

— Croisement

Pour effectuer un croisement, nous sélectionnons deux individus dans la population "Parents" actuelle, et on détermine un point de croisement (entre 1 et h strictement) noté ω . Pour les deux individus sélectionnés, le point de croisement opère sur leurs tables de codage respectives de sorte que nous prenons du premier individu de la première colonne à la colonne ω et du second individu de la colonne $\omega + 1$ à la $h^{\text{ième}}$ colonne. Ainsi, nous construisons une table de codage qui représente un individu "enfant" résultant du croisement de deux individus. À ce stade, la table résultante est interprétée comme décrit dans la deuxième partie de l'étape 2.

Notez que nous avons utilisé un croisement qui coupe le tableau verticalement pour obtenir des ordres aléatoires réalisables dans la première et la troisième partie du tableau.

— Mutation

L'opérateur de mutation apporte une modification au tableau résultant du croisement avec une probabilité p_{mutation} . Cette mutation agit sur deux colonnes de la table de codage choisies au hasard en les inversant.

4.1.4 Étape IV : Construction de la nouvelle génération

Avant de sélectionner les individus qui feront partie de la prochaine population "parents", on calcule les valeurs des fonctions objectifs de la population des "enfants". Ensuite, dans la population

composée des individus "parents" et "enfants", on effectue un tri en fronts non dominés, en commençant par le premier front.

Pour chaque front, si le nombre de solutions est inférieur à la taille de la population, alors on ajoute tous les individus appartenant à ce front à la population de la génération suivante et on passe au front suivant. Dans le cas contraire (le nombre de solutions de ce front est supérieur à la taille de la population), nous calculons la distance d'encombrement pour les individus du front actuel et nous les trions ensuite sur la base de l'opérateur de comparaison d'encombrement. Ainsi, les individus du front actuel ayant la plus grande distance d'encombrement sont sélectionnés un par un jusqu'à ce que la taille de la population de la nouvelle génération soit complète.

4.1.5 Étape V : Condition d'arrêt

Nous définissons pour notre algorithme deux conditions d'arrêt principales :

- Un nombre d'itérations maximum ; et
- L'indisponibilité de stock.

Si l'une des conditions d'arrêt est satisfaite, l'algorithme s'arrête. Sinon, on passe à l'étape III.

4.2 Illustration de l'approche de résolution

Afin d'illustrer et d'expliquer l'approche de solution proposée, nous présentons dans ce qui suit une itération complète de l'algorithme, et tout particulièrement l'étape I, l'étape II et les opérations de mutation et de croisement de l'étape III.

4.2.1 Génération des données et paramètres

Comme paramètres de l'algorithme NGS-II, nous avons choisi une probabilité de mutation de $\frac{1}{3}$. Nous ne considérons que deux individus dans la population. Pour la condition d'arrêt de l'algorithme, nous pouvons choisir de mettre une limite au nombre d'itérations à effectuer. Dans le cas de cet exemple, nous n'allons pas fixer de condition d'arrêt car nous n'appliquons qu'une seule itération.

Comme paramètres du problème, nous considérons $t = 4$ périodes, $p = 5$ produits, $n = 3$ clients, $g = 5$ grades (table IV.2, $C = 3$ composants et $F = 4$ caractéristiques. Les tables IV.3 et IV.4 représentent les paramètres α_{cf} et γ_f , desquels on déduit la table IV.5 selon l'équation IV.6.

La durée de chaque période est donnée dans le tableau IV.6.

Le stock initial est égal à 2 (il y a deux nouveaux produits disponibles en stock au départ).

Les coûts économiques et écologiques liés au stock sont comme suit :

TABLEAU IV.2 – Relation grade/performance

| | | | | | |
|------------|---------|-----------|-----------|-----------|---------|
| Grade | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Intervalle | [8.0;1] | [0.6;0.8[| [0.4;0.6[| [0.2;0.4[| [0;0.2[|

TABLEAU IV.3 – Relation composants/fonctionnalité (α_{cf})

| | | | | |
|-------|------|------|------|------|
| c \ f | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 0.47 | 0.3 | 0 | 0.23 |
| 2 | 0.16 | 0.24 | 0.51 | 0.09 |
| 3 | 0 | 0 | 1 | 0 |

TABLEAU IV.4 – Importance des fonctionnalités (γ_f)

| | | | | |
|------------|------|------|------|------|
| f | 1 | 2 | 3 | 4 |
| γ_f | 0.27 | 0.24 | 0.32 | 0.17 |

TABLEAU IV.5 – Importance des composants (θ_c)

| | | | |
|----------|------|------|------|
| c | 1 | 2 | 3 |
| θ | 0.29 | 0.33 | 0.38 |

TABLEAU IV.6 – Durée des périodes d_t

| | | | | |
|-------|----|----|---|---|
| t | 1 | 2 | 3 | 4 |
| d_t | 30 | 15 | 7 | 4 |

- Nous considérons pour cet exemple que le coût de stockage par unité de temps représente 3% de la valeur du produit stocké. Nous désignons le coût de fabrication d'un nouveau produit par χ et sa valeur est 50. Notons que la meilleure note est la première note ($k = 1$). Le coût de stockage est alors donné par l'équation suivante :

$$CS_{kt} = 0.003 \times \frac{d_t}{k} \times \chi \quad (\text{IV.26})$$

- Nous considérons que l'empreinte carbone du stockage par unité de temps représente 1% de l'empreinte carbone résultant de la fabrication d'un nouveau produit. Nous désignons l'em-

preinte carbone de la fabrication d'un nouveau produit par χ' et sa valeur est de 0,01. Le stockage CO_2 est donné par l'équation suivante :

$$IS_{kt} = 0.0001 \times \frac{d_t}{k} \times \chi' \quad (IV.27)$$

L'ensemble $\varepsilon = \{1, 2, 3, 4\}$ où 4 est le centre de remanufacturing.

La matrice des distances symétrique Δ :

$$\Delta = \begin{pmatrix} 0 & 27 & 43 & 5 \\ 27 & 0 & 15 & 37 \\ 43 & 15 & 0 & 2 \\ 5 & 37 & 2 & 0 \end{pmatrix}$$

Le calcul du coût économique et environnemental du transport est basé sur la consommation moyenne des voitures, nous avons donc :

- $m = 0.1$ unité monétaire par unité de distance.
- $m' = 3 \times 10^{-4} CO_2$ par unité de distance.

Les expressions de fonction utilisées sont les suivantes :

- La fonction $\mathfrak{F}(v) = \ln(1 + v)$ est utilisée pour calculer le taux de diminution de la performance d'un composant et v se réfère à une fréquence d'utilisation.
- La fonction $\mathfrak{D}(d_t) = \sqrt{\frac{d_t}{\sum_{t=1}^h d_t}}$
- La fonction $\mathfrak{H}(v, v') = v' - v$ est utilisée pour calculer le taux de diminution de la capacité de remanufacturing d'un composant, où v et v' se réfèrent respectivement aux performances avant et après les opérations de remanufacturing.
- La fonction $\mathfrak{G}(v) = \lceil v \times g \rceil$ est utilisée pour calculer la note basée sur v qui est une performance
- les fonctions $\Psi(v, v') = (G^{-1}(v') - v) \times \chi$ et $\psi'(v, v') = (G^{-1}(v') - v) \times \chi'$ où v et v' se réfèrent respectivement à la performance avant et à la note après les opérations de reconditionnement
- $\sigma(v, v') = (\sum_{t=1}^h d_t - d_v) \times v' \times \tau$ et $\sigma'(v, v') = (\sum_{t=1}^h d_t - d_v) \times v' \times \tau'$ où τ et τ' sont respectivement le coût d'élimination et CO_2 , v et v' font respectivement référence à une période et à une performance
- $\mu(v, v') = \ln(1 + v \times (1 - v'))$ où v et v' font référence à une fréquence d'utilisation et à une performance respectivement.

Nous supposons que nous avons 3 profils d'utilisation différents pour l'utilisation des produits par les clients. Le premier profil correspond à une faible fréquence d'utilisation (de 0 à 0,33), le deuxième

correspond à une fréquence d'utilisation moyenne (de 0,34 à 0,66) et le dernier correspond à une fréquence d'utilisation élevée (de 0,67 à 1). Nous supposons ici que les profils 1, 2 et 3 sont représentés par les clients 1, 2 et 3 respectivement.

TABLEAU IV.7 – Fréquence d'utilisation (φ_{jt})

| $j \backslash t$ | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------|------|------|------|------|
| 1 | 0.27 | 0.16 | 0.31 | 0.08 |
| 2 | 0.62 | 0.47 | 0.58 | 0.36 |
| 3 | 0.69 | 0.85 | 0.96 | 0.73 |

Les performances et le caractère remanufacturable de chaque composant sont initialisés à 1 (100%).

Les produits 1, 2 et 3 sont attribués respectivement aux clients 1, 2 et 3.

4.2.2 Génération de la population

Maintenant que toutes les données et les paramètres du problème et de l'algorithme ont été définis, nous procédons à la génération de la population.

Les tableaux IV.8, IV.9 représentent deux individus générés.

TABLEAU IV.8 – Parent 1

| $j \backslash t$ | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------|------|------|------|------|
| 1 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 2 | 2 | 1 | 3 | 1 |
| 3 | 3 | 3 | 2 | 3 |
| 1 | 0,38 | 0,48 | 0,49 | 0,10 |
| 2 | 0,64 | 0,76 | 0,69 | 0,66 |
| 3 | 0,72 | 0,58 | 0,75 | 0,41 |
| 1 | 3 | 2 | 1 | 3 |
| 2 | 1 | 1 | 3 | 1 |
| 3 | 2 | 3 | 2 | 2 |

Nous allons expliquer les étapes de l'algorithme pour le parent 1 uniquement.

Avant de commencer à interpréter le codage, nous allons calculer la performance de chaque composant après une période d'utilisation, cette performance est calculée selon une formule extraite de l'équation IV.9.

TABLEAU IV.9 – Parent 2

| $j \backslash t$ | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------|------|------|------|------|
| 1 | 3 | 1 | 3 | 1 |
| 2 | 2 | 3 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 2 | 1 | 3 |
| 1 | 0,74 | 0,62 | 0,45 | 0,73 |
| 2 | 0,07 | 0,57 | 0,70 | 0,52 |
| 3 | 0,53 | 0,78 | 0,36 | 0,16 |
| 1 | 3 | 1 | 3 | 2 |
| 2 | 1 | 2 | 1 | 3 |
| 3 | 2 | 3 | 2 | 1 |

Puisque le client 1 possède le produit 1 ($i = 1$ et $j = 1$) dans la première période ($t = 1$), nous avons les formules suivantes pour calculer la performance des composants du premier produit :

- $\beta_{111} = \beta_{110} - \theta_1 \times \mathfrak{D}(d_1) \times \ln(1 + \varphi_{11})$
- $\beta_{121} = \beta_{120} - \theta_2 \times \mathfrak{D}(d_1) \times \ln(1 + \varphi_{11})$
- $\beta_{131} = \beta_{130} - \theta_3 \times \mathfrak{D}(d_1) \times \ln(1 + \varphi_{11})$

Le tableau IV.10 montre les performances des composants pour chaque produit après une période d'utilisation :

TABLEAU IV.10 – Performance du composant après une période d'utilisation pour le parent 1 (β_{ic1})

| $i \backslash c$ | 1 | 2 | 3 | π_{i1} |
|------------------|------|------|------|------------|
| 1 | 0,95 | 0,94 | 0,93 | 0,94 |
| 2 | 0,90 | 0,88 | 0,87 | 0,88 |
| 3 | 0,89 | 0,87 | 0,85 | 0,87 |

L'interprétation du codage utilisé pour le Parent 1 a procédé période par période comme suit :

1. Selon l'ordre de visite des clients (de la rangée 1 à la rangée 3 et en considérant uniquement la première colonne), nous commençons par le client 1, puis le client 2, et enfin le client 3 (car la position est 1 pour le client 1, 2 pour le client 2 et 3 pour le client 3).
2. Après une période d'utilisation, le produit 1 en possession du client 1 atteint une performance de 0,94. Nous allons vérifier s'il existe un produit en stock dont la performance est supérieure à celle du produit 1. Il y a deux produits (4 et 5) en stock et ils sont tous deux neufs (performance égale à 1). Le produit 4 (avec le plus petit indice) est donc attribué au client 1 et le produit 1 (précédemment utilisé par ce client) est à récupérer.

3. Le produit 2 est utilisé par le client 2 et atteint une performance de 0,88 après une période d'utilisation. Le seul produit disponible en stock a une performance de 1 (supérieure à la performance du produit 2). Le produit 5 est donc affecté au client 2 et le produit 2 est à récupérer.
4. Comme il n'y a plus de produits en stock, le client 3 n'est pas visité, il conserve donc le produit 3 qu'il a déjà.
5. Des opérations précédentes, on déduit l'ensemble E_1 qui représente l'ensemble des clients dont les produits sont récupérés en première période, auquel on ajoute le centre de remanufacturing :

$$E_1 = \{1, 2, 4\}$$

Nous construirons plus tard un cycle hamiltonien à partir de E_1 .

6. Nous passons maintenant aux opérations de remanufacturing : les produits 1 et 2 doivent être remis à neuf et présenter respectivement des performances de 0,94 et 0,88. Pour déterminer la performance à atteindre après les opérations de remanufacturing, nous considérons la première colonne du tableau Parent 1 et les lignes 4, 5 et 6. Comme le produit 1 a été utilisé par le client 1, pour calculer sa nouvelle note, nous allons multiplier la case correspondant à l'intersection de la ligne 4 (ligne du client 1 pour la deuxième partie du tableau de codage) et de la colonne 1 (période 1) par la valorisation du produit ($\mathfrak{G}(0.94) = 1$). On a donc :

$$1 \times 0,38 = 0,38$$

On applique ensuite la fonction plancher supérieur au nombre obtenu. Le grade à atteindre après l'action de remanufacturing est 1, en termes de performance nous prenons la borne supérieure de l'intervalle représentant le grade 1 (performance égale à 1). La performance à atteindre pour chaque composant est alors de 1 ($\beta_{1c2} = 1$ avec $c = 1, 2, 3$).

En suivant la même procédure pour le produit 2, il en résulte que la performance à atteindre après son action de remanufacturing est de 1 (même pour les composants).

7. Concernant l'étape de construction du cycle hamiltonien, nous nous appuyons sur les trois dernières lignes du tableau de codage du Parent 1 en ne considérant que la première colonne pour extraire les informations sur l'ordre à suivre pour la récupération des produits. En partant du centre de remanufacturing, nous récupérons le produit du client 2, puis celui utilisé par le client 1 pour retourner au centre de remanufacturing (comme indiqué sur la figure IV.3).
8. A ce stade, nous calculons la remanufacturabilité de chaque composant de chaque produit récupéré et remanufacturé dans la période 1. Pour le produit 1 :

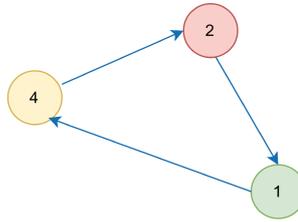


FIGURE IV.3 – Cycle hamiltonien du parent 1 en période 1

$$* \lambda_{111} = \lambda_{110} - \theta_1 \times (\beta_{112} - \beta_{111}) = 1 - 0.29 \times (1 - 0.95) = 0.99$$

$$* \lambda_{121} = \lambda_{120} - \theta_2 \times (\beta_{122} - \beta_{121}) = 1 - 0.33 \times (1 - 0.94) = 0.98$$

$$* \lambda_{131} = \lambda_{130} - \theta_3 \times (\beta_{132} - \beta_{131}) = 1 - 0.38 \times (1 - 0.93) = 0.97$$

L'indice total de remanufacturabilité du produit 1 est alors :

$$\rho_{11} = \theta_1 \times \lambda_{111} + \theta_2 \times \lambda_{121} + \theta_3 \times \lambda_{131} = 0.29 \times 0.99 + 0.33 \times 0.98 + 0.38 \times 0.97 = 0.98$$

En suivant les mêmes étapes de calcul, on obtient pour le produit 2 un indice de remanufacturabilité $\rho_{21} = 0.96$.

Pour les autres produits, l'indice de remanufacturabilité ne change pas (égal à 1).

9. À la fin de la première période, nous calculons le coût économique généré par chacune des opérations effectuées :

— Coût de stockage des produits : nous avons stocké deux produits de qualité 1 pendant 30 unités de temps, selon la formule suivante IV.26 :

$$CS_{11} = 2 \times 0.01 \times \frac{30}{1} \times 50 = 30$$

— Le coût de remise à neuf : nous avons remis à neuf deux produits, le premier d'une performance de 0,94 à 1, et le second d'une performance de 0,88 à 1 :

$$CR = [(1 - 0.94) + (1 - 0.88)] \times 50 = 9$$

— Coût de récupération (transport) : Le cycle de récupération est le suivant : le centre de remanufacturing, le clien 2, le client 1 et nous revenons au centre de remanufacturing. Nous prélevons les coûts correspondant de la matrice Δ , et nous obtenons :

$$CT = (37 + 27 + 5) \times 0.01 = 6.9$$

10. Ensuite, de la même manière, nous calculons l'empreinte carbone :

— Empreinte carbone du stockage :

$$IS_{11} = 2 \times 0.01 \times \frac{30}{1} \times 0.001 = 0.0006$$

— Empreinte carbone du reconditionnement :

$$IR = [(1 - 0.94) + (1 - 0.88)] \times 0.001 = 9$$

— Empreinte carbone de la récupération (transport) :

$$IT = (37 + 27 + 5) \times 0.0003 = 0.02$$

— Empreinte carbone de l'élimination des produits : aucun produit n'est éliminé à cette période, l'empreinte carbone de l'élimination est nulle.

En suivant la même procédure pour les autres périodes (2, 3 et 4), les résultats obtenus sont résumés dans les tableaux suivants :

— Dans le tableau IV.11, nous avons l'affectation des produits aux clients telle que dans la période d'initialisation, les produits 1, 2, et 3 sont affectés respectivement aux clients 1, 2, et 3. Puis, après une période, on récupère les produits 1 et 2 du client 1 et 2, on les remplace par les produits 4 et 5 respectivement. Dans la deuxième période, les produits 4 et 5 sont récupérés auprès des clients 1 et 2 et sont remplacés par les produits 2 et 1 respectivement. Dans la troisième période, les produits 2 et 3 sont récupérés auprès des clients 1 et 3 et sont remplacés par les produits 4 et 5 respectivement. Dans la dernière période, les produits 4 et 1 sont récupérés auprès des clients 1 et 2 et sont remplacés par les produits 3 et 2 respectivement.

TABLEAU IV.11 – affectation clients/produits

| j \ t | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 4 | 2 | 4 | 3 |
| 2 | 2 | 5 | 1 | 1 | 2 |
| 3 | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 |

— La tableau IV.13 montre les performances totales des produits à travers les périodes. Par exemple, le produit 1 est neuf au début, après une période d'utilisation, sa performance atteint 0.94, il est récupéré et remanufacturé et a une performance égale à 1 dans la deuxième période, puis il est utilisé pendant deux périodes et il atteint une performance égale à 0.94 à la fin de la dernière période. Le tableau IV.14 donne plus de détails et montre les performances de chaque composant des produits.

TABLEAU IV.12 – Performance des produits

| i \ t | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------|---|------|------|------|------|
| 1 | 1 | 0.94 | 1 | 0.95 | 0.94 |
| 2 | 1 | 0.88 | 1 | 0.97 | 1 |
| 3 | 1 | 0.87 | 0.76 | 0.68 | 1 |
| 4 | 1 | 1 | 0.97 | 1 | 0.99 |
| 5 | 1 | 1 | 0.93 | 1 | 0.95 |

TABLEAU IV.13 – Performance des composants

| i | c \ t | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|-------|---|------|------|------|------|
| 1 | 1 | 1 | 0.95 | 1 | 0.95 | 0.95 |
| | 2 | 1 | 0.94 | 1 | 0.95 | 0.94 |
| | 3 | 1 | 0.93 | 1 | 0.94 | 0.93 |
| 2 | 1 | 1 | 0.90 | 1 | 0.97 | 1 |
| | 2 | 1 | 0.88 | 1 | 0.97 | 1 |
| | 3 | 1 | 0.87 | 1 | 0.96 | 1 |
| 3 | 1 | 1 | 0.89 | 0.8 | 0.73 | 1 |
| | 2 | 1 | 0.87 | 0.76 | 0.68 | 1 |
| | 3 | 1 | 0.85 | 0.73 | 0.64 | 1 |
| 4 | 1 | 1 | 1 | 0.98 | 1 | 0.99 |
| | 2 | 1 | 1 | 0.97 | 1 | 0.99 |
| | 3 | 1 | 1 | 0.97 | 1 | 0.99 |
| 5 | 1 | 1 | 1 | 0.94 | 1 | 0.96 |
| | 2 | 1 | 1 | 0.93 | 1 | 0.95 |
| | 3 | 1 | 1 | 0.92 | 1 | 0.94 |

- Le tableau IV.14 représente l'indice de remise à neuf des produits à travers les périodes. Par exemple, le produit 1 commence avec une remise à neuf totale (égale à 1), elle atteint 0.98 après la première remise à neuf à la fin de la première période, puis elle atteint 0.95 dans la dernière période après la deuxième remise à neuf. Le tableau IV.15 donne plus de détails et montre l'évolution de la remise à neuf au niveau des composants pour chaque produit.

TABLEAU IV.14 – remise à neuf des produits

| i \ t | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------|---|------|------|------|------|
| 1 | 1 | 0.98 | 0.98 | 0.98 | 0.95 |
| 2 | 1 | 0.96 | 0.96 | 0.94 | 0.94 |
| 3 | 1 | 1 | 1 | 0.89 | 0.89 |
| 4 | 1 | 1 | 0.99 | 0.99 | 0.98 |
| 5 | 1 | 1 | 0.98 | 0.98 | 0.98 |

TABLEAU IV.15 – Remise à neuf des composants

| i | c \ t | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|-------|---|------|------|------|------|
| 1 | 1 | 1 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.97 |
| | 2 | 1 | 0.98 | 0.98 | 0.98 | 0.96 |
| | 3 | 1 | 0.97 | 0.97 | 0.97 | 0.94 |
| 2 | 1 | 1 | 0.97 | 0.97 | 0.96 | 0.96 |
| | 2 | 1 | 0.96 | 0.96 | 0.95 | 0.95 |
| | 3 | 1 | 0.95 | 0.95 | 0.93 | 0.93 |
| 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.92 | 0.92 |
| | 2 | 1 | 1 | 1 | 0.89 | 0.89 |
| | 3 | 1 | 1 | 1 | 0.86 | 0.86 |
| 4 | 1 | 1 | 1 | 0.99 | 0.99 | 0.98 |
| | 2 | 1 | 1 | 0.99 | 0.99 | 0.98 |
| | 3 | 1 | 1 | 0.99 | 0.99 | 0.98 |
| 5 | 1 | 1 | 1 | 0.98 | 0.98 | 0.98 |
| | 2 | 1 | 1 | 0.98 | 0.98 | 0.98 |
| | 3 | 1 | 1 | 0.97 | 0.97 | 0.97 |

- Les tableaux IV.16 et IV.17 représentent les coûts économiques et environnementaux respectivement et montrent les coûts pour le stockage, la remise à neuf, les opérations de transport et les coûts totaux. Comme aucun produit n'est éliminé au cours d'une période donnée, les coûts d'élimination sont égaux à 0.

