

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du grade de DOCTEUR

En : Productique

par

Mr. Yassir BENSMAIN

Élaboration d'une nouvelle stratégie du remanufacturing des équipements avec intégration des contraintes de maintenance et de production

Soutenue publiquement, le 18/04/2019, devant le jury composé de :

Mr. Azeddine CHIKH	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mr. Zaki SARI	Professeur	ESSA Tlemcen	Directeur
Mr. Mohammed DAHANE	MCA	Université de Lorraine	Co-Directeur
Mr. Mohammed BENNEKROUF	MCB	ESSA Tlemcen	Co-Directeur
Mr. Khalid HACHEMI	Professeur	Université d'Oran 2	Examinateur
Mr. Chakib SELADJI	Professeur	Université de Tlemcen	Examinateur

Thèse effectuée au sein du



Laboratoire de productique
de l'Université de Tlemcen
Algérie
en collaboration avec



Laboratoire de Génie Industriel et de Production de Metz (LGIPM)
de l'Université de Lorraine
France
dans le cadre du programme de bourse PROFAS B+

إذا كان الله معك فمن عليك؟ وإذا كان عليك فمن معك؟

وإذا نلت محبة الله فماذا فقدت؟ وإذا غابت عنك محبة الله فماذا وجدت؟

إذا أحبك الله جعل محبتك في قلوب الخلق، وإذا أحبك الخلق فهذا رأس مال لا يقدر بثمن

إذا أحبك الله منحك الحكمة، ومن يؤتى الحكمة فقد أوتي خيراً كثيراً

الدكتور محمد راتب النابلسي

*À ma mère, À mon père,
À mon frère et ma sœur,
À mes grands-parents,
À ma fiancée,
À toute ma grande famille et mes amis...
À mon ami défunt « Boumedienne Bouabdallah »*

Résumé

Le remanufacturing des équipements avant la fin de sa vie physique peut générer des profits considérables tant pour l'utilisateur que pour les fabricants/refabricants d'équipements d'origine. Cependant, les conditions opérationnelles des équipements et la qualité des interventions de maintenance effectuées tout au long de leur durée de vie affectent largement les coûts totaux du cycle de vie du point de vue de l'utilisateur, et la qualité des équipements récupérés du point de vue du refabricant/refabricant. Cette thèse a pour but d'étudier les possibilités du remanufacturing des équipements de production du point de vue de l'utilisateur, utilisés pour fabriquer un seul type de produit afin de répondre à des demandes déterministes et dynamiques durant un horizon fini. Les actions de maintenance préventive sont supposées imparfaites. En effet, lorsqu'elles sont effectuées, ces actions sont censées améliorer l'équipement en atteignant un état entre « Aussi Bon Que Neuf » et « Aussi Mauvais Qu'Ancien ». Nous supposons que les partenaires (l'utilisateur de l'équipement et le fabricant d'équipements d'origine) sont intéressés par toute opportunité du remanufacturing. Notre objectif dans cette thèse est d'examiner l'interdépendance entre les conditions opérationnelles, les activités de maintenance et les décisions du remanufacturing des équipements de production lorsque des pièces de rechange neuves et remanufacturées sont utilisées dans le processus du remanufacturing. Dans ce contexte, nous proposons une approche de planification intégrée afin d'optimiser conjointement le plan de production, le plan du remanufacturing et la qualité des pièces de rechange utilisées pour chaque action du remanufacturing.

Afin de réduire la complexité de modélisation et de résolution du problème d'optimisation présenté dans cette thèse, nous décomposons la problématique principale en plusieurs problématiques consécutives. À chaque étape, nous adoptons une modélisation mathématique non linéaire afin de formuler les différents problèmes d'optimisation. Pour résoudre ces problèmes, une heuristique constructive de type Fix-and-Relax et un algorithme génétique hybride sont proposés. Des expériences numériques et une analyse de sensibilité sont présentées pour illustrer l'applicabilité de l'approche proposée.

Mots-clé :

Remanufacturing préventive, maintenance imparfaite, planification de la production, algorithme génétique, Heuristique Fix-and-Relax.

**Developing new strategy for equipment
remanufacturing with considering
maintenance and production constraints**

Abstract

Remanufacturing an equipment before the end of its life may generate substantial profits for both the user and the remanufacturer. However, the equipment operating conditions as well as the quality of maintenance actions undergone throughout the life of equipment largely affect the total life cycle costs from the user's perspective, and the quality of the recovered equipment from the remanufacturer's perspective. This research aims at investigating the remanufacturing opportunities of production equipment from the user's perspective, used to produce a single product in order to meet deterministic and dynamic demands over a finite horizon. Preventive maintenance actions on equipment are assumed to be imperfect. Indeed, when performed, these actions can improve the equipment to reach a state between the "As-good-as-new" level and the "As-bad-as-old" level. It is assumed that the stakeholders (the equipment's user and the original equipment manufacturer-remanufacturer) are interested by all remanufacturing opportunities. This thesis aimed at investigating the interdependence between the operating conditions, the maintenance activities, and the remanufacturing decisions in production equipment sector when new and remanufactured spare parts are used in the remanufacturing process. In this context, we propose an integrated planning approach to jointly optimize the production plan, the remanufacturing plan and the quality of spare parts used in each remanufacturing action.