TABLEAU IV.16 – Coûts économiques

| Coûts \ i | 1 | 2 | 3 | 4 | Coût total |
|-----------------|-----|-----|------|------|------------|
| Stockage | 9 | 4.5 | 2.25 | 1.12 | 83.07 |
| Remanufacturing | 9 | 5 | 18.5 | 8 | |
| Transport | 6.9 | 6.9 | 5 | 6.9 | |

TABLEAU IV.17 – Coûts environnementaux

| Coûts \ i | 1 | 2 | 3 | 4 | Coût total |
|---------------|-------|--------|---------|--------|------------|
| Stockage | 0.003 | 0.0015 | 0.00075 | 0.0004 | 0.089 |
| Remise à neuf | 0.001 | 0.001 | 0.004 | 0.002 | |
| Transport | 0.02 | 0.02 | 0.015 | 0.02 | |

4.2.3 Croisement et mutation

Nous allons expliquer les opérations de croisement et de mutation effectuées sur les deux individus Parent 1 et Parent 2 (nous supposons que ce sont les deux individus sélectionnés pour un

croisement).

Nous déterminons d'abord un point de croisement (un nombre généré aléatoirement parmi 1, 2 ou 3). Nous supposons que ce nombre est 1, le point de croisement se situe donc entre la colonne 1 et la colonne 2 de Parent 1 et Parent 2. Le croisement est effectué selon le schéma présenté dans la figure [IV.4](#).

La mutation se produit avec une probabilité de $\frac{1}{3}$. Pour l'appliquer, il suffit de choisir un nombre aléatoire réel entre 0 et 1. Si ce nombre est supérieur à la probabilité de mutation alors l'enfant ne change pas. Sinon, la mutation se fait en inversant deux colonnes (choisies au hasard) du tableau enfant.

Nous supposons que dans cet exemple, la mutation est faite sur l'enfant en inversant les colonnes 2 et 4. Le résultat de la mutation est donné dans la figure suivante : [IV.5](#).

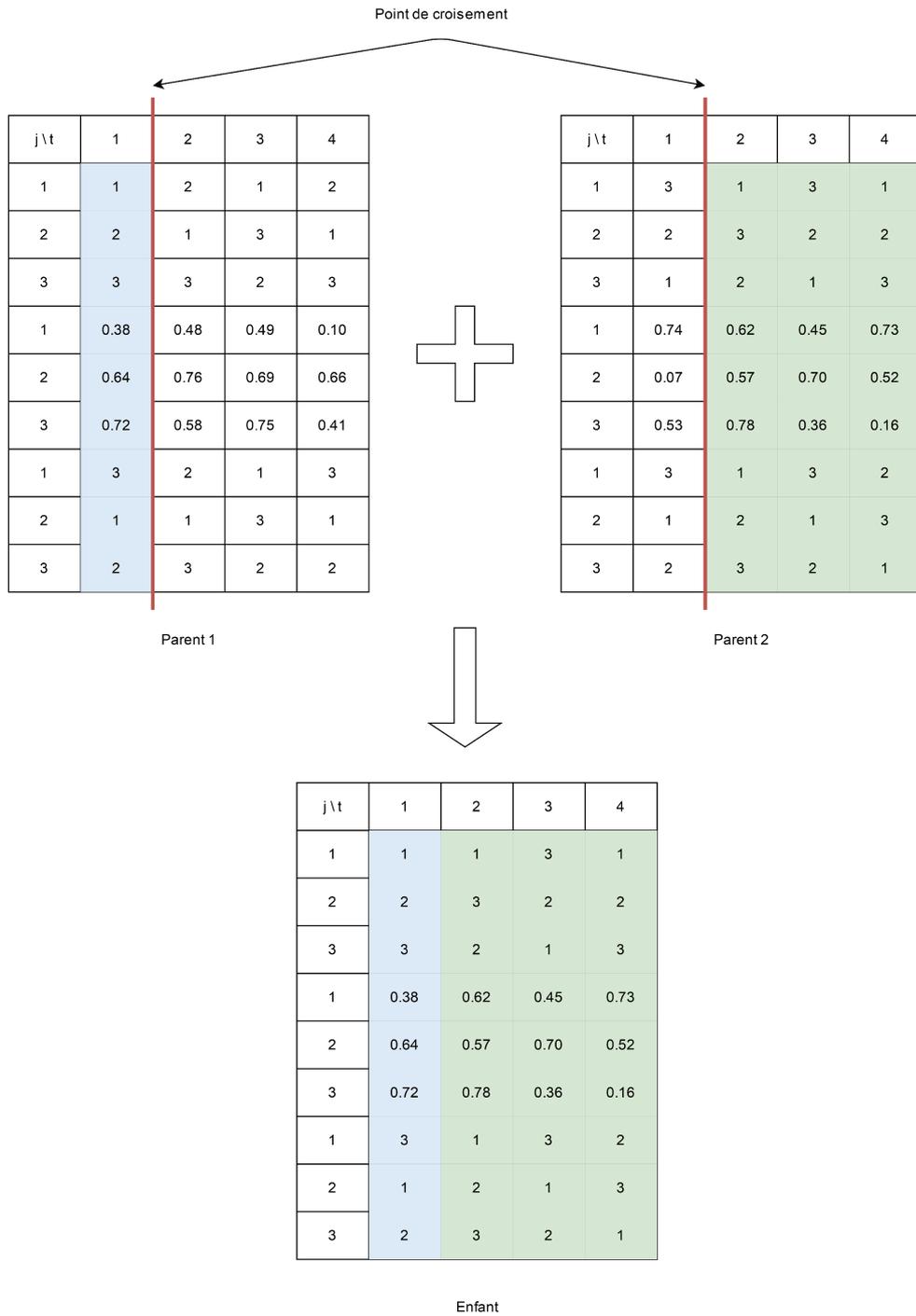


FIGURE IV.4 – Schéma du croisement

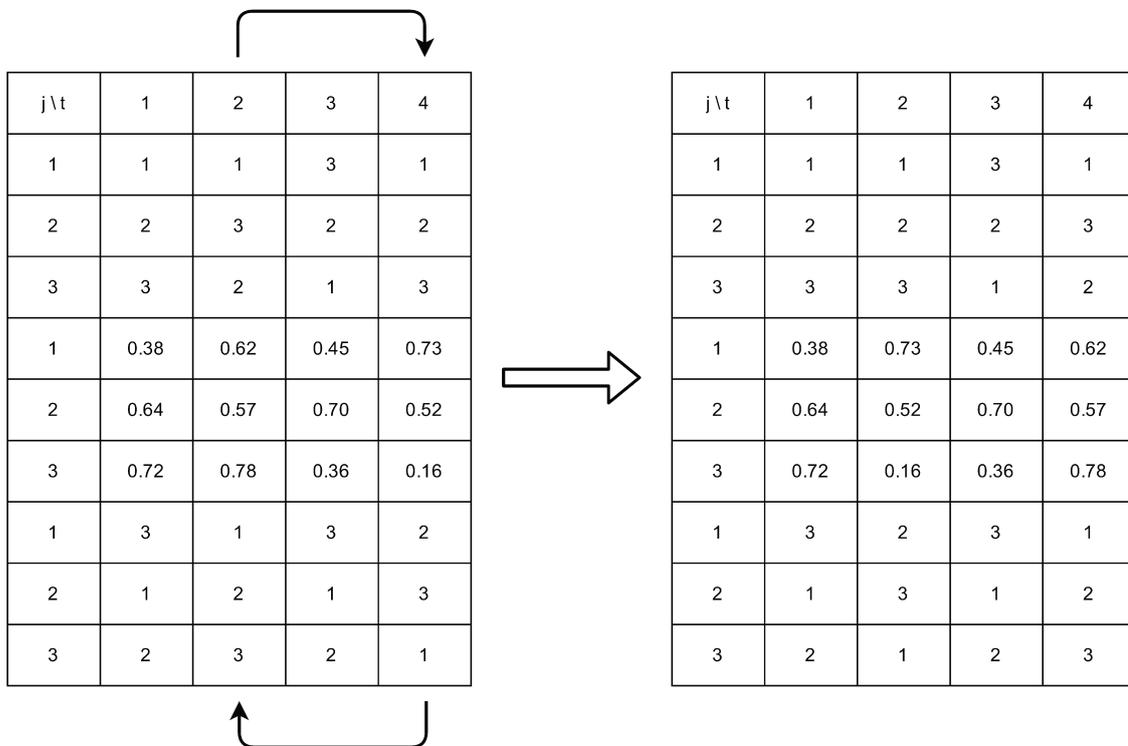


FIGURE IV.5 – Opération de mutation

5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur les avantages économiques et écologiques du re-manufacturing. Dans ce contexte, nous combinons trois problèmes bien connus dans la littérature : le problème de taille de lot, le problème d'allocation et le problème du vendeur itinérant, afin de trouver la meilleure stratégie de re-manufacturing qui prolonge la durée de vie des produits et réduit également les coûts économiques et environnementaux.

En effet, lorsqu'un produit est utilisé, ses performances décroissent et après un certain temps, le produit atteint sa fin de vie. Les opérations de re-manufacturing à titre préventif permettent de prolonger la durée de vie et l'utilisation des produits. Cependant, la diminution de la performance d'un produit dépend de la performance de ses composants et de leur implication dans les différentes fonctionnalités liées à l'utilisation d'un produit. Dans ce cadre, nous définissons une formule permettant de calculer la performance d'un produit à partir de la performance de ses composants et de la fréquence d'utilisation du produit.

De plus, on retrouve l'aspect dimensionnement de lots dans la prise de décision concernant les produits à récupérer (combien ? et lesquels ?). En conséquence, et pour assurer la continuité de l'utilisation des produits par les clients, nous remplaçons les produits sélectionnés pour la récupération en

leur attribuant d'autres produits parmi ceux disponibles en stock.

Aussi, le problème étudié intègre le problème du voyageur de commerce pour le transport des produits récupérés. En considérant le centre de remanufacturing comme une ville de départ et d'arrivée, nous optimisons la tournée entre les clients sélectionnés pour la récupération. Lorsqu'un produit est récupéré, il atteint un grade spécifique (déduit de sa performance). Le remanufacturing améliore la qualité, et la décision à prendre à ce niveau est de savoir quelle qualité atteindre après la remise à neuf.

Une formulation mathématique décrivant le problème est présentée, prenant en compte la minimisation des coûts économiques et environnementaux comme objectifs. Nous proposons également une adaptation de la métaheuristique NSGA-II à notre problème. Nous verrons une application de l'approche de résolution dans le chapitre dédié aux exemples numériques.

Chapitre V

Expérimentation numérique : cas des smartphones

Résumé

Les smartphones présentent les produits électronique les plus utilisés et les plus reconditionnés à leur fin d'utilisation. Pour mieux montrer l'applicabilité des approches de résolutions proposées, nous nous intéressons, dans ce chapitre, à leurs applications sur le cas des smartphones.

Pour chacune des problématiques décrites dans les précédents chapitres précédents, nous avons proposé une approche de résolution. Nous allons ainsi présenter les résultats obtenus chaque approche. Dans un premier temps, on s'intéresse aux résultats obtenus par l'adaptation de l'algorithme NSGA-II à la première problématique. Dans un deuxième temps, on s'intéresse aux résultats obtenus par l'heuristique de problématique étendue qui permet de construire un plan de récupération et de remise à neuf selon deux stratégies de remanufacturing, en prenant en compte les performances des produits et les profils d'utilisation des clients. Une analyse de sensibilité de la variation de l'horizon, des périodes et du stock initial est également présentée. Pour finir, on s'intéresse aux résultats obtenus par l'adaptation de NSGA-II à la troisième problématique intégrant l'optimisation du transport. Nous présenterons également l'évolution des composants des produits tout le long de l'horizon.

1 Introduction

Les smartphones sont de nos jours les appareils électroniques les plus utilisés dans la vie quotidienne, et leur durée de vie moyenne comprise entre 18 et 24 mois. En effet, les utilisateurs sont amenés à les changer en fin de vie, et à acheter des nouveaux smartphones de dernière génération, augmentant ainsi les déchets électroniques. Afin de réduire les impacts environnementaux qui en découlent, nous nous intéressons dans ce chapitre à étendre la durée de vie des smartphones en les récupérant puis en les remettant à neuf.

Dans un rapport sur les produits reconditionnés en France publié par statista, les smartphones sont les appareils électroniques les plus reconditionnés en France. Comme le montre la figure V.1, 45% des smartphones en fin d'utilisation sont récupérés pour être reconditionnés. De plus, selon une autre étude, 58% des Français sont prêts à acheter un smartphone reconditionné à condition que le reconditionnement est fait par un professionnel. Leurs principales motivations sont le prix abordable et le respect de l'environnement.

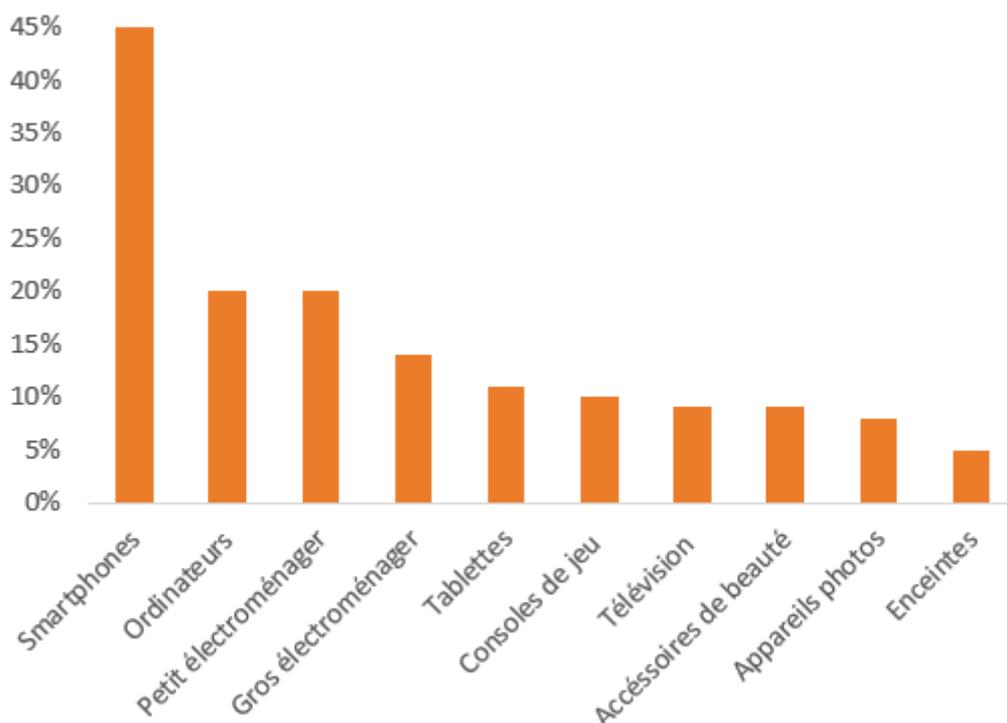


FIGURE V.1 – Pourcentage de reconditionnement de différents articles

Nous commencerons par présenter les résultats obtenus pour la première approche proposée sur la première problématique décrite. Nous poursuivons ensuite avec l'extension de la première problématique qui prend en compte les profils des utilisateurs, ainsi que les performances et les grades

des produits. Nous comparerons à travers une expérience numérique les résultats obtenus des deux stratégies de remanufacturing proposées dans l'heuristique décrite. Nous terminons par une présentation des résultats de la problématique étendue comprenant les performances des composants des produits et l'étape de l'optimisation du transport intégré dans l'approche proposée.

2 Exemple numérique 1

Pour illustrer l'applicabilité de l'approche proposée dans le chapitre II, nous proposons l'expérience numérique suivante :

nous choisissons l'instance de test suivante :

- La taille de la population est de 100;
- Les grades des articles vont de 1 jusqu'à 5 avec comme meilleur grade le 1 et comme grade le fin de vie le 6 (au grade 5, un produit est toujours fonctionnel);
- Nous traitons avec 20 clients; et
- L'horizon est composé de 10 périodes.

Après 50 itérations, l'algorithme donne le front de Pareto représenté dans le "Tableau V.1". Pour les coûts, nous prenons en compte les coûts de transport, les coûts de stockages des produits récupérés pour remise à neuf et les coûts de remanufacturing. Pour l'impact carbone, nous prenons en compte l'impact carbone de transport, de stockage des produits récupérés pour remise à neuf, d'utilisation et de remanufacturing.

| Solution | Coût | CO ₂ |
|----------|--------------------|-----------------|
| 1 | 3.37×10^6 | 1.277841 |
| 2 | 3.40×10^6 | 1.194243 |
| 3 | 3.21×10^6 | 1.327462 |
| 4 | 3.27×10^6 | 1.307982 |
| 5 | 3.41×10^6 | 1.192820 |

TABLEAU V.1 – Front de Pareto

Le grade moyen par client correspondant à la solution donnée dans la première ligne du "Tableau V.1" est présentée dans la "Fig. V.2" calculée à partir de l'interprétation des résultats montrés dans le "Tableau V.10".

Dans le "Tableau V.3", nous retrouvons pour chaque période, le grade du produit qui est en cours d'utilisation par chacun des clients.

| | Période 1 | Période 2 | Période 3 | Période 4 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Client 1 | 0 | 0.25 | 0 | 0.88 |
| Client 2 | 0 | 0 | 0.68 | 0 |
| Client 3 | 0 | 0.13 | 0.91 | 0.14 |
| Client 4 | 0 | 0.57 | 0 | 0 |
| Client 5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Client 6 | 0 | 0.53 | 0 | 0 |
| Client 7 | 0 | 0.78 | 0 | 0.95 |
| Client 8 | 0 | 0 | 0.73 | 0 |
| Client 9 | 0 | 0 | 0.61 | 0 |
| Client 10 | 0 | 0 | 0.61 | 0.82 |
| Client 11 | 0 | 0.20 | 0 | 0 |
| Client 12 | 0 | 0 | 0.83 | 0.40 |
| Client 13 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Client 14 | 0 | 0 | 0.14 | 0.09 |
| Client 15 | 0 | 0.47 | 0.63 | 0.72 |
| Client 16 | 0 | 0.11 | 0.95 | 0.51 |
| Client 17 | 0 | 0.94 | 0.79 | 0.29 |
| Client 18 | 0 | 0.39 | 0 | 0 |
| Client 19 | 0 | 0.89 | 0 | 0 |
| Client 20 | 0 | 0 | 0 | 0 |

TABLEAU V.2 – Chromosome de la solution 1 du front de Pareto pour quatre périodes

Le "Tableau V.4" présente le nombre de produits récupérés par grade. Lors de la première période, il n'y a pas de récupération (période de démarrage). Après une période d'utilisation, tous les produits en possession des clients passent au grade 2 (après chaque période, le grade d'un produit utilisé augmente et décroît d'une unité), nous retrouvons alors 11 produits de grade 2 récupérés. Pendant la période 3, nous récupérons 4 produits de grade 2 et 6 produits de grade 3. Pour la période 4, 6 produits de grade 2 et 3 produits de grade 3 sont récupérés. Notons qu'il n'y a pas de produits de grade 1 à récupérer (car il s'agit du meilleur grade et après une période d'utilisation, il passe au grade suivant) et le grade minimum pour une récupération est de 2.

| | Période 1 | Période 2 | Période 3 | Période 4 |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Grade 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Grade 2 | 0 | 11 | 4 | 6 |
| Grade 3 | 0 | 0 | 6 | 3 |

TABLEAU V.4 – Le nombre de produits récupérés par grade

"Tableau V.5 représente le nombre de produits des différents grades obtenus après les opérations

| | Période 1 | Période 2 | Période 3 | Période 4 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Client 1 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| Client 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Client 3 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Client 4 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| Client 5 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Client 6 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| Client 7 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| Client 8 | 1 | 2 | 2 | 3 |
| Client 9 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Client 10 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| Client 11 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| Client 12 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| Client 13 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Client 14 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| Client 15 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Client 16 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Client 17 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Client 18 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| Client 19 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| Client 20 | 1 | 2 | 3 | 4 |

TABLEAU V.3 – Les grades des produits utilisés par les clients

de remise à neuf :

- Pour la deuxième période, les 11 produits de grade 2 récupérés sont remis à neuf au grade 1.
- Pour la troisième période, 7 produits de grade 2 et 3 produits de grade 3 sont remis à neuf au grade 1, et 3 produits de grade 3 sont remis à neuf au grade 2.
- Pour la quatrième période, 6 produits de grade 2 et un produit de grade 3 sont remis à neuf au grade 1, et 2 produit de grade 3 sont remis à neuf au grade 2.

| | Période 1 | Période 2 | Période 3 | Période 4 |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Grade 1 | 0 | 11 | 7 | 7 |
| Grade 2 | 0 | 0 | 3 | 2 |

TABLEAU V.5 – Nombre de produits par grade après remanufacturing

La "Figure V.2 représente le grade moyen des produits qui ont été utilisés par les différents clients tout le long de l'horizon. On remarque que le grade moyen est égale à 1 pour le 17ème client et il est égal à presque 5 pour le 13ème client, et pour les autres clients, elle varie de presque 2 à 3. Cela

signifie que l'algorithme cherche un compromis acceptable comme solution à notre problème. En effet, pour certains clients, la solution est de ne pas récupérer l'article pendant plusieurs périodes et lorsqu'une récupération est faite, l'article remplacé est de moindre grade, et pour d'autres, les articles sont plus souvent récupérés ce qui implique que ces clients utilisent des articles qui ont de bons grades.

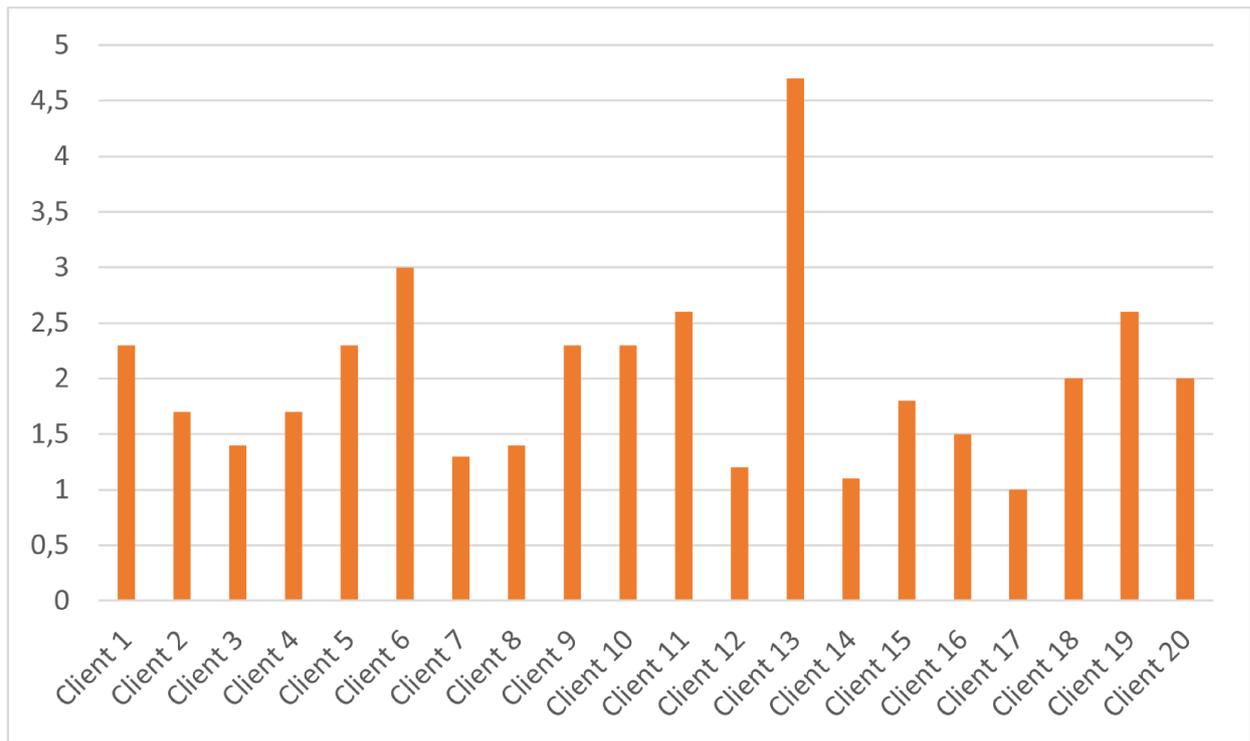


FIGURE V.2 – Le grade moyen par client sur les 10 périodes de l'horizon

Le grade des produits utilisés par les différents est, en moyenne, entre 2 et 3. Ce niveau de grade n'aurait pas été atteint sans la politique de remplacement et de remise à neuf des produits utilisés que nous avons proposée. En effet, étant donné que le grade de fin de vie est le 6, après 5 périodes d'utilisation un produit atteint sa fin de vie, et sur un horizon de 10 périodes avec 20 clients, à la fin de cet horizon, 40 produits atteindront leur fin de vie. Les clients sont alors amenés à acquérir des produits nouvellement fabriqués, ce qui augmentera, pour le fabricant, les coûts économiques et environnementaux issus du processus de production et de la gestion des produits en fin de vie.

3 Exemple numérique 2

Nous appliquons l'approche de résolution présentée dans la deuxième problématique afin de voir l'impact des profils des clients sur les décisions de récupération et de remise à neuf.

3.1 Données du problème

Pour montrer l'applicabilité de l'heuristique proposée en chapitre 3, nous proposons dans cette section une expérience numérique, dans laquelle nous analysons le remanufacturing des smartphones de 100 clients sur un horizon de 5 ans de 20 périodes, réparties comme détaillé dans le tableau V.6.

Le stock initial est composé de 20 smartphones neufs. Chaque produit (smartphone) peut être dans l'un des 7 grade considérées : neuf, comme neuf, très bon état, bon état, état correct, état d'usage, et mauvais état.

TABLEAU V.6 – Durées des périodes

| Périodes | Durée (jours) | Début | Fin |
|----------|---------------|---------|---------|
| 1 | 182.5 | 0 | 182.5 |
| 2 | 182.5 | 182.5 | 365 |
| 3 | 121.66 | 365 | 486.66 |
| 4 | 121.66 | 486.66 | 608.33 |
| 5 | 121.66 | 608.33 | 730 |
| 6 | 91.25 | 730 | 821.25 |
| 7 | 91.25 | 821.25 | 912.5 |
| 8 | 91.25 | 912.5 | 1003.75 |
| 9 | 91.25 | 1003.75 | 1095 |
| 10 | 73 | 1095 | 1168 |
| 11 | 73 | 1168 | 1241 |
| 12 | 73 | 1241 | 1314 |
| 13 | 73 | 1314 | 1387 |
| 14 | 73 | 1387 | 1460 |
| 15 | 60.83 | 1460 | 1520.83 |
| 16 | 60.83 | 1520.83 | 1581.66 |
| 17 | 60.83 | 1581.66 | 1642.5 |
| 18 | 60.83 | 1642.5 | 1703.33 |
| 19 | 60.83 | 1703.33 | 1764.16 |
| 20 | 60.83 | 1764.16 | 1825 |

Les données relatives aux clients sont les suivantes :

- Chaque client a un numéro d'identification unique (dans cette expérience de 1 à 100).
- Un client est caractérisé par un profil modélisé par une fréquence d'utilisation comprise entre : 20% et 30%, 30% et 40%, 40% et 50%, 50% et 60% ou 60% et 70%.

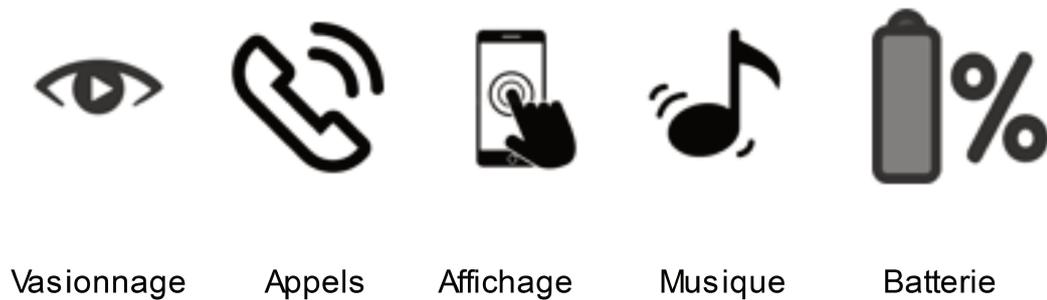


FIGURE V.3 – Fonctionnalités d'un smartphone considérées dans notre exemple

— Chaque client est affecté au centre de collecte le plus proche pour la récupération.

Les données suivantes sont liées aux produits :

- Un produit est identifié par un numéro unique compris entre 1 et 120.
- Un produit est constitué de 5 fonctionnalités : visionnage, appels, affichage, musique et batterie, comme indiqué dans la figure V.3.
- L'importance des caractéristiques est présentée dans le tableau V.7.

| Fonctionnalités | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------|------|------|------|------|------|
| Importance | 0.10 | 0.24 | 0.31 | 0.01 | 0.34 |

TABEAU V.7 – Importance des fonctionnalités

— L'état d'un produit prend les valeurs -1 si le produit est stocké ou le numéro d'identification du client qui l'utilise. Un autre état est possible, lorsqu'un produit est récupéré et pas encore remis à neuf, la valeur de l'état dans ce cas est -2. Enfin, on considère l'état -3 lorsque le produit atteint sa fin de vie (la contrainte de remanufacturabilité n'est pas respectée).

Les données relatives aux centres de collecte sont les suivantes :

- Nous considérons 21 centres de collecte.
- Le centre de remanufacturing correspond au 21^{ème} centre de collecte.
- Les distances entre les centres de collecte sont détaillées dans le tableau V.8.

Le processus de remanufacturing des smartphones est basé sur deux stratégies de remanufacturing : complète (SRC) et minimale (SRM). Dans la première stratégie, les produits récupérés sont remis à neuf au grade le plus élevé, indépendamment de leur grade actuel, tandis que dans la seconde

| | | | | | | | | | | | |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Centres | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 1 | 0 | 30 | 18.6 | 22.2 | 135 | 82.4 | 66.7 | 58.4 | 24.5 | 47.4 | 48.1 |
| 2 | 30 | 0 | 13.2 | 49.4 | 150 | 91.2 | 44.5 | 82.6 | 58.6 | 69.7 | 72.4 |
| 3 | 18.6 | 13.2 | 0 | 37.6 | 119 | 78.9 | 49.6 | 70.7 | 46.7 | 57.8 | 68.2 |
| 4 | 22.2 | 49.4 | 37.6 | 0 | 76.5 | 60.6 | 86.2 | 79.9 | 38.2 | 67.4 | 59.7 |
| 5 | 135 | 150 | 119 | 76.5 | 0 | 52.8 | 121 | 178 | 104 | 165 | 140 |
| 6 | 82.4 | 91.2 | 78.9 | 60.6 | 52.8 | 0 | 57.9 | 133 | 109 | 120 | 130 |
| 7 | 66.7 | 44.5 | 49.6 | 86.2 | 121 | 57.9 | 0 | 119 | 95 | 106 | 116 |
| 8 | 58.4 | 82.6 | 70.7 | 79.9 | 178 | 133 | 119 | 0 | 54.8 | 21.5 | 45.6 |
| 9 | 24.5 | 58.6 | 46.7 | 38.2 | 104 | 109 | 95 | 54.8 | 0 | 34.6 | 24.1 |
| 10 | 47.4 | 69.7 | 57.8 | 67.4 | 165 | 120 | 106 | 21.5 | 34.6 | 0 | 31.4 |
| 11 | 48.1 | 72.4 | 68.2 | 59.7 | 140 | 130 | 116 | 45.6 | 24.1 | 31.4 | 0 |
| Centres | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 |
| 12 | 0 | 56 | 88.6 | 54.1 | 83.8 | 80.3 | 50 | 82.1 | 179 | 51.4 | 32.5 |
| 13 | 56 | 0 | 150 | 87.6 | 29.6 | 47.7 | 33.4 | 71.2 | 205 | 50.2 | 70 |
| 14 | 88.6 | 150 | 0 | 54.1 | 175 | 212 | 140 | 151 | 174 | 135 | 91.5 |
| 15 | 54.1 | 87.6 | 54.1 | 0 | 111 | 151 | 100 | 132 | 194 | 66.1 | 76.2 |
| 16 | 83.8 | 29.6 | 175 | 111 | 0 | 71.9 | 64.9 | 104 | 229 | 56 | 93.7 |
| 17 | 80.3 | 47.7 | 212 | 151 | 71.9 | 0 | 28.4 | 28.6 | 183 | 104 | 79.9 |
| 18 | 50 | 33.4 | 140 | 100 | 64.9 | 28.4 | 0 | 39.4 | 188 | 74.4 | 52 |
| 19 | 82.1 | 71.2 | 151 | 132 | 104 | 28.6 | 39.4 | 0 | 151 | 114 | 64 |
| 20 | 179 | 205 | 174 | 194 | 229 | 183 | 188 | 151 | 0 | 219 | 133 |
| 21 | 51.4 | 50.2 | 135 | 66.1 | 56 | 104 | 74.4 | 114 | 219 | 0 | 84.1 |
| 22 | 32.5 | 70 | 91.5 | 76.2 | 93.7 | 79.9 | 52 | 64 | 133 | 84.1 | 0 |

TABLEAU V.8 – Distances entre les centres de collecte

stratégie, les appareils sont remis à neuf au grade directement supérieur à leur grade au moment de la récupération.

Comme le montre les figures V.4 et V.5, l'indice de remanufacturabilité sera influencé par le niveau de remise à neuf, c'est-à-dire l'effort de remanufacturing effectué sur le smartphone, en fonction de la performance enregistrée avant l'action de remise à neuf. Dans cette stratégie, la remanufacturabilité des smartphones risque de prendre fin plus vite que dans la stratégie minimale.

3.2 Discussion des résultats

3.2.1 Stratégie de remanufacturing complet

Comme mentionné ci-dessus, l'horizon commence avec 20 nouveaux produits (smartphones) stockés. A chaque période, 20 produits sont collectés et remanufacturés. Ainsi, l'indice de remanufacturabilité (initialement égal à 1) de ces produits remanufacturés diminue. Par exemple, dans la période

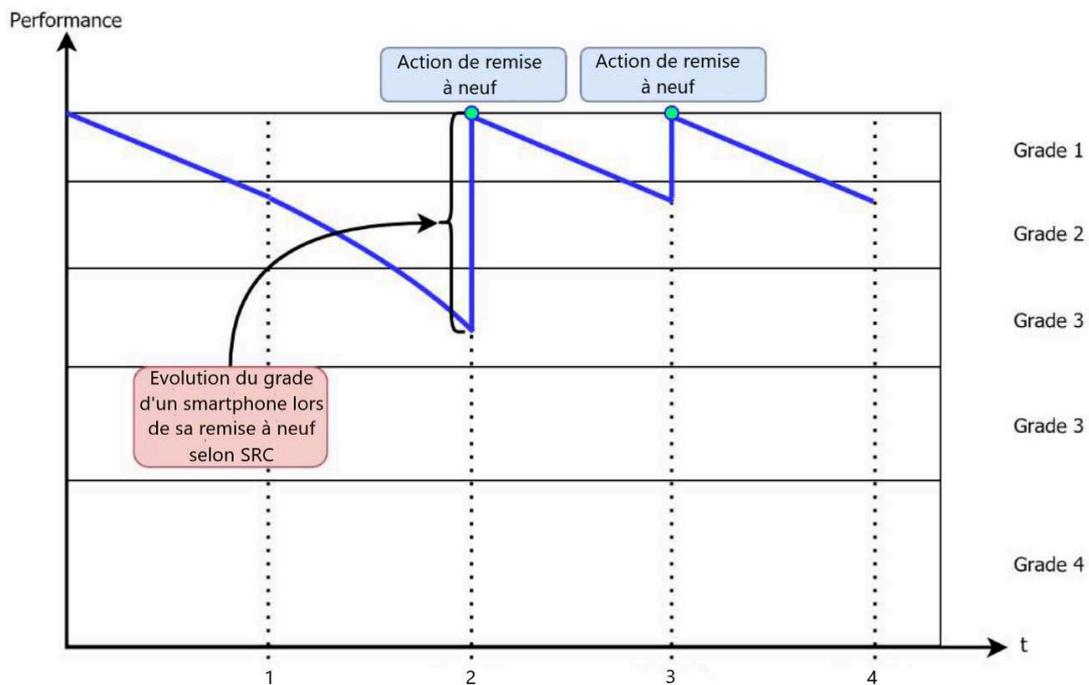


FIGURE V.4 – Exemple de l'évolution de la performance d'un smartphone selon la stratégie de remanufacturing complet

12th, le smartphone du client 13 atteint un indice de remanufacturabilité égal à 0 après plusieurs opérations de remanufacturing. En fait, le smartphone est récupéré après avoir été utilisé pendant 4 périodes. Comme l'indice de remanufacturabilité est égal à 0, le téléphone ne peut pas être remanufacturé une autre fois et il est envoyé au recyclage.

Nous remarquons qu'à partir de la période 17, certains smartphones atteignent leur fin de cycle de vie. En effet, un smartphone est envoyé au recyclage à la période 17, 7 autres smartphones à la période 18, et 6 à la période 19. Ainsi, à la fin de l'horizon, nous n'avons plus que deux smartphones (Tableau V.9).

Afin d'analyser le comportement des clients, nous effectuons une comparaison entre 5 clients ayant deux profils d'utilisation (comportement) différents. Les clients considérés sont : 1, 3, 6, 18 et 31 correspondant à une fréquence d'utilisation moyenne égale à 65,26%, 54,52%, 44,94%, 35,81% et 24,76% respectivement. Nous analysons ci-dessous les performances des smartphones utilisés par ces clients, c'est-à-dire utilisés respectivement sous une fréquence d'utilisation très élevée, élevée, moyenne, faible et très faible. Les résultats sont présentés dans les figures V.6, V.7, V.8, V.9 et V.10.

D'après les figures V.6, V.7, V.8, V.9 et V.10, nous constatons que :

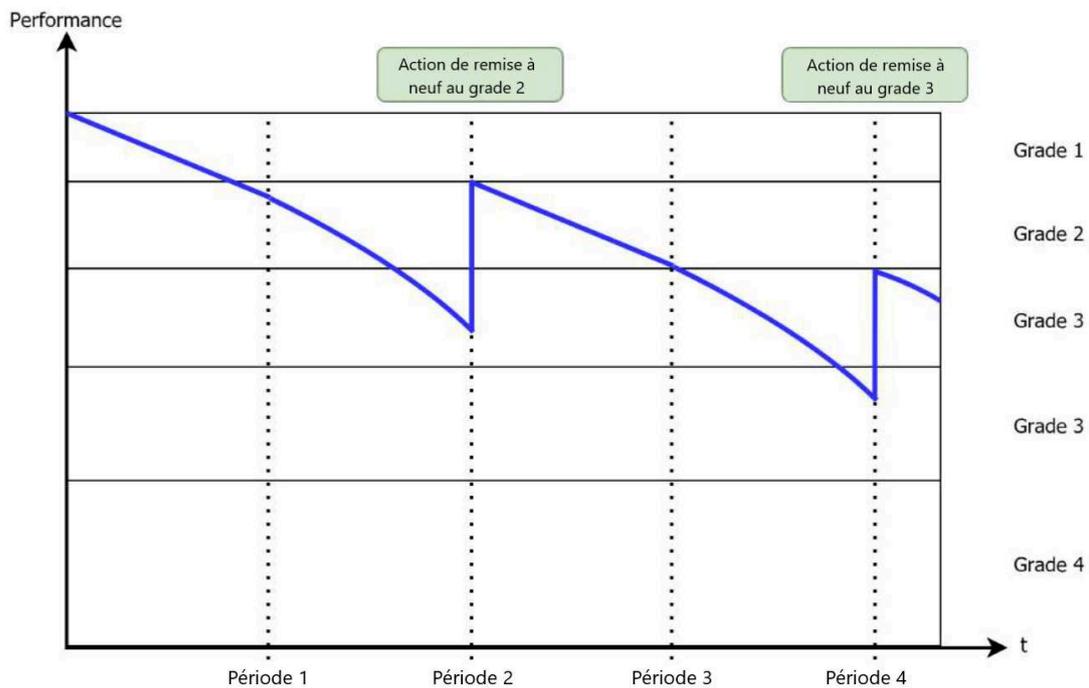


FIGURE V.5 – Exemple de l'évolution de la performance d'un smartphone selon la stratégie de remanufacturing minimal

- Il y a 5 récupérations pour les clients à fréquence d'utilisation très élevée et élevée, et 4 récupérations pour les clients à fréquence d'utilisation moyenne, faible et très faible.
- La période de la première récupération dépend du profil d'utilisation des clients. En effet, lorsque la fréquence d'utilisation est élevée, la période de première récupération est précoce. Lorsque nous avons la même période de première récupération pour deux profils d'utilisation différents, nous remarquons que la performance du téléphone est plus faible pour le client ayant une fréquence d'utilisation plus élevée. Par exemple, pour les clients à fréquence d'utilisation moyenne et faible, la première récupération a lieu dans la période 4 et les performances de leurs téléphones respectifs sont d'environ 30% et 40%.
- La pire performance est atteinte avec le smartphone utilisé avec une fréquence d'utilisation très élevée. En effet, à la fin de la période 5, ce smartphone atteint le grade 5 avec une performance égale à 35% (Figure V.6).

Étant donné qu'un smartphone peut être utilisé par différents clients au cours des différentes périodes en raison du processus de récupération et de remanufacturing, nous comparons ici deux smartphones, utilisés avec une fréquence d'utilisation moyenne égale à 51,65 (fréquence la plus éle-