In order to reduce the modelling and solving complexity of the optimization problem presented in this thesis, we decompose the main problem into several consecutive problems. At each step, we adopt a non-linear mathematical modelling to formulate the different optimization problems. To solve these problems, a constructive Fix-and-Relax heuristic and a hybrid genetic algorithm are proposed. Numerical experiments and sensitivity analysis are presented to illustrate the applicability of the proposed approach.

Keywords :

Preventive remanufacturing, Imperfect maintenance, Production planning Genetic algorithm, Fix and Relax heuristic.

Remerciements

Je remercie, avant tout, Dieu, le Tout-Puissant, de m'avoir accordé parmi ses innombrables grâces, santé et courage pour accomplir ce travail.

Le travail de recherche présenté dans ce manuscrit a été accompli en collaboration avec le Laboratoire de Génie Industriel et de Production de Metz. Ce travail s'intègre dans le cadre du programme de bourse PROFAS B+.

Je ne pouvais pas commencer ces remerciements sans évoquer mes très chers encadrants, MM DAHANE Mohammed, Maître de conférences de l'Université de Lorraine, BENNEKROUF Mohammed, Docteur de l'Université de Tlemcen et SARI Zaki, Professeur de l'Université de Tlemcen.

Je tiens également à adresser mes plus vifs remerciements aux membres du jury, qui ont accepté d'évaluer mon travail et de faire partie de mon jury de thèse. Merci à MM. CHIKH Azeddine, Professeur de l'Université de Tlemcen, HACHEMI Khalid, Professeur de l'Université d'Oran 2 et SELADJI Chakib, Professeur de l'Université de Tlemcen.

A tous ceux qui m'ont encouragé à mener ce travail jusqu'au bout.

Table des matières

Résumé	v
Abstract	vii
Table des matières	ix
Table des figures	xiii
Liste des tableaux	xv
Liste des algorithmes	xvii
Glossaire	xix
Introduction générale	1
1 Contexte général de l'étude	6
1.1 Introduction	6
1.2 Les chaînes logistiques en boucle fermée	6
1.2.1 La boucle fermée de la réutilisation	8
1.2.2 La boucle fermée de réparation	8
1.2.3 La boucle fermée de remanufacturing	9
1.2.4 La boucle fermée de recyclage	9
1.3 Remanufacturing des équipements de production	11
1.3.1 Du point de vue de l'utilisateur	11
1.3.2 Du point de vue du fabricant des équipements d'origine	12
1.4 Temps de remanufacturing des équipements de production	13
1.4.1 Selon une perspective environnementale	13
1.4.2 Selon une perspective économique	13

1.4.3	Selon une perspective technique	13
1.4.4	Remanufacturing à cause de l'obsolescence	14
1.4.5	Temps de remanufacturing basé sur la vie physique	14
1.5	L'analyse des coûts du cycle de vie	14
1.6	La défaillance sous des conditions de fonctionnement variables (modèle à risques proportionnels)	15
1.7	La maintenance	18
1.7.1	Politiques de maintenance	19
1.7.2	Efficacité de la maintenance	23
1.8	Quelques modèles de la maintenance préventive imparfaite	24
1.9	Conclusion	27
2	État de l'art et position du problème	28
2.1	Introduction	28
2.2	Le remanufacturing dans le secteur industriel	29
2.3	Le remanufacturing préventive	30
2.4	La sélection des pièces de rechange	31
2.5	Conditions de fonctionnement, maintenance et fiabilité	32
2.5.1	Planification de la production	32
2.5.2	L'effet des conditions de fonctionnement sur la fiabilité	33
2.5.3	L'effet de la maintenance imparfaite sur la fiabilité	33
2.5.4	L'effet des conditions de fonctionnement et de la maintenance imparfaite sur la fiabilité	34
2.6	Synthèse de l'étude bibliographique et position du problème	35
2.7	Présentation des méthodes d'optimisation utilisées	38
2.7.1	Modélisation par la programmation mathématique	40
2.7.2	Solveur Lingo	40
2.7.3	Heuristique Fix-and-Relax basée sur l'approche de l'horizon glissant	41
2.7.4	Algorithmes génétiques	43
2.8	Conclusion	49
3	Modélisation et résolution du problème de planification de la production en tenant compte des contraintes de détérioration et de maintenance	50
3.1	Introduction	50