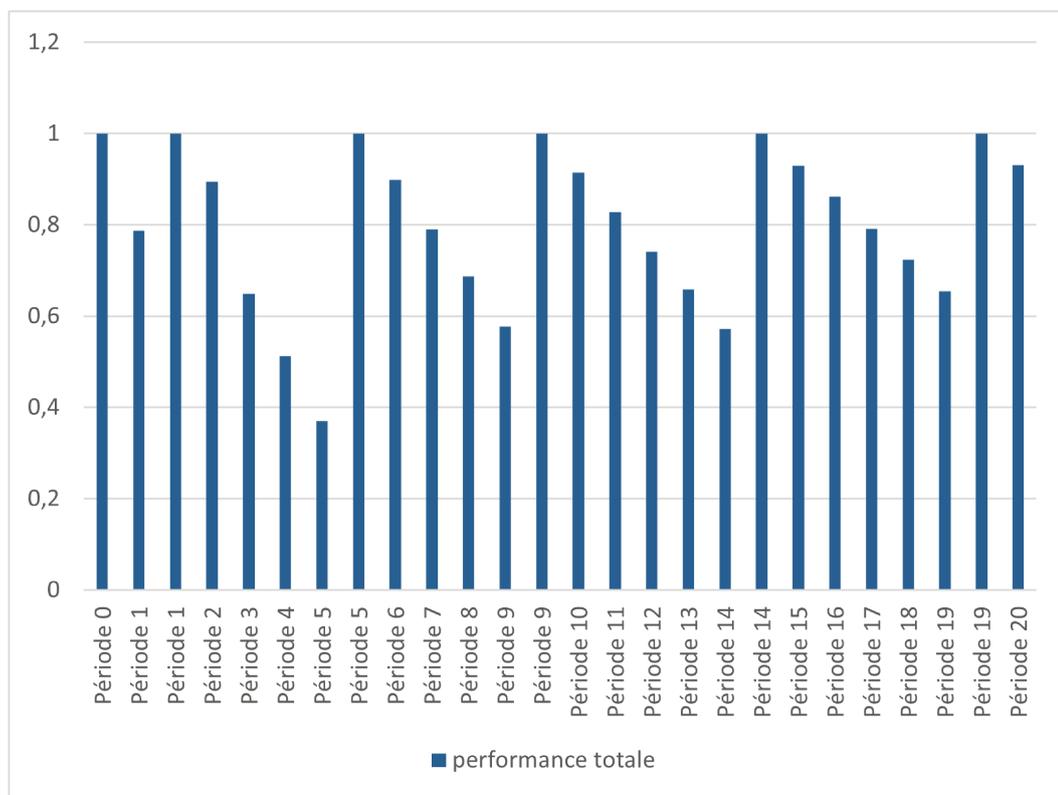


FIGURE V.6 – Performance des téléphones utilisés par le client 1 selon la SRM

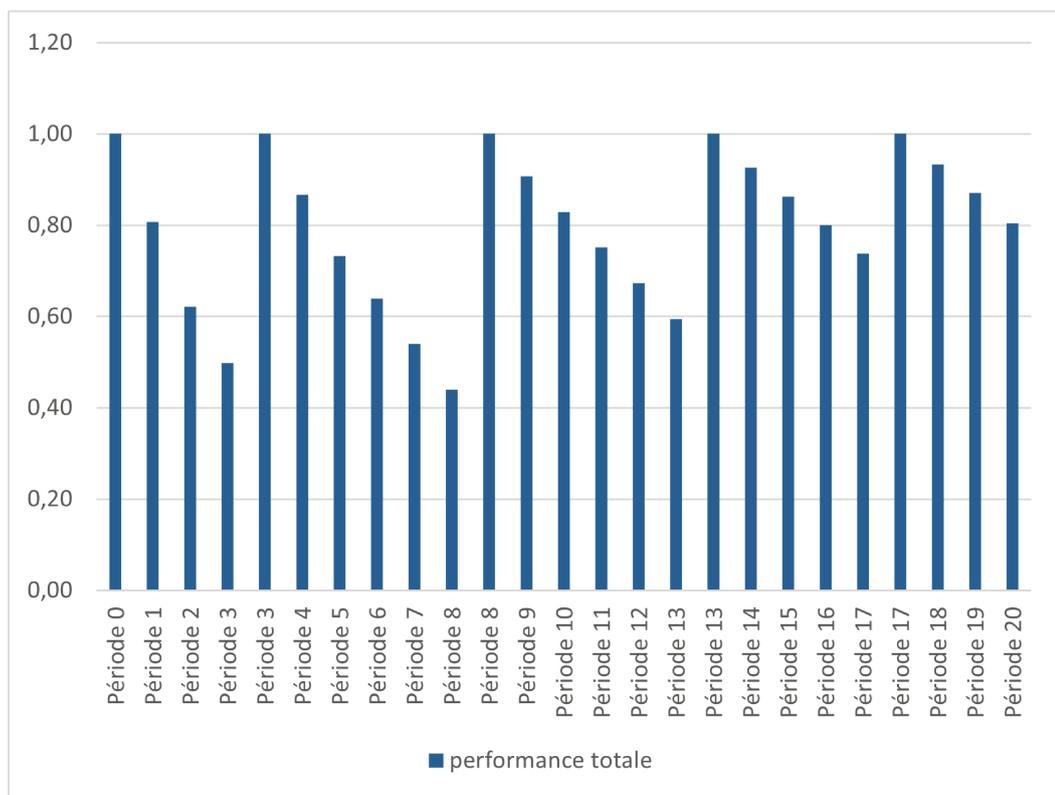


FIGURE V.7 – Performance des téléphones utilisés par le client 3 selon la SRM

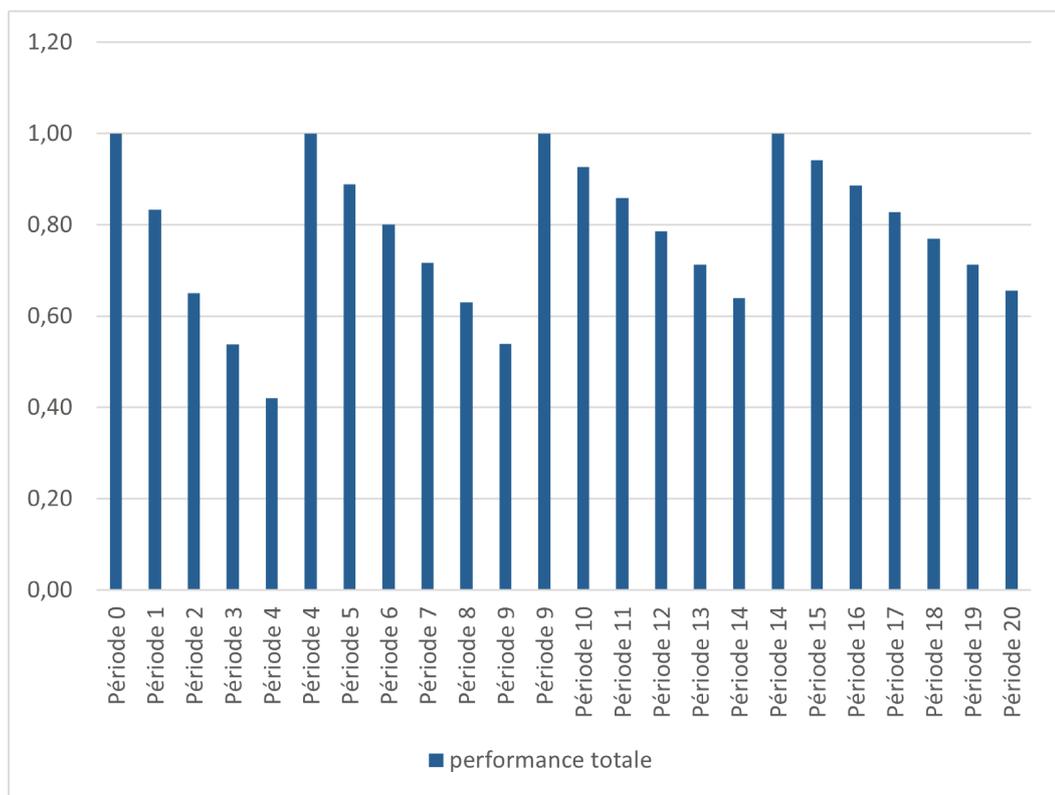


FIGURE V.8 – Performance des téléphones utilisés par le client 6 selon la SRM

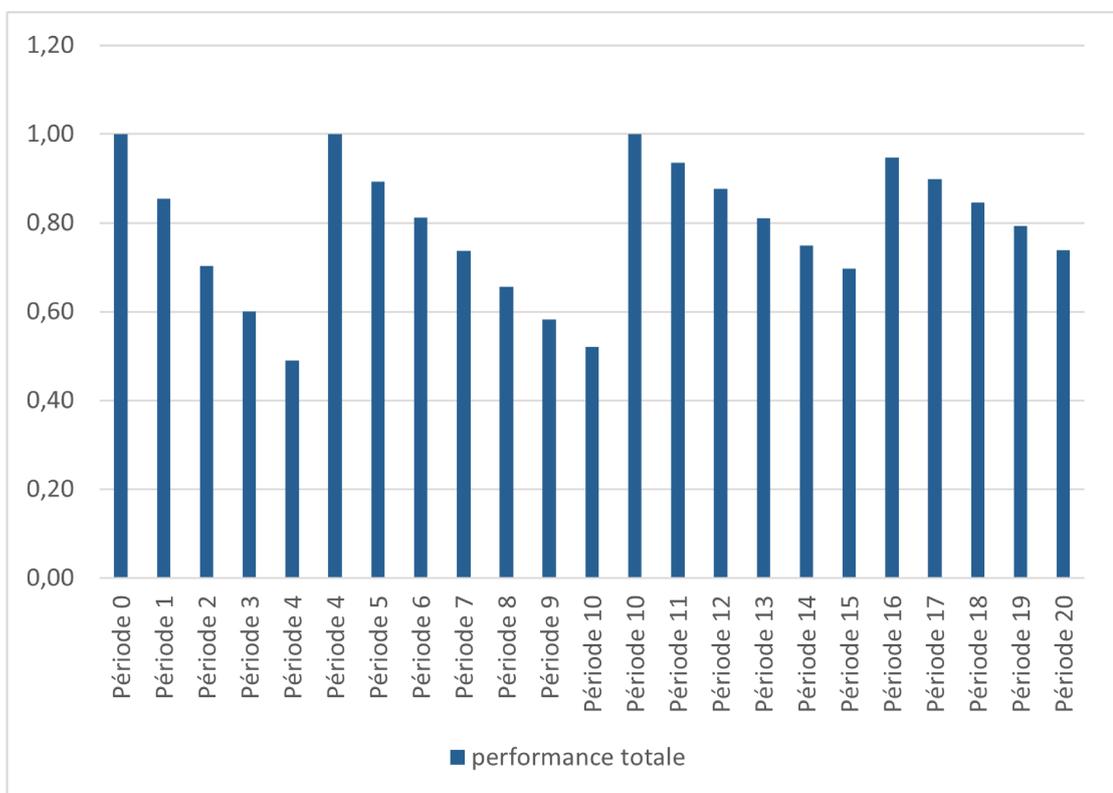


FIGURE V.9 – Performance des téléphones utilisés par le client 18 selon la SRM

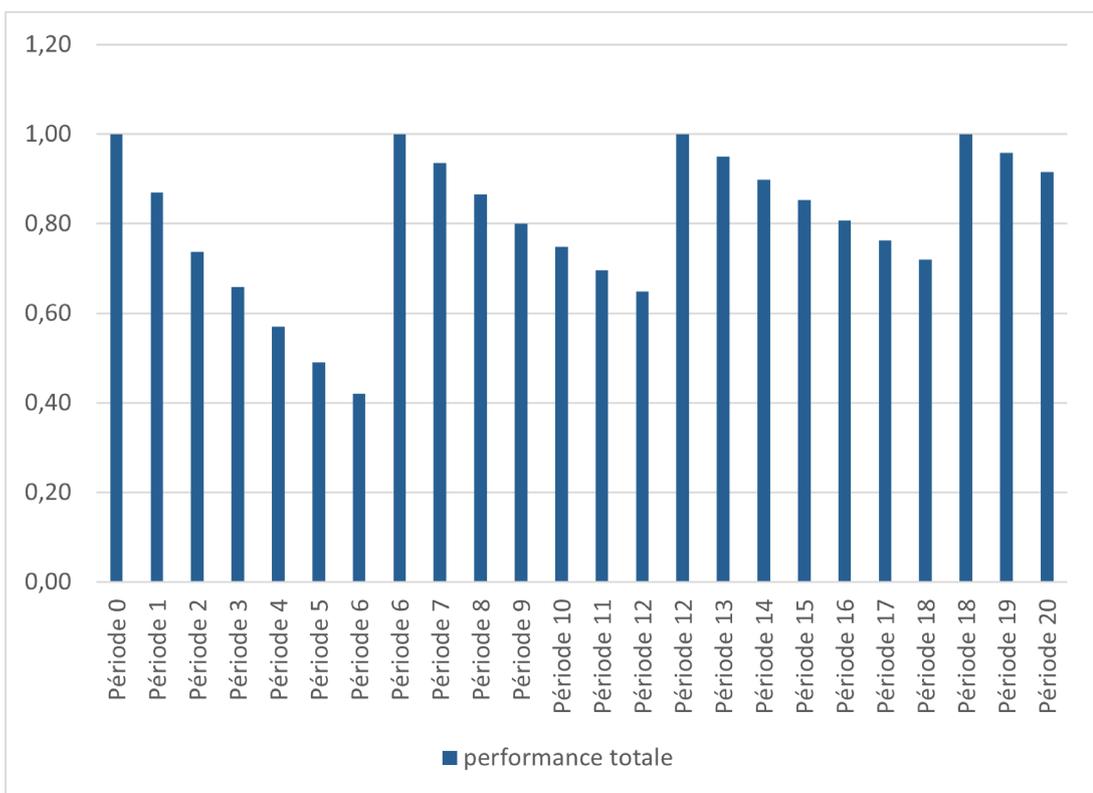


FIGURE V.10 – Performance des téléphones utilisés par le client 31 selon la SRM

| Périodes | Grades | | | | | | | Total |
|----------|--------|---|---|---|---|---|---|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| 0 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| 1 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| 2 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| 3 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| 4 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| 5 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| 6 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| 7 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| 8 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| 9 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| 10 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| 11 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| 12 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| 13 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| 14 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| 15 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| 16 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| 17 | 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19 |
| 18 | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12 |
| 19 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 |
| 20 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |

TABLEAU V.9 – Variation de l'état du stock

vée) et 26,48 (fréquence la plus faible) respectivement.

En raison des fréquences d'utilisation moyennes, nous remarquons les différents progrès des performances des smartphones. En outre, les figures V.11 et V.12 montrent une différence significative de l'intervalle de récupération. Même si le nombre de récupérations est le même pour les deux produits (3 récupérations), les périodes de récupération se produisent dans les périodes 2, puis 8, et 14 pour le téléphone utilisé avec une fréquence d'utilisation moyenne et haute, et dans les périodes 6, 11, et 19 pour le téléphone utilisé avec une fréquence d'utilisation haute et faible. Il y a au moins un écart de trois périodes pour chaque récupération.

3.2.2 Stratégie de remanufacturing minimal

Comme la stratégie précédente, l'horizon commence avec 20 nouveaux produits (smartphones) stockés. A chaque période, 20 produits sont collectés et remis à neuf. La variation du niveau de stock de chaque catégorie est présentée dans le tableau V.10.

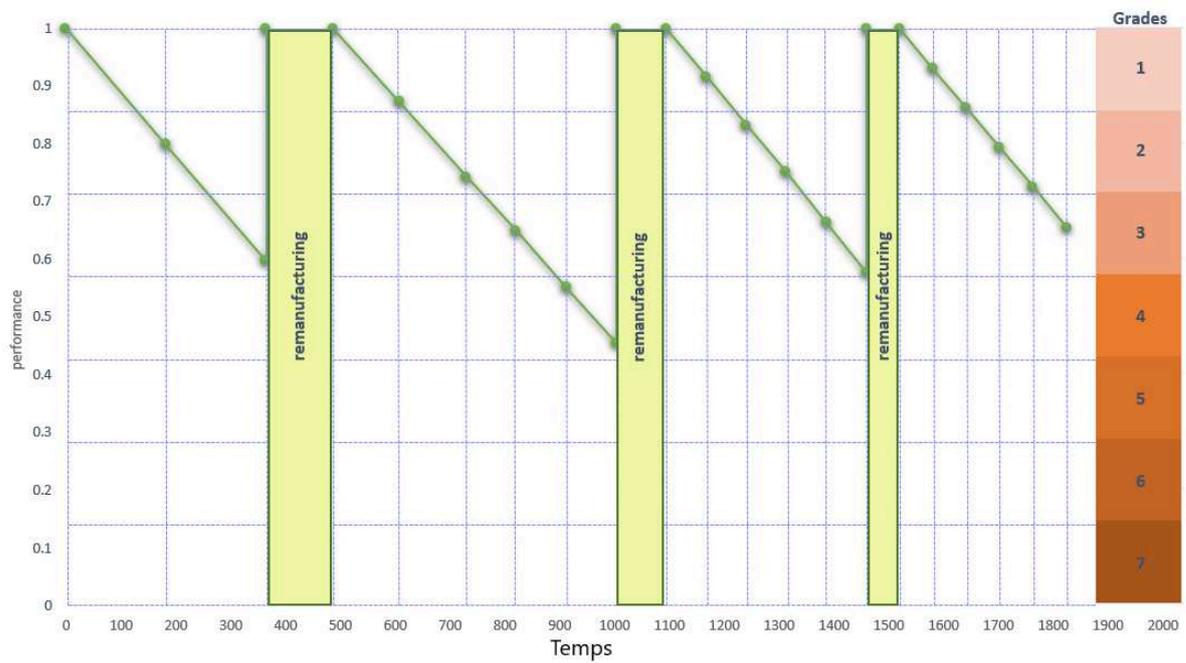


FIGURE V.11 – Performance d’un smartphone utilisé haute et moyenne fréquences

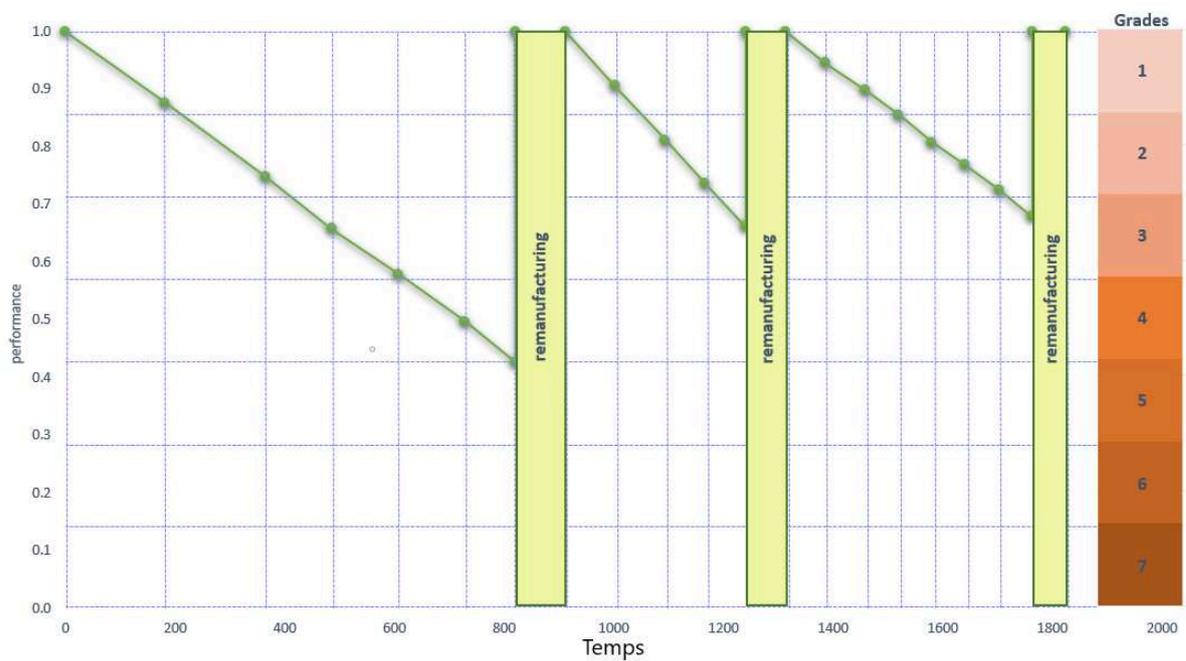


FIGURE V.12 – Performance d’un smartphone utilisé haute et basse fréquences

Contrairement à la stratégie de remanufacturing complet, à la fin de la stratégie de remanufacturing minimal, tous les smartphones sont prêts à être utilisés et nous avons 20 articles de grade 6 disponibles en stock.

TABLEAU V.10 – Variation du niveau de stock - Stratégie de remanufacturing minimal

| Périodes | Grades | | | | | | | Total |
|----------|--------|----|----|----|----|----|---|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| 0 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| 1 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| 2 | 0 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| 3 | 0 | 0 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| 4 | 0 | 0 | 15 | 5 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| 5 | 0 | 0 | 2 | 18 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| 6 | 0 | 0 | 2 | 18 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 20 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 20 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 5 | 15 | 0 | 0 | 20 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 0 | 0 | 20 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 0 | 0 | 20 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 0 | 0 | 20 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 0 | 0 | 20 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 5 | 0 | 20 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 11 | 0 | 20 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 0 | 20 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 12 | 0 | 20 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 15 | 0 | 20 |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 0 | 20 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 0 | 20 |

À la fin de l'horizon, l'indice de remanufacturabilité des téléphones est positif et tous les téléphones sont prêts à être réutilisés.

1. Analyse du comportement des clients

Dans cette stratégie, nous analysons les mêmes clients que dans la stratégie SRC.

D'après les figures [V.13](#), [V.14](#), [V.15](#), [V.16](#) et [V.17](#) :

- Il y a 5 récupérations pour les clients à très haute et haute fréquence d'utilisation, 4 récupérations pour le client à haute fréquence d'utilisation, et 3 récupérations pour les clients à moyenne, basse et très basse fréquence d'utilisation.
- Pour les clients à fréquence d'utilisation moyenne et faible, la première récupération a lieu dans la période 4 et les performances de leurs téléphones respectifs sont d'environ 40% et 50%.

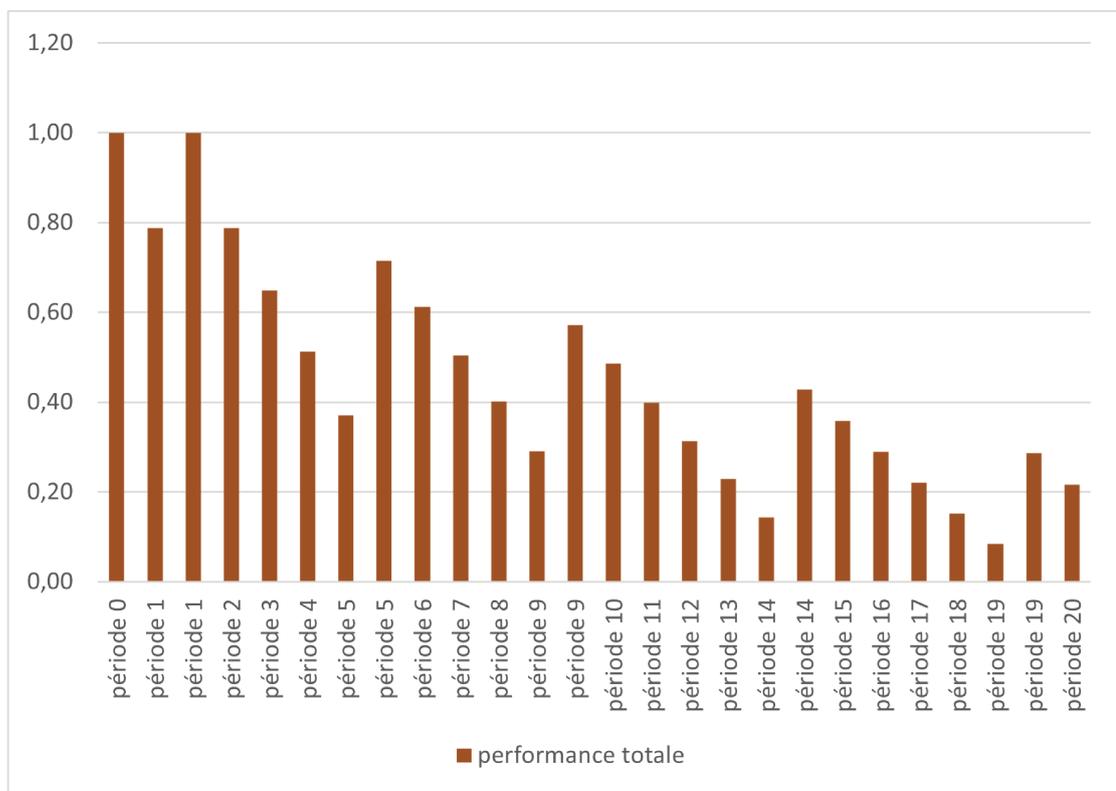


FIGURE V.13 – Performance des téléphones utilisés par le client 1 selon la SRC

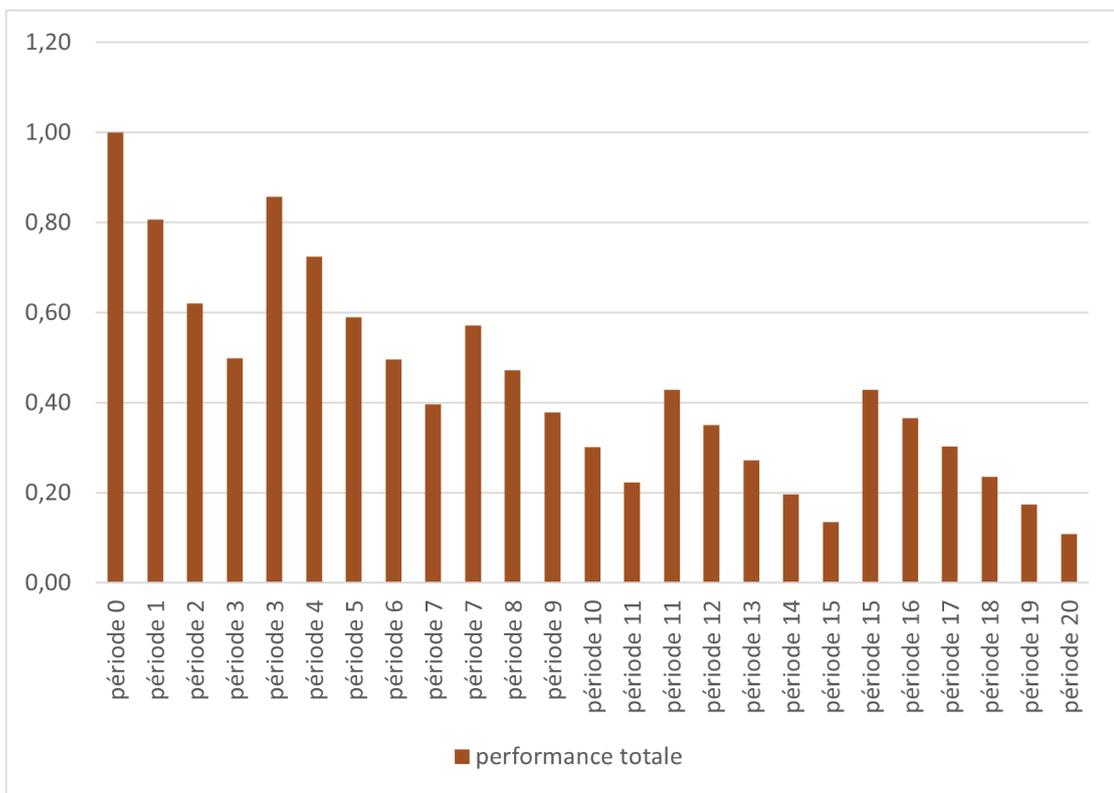


FIGURE V.14 – Performance des téléphones utilisés par le client 3 selon la SRC

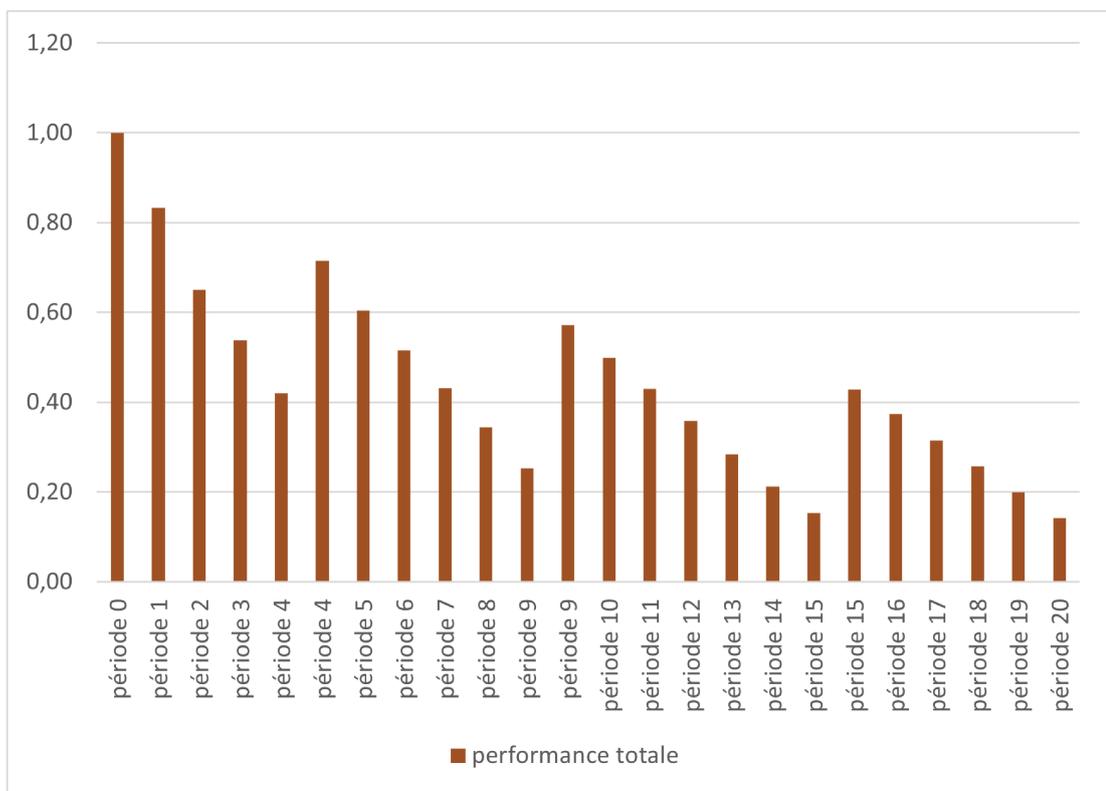


FIGURE V.15 – Performance des téléphones utilisés par le client 6 selon la SRC

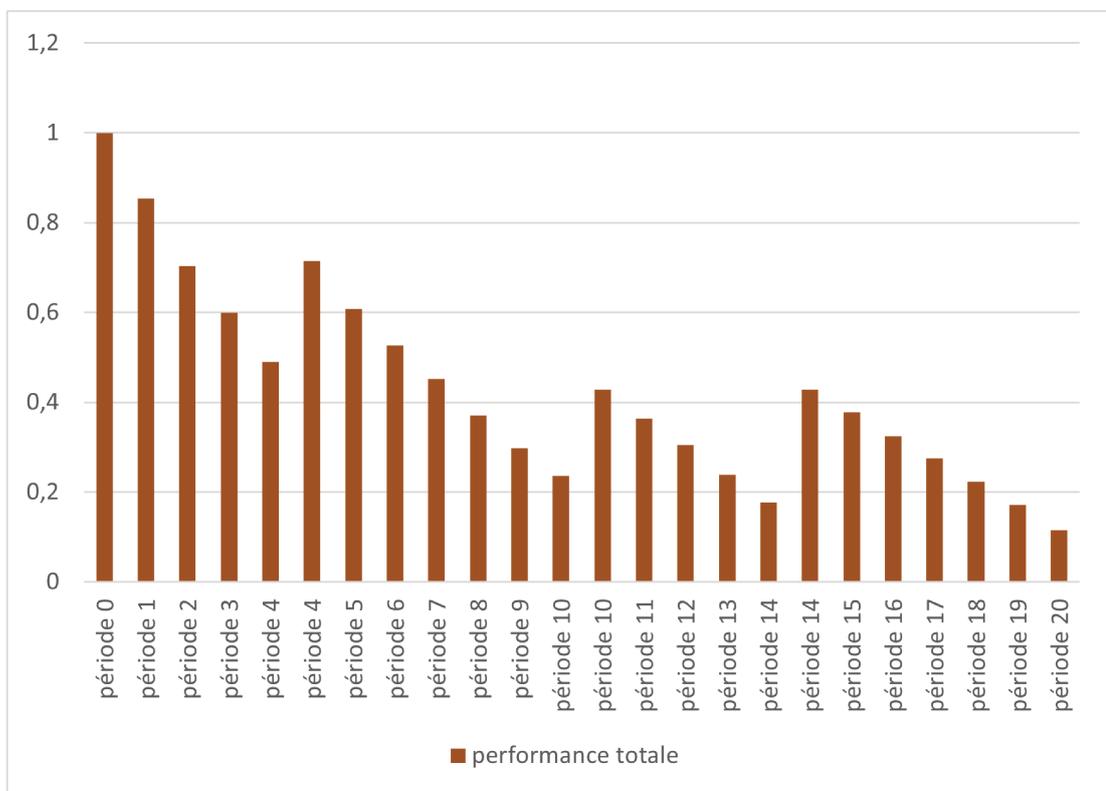


FIGURE V.16 – Performance des téléphones utilisés par le client 18 selon la SRC

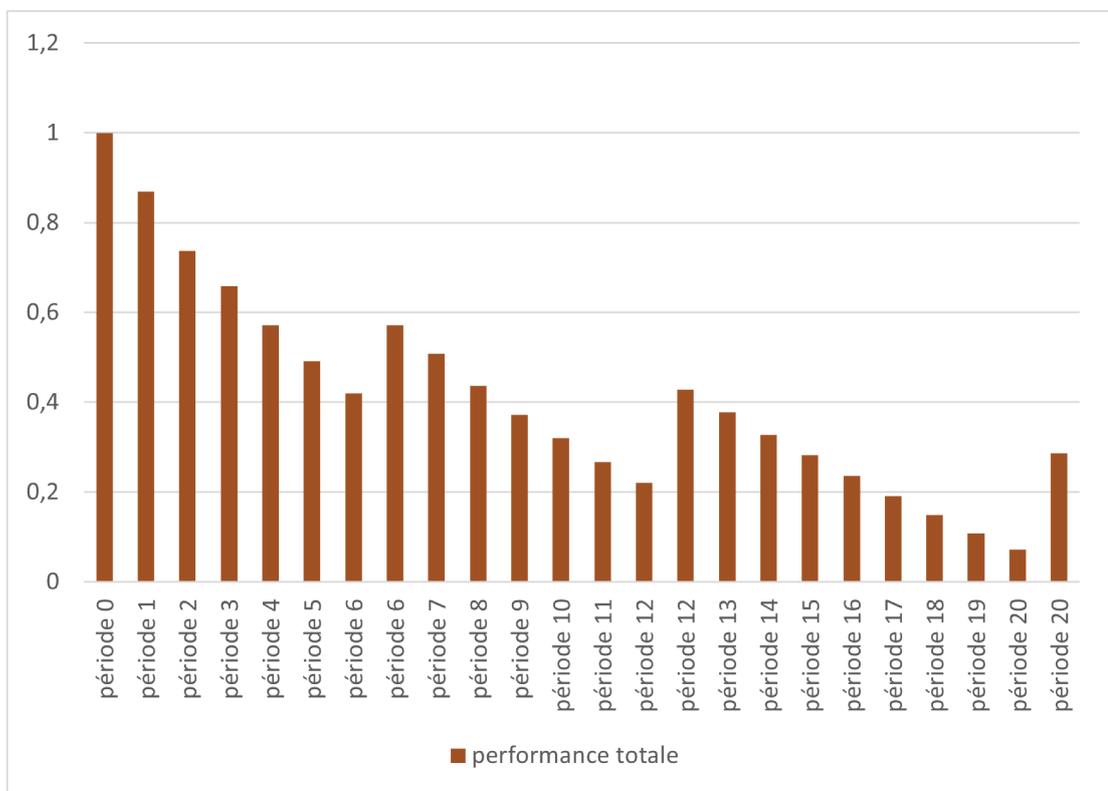


FIGURE V.17 – Performance des téléphones utilisés par le client 31 selon la SRC

2. Analyse des performances des smartphones

Nous comparons ici 2 smartphones, utilisés avec une fréquence d'utilisation moyenne égale à 49,73 (fréquence la plus élevée) et 28,11 (fréquence la plus faible) respectivement.

Les graphiques présentés dans la figure V.18 montrent que les périodes de récupération se produisent dans les 1^{ère}, les 7^{ème}, et les 13^{ème} périodes pour le smartphone utilisé avec une fréquence élevée, et dans les 4^{ème}, et les 15^{ème} périodes pour le smartphone utilisé avec une fréquence faible. Cela signifie qu'il y a au moins un écart de six périodes pour chaque récupération.

3.2.3 Performances économique et environnementale des stratégies SRC et SRM

Nous présentons dans le tableau V.11 les valeurs du coût généré et de l'empreinte carbone pour les stratégies de remanufacturing complet (SRC) et stratégie de remanufacturing minimal (SRM) :

TABLEAU V.11 – Performance économique et environnementale des stratégies SRC et SRM

| | Coût économique | Coût environnemental |
|--------------------------------------|-----------------|----------------------|
| Stratégie de remanufacturing complet | 78659.86 | 2750.0174 |
| Stratégie de remanufacturing minimal | 45568.25 | 1535.46 |

Selon le tableau V.11, les performances économiques et environnementales obtenues avec la stratégie SRM sont meilleures, en raison des points suivants :

- L'effort de remise à neuf des smartphones réalisé par la stratégie SRC est plus important, car il s'agit d'une remise à neuf au meilleur niveau. Les coûts économiques et environnementaux seront donc plus élevés avec la stratégie SRC.
- Dans les dernières périodes de la stratégie SRM, nous avons plus d'articles disponibles en stock, ce qui signifie la possibilité de récupérer plus d'articles à récupérer. Dans ce cas, le coût du transport et l'empreinte carbone augmentent.
- Nous considérons un coût de stockage égal à 1/4 de la valeur du stock. Puisque les articles stockés dans la stratégie SRC ont de meilleures qualités que les articles stockés dans la stratégie SRM, alors le coût de stockage généré par la stratégie SRC est plus élevé.

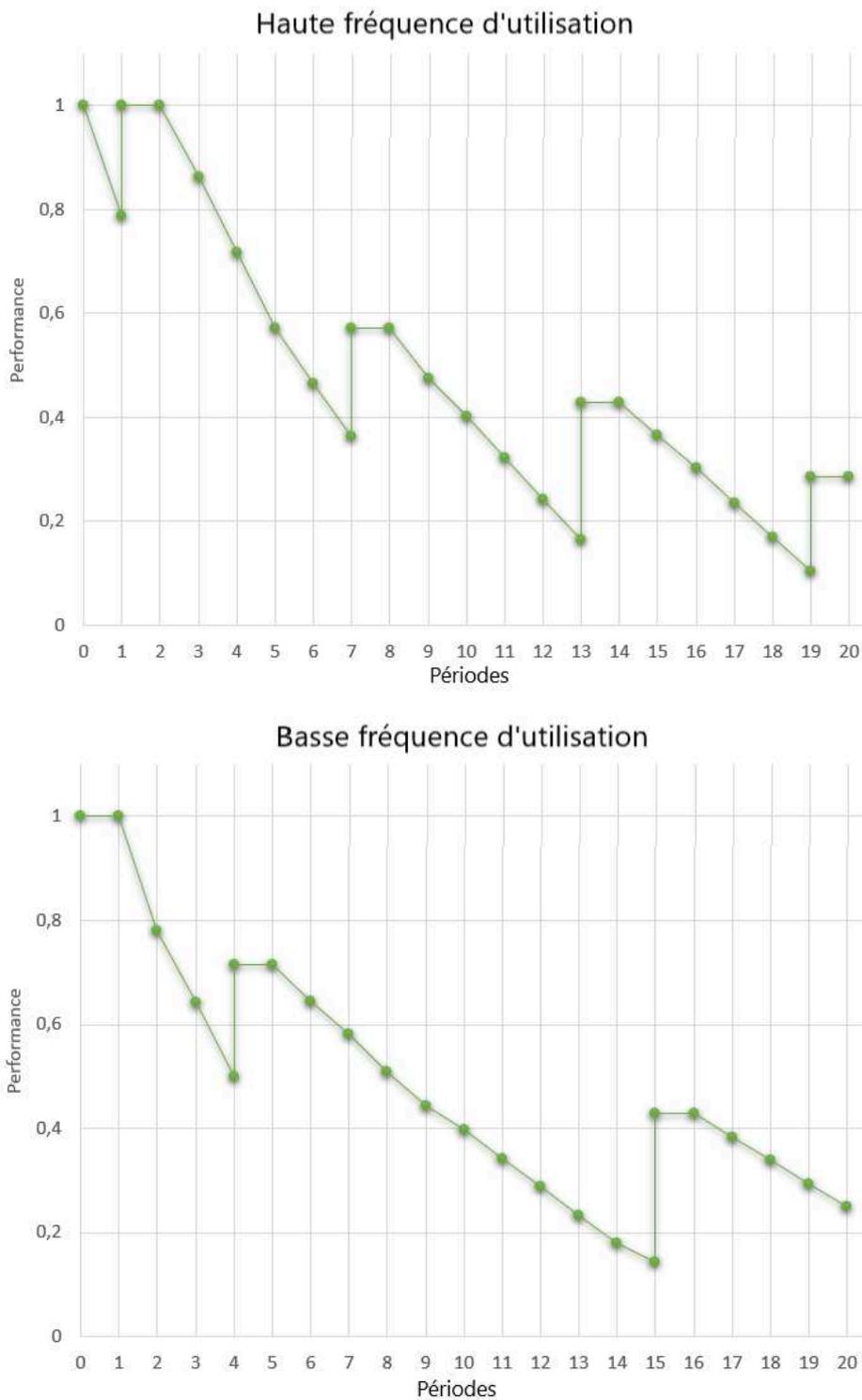


FIGURE V.18 – SRM : Performance des produits - Smartphones utilisés à haute et basse fréquence

4 Analyse de sensibilité

Dans cette section, nous discutons l'impact des principaux paramètres sur la performance du remanufacturing, à savoir :

1. L'impact du niveau de stock initial, qui est le nombre de smartphones stockés pour remplacer les smartphones récupérés sélectionnés pour le remanufacturing,
2. Le comportement des clients caractérisé par leur fréquence d'utilisation,
3. Les durées de l'horizon et des périodes, qui définit les instants de remanufacturing sur l'horizon considéré.

4.1 Impact du niveau de stock initial sur la performance du remanufacturing

Les résultats obtenus et présentés dans la section précédente sont basés sur un niveau de stock initial égal au 1/5 du nombre de clients. Cette section vise à montrer l'impact de ce niveau sur la stratégie de remanufacturing étudiée. Nous avons choisi ici de fixer le niveau de stock initial à 1/10, 1/4, 1/3, et 1/2 du nombre de clients.

TABLEAU V.12 – Impact du niveau de stock initial sur la stratégie de remanufacturing complet

| Stock initial | 10 | 25 | 33 | 50 |
|----------------------|-------------|-------------|------------|-------------|
| Coût total | 62608.61775 | 62698.6637 | 64918.6081 | 69838.70583 |
| Impact carbone total | 2645.147342 | 2654.644865 | 2781.08953 | 3064.188899 |

TABLEAU V.13 – Impact du niveau de stock initial sur la stratégie de remanufacturing minimal

| Stock initial | 10 | 25 | 33 | 50 |
|----------------------|-------------|-------------|------------|-------------|
| Coût total | 16895.82834 | 40874.22511 | 49502.0699 | 59960.96142 |
| Impact carbone total | 866.9997596 | 1955.9218 | 2446.46252 | 3042.897215 |

Les tableaux V.12 et V.13 montrent que :

- Le coût et l'empreinte carbone dans la stratégie SRC augmentent lentement parce que le nombre d'articles disponibles dans les dernières périodes est réduit (parce que l'indice de remanufacturabilité des articles atteint 0). Ainsi, même si le stock initial est élevé, la remise à neuf des articles au meilleur niveau d'une part, et la contrainte de remanufacturabilité d'autre part, limitent l'impact du stock initial sur la stratégie SRC.

- Dans la stratégie SRM, les valeurs du coût généré et de l’empreinte carbone augmentent lorsque le niveau du stock initial augmente. Cela signifie que les performances de la stratégie SRM sont affectées par le niveau du stock initial.

4.2 Impact du profil des clients sur la stratégie de remanufacturing

Cette section vise à montrer l’impact des profils des clients sur la performance des stratégies de remanufacturing SRC et SRM. Ainsi, nous attribuons la même fréquence d’utilisation à tous les clients, et nous la fixons à des fréquences faibles, moyennes puis élevées. Les résultats sont présentés dans les tableaux V.14 et V.15.

TABLEAU V.14 – Impact des profils des clients sur la stratégie de remanufacturing complet

| | Profils des clients | | |
|----------------------|---------------------|----------|----------|
| | Bas | Moyen | Haut |
| Coût total | 38715.79 | 46682.75 | 51524.28 |
| Impact carbone total | 2194.72 | 2647.25 | 2919.03 |

TABLEAU V.15 – Impact des profils des clients sur la stratégie de remanufacturing minimal

| | Profils des clients | | |
|----------------------|---------------------|----------|----------|
| | Bas | Moyen | Haut |
| Coût total | 27825.95 | 27155.92 | 30151.92 |
| Impact carbone total | 1578.58 | 1540.53 | 1710.17 |

L’impact des profils des clients sur les stratégies de remanufacturing peut être résumé comme suit :

- Pour la stratégie SRC, les coûts économiques et environnementaux augmentent avec la fréquence d’utilisation. Cela peut s’expliquer par le fait que plus les fréquences d’utilisation sont élevées, plus les actions de remanufacturing sont importantes. Par conséquent, les coûts totaux et l’empreinte carbone sont influencés par les profils des clients.
- Pour la stratégie SRC, nous remarquons que le niveau de stock à la fin de l’horizon diminue avec l’augmentation des fréquences d’utilisation. Ainsi, nous avons 20 nouveaux articles disponibles à la fin de l’horizon pour les faibles fréquences d’utilisation de , mais, il n’y a aucun article disponible de la 17^{ème} période et de la 15^{ème} période, pour les fréquences d’utilisation

moyenne et élevée respectivement. Cela est dû à la possibilité de remettre à neuf les produits, qui dépend des opérations de remanufacturing appliquées aux articles. Notons que les articles en fin de vie sont destinés à être éliminés (figure V.19).

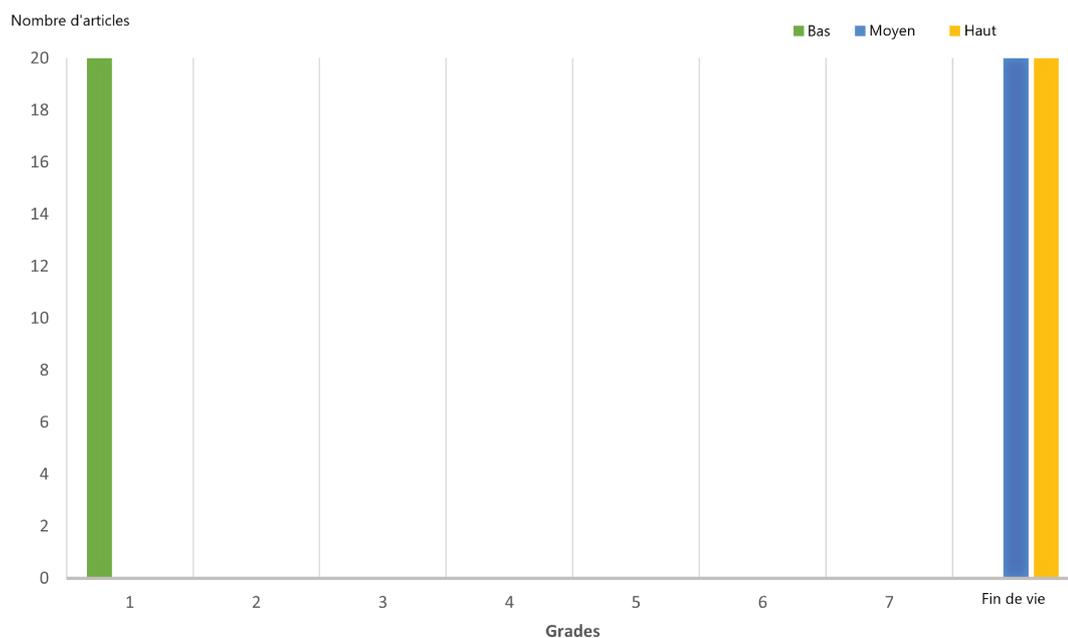


FIGURE V.19 – Niveau de stock de chaque grade dans la période précédente - Stratégie SRC

- Contrairement à la stratégie SRC, pour la stratégie SRM la variation des fréquences d'utilisation donne des valeurs assez proches pour les fonctions objectifs. Ainsi, nous enregistrons les plus petites valeurs pour les fréquences moyennes, et les valeurs enregistrées pour les basses fréquences sont modérément plus élevées. Les plus grandes valeurs sont enregistrées pour les hautes fréquences. Ceci s'explique par le fait que la politique de remanufacturing utilisée, met à niveau vers un grade élevé.
- Contrairement à la première stratégie, à la fin de la deuxième stratégie, tous les articles sont disponibles, pour les trois niveaux de fréquences d'utilisation. Nous avons :
 - 20 articles en deuxième grade pour la fréquence d'utilisation faible.
 - 12 articles en quatrième grade et 8 items en cinquième grade pour la fréquence d'utilisation moyenne.
 - 1 article en quatrième grade et 19 éléments en cinquième grade pour la fréquence d'utilisation élevée.

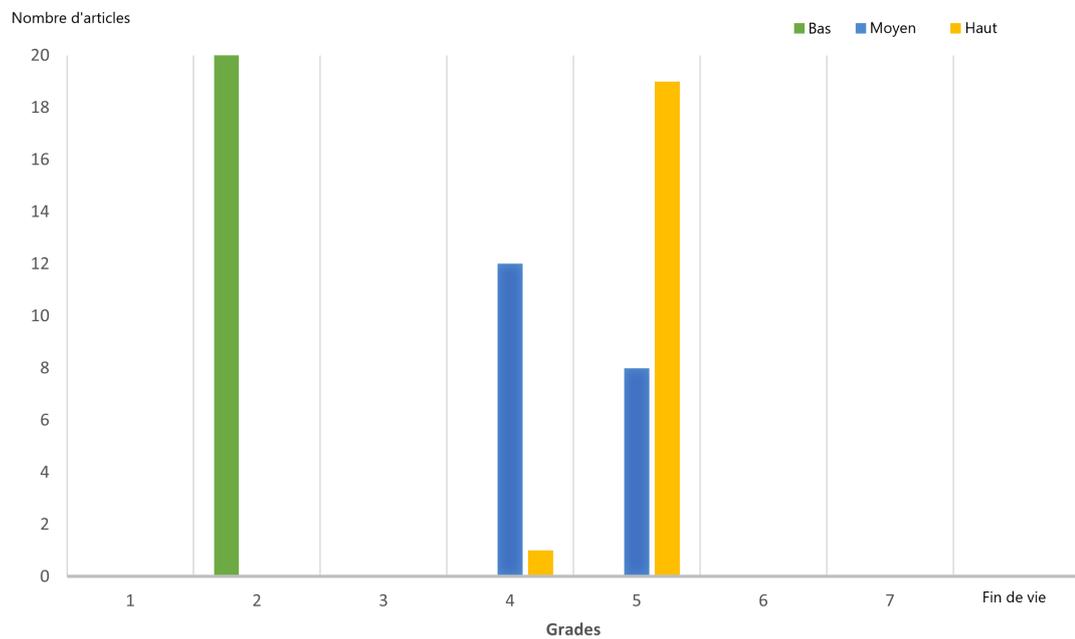


FIGURE V.20 – Niveau de stock de chaque grade dans la période précédente - Stratégie SRM

4.3 Impact de l'horizon et des durées de périodes sur la stratégie de remanufacturing

Dans cette section, nous cherchons à montrer l'impact de l'horizon et du profil de la période, c'est-à-dire les dates de la reprise et du remanufacturing sur la performance de la stratégie étudiée. Rappelons que nous considérons dans les sections précédentes un horizon de 5 ans, distribué comme le montre la figure V.21.