3.2	Description du problème et hypothèses	51
3.3	Modélisation de la loi de défaillance	53
3.4	Formulation mathématique du problème	56
3.5	Approche de résolution proposée	57
3.6	Expériences numériques et analyse	61
3.7	Mesure de performance de l'approche de résolution adaptée à l'expérimentation numérique	67
3.8	Conclusion	69
4	Modélisation et résolution du problème de la planification intégrée de la production et du remplacement en tenant compte des contraintes de détérioration et de maintenance	71
4.1	Introduction	71
4.2	Description du problème et hypothèses	72
4.2.1	Notations mathématiques	73
4.3	Évaluation des charges d'amortissement	74
4.4	Formulation mathématique du problème	76
4.5	Approche de résolution proposée	78
4.5.1	L'algorithme génétique	79
4.5.2	Algorithme de l'horizon glissant basée sur une procédure de décomposition	84
4.5.3	L'heuristique Fix-and-Relax	86
4.6	Expériences numériques et analyses	87
4.7	Conclusion	95
5	Modélisation et résolution du problème de la planification intégrée de la production et du remanufacturing en tenant compte différentes qualités de la pièce de rechange	96
5.1	Introduction	96
5.2	Description du problème et hypothèses	97
5.2.1	Notations mathématiques	98
5.3	Modélisation de la loi de défaillance en tenant compte du remanufacturing	100
5.4	Formulation mathématique du problème	101
5.5	Approche de résolution proposée	103
5.6	Expériences numériques et analyse	104

5.6.1	Les données numériques	104
5.6.2	Les résultats obtenus	105
5.7	Mesure de performance de l'approche de résolution	108
5.8	Analyse de sensibilité	109
5.8.1	Effet de la variation de la demande sur les plans de production et de remanufacturing	109
5.8.2	Effet du taux de panne des pièces de rechange remanufacturées sur le plan de remanufacturing	111
5.8.3	Effet du taux d'amortissement des pièces de rechanges remanufacturées sur le plan de remanufacturing	112
5.8.4	Effet conjoint des taux de défaillance et d'amortissement des pièces de rechange remanufacturées sur le plan de remanufacturing	112
5.8.5	Effet du coût fixe du remanufacturing sur le plan de remanufacturing .	113
5.9	Conclusion	115
Conclusions et perspectives		116
A Exemple numérique détaillé de l'exécution des algorithmes proposés		119
A.1	Algorithme de l'horizon glissant basée sur une procédure de décomposition (Algorithme 3)	119
A.2	Algorithme Fix and Relax (Algorithme 1)	121
A.3	Algorithme d'optimisation du problème de la fenêtre d'observation (Algorithme 2)	123
Bibliographie		126

Table des figures

1.1	Flux de base des processus logistiques directes et inverses [Agrawal et al., 2015a]	8
1.2	Évolution du taux de défaillance sous des conditions de travail normales et sévères	17
1.3	Évolution du taux de défaillance suite à des maintenances de type parfait, minimal, et imparfait [Schutz, 2009]	25
1.4	Évolution du taux de défaillance sur la base du modèle hybride de la maintenance imparfaite	27
2.1	Domaines connexes de l'ingénierie de production et de fiabilité	35
2.2	Notre contribution principale	38
2.3	Classification des méthodes de résolution	40
2.4	Démarche d'un algorithme génétique [Ghali, 2005]	48
3.1	Système étudiée	52
3.2	Variation du taux de défaillance sous l'effet du taux de panne de de la maintenance imparfaite	56
3.3	Principe de l'heuristique Fix-and-Relax	58
3.4	Taux de production par période	64
3.5	Demande par période	64
3.6	Nombre moyen de pannes par période	64
3.7	Coûts de maintenance par période	65
3.8	Coûts de maintenances correctives par période	65
3.9	Coûts de maintenances préventives par période	65
3.10	Niveau du stock par période	66
3.11	Variation du taux de panne	66
3.12	Variation de l'âge virtuel	66
4.1	Système étudié	73

4.2	Schéma de l'algorithme génétique hybride	78
4.3	Structure du chromosome	79
4.4	Opérateur du croisement	81
4.5	Opérateur de mutation	82
4.6	Opérateurs de l'algorithme génétique proposé	84
4.7	Principe de l'horizon glissant	85
4.8	Taux de production par période	89
4.9	Demande par période	90
4.10	Nombre moyen de pannes par période	90
4.11	Coûts de maintenance par période	90
4.12	Coûts de maintenances correctives par période	91
4.13	Coûts de maintenances préventives par période	91
4.14	Charges d'amortissement par période	91
4.15	Amortissement de la valeur de la machine	92
4.16	Niveau du stock par période	92
4.17	Variation du taux de panne	92
4.18	Variation de l'âge virtuel	93
5.1	Système étudié	98
5.2	Exemple de la variation du taux de défaillance sous l'effet conjugué