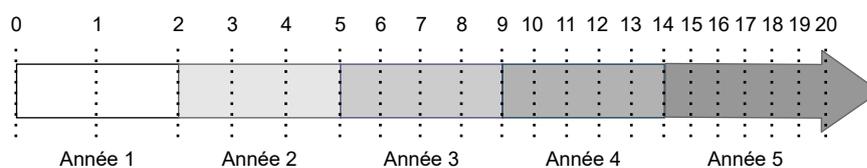


FIGURE V.21 – Horizon et répartition des périodes

Ainsi, nous considérons dans cette section deux profils différents d'horizon et de durée des périodes. Nous avons un stock initial de 20 nouveaux articles, et dix fréquences d'utilisation comme supposé dans la section 3. Les autres paramètres restent inchangés.

- Horizon et périodes profil 1 : on considère 10 périodes (au lieu de 20) réparties de façon homogène sur un horizon de 5 ans (Cela représente deux périodes par an) (figure V.22).

En considérant l'horizon et les répartitions des périodes, les résultats obtenus montrent que :

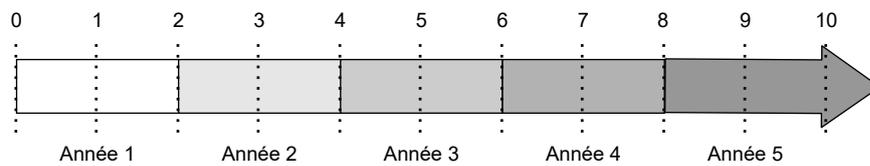


FIGURE V.22 – Horizon et périodes profil 1

- Pour la stratégie SRC, nous avons 20 nouveaux articles à la fin de l’horizon. L’indice de remanufacturabilité reste supérieur à 0 car le nombre d’opérations de remanufacturing des articles est réduit, même si les opérations de remanufacturing appliquées sont plus importantes du fait de la durée des périodes.
- A la fin de la stratégie SRM, nous avons 20 articles de cinquième grade disponibles.
- Horizon et périodes profil 2 : nous considérons 20 périodes réparties de façon homogène sur un horizon de 5 ans (Cela représente quatre périodes par an) (figure V.23).

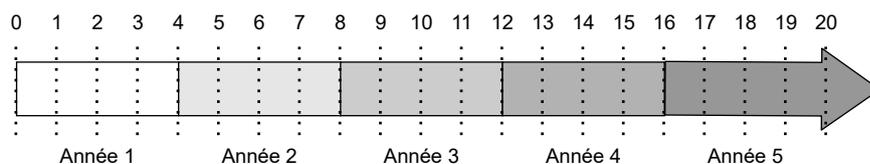


FIGURE V.23 – Horizon et périodes profil 2

En considérant ce profil d’horizon et de périodes, les résultats obtenus montrent que :

- A la fin de la stratégie SRC, nous avons 15 nouveaux articles, et 5 articles destinés à être éliminés. Le nombre d’opérations de remanufacturing des articles est élevé, en raison du nombre de périodes considérées.
- A la fin de la stratégie SRM, nous avons 20 articles de cinquième grade.

Les performances des stratégies SRC et SRM sous ces profils d’horizon et de périodes sont résumées comme suit :

- Comme dans les expériences précédentes, la stratégie de remanufacturing minimal donne de meilleurs résultats en termes de coûts économiques et environnementaux pour les deux profils d’horizon, comme le montrent les tableaux V.16 et V.17 :
- Le nombre de récupérations avec le profil d’horizon 1 est inférieur au nombre de récupérations avec le profil d’horizon 2.

Par exemple, sous le profil d’horizon 1, le smartphone 1 est récupéré deux fois avec la stratégie SRC et trois fois avec la stratégie SRM. Avec le profil d’horizon 2, il est récupéré quatre fois

| | Stratégie SRC | Stratégie SRM |
|-------------------|---------------|---------------|
| Coût | 43966.22 | 14912.54 |
| Empreinte carbone | 2492.78 | 848.83 |

TABLEAU V.16 – Performance des stratégies de remanufacturing - Horizon et périodes profil 1

| | Stratégie SRC | Stratégie SRM |
|-------------------|---------------|---------------|
| Coût | 49734.13 | 26444.87 |
| Empreinte carbone | 2823.50 | 1505.92 |

TABLEAU V.17 – Performance des stratégies de remanufacturing - Horizon et périodes profil 2

avec les deux stratégies (tableau V.18). De même, sous le profil d'horizon 1, le smartphone du consommateur 1 est récupéré trois fois avec les stratégies SRC ou SRM. Cependant, dans le profil d'horizon 2, il est récupéré cinq fois (stratégie SRC) ou six fois (stratégie SRM) (tableau V.19).

| | Stratégies | Nombre de récupérations |
|------------------|---------------|-------------------------|
| Horizon profil 1 | Stratégie SRC | 2 |
| | Stratégie SRM | 3 |
| Horizon profil 2 | Stratégie SRC | 4 |
| | Stratégie SRM | 4 |

TABLEAU V.18 – Impact de répartition des périodes sur l'horizon sur le nombre de récupération du smartphone 1

| | Stratégies | Nombre de récupérations |
|------------------|---------------|-------------------------|
| Horizon profil 1 | Stratégie SRC | 3 |
| | Stratégie SRM | 3 |
| Horizon profil 2 | Stratégie SRC | 5 |
| | Stratégie SRM | 6 |

TABLEAU V.19 – Impact de répartition des périodes sur l'horizon sur le nombre de récupération du client 1

5 Expérience numérique 3

Nous appliquons l'approche de résolution présenté dans la troisième problématique afin de voir une solution avec l'évolution de la performance de chaque composant. Dans cette section, nous allons présenter les résultats de l'exécution de 3 instances différentes dont les paramètres sont présentés dans le tableau ???. La taille de la population et le nombre d'itérations ont été choisis en fonction des résultats de plusieurs tests d'exécution de l'algorithme.

| Paramètres | Instance |
|-----------------|----------|
| Périodes | 6 |
| Produits | 10 |
| Composants | 3 |
| Fonctionnalités | 5 |
| Grades | 5 |
| Clients | 7 |
| Population | 6 |
| Mutation | 0,15 |
| Itérations | 8 |

TABLEAU V.20 – Paramètres de l'instance

Nous considérons 5 fonctionnalités des smartphones (citées dans la section précédente) et 3 des composants qui interviennent dans leur exécution : la batterie, l'écran et le haut parleur (figure V.24).

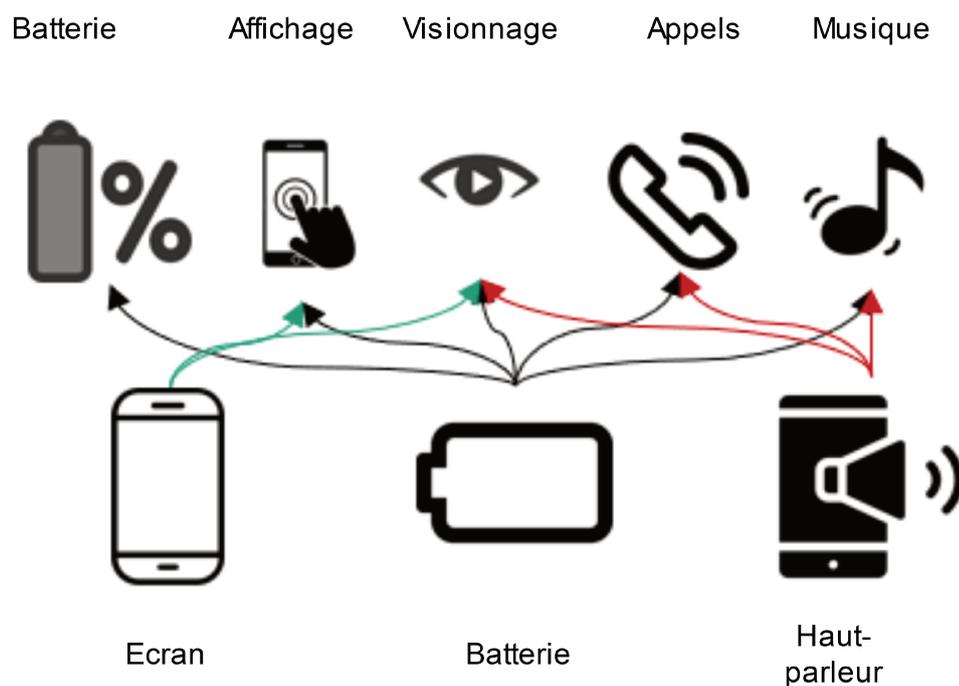


FIGURE V.24 – Composants et fonctionnalités considérés

Pour cette instance, nous présenterons le front de Pareto obtenu à la dernière itération (tableau V.21), puis nous appliquerons une méthode d'aide à la décision multicritères. Nous choisissons pour cela la méthode TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) définie initialement par Hwang et al. [43]. Cette méthode permet de classer par ordre de choix un certain nombre d'alternatives sur la base d'un ensemble de critères favorables (plus proche possible de la meilleure

alternative) ou défavorables (plus loin possible de la meilleure alternative). Dans notre cas les alternatives sont les solutions et les critères sont les objectifs. Le principe de la méthode se base sur les étapes suivantes :

- L'attribution d'un niveau à chaque critère ainsi qu'un score par rapport à chaque alternative. L'attribution des scores formera une matrice dont les lignes sont les alternatives et les colonnes sont les critères. Dans notre cas, Il faudra attribuer une pondération en guise de niveau à chaque critère, quant aux scores, ils sont représentés par les valeurs des fonctions objectifs ;
- La normalisation de la matrice en utilisant la distance euclidienne et la multiplication des éléments de la matrice par les poids attribués à chaque critère ;
- Le calcul de la meilleure alternative et de la pire alternative ;
- Le calcul de la distance entre chaque alternative et la meilleure (et la pire) alternative ; et
- Le calcul du coefficient de proximité de chaque alternative.

Les différentes alternatives sont ensuite classées selon leurs coefficients de proximité.

Pour donner un classement aux solutions de ce front, nous considérons trois cas :

- Puisque nous avons deux objectifs dans notre problème, nous allons attribuer un poids à chaque objectif pour appliquer la technique TOPSIS. Dans le premier cas, nous allons donner un poids de 0.75 au premier objectif. Le poids attribué au deuxième objectif est alors de 0.25.
- Dans le deuxième cas, on donne le même poids aux deux objectifs (0.50).
- Dans le troisième cas, les pondérations sont de 0.25 et 0.75 pour le premier et le deuxième objectif respectivement.

TABLEAU V.21 – Front de Pareto de la première instance

| Solutions | Coût total (UM) | Empreinte carbone totale (kg) |
|-----------|-----------------|-------------------------------|
| 1 | 852,66 | 934,06 |
| 2 | 918,77 | 902,52 |
| 3 | 1010,62 | 864,45 |
| 4 | 926,19 | 873,42 |

Dans les trois cas de figure de l'application de la méthode TOPSIS sur les solutions du front de Pareto obtenues, nous avons que la solution la mieux classées est la solution 1. Nous allons présenter les résultats obtenus pour cette solution.

Le chromosome qui représente cette solution est donné dans la tableau [V.22](#).

| | | | | | | |
|----------|------|------|------|------|------|------|
| Périodes | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Client 1 | 4 | 1 | 6 | 4 | 6 | 6 |
| Client 2 | 1 | 6 | 2 | 5 | 2 | 4 |
| Client 3 | 5 | 4 | 1 | 6 | 4 | 2 |
| Client 4 | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 | 1 |
| Client 5 | 2 | 5 | 4 | 2 | 0 | 0 |
| Client 6 | 6 | 2 | 3 | 0 | 5 | 5 |
| Client 7 | 3 | 3 | 5 | 1 | 1 | 3 |
| Client 1 | 0,39 | 0,78 | 0,38 | 0,09 | 0,23 | 0,93 |
| Client 2 | 0,33 | 0,06 | 0,52 | 0,09 | 0,06 | 0,36 |
| Client 3 | 0,54 | 0,47 | 0,86 | 0,54 | 0,27 | 0,19 |
| Client 4 | 0,02 | 0,32 | 0,16 | 0,08 | 0,53 | 0,75 |
| Client 5 | 0,11 | 0,86 | 0,05 | 0,36 | 0,76 | 0,48 |
| Client 6 | 0,40 | 0,72 | 0,65 | 0,32 | 0,92 | 0,62 |
| Client 7 | 0,03 | 0,69 | 0,40 | 0,77 | 0,22 | 0,70 |
| Client 1 | 1 | 6 | 2 | 4 | 1 | 2 |
| Client 2 | 5 | 0 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| Client 3 | 3 | 1 | 6 | 6 | 5 | 0 |
| Client 4 | 6 | 5 | 4 | 2 | 2 | 5 |
| Client 5 | 2 | 4 | 0 | 3 | 6 | 4 |
| Client 6 | 0 | 3 | 3 | 1 | 4 | 6 |
| Client 7 | 4 | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 |

TABLEAU V.22 – Chromosome de la solution 1

| | | | | | |
|-----------|---|---|---|---|---|
| Grades | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Période 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Période 1 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Période 2 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Période 3 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Période 4 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Période 5 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Période 6 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |

TABLEAU V.23 – État du stock par grade pour chaque période

Nous avons le tableau suivant (V.23) qui représente l'état du stock par grade pour chaque période.

Nous avons également, dans le tableau V.24, les affectations des produits aux clients.

Nous avons dans le tableau V.25 l'évolution des performances des produit.

Nous avons choisi de présenter l'évolution des composants pour trois produits : le produit 1 qui est remis à neuf dès la deuxième période, le produit 3 qui est remis à neuf un peu plus tard et le

| Périodes | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------|---|----|----|----|---|----|----|
| Client 1 | 1 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Client 2 | 2 | 9 | 9 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Client 3 | 3 | 3 | 3 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Client 4 | 4 | 8 | 2 | 1 | 1 | 1 | 9 |
| Client 5 | 5 | 10 | 10 | 10 | 9 | 5 | 3 |
| Client 6 | 6 | 6 | 5 | 5 | 2 | 2 | 2 |
| Client 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 3 | 10 | 10 |

TABLEAU V.24 – Affectations les smartphones aux clients

| Périodes | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------------|---|------|------|------|------|------|
| Produit 1 | 1 | 0,87 | 1 | 1 | 0,92 | 0,83 |
| Produit 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,90 |
| Produit 3 | 1 | 0,79 | 0,58 | 0,8 | 0,8 | 1 |
| Produit 4 | 1 | 1 | 1 | 0,92 | 0,84 | 0,76 |
| Produit 5 | 1 | 1 | 1 | 0,90 | 1 | 1 |
| Produit 6 | 1 | 0,86 | 1 | 1 | 0,86 | 0,72 |
| Produit 7 | 1 | 0,80 | 0,58 | 0,44 | 0,6 | 0,6 |
| Produit 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,95 | 0,90 |
| Produit 9 | 1 | 1 | 0,92 | 1 | 1 | 1 |
| Produit 10 | 1 | 1 | 0,84 | 0,74 | 1 | 1 |

TABLEAU V.25 – Évolution de la performance des produits

produit 7 qui est remis à neuf beaucoup plus tard.

Dans la figure V.25, le produit 1 est récupéré en deuxième période avec une performance totale égale à 0,87 correspondant au grade 1. Le produit est donc remis au grade 1 (selon la case correspondante dans le chromosome représentant la solution) et tous ses composants sont remis à neuf à 100% de leur performance. Le produit est utilisé une autre fois par un autre utilisateur et n'est récupéré qu'à la dernière période de l'horizon.

Dans la figure V.26, la première récupération du produit 3 se fait à la troisième période, et le produit passe du grade 3 au grade 2 et les performances de tous les composants passent à 0,6. Le produit est réutilisé et remis à neuf en cinquième période du grade 2 au grade 1.

Dans la figure V.27, la première récupération du produit 7 se fait à la période 4, le produit passe alors du grade 3 au grade 2 avec une performance des composants égale à 0,6.

Nous avons également le tableau V.26 qui présente la remanufacturabilité des produits. Nous remarquons que le produit 1 a une remanufacturabilité plus élevée que celles des produits 3 et 7. Ceci s'explique par le fait que le produit 1 ait été récupéré et remis à neuf deux fois. Pour ces deux

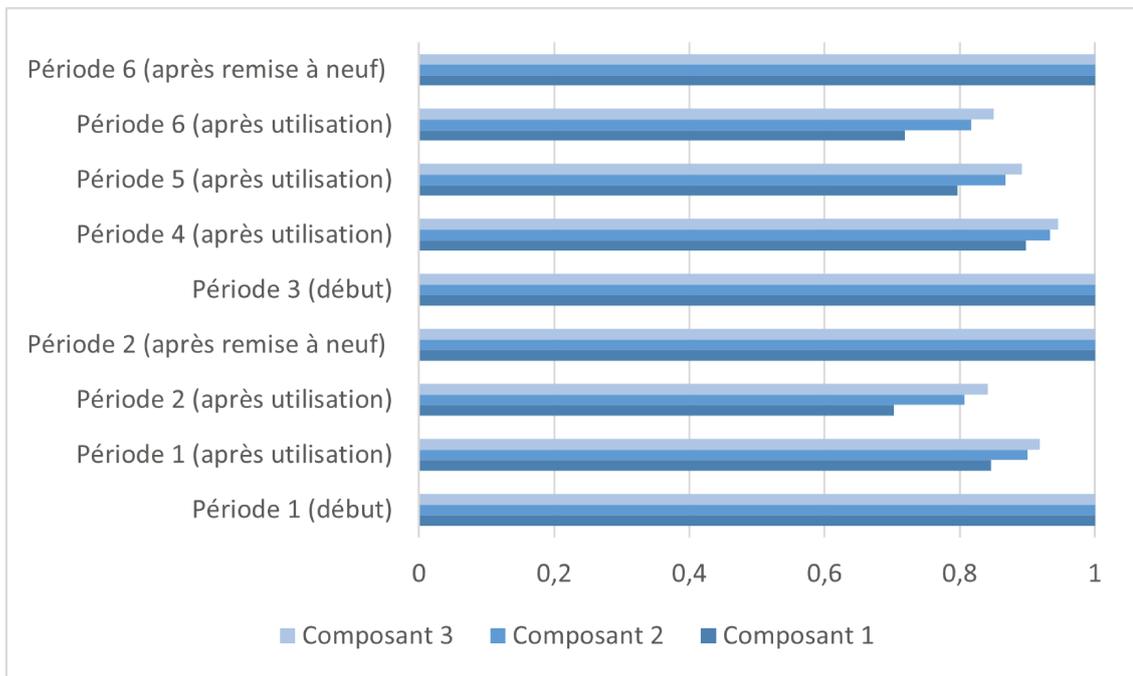


FIGURE V.25 – Évolution des performances des composant du produit 1

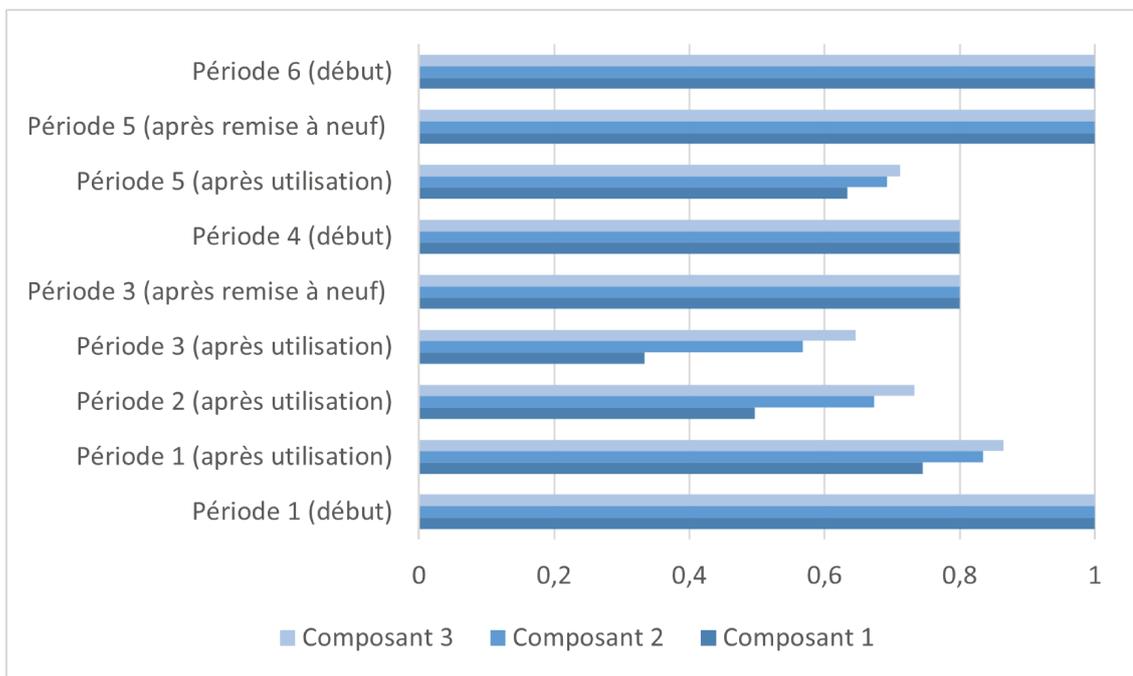


FIGURE V.26 – Évolution des performances des composant du produit 3

fois, sa remise à neuf est passé du grade 2 au grade 1. Contrairement aux produits 3 et 7 dont la remise à neuf a été plus importante.

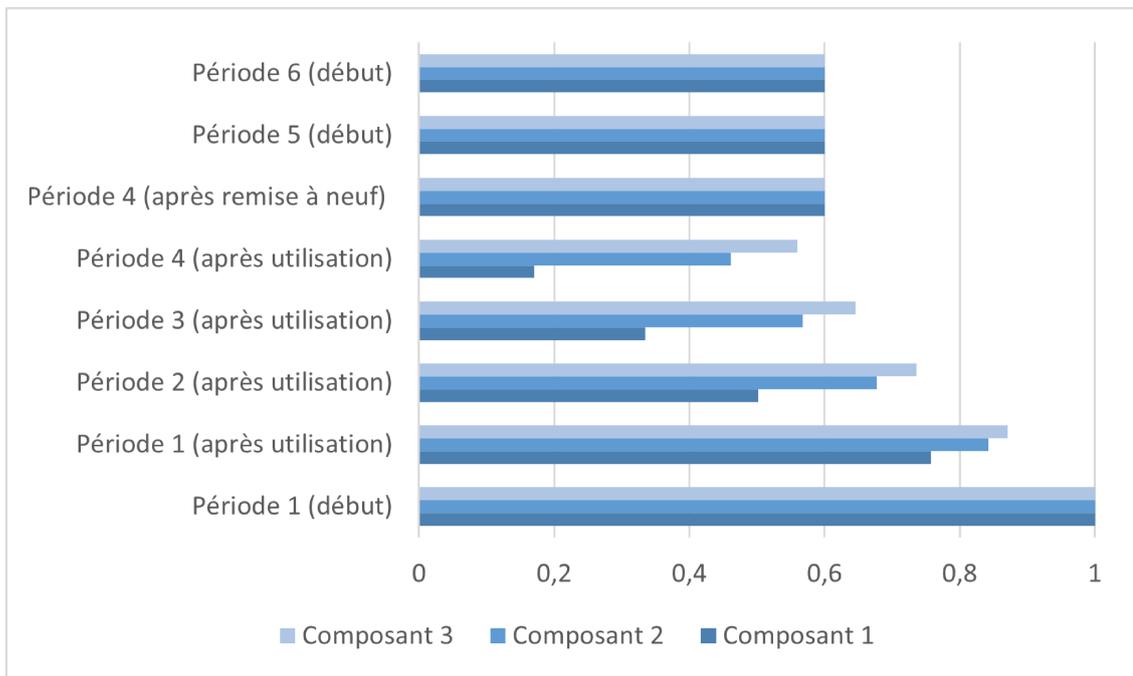


FIGURE V.27 – Évolution des performances des composant du produit 7

| Périodes | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------------|---|------|------|------|------|------|
| Produit 1 | 1 | 1 | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,80 |
| Produit 2 | 1 | 0,97 | 0,97 | 0,94 | 0,94 | 0,94 |
| Produit 3 | 1 | 1 | 1 | 0,81 | 0,81 | 0,70 |
| Produit 4 | 1 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 |
| Produit 5 | 1 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,89 | 0,89 |
| Produit 6 | 1 | 1 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 |
| Produit 7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,77 | 0,77 |
| Produit 8 | 1 | 1 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 |
| Produit 9 | 1 | 1 | 1 | 0,96 | 0,96 | 0,92 |
| Produit 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,88 | 0,88 |

TABLEAU V.26 – Remanufacturabilités des produits

Pour terminer la présentation des résultats, nous présentons dans le tableau V.27 le cycle hamiltonien correspondant à chaque période.

Par exemple, pour la première période, on démarre du centre de remanufacturing, on récupère le produit du client 5 puis celui du client 2 puis celui du client 4, on retourne au centre de remanufacturing pour finir.

Pour les deux dernières périodes, nous avons que deux récupérations (contre 3 pour les autres périodes). Ceci est expliqué par l'indisponibilité des produits en stock pour remplacer le produit du

dernier client à sélectionner pour la récupération.

| | Cycle hamiltonien | | | | |
|-----------|------------------------|---|---|------------------------|------------------------|
| Période 1 | Centre remanufacturing | 5 | 2 | 4 | Centre remanufacturing |
| Période 2 | Centre remanufacturing | 6 | 4 | 1 | Centre remanufacturing |
| Période 3 | Centre remanufacturing | 4 | 2 | 3 | Centre remanufacturing |
| Période 4 | Centre remanufacturing | 7 | 6 | 5 | Centre remanufacturing |
| Période 5 | Centre remanufacturing | 7 | 5 | Centre remanufacturing | |
| Période 6 | Centre remanufacturing | 5 | 4 | Centre remanufacturing | |

TABLEAU V.27 – Cycle Hamiltonien de chaque période

Nous avons présenté le plan de récupération et de remise à neuf pour une seule solution du front de Pareto. Pour les autres solutions, bien que les valeurs des fonctions objectifs sont proches, nous avons des plan de récupération et de remise à neuf très différents.

6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'expérimentation numérique uniquement sur les smartphones. Nous avons commencé par l'expérience numérique de l'adaptation de NSGA-II proposée dans la première problématique décrite.

Nous avons ensuite présenté les résultats obtenus pour l'approche proposée comme méthode de résolution de la problématique décrite en deuxième lieu. Cette approche permet de construire un plan de récupération et de remise à neuf selon deux stratégies de remise à neuf : complète et minimale. Étant donné que les objectifs à minimiser sont les coûts et l'empreinte carbone, la deuxième stratégie donne un meilleur coût et une meilleure empreinte carbone et la durée de vie utile moyenne des produits est plus longue. Une analyse de sensibilité a été réalisée pour déterminer l'impact des principaux paramètres sur la performance de la stratégie de remanufacturing, comme la fréquence d'utilisation, le niveau de stock initial, et les profils d'horizon et de périodes. Pour finir, nous avons présenté une expérience numérique pour l'approche permettant de trouver une solution à la troisième problématique décrite. Nous effectuons des tests sur une instance de l'adaptation de NSGA-II proposée. Nous présentons les valeurs des fonctions objectifs des solutions du front de Pareto pour chaque instance, ordonnées avec la technique d'aide à la décision TOPSIS.

Conclusion générale

À travers cette thèse, nous nous sommes intéressés à la problématique de réduction des déchets issus de la fabrication et de l'utilisation des produits, par le biais du remanufacturing, considéré comme une des alternatives de l'économie circulaire pour la gestion de fin de vie et d'utilisation des produits.

Révolutionnant le monde l'industrie, le remanufacturing demeure un processus complexe du fait de ses trois étapes principales : la récupération des produits utilisés, les opérations de remise à neuf et la redistribution des produits remis à neuf. Les chercheurs se sont donc intéressés à étudier diverses problématiques découlant des étapes du processus de remanufacturing, telles que l'optimisation de la chaîne logistique pour les retours des produits, le dimensionnement des lots, l'ordonnancement, la planification, etc.

Nous fondons nos principales motivations des travaux de cette thèse sur la mise en application du processus de remanufacturing dit à titre préventif. En effet, nous nous sommes intéressés à appliquer les étapes du processus de remanufacturing, sur un horizon fini, pour des produits qui sont en cours d'utilisation par des clients, et ce dans le but de prolonger leur durée de vie utile. Les stratégies de remanufacturing proposées dans cette thèse visent à intégrer les différentes étapes liées à l'activité de remanufacturing, tout en prenant en considération les contraintes fonctionnelles et structurelles des produits à remanufacturer. Ainsi, nous procédons alors à la récupération à des instants prédéterminés, de produits multi-composants, offrant des multiples fonctionnalités. L'objectif est de les remettre à neuf ou améliorer leur état de fonctionnement puis de les redistribuer à nouveau vers d'autres clients.

Les différentes stratégies proposées vise à minimiser les coûts économique et environnemental (en émission carbone) résultant des étapes du processus de remanufacturing et comprenant les coûts relatifs au transport, au stockage, aux opérations de remise à neuf, à l'utilisation et au traitement des produits ou dans composants atteignant leur fin de vie (étant donné que les produits ne sont indéfi-

niment éligibles à une remise à neuf).

La première étape de nos travaux de recherche consiste à adapter le problème de dimensionnement des lots (lot-sizing) aux étapes du processus de remanufacturing. L'objectif est de déterminer d'abord le nombre de produits de chaque grade à récupérer parmi les produits qui sont en cours d'utilisation par des clients, puis de prendre les décisions du grade à atteindre, suite aux opérations de remise à neuf sur les produits récupérés. Ces décisions sont prises à chacun des différents instants de récupération préalablement déterminés et équitablement répartis sur un horizon temporel donné. Pour ce faire, un modèle mathématique multi-objectif a été proposé dans lequel nous considérons le coût total et l'impact carbone total à minimiser. Nous avons proposé également une adaptation de la métaheuristique multi-objectif NSGA-II basée sur un codage des solutions en nombres réels.

Dans la deuxième étape de cette thèse, nous avons considéré qu'un produit présente plusieurs fonctionnalités, et est caractérisé par un indice de performance et un indice de remanufacturabilité. Cette performance est un taux permettant d'exprimer l'état du produit et son calcul est basé sur le comportement du client par rapport à l'utilisation du produit et sur la qualité d'exécution des fonctionnalités des produits. Quant à l'indice de remanufacturabilité, il représente un taux qui diminue à chaque fois que des opérations de remise à neuf sont appliquées au produit. Nous avons proposé pour cela une modélisation mathématique du problème intégrant les nouveaux paramètres avec les objectifs de minimiser les coûts économiques et environnementaux. Nous avons également proposé une heuristique qui construit un plan réalisable de récupération et de remise à neuf des produits utilisés. Nous avons ajouté, à ce stade, l'optimisation de l'étape de la récupération des produits en appliquant une heuristique.

Par extension, nous avons considéré dans la troisième étape de nos travaux, qu'un produit comporte plusieurs composants. Chaque composant est caractérisé par une performance et intervient dans l'exécution d'une ou plusieurs fonctionnalités. La fréquence d'utilisation d'un client impacte directement la performance du composant et de ce fait la qualité d'exécution des fonctionnalités. Nous avons développé une formule qui permet de calculer la performance totale d'un produit en fonction de ces paramètres. Nous avons intégré également l'optimisation de l'étape de récupération. Nous avons proposé alors une modélisation mathématique du problème intégrant les nouveaux paramètres avec les objectifs de minimiser les coûts économiques et environnementaux. Comme méthode de résolution, nous avons adapté la métaheuristique NSGA-II basée sur un codage en nombres entiers et réels en parallèle, intégrant directement l'optimisation de l'étape de la récupération des produits.

En se basant sur la problématique générale de cette thèse, nous prenons en compte plus de paramètres au fur et à mesure qu'on avance dans les chapitres, ce qui permet de rendre chaque problème traité, plus réaliste que le précédent, de se rapprocher le plus possible des cas réels et d'ajouter de la précision dans l'étude du processus de remanufacturing.

Le processus de remanufacturing reste à ce jour en cours de développement et d'innovation. De ce fait, plusieurs directions de recherche peuvent être considérées dans les travaux futurs. Nous proposons quelques perspectives en continuité avec les travaux réalisés dans cette thèse :

1. Nous avons considéré tout le long de cette thèse, un seul type de produits. Dans un premier temps, nous pouvons envisager de reprendre l'étude des problèmes traités dans les chapitres précédents en prenant en compte plusieurs type de produits. Cette extension permet de se rapprocher d'un contexte plus réaliste. Les modèles mathématiques et les méthodes que nous avons proposés peuvent être réadaptés pour contribuer à la résolution de cette extension.
2. La récupération des produits utilisés demeure une étape importante du processus de remanufacturing et nécessite la résolution de problématiques liées au transport. Ces problématiques sont connues pour être NP-difficiles. Pour l'optimisation de cette étape, nous avons intégré dans notre étude le problème du voyageur de commerce. Afin d'apporter plus de précision à l'optimisation de cette étape, nous pouvons considérer le problème de tournées de véhicules (VRP : Vehicle Routing Problem) auquel on peut intégrer une variante du problème de Bin-packing¹ par exemple.
3. Dans le dernier chapitre de cette thèse, nous prenons en compte les caractéristiques structurelles et fonctionnelles du produit, sa remise à neuf se fait donc au niveau de ses composants, de sorte que la performance de chaque composant est améliorée dans le but d'avoir une performance totale du produit équivalente au grade souhaité. Pour atteindre précisément ce grade, nous avons proposé une méthode gloutonne qui améliore les performances des composants un par un par (par ordre décroissant de leur importance) et s'arrête lorsque la performance totale du produit correspond au grade cible. Cette méthode permet d'avoir un résultat fiable mais non forcément optimal. Pour cela, nous pouvons envisager d'améliorer le résultat de cette étape en proposant de déterminer les performances à atteindre pour chaque composant de façon ralentir la décroissance de la performance totale du produit lors d'une utilisation ultérieure quel que soit le profil de l'utilisateur.
4. D'autres perspectives peuvent être envisagées pour la problématique traitée. Nous pouvons éventuellement prendre en compte une durée de garantie sur un produit remis à neuf rentable pour le remanufacturier. Nous pouvons également adapter d'autres méthodes de résolution

1. Rangement d'objet en utilisant un minimum de boites

basée sur l'apprentissage par exemple pour se donner la possibilité d'améliorer les solutions obtenues.

5. Des perspectives de problématiques permettant d'étudier la robustesse des approches proposées dans ce manuscrit sont également envisageables.
6. Nous pouvons prendre en compte les différentes incertitudes dans les décisions de récupération et de remise à neuf.

Les perspectives de recherche présentées sont des extensions directes à la problématique traitée dans cette thèse et ne représentent qu'une minime partie de toutes les problématiques pouvant découler de l'optimisation du processus de remanufacturing.

Liste des publications

Revues internationales indécouée JCR

1. **Latifa Belhocine**, Mohammed Dahane, Mohammed Yagouni. Customer behaviour-based multi-objective approach for the recovery and remanufacturing of used products : application to smartphone reconditioning process. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer Verlag, 2021, 117 (1-2), pp.125-146. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07646-7>

Conférences internationales avec comité de lecture

1. **Latifa Belhocine**, Mohammed Dahane, Mohammed Yagouni. Heuristic Based Strategy for Multi-Components Products Recovery and Remanufacturing. IEEE GOL 2020, Oct 2020, Rabat, Morocco. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07646-7>
2. **Latifa Belhocine**, Mohammed Dahane, Mohammed Yagouni. Performance and Usage Frequency Based Policy for Products Recovery and Remanufacturing. IEEE CoDIT 2020, Jun 2020, Prague, Czech Republic. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07646-7>
3. **Latifa Belhocine**, Mohammed Dahane, Mohammed Yagouni. Contribution to the optimisation of products recovery and remanufacturing : a multiobjective non-dominated sorting genetic algorithm based hybrid approach. IEEE SMC 2019, Oct 2019, Bari, Italy. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07646-7>

Congrès national

1. **Latifa Belhocine**, Mohammed Dahane, Mohammed Yagouni. Approche multiobjectif et hybride pour l'optimisation des décisions de récupération et de remise à neuf d'une politique de remanufacturing. ROADEF 2019, Feb 2019, Le Havre, France.

Bibliographie

- [1] James D Abbey and V Daniel R Guide Jr. A typology of remanufacturing in closed-loop supply chains. *International Journal of Production Research*, 56(1-2) :374–384, 2018.
- [2] Federica Acerbi, Claudio Sassanelli, Sergio Terzi, and Marco Taisch. A systematic literature review on data and information required for circular manufacturing strategies adoption. *Sustainability*, 13(4) :2047, 2021.
- [3] A Parchami Afra and J Behnamian. Lagrangian heuristic algorithm for green multi-product production routing problem with reverse logistics and remanufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 58 :33–43, 2021.
- [4] Nima Alizadeh-Basban and Ata Allah Taleizadeh. A hybrid circular economy-game theoretical approach in a dual-channel green supply chain considering sale’s effort, delivery time, and hybrid remanufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 250 :119521, 2020. [21](#)
- [5] Ammar Y Alqahtani and Surendra M Gupta. Warranty as a marketing strategy for remanufactured products. *Journal of Cleaner Production*, 161 :1294–1307, 2017. [20](#)
- [6] Armin Aminipour, Zied Bahroun, and Moncer Hariga. Cyclic manufacturing and remanufacturing in a closed-loop supply chain. *Sustainable Production and Consumption*, 25 :43–59, 2021. [21](#)
- [7] Öykü Naz Attila, Agostinho Agra, Kerem Akartunalı, and Ashwin Arulseivan. Robust formulations for economic lot-sizing problem with remanufacturing. *European Journal of Operational Research*, 2020. [22](#)

-
- [8] Ehab Bazan, Mohamad Y Jaber, and Ahmed MA El Saadany. Carbon emissions and energy effects on manufacturing–remanufacturing inventory models. *Computers & Industrial Engineering*, 88 :307–316, 2015.
- [9] Sara Behdad, Aida Sefic Williams, and Deborah Thurston. End-of-life decision making with uncertain product return quantity. *Journal of Mechanical Design*, 134(10) :100902, 2012.
- [10] Imen Belhadj, Moncef Hammadi, and Nizar Aifaoui. Parallel disassembly approach with recycling rate calculation of industrial products. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pages 1–16, 2021.
- [11] Latifa Belhocine, Mohammed Dahane, and Mohammed Yagouni. Contribution to the optimisation of products recovery and remanufacturing : a multiobjective non-dominated sorting genetic algorithm based hybrid approach. In *2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, pages 134–139. IEEE, 2019.
- [12] Latifa Belhocine, Mohammed Dahane, and Mohammed Yagouni. Heuristic based strategy for multi-components products recovery and remanufacturing. In *2020 5th International Conference on Logistics Operations Management (GOL)*, pages 1–6. IEEE, 2020.
- [13] Latifa Belhocine, Mohammed Dahane, and Mohammed Yagouni. Performance and usage frequency based policy for products recovery and remanufacturing. In *2020 7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, volume 1, pages 849–854. IEEE, 2020.
- [14] Yassir Bensmain, Mohammed Dahane, Mohammed Bennekrouf, and Zaki Sari. Preventive remanufacturing planning of production equipment under operational and imperfect maintenance constraints : A hybrid genetic algorithm based approach. *Reliability Engineering & System Safety*, 185 :546–566, 2019. [23](#)
- [15] Abderrahmane Bensmaine, Mohammed Dahane, and Lyes Benyoucef. A non-dominated sorting genetic algorithm based approach for optimal machines selection in reconfigurable manufacturing environment. *Computers & Industrial Engineering*, 66(3) :519–524, 2013.
- [16] Philippe Bihouix. *L'Âge des low tech. Vers une civilisation techniquement soutenable : Vers une civilisation techniquement soutenable*. Le Seuil, 2014.
- [17] Hamza Boudhar. *Optimisation de la politique de remanufacturing des pièces de rechange dans le cadre d'une maintenance intégrée à une chaîne logistique en boucle fermée*. PhD thesis, Université de Lorraine, 2015. [21](#)

-
- [18] Hamza Boudhar, Mohammed Dahane, and Nidhal Rezg. New dynamic heuristic for the optimization of opportunities to use new and remanufactured spare part in stochastic degradation context. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28(2) :437–454, 2017.
- [19] Lisbeth Buschkühl, Florian Sahling, Stefan Helber, and Horst Tempelmeier. Dynamic capacitated lot-sizing problems : a classification and review of solution approaches. *Or Spectrum*, 32(2) :231–261, 2010.
- [20] Jian Cao, Xihui Chen, Xuemei Zhang, Yanchen Gao, Xueping Zhang, and Sanjay Kumar. Overview of remanufacturing industry in china : Government policies, enterprise, and public awareness. *Journal of Cleaner Production*, 242 :118450, 2020. [18](#)
- [21] Navin Chari, Claver Diallo, Uday Venkatadri, and Daoud Ait-Kadi. Production planning in the presence of remanufactured spare components : an application in the airline industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(1-4) :957–968, 2016.
- [22] CNE. Recycled materials and packaging : State of play, advantages, obstacles, issues and prospects, 2019. [16](#)
- [23] Li Cui, Kuo-Jui Wu, and Ming-Lang Tseng. Selecting a remanufacturing quality strategy based on consumer preferences. *Journal of Cleaner Production*, 161 :1308–1316, 2017. [19](#)
- [24] Jesus O Cunha, Hugo H Kramer, and Rafael A Melo. Effective matheuristics for the multi-item capacitated lot-sizing problem with remanufacturing. *Computers & Operations Research*, 104 :149–158, 2019. [22](#)
- [25] Mohammed Dahane, M’hammed Sahnoun, Belgacem Bettayeb, David Baudry, and Hamza Boudhar. Impact of spare parts remanufacturing on the operation and maintenance performance of offshore wind turbines : a multi-agent approach. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28(7) :1531–1549, 2017. [23](#)
- [26] Kalyanmoy Deb, Samir Agrawal, Amrit Pratap, and Tanaka Meyarivan. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization : Nsga-ii. In *International conference on parallel problem solving from nature*, pages 849–858. Springer, 2000. [35](#)
- [27] HH Doh and DH Lee. Generic production planning model for remanufacturing systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture*, 224(1) :159–168, 2010.

-
- [28] Behzad Esmaeilian, Sara Behdad, and Ben Wang. The evolution and future of manufacturing : A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 39 :79–100, 2016.
- [29] Chih-Chiang Fang, Min-Hsiu Lai, and Yeu-Shiang Huang. Production planning of new and remanufacturing products in hybrid production systems. *Computers & Industrial Engineering*, 108 :88–99, 2017. [24](#)
- [30] Yun A Fatimah and Wahidul K Biswas. Remanufacturing as a means for achieving low-carbon smes in indonesia. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(8) :2363–2379, 2016.
- [31] Vishal Fegade, RL Shrivatsava, and AV Kale. Design for remanufacturing : methods and their approaches. *Materials Today : Proceedings*, 2(4-5) :1849–1858, 2015.
- [32] Geraldo Ferrer. Yield information and supplier responsiveness in remanufacturing operations. *European Journal of Operational Research*, 149(3) :540–556, 2003. [15](#)
- [33] Yaping Fu, Guangdong Tian, Amir Mohammad Fathollahi-Fard, Abbas Ahmadi, and Chaoyong Zhang. Stochastic multi-objective modelling and optimization of an energy-conscious distributed permutation flow shop scheduling problem with the total tardiness constraint. *Journal of cleaner production*, 226 :515–525, 2019.
- [34] Delphine Gallaud and Blandine Laperche. *Circular economy, industrial ecology and short supply chain*. John Wiley & Sons, 2016.
- [35] M Gallo, L Guerra, and G Guizzi. Hybrid remanufacturing/manufacturing systems : Secondary markets issues and opportunities. *WSEAS Transactions on Business and Economics*, 6(1) :31–41, 2009.
- [36] Ron Giutini, Kevin Gaudette, et al. Remanufacturing : The next great opportunity for boosting us productivity. *Business Horizons*, 46(6) :41–48, 2003. [15](#)
- [37] Awuchi Chinaza Godswill, Awuchi Chibueze Gospel, Amagwula Ikechukwu Otuosorochi, and Igwe Victory Somtochukwu. Industrial and community waste management : Global perspective. *American Journal of Physical Sciences*, 1(1) :1–16, 2020. [9](#)
- [38] Guiliang Gong, Qianwang Deng, Raymond Chiong, Xuran Gong, Hezhiyuan Huang, and Wenwu Han. Remanufacturing-oriented process planning and scheduling : mathematical modelling and evolutionary optimisation. *International Journal of Production Research*, pages 1–19, 2019. [23](#)

-
- [39] Nicoleta Gurita, Magnus Fröhling, and Jan Bongaerts. Future perspectives for weee recycling—dynamic evaluation of the mobile phones and smartphones waste stream. In *2016 Electronics Goes Green 2016+(EGG)*, pages 1–9. IEEE, 2016. [10](#)
- [40] Nicoleta Gurita, Magnus Fröhling, and Jan Bongaerts. Assessing potentials for mobile/smartphone reuse/remanufacture and recycling in germany for a closed loop of secondary precious and critical metals. *Journal of Remanufacturing*, 8(1-2) :1–22, 2018.
- [41] P Hasanov, MY Jaber, and N Tahirov. Four-level closed loop supply chain with remanufacturing. *Applied Mathematical Modelling*, 66 :141–155, 2019. [21](#)
- [42] Louise Lindkvist Haziri and Erik Sundin. Supporting design for remanufacturing—a framework for implementing information feedback from remanufacturing to product design. *Journal of Remanufacturing*, pages 1–20, 2019. [20](#)
- [43] Ching-Lai Hwang and Kwangsun Yoon. Methods for multiple attribute decision making. In *Multiple attribute decision making*, pages 58–191. Springer, 1981. [124](#)
- [44] Winifred L Ijomah, Jan P Bennett, and Jim Pearce. Remanufacturing : evidence of environmentally conscious business practice in the uk. In *Proceedings first international symposium on environmentally conscious design and inverse manufacturing*, pages 192–196. IEEE, 1999. [16](#)
- [45] Mehmet Ali Ilgin and Surendra M Gupta. *Remanufacturing modeling and analysis*. CRC Press, 2012.
- [46] Mehmet Ali Ilgin and Surendra M Gupta. *Remanufacturing modeling and analysis*. CRC Press, 2016. [14](#)
- [47] Anbesh Jamwal, Rajeev Agrawal, Monica Sharma, and Vikas Kumar. Review on multi-criteria decision analysis in sustainable manufacturing decision making. *International Journal of Sustainable Engineering*, pages 1–24, 2021.
- [48] Raf Jans and Zeger Degraeve. Modeling industrial lot sizing problems : a review. *International Journal of Production Research*, 46(6) :1619–1643, 2008.
- [49] Zhigang Jiang, Han Wang, Hua Zhang, Gamini Mendis, and John W Sutherland. Value recovery options portfolio optimization for remanufacturing end of life product. *Journal of cleaner production*, 210 :419–431, 2019. [20](#)

-
- [50] Yi Jing, Xu Wang, Wenchuan Li, and Lei Deng. Robust production planning with remanufacturing and heterogeneous demands under return and demand uncertainty. *International Journal of Applied Mathematics and Statistics* ?, 41(11) :183–196, 2013.
- [51] H-B Jun, Mathieu Cusin, Dimitris Kiritsis, and Paul Xirouchakis. A multi-objective evolutionary algorithm for eol product recovery optimization : turbocharger case study. *International Journal of Production Research*, 45(18-19) :4573–4594, 2007.
- [52] Yong-Sung Jun, Hyun-Jung Jo, Young-Chun Kim, Hong-Yoon Kang, Yong-Woo Hwang, and Young-Won Kim. Analysis of potential economic and environmental effects through remanufacturing of construction equipment in korea. *Procedia Manufacturing*, 43 :620–626, 2020.
- [53] Anil Kumar Katta, Matthew Davis, and Amit Kumar. Development of disaggregated energy use and greenhouse gas emission footprints in canada’s iron, gold, and potash mining sectors. *Resources, Conservation and Recycling*, 152 :104485, 2020.
- [54] A Khatab, C Diallo, EH Aghezzaf, and U Venkatadri. Joint optimization of the selective maintenance and repairperson assignment problem when using new and remanufactured spare parts. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13) :1063–1068, 2019.
- [55] Onur A Kilic and Huseyin Tunc. Heuristics for the stochastic economic lot sizing problem with remanufacturing under backordering costs. *European Journal of Operational Research*, 276(3) :880–892, 2019. [22](#)
- [56] Pakayse Koken, Venkatesh Arasanipalai Raghavan, and Sang Won Yoon. A genetic algorithm based heuristic for dynamic lot sizing problem with returns and hybrid products. *Computers & Industrial Engineering*, 119 :453–464, 2018. [23](#)
- [57] Andreas Kroner, Zhenghe Luo, and Bernd Bertsche. Prediction of the remaining useful life of transmission components within a remanufacturing process to ensure the second product life. In *Proc. IRF2020 : 7th International Conference Integrity-Reliability-Failure, 6th–10th September, 2020*.
- [58] V Kumar, PS Shirodkar, JA Camelio, and JW Sutherland. Value flow characterization during product lifecycle to assist in recovery decisions. *International Journal of Production Research*, 45(18-19) :4555–4572, 2007.
- [59] Jelena Kurilova-Palisaitiene, Erik Sundin, and Bonnie Poksinska. Remanufacturing challenges and possible lean improvements. *Journal of Cleaner Production*, 172 :3225–3236, 2018.

-
- [60] Choon-Man Lee, Wan-Sik Woo, and Young-Hwa Roh. Remanufacturing : Trends and issues. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 4(1) :113–125, 2017.
- [61] Seoyoon Lee and Minjung Kwak. Consumer valuation of remanufactured products : A comparative study of product categories and business models. *Sustainability*, 12(18) :7581, 2020. [19](#)
- [62] Haolan Liao, Qianwang Deng, Yuanrui Wang, Shumin Guo, and Qinghua Ren. An environmental benefits and costs assessment model for remanufacturing process under quality uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 178 :45–58, 2018. [17](#)
- [63] Wenyi Lin, Yi Chai, and Qie Liu. Remaining useful life prediction of electronic products based on wiener degradation process. *IFAC-PapersOnLine*, 52(24) :24–28, 2019.
- [64] Changping Liu and Weiyu Zhou. Production decision optimization for iron and steel scrap remanufacturing considering carbon emission and delivery time. *Complexity*, 2021, 2021.
- [65] Conghu Liu, Wei Cai, Ognyan Dinolov, Cuixia Zhang, Weizhen Rao, Shun Jia, Li Li, and Felix TS Chan. Energy based sustainability evaluation of remanufacturing machining systems. *Energy*, 150 :670–680, 2018.
- [66] Jiayi Liu, Zude Zhou, Duc Truong Pham, Wenjun Xu, Chunqian Ji, and Quan Liu. Collaborative optimization of robotic disassembly sequence planning and robotic disassembly line balancing problem using improved discrete bees algorithm in remanufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61 :101829, 2020.
- [67] Jiayi Liu, Zude Zhou, Duc Truong Pham, Wenjun Xu, Junwei Yan, Aiming Liu, Chunqian Ji, and Quan Liu. An improved multi-objective discrete bees algorithm for robotic disassembly line balancing problem in remanufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(9) :3937–3962, 2018.
- [68] Wenjie Liu, Wenyan Ma, Yi Hu, Mingzhou Jin, Kai Li, Xiangyun Chang, and Xianyu Yu. Production planning for stochastic manufacturing/remanufacturing system with demand substitution using a hybrid ant colony system algorithm. *Journal of cleaner production*, 213 :999–1010, 2019. [23](#)
- [69] Zhi Liu, Kevin W Li, Bang-Yi Li, Jun Huang, and Juan Tang. Impact of product-design strategies on the operations of a closed-loop supply chain. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 124 :75–91, 2019.

-
- [70] Zhichao Liu, Tao Li, Qihong Jiang, and Hongchao Zhang. Life cycle assessment–based comparative evaluation of originally manufactured and remanufactured diesel engines. *Journal of Industrial Ecology*, 18(4) :567–576, 2014. [17](#)
- [71] Robert T Lund and W Hauser. The database of remanufacturers. *Boston University, Boston, Massachusetts*, 2012.
- [72] Ellen MacArthur. Towards the circular economy. *Journal of Industrial Ecology*, 2 :23–44, 2013. [11](#)
- [73] Paula Martínez, Diego Molina, Luciana Vidal, Pedro Piñeyro, and Omar Viera. Production planning with remanufacturing and environmental costs. In Daniel Alejandro Rossit, Fernando Tohmé, and Gonzalo Mejía Delgado, editors, *Production Research*, pages 89–101, Cham, 2021. Springer International Publishing.
- [74] A Raihanian Mashhadi, Behzad Esmailian, and Sara Behdad. Uncertainty management in remanufacturing decisions : a consideration of uncertainties in market demand, quantity, and quality of returns. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B : Mechanical Engineering*, 1(2) :021007, 2015.
- [75] Nabil Nasr. *Remanufacturing in the circular economy : operations, engineering and logistics*. John Wiley & Sons, 2019.
- [76] Katherine Ortegon, Loring F. Nies, and John W. Sutherland. Remanufacturing : an alternative for end of use of wind turbines. In *Leveraging technology for a sustainable world*, pages 155–160. Springer, 2012.
- [77] Johan Östlin, Erik Sundin, and Mats Björkman. Importance of closed-loop supply chain relationships for product remanufacturing. *International Journal of Production Economics*, 115(2) :336–348, 2008.
- [78] Samir Ouaret, Jean-Pierre Kenné, and Ali Gharbi. Production and replacement planning of a deteriorating remanufacturing system in a closed-loop configuration. *Journal of Manufacturing Systems*, 53 :234–248, 2019. [23](#)
- [79] Anton Ovchinnikov, Vered Blass, and Gal Raz. Economic and environmental assessment of remanufacturing strategies for product+ service firms. *Production and Operations Management*, 23(5) :744–761, 2014.
- [80] D Parker, K Riley, S Robinson, H Symington, J Tewson, K Jansson, S Ramkumar, and D Peck. Remanufacturing market study, report from the horizon 2020 project : Ern—european remanufacturing network. *Grant Agreement*, (645984), 2015.

-
- [81] Konstantinos E Parsopoulos, Ioannis Konstantaras, and K Skouri. Metaheuristic optimization for the single-item dynamic lot sizing problem with returns and remanufacturing. *Computers & Industrial Engineering*, 83 :307–315, 2015. [22](#)
- [82] Pedro Piñeyro and Omar Viera. The economic lot-sizing problem with remanufacturing : analysis and an improved algorithm. *Journal of Remanufacturing*, 5(1) :1–13, 2015. [22](#)
- [83] Franco Quezada, Céline Gicquel, Safia Kedad-Sidhoum, and Dong Quan Vu. A multi-stage stochastic integer programming approach for a multi-echelon lot-sizing problem with returns and lost sales. *Computers & Operations Research*, 116 :104865, 2020. [22](#)
- [84] Jim Rallo. The rise of refurbished products. *Liquidity Services*. Available online : <https://www.liquidityservices.com/the-rise-of-the-refurbished-goods-market/>(accessed on 6 October 2020), 2019. [19](#)
- [85] Henrik Riisgaard, Mette Mosgaard, and Kristina Overgaard Zacho. Local circles in a circular economy—the case of smartphone repair in denmark. *European Journal of Sustainable Development*, 5(1) :109–109, 2016. [10](#)
- [86] Abdolreza Roshani, Davide Giglio, and Massimo Paolucci. A simulated annealing approach for the capacitated dynamic lot sizing problem in a closed remanufacturing system. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12) :1496–1501, 2016. [22](#)
- [87] Takako Sakai and Shozo Takata. Reconfiguration management of remanufactured products for responding to varied user needs. *CIRP annals*, 61(1) :21–26, 2012.
- [88] Tomohiko Sakao and Erik Sundin. How to improve remanufacturing?—a systematic analysis of practices and theories. *Journal of manufacturing science and engineering*, 141(2), 2019. [17](#)
- [89] Biswajit Sarkar, Mehran Ullah, and Namhun Kim. Environmental and economic assessment of closed-loop supply chain with remanufacturing and returnable transport items. *Computers & Industrial Engineering*, 111 :148–163, 2017. [21](#)
- [90] Wenbo Shi and K Jo Min. Product remanufacturing : a real options approach. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 61(2) :237–250, 2014.
- [91] Angelo Sifaleras, Ioannis Konstantaras, and Nenad Mladenović. Variable neighborhood search for the economic lot sizing problem with product returns and recovery. *International Journal of Production Economics*, 160 :133–143, 2015. [22](#)

-
- [92] Sakraan Sitcharangsie, Winifred Ijomah, and TC Wong. Decision makings in key remanufacturing activities to optimise remanufacturing outcomes : a review. *Journal of Cleaner Production*, 232 :1465–1481, 2019.
- [93] Daniel W Steeneck and Subhash C Sarin. Product design for leased products under remanufacturing. *International Journal of Production Economics*, 202 :132–144, 2018.
- [94] Erik Sundin. The role of remanufacturing in a circular economy. *Remanufacturing in the Circular Economy : Operations, Engineering and Logistics*, pages 31–60, 2019. [17](#)
- [95] Erik Sundin and Bert Bras. Making functional sales environmentally and economically beneficial through product remanufacturing. *Journal of cleaner production*, 13(9) :913–925, 2005.
- [96] Jana Švecová et al. Consumer knowledge and young consumer purchase behaviour towards remanufactured products. 2019. [17](#)
- [97] Guangdong Tian, Yaping Ren, Yixiong Feng, MengChu Zhou, Honghao Zhang, and Jianrong Tan. Modeling and planning for dual-objective selective disassembly using and/or graph and discrete artificial bee colony. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4) :2456–2468, 2018.
- [98] Guangdong Tian, Honghao Zhang, Yixiong Feng, Hongfei Jia, Chaoyong Zhang, Zhigang Jiang, Zhiwu Li, and Peigen Li. Operation patterns analysis of automotive components remanufacturing industry development in china. *Journal of cleaner production*, 164 :1363–1375, 2017.
- [99] Meriem Tigane, Mohammed Dahane, and Mourad Boudhar. Multiobjective approach for deteriorating jobs scheduling for a sustainable manufacturing system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101(5) :1939–1957, 2019.
- [100] Patricia van Loon and Luk N Van Wassenhove. Assessing the economic and environmental impact of remanufacturing : a decision support tool for oem suppliers. *International Journal of Production Research*, 56(4) :1662–1674, 2018.
- [101] G Villalba, M Segarra, JM Chimenos, and F Espiell. Using the recyclability index of materials as a tool for design for disassembly. *Ecological Economics*, 50(3-4) :195–200, 2004.
- [102] Harvey M Wagner and Thomson M Whitin. Dynamic version of the economic lot size model. *Management science*, 5(1) :89–96, 1958. [29](#)

-
- [103] Han Wang, Zhigang Jiang, Xugang Zhang, Yanan Wang, and Yan Wang. A fault feature characterization based method for remanufacturing process planning optimization. *Journal of Cleaner Production*, 161 :708–719, 2017.
- [104] Wenjie Wang, Guangdong Tian, Maoning Chen, Fei Tao, Chaoyong Zhang, AI-Ahmari Abdulraham, Zhiwu Li, and Zhigang Jiang. Dual-objective program and improved artificial bee colony for the optimization of energy-conscious milling parameters subject to multiple constraints. *Journal of Cleaner Production*, 245 :118714, 2020.
- [105] Yacan Wang and Benjamin T Hazen. Consumer product knowledge and intention to purchase remanufactured products. *International Journal of Production Economics*, 181 :460–469, 2016. [19](#)
- [106] Matt Watson. A review of literature and research on public attitudes, perceptions and behaviour relating to remanufactured, repaired and reused products. *Report for the Centre for Remanufacturing and Reuse*, pages 1–26, 2008.
- [107] Haijun Wen, Shiwang Hou, Zhaohua Liu, and Yongjiang Liu. An optimization algorithm for integrated remanufacturing production planning and scheduling system. *Chaos, Solitons & Fractals*, 105 :69–76, 2017. [23](#)
- [108] Xuhui Xia, Huixian Zhu, Zelin Zhang, Xiang Liu, Lei Wang, and Jianhua Cao. 3d-based multi-objective cooperative disassembly sequence planning method for remanufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(9) :4611–4622, 2020.
- [109] B Xing and WJ Gao. Computational intelligence in remanufacturing. 701 e. chocolate avenue, suite 200, hershey pa 17033 : Igi global. Technical report, ISBN 978-1-4666-4908-8, 2014.
- [110] Siqin Xiong, Junping Ji, and Xiaoming Ma. Environmental and economic evaluation of remanufacturing lithium-ion batteries from electric vehicles. *Waste Management*, 102 :579–586, 2020.
- [111] Lin Yang, Feng Wang, Jiaojiao Zhang, and Weihao Ren. Remaining useful life prediction of ultrasonic motor based on elman neural network with improved particle swarm optimization. *Measurement*, 143 :27–38, 2019.
- [112] SS Yang, SK Ong, and AYC Nee. A decision support tool for product design for remanufacturing. *Procedia CIRP*, 40 :144–149, 2016. [20](#)
- [113] HP Zhang. Optimization of remanufacturing production scheduling considering uncertain factors. *International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM)*, 18(2), 2019. [23](#)

-
- [114] Xiufen Zhang, Shuyou Zhang, Lichun Zhang, Junfang Xue, Rina Sa, and Hai Liu. Identification of product's design characteristics for remanufacturing using failure modes feedback and quality function deployment. *Journal of Cleaner Production*, 239 :117967, 2019. [20](#)
- [115] Xugang Zhang, Xiuyi Ao, Wei Cai, Zhigang Jiang, and Hua Zhang. A sustainability evaluation method integrating the energy, economic and environment in remanufacturing systems. *Journal of Cleaner Production*, 239 :118100, 2019.
- [116] Xugang Zhang, Lu Xu, Hua Zhang, Zhigang Jiang, and Wei Cai. Emergy based intelligent decision-making model for remanufacturing process scheme integrating economic and environmental factors. *Journal of Cleaner Production*, page 125247, 2020.
- [117] Yingfeng Zhang, Sichao Liu, Yang Liu, Haidong Yang, Miao Li, Donald Huisingh, and Lihui Wang. The 'internet of things' enabled real-time scheduling for remanufacturing of automobile engines. *Journal of cleaner production*, 185 :562–575, 2018.
- [118] Zhengyang Zhang, Kazuyo Matsubae, and Kenichi Nakajima. Impact of remanufacturing on the reduction of metal losses through the life cycles of vehicle engines. *Resources, Conservation and Recycling*, 170 :105614, 2021.
- [119] Liangchuan Zhou and Surendra M Gupta. Value depreciation factors for new and remanufactured high-technology products : a case study on iphones and ipads. *International Journal of Production Research*, pages 1–32, 2020.
- [120] Xian-cheng Zhou, Zhi-xue Zhao, Kai-jun Zhou, and Cai-hong He. Remanufacturing closed-loop supply chain network design based on genetic particle swarm optimization algorithm. *Journal of Central South University*, 19(2) :482–487, 2012. [21](#)
- [121] Yapeng Zhou, Miaohua Huang, and Michael Pecht. Remaining useful life estimation of lithium-ion cells based on k-nearest neighbor regression with differential evolution optimization. *Journal of Cleaner Production*, 249 :119409, 2020.
- [122] Tarik Zouadi, Alice Yalaoui, Mohamed Reghioui, and Kamal Eddin El Kadiri. Hybrid manufacturing/remanufacturing lot-sizing problem with returns supplier's selection under, carbon emissions constraint. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12) :1773–1778, 2016. [22](#)

Résumé

La construction d'une réputation écologique exemplaire est devenue primordiale pour les industries de tous les secteurs. A cet effet, et dans le cadre de la réduction des déchets de la production, de la consommation de ressources, et des émissions de gaz à effet de serre, les industriels se tournent vers l'adoption du concept de l'économie circulaire. Parmi les processus utilisés dans ce contexte, nous retrouvons le remanufacturing qui permet d'étendre le cycle de vie et d'utilisation des produits usagés selon trois étapes principales : la récupération et la collecte de produits usagés, les opérations de remise à neuf et la redistribution des produits remis à neuf.

Nous nous intéressons dans cette thèse à une application du processus de remanufacturing à titre préventif. Nous considérons des produits en cours d'utilisation par des clients, sur un horizon fini, et nous procédons à la récupération de ces produits à des instants prédéterminés afin de les remettre à neuf ou améliorer leur état de fonctionnement, puis à les redistribuer pour d'autres utilisations ultérieures. L'objectif global est de développer des stratégies de remanufacturing performantes sur le plan économique et environnemental, intégrant les différentes phases du remanufacturing et tenant en compte les caractéristiques du produit et des conditions de son utilisation.

En premier lieu, nous considérons la prise de deux décisions majeures de l'activité de remanufacturing. La première est liée à la capacité du stock et consiste à sélectionner les produits à récupérer ainsi que leur nombre. Chaque produit étant caractérisé par un grade supposé connu, nous nous intéressons dans la seconde décision à déterminer le niveau de remise à neuf et le grade à atteindre pour chaque produit récupéré.

En deuxième lieu, par extension de la première problématique, nous intégrons les caractéristiques des produits et les profils des clients. En effet, nous nous focalisons sur la structure du produit en considérant qu'il présente plusieurs fonctionnalités et qu'il est caractérisé par une performance déterminant son grade et dépendant de la qualité de réalisation (exécution) des fonctionnalités. Nous considérons également le profil du client utilisateur du produit, basé sur la fréquence d'utilisation qui impacte la réalisation des fonctionnalités du produit et par conséquent son grade. Ainsi, une fréquence d'utilisation élevée donnera une qualité d'exécution des fonctionnalités inférieure. Nous développons le modèle mathématique permettant de faire le lien entre la performance d'un produit et la qualité d'exécution de ses fonctionnalités. Nous proposons à ce stade l'optimisation multiobjectif de l'étape de la récupération indépendamment des autres décisions relatives à l'action de remanufacturing.

En dernier lieu, nous considérons qu'un produit est constitué de plusieurs composants, chacun intervenant d'une manière spécifique dans l'exécution des fonctionnalités offertes par le produit. En plus, chaque composant est caractérisé par une performance donnée. Dans ce cas, le profil du client, i.e. la fréquence d'utilisation impacte la performance de chaque composant et de ce fait la performance globale du produit. Nous développons le modèle mathématique qui permet de calculer la performance d'un produit en fonction de la performance de ses composants et de leur relation avec ses fonctionnalités. En plus des décisions relatives à la sélection des produits et aux niveaux de remise à neuf, nous intégrons l'optimisation de l'étape de transport et de récupération des produits utilisés.

Pour chaque problème étudié, un modèle mathématique multiobjectif est développé, résolu en ayant recours à des métaheuristiques et/ou heuristiques. De plus, une analyse de décision multicritères est réalisée pour aider le décideur à déterminer les meilleures alternatives de remanufacturing à mettre en oeuvre. Plusieurs expériences numériques ont été réalisées pour illustrer l'applicabilité des différentes approches proposées.

Mots clés : Remanufacturing, récupération, remise à neuf, optimisation, heuristique, métaheuristique.

Abstract

Building an exemplary green reputation has become essential for industries in all sectors. To this end, and with the aim of reducing production waste, resource consumption, and greenhouse gas emissions, manufacturers are turning to the adoption of the circular economy concept. Among the processes used in this context, we find remanufacturing, which extends the life cycle and use of products in three main steps: recovery and collection of used products, remanufacturing operations, and redistribution of remanufactured products.

In this thesis, we are interested in an application of the remanufacturing process as a preventive measure. We consider products in use by customers, over a finite horizon, and we proceed to the recovery of these products at predetermined times to refurbish them or improve their working condition, and then to redistribute them for further use. The overall objective is to develop economically and environmentally efficient remanufacturing strategies, integrating the different phases of remanufacturing and considering the characteristics of the product and the conditions of its use.

First, we consider two major decisions in the remanufacturing activity. The first one is related to the stock capacity and consists in selecting the products to be recovered and their number. Since each product is characterized by a grade, we are interested in the second decision to determine the level of remanufacturing and the grade to be reached for each recovered product.

Second, by extension of the first problem, we integrate the characteristics of the products and the profiles of the customers. We focus on the structure of the product composed of several functionalities and characterized by a performance determining its grade and depending on the quality of execution of the functionalities. We also consider the profile of the product user, based on the frequency of usage impacting the realization of the product functionalities and grade. Thus, a high frequency of usage gives a lower execution quality of the features. We develop the mathematical model to make the link between the performance of a product and the quality of execution of its features. We propose at this stage the multi-objective optimization of the recovery stage independently of the other remanufacturing action decisions.

Finally, we consider that a product is made of several components, each of which intervenes in a specific way in the execution of the functionalities offered by the product. Moreover, each component is characterized by a given performance. In this case, the customer profile, i.e., the frequency of use, impacts the performance of each component and thus the overall performance of the product. We develop the mathematical model that allows calculating the performance of a product according to the performance of its components and their relationship with its functionalities. In addition to decisions on product selection and remanufacturing levels, we integrate the optimization of the transportation and recovery stage of used products.

For each problem studied, a multi-objective mathematical model is developed, solved using metaheuristics and/or heuristics. In addition, multi-criteria decision analysis is performed to help the decision-maker to determine the best remanufacturing alternatives to implement. Several numerical experiments have been performed to illustrate the applicability of the different approaches proposed.

Keywords: Remanufacturing, recovery, optimization, heuristic, metaheuristic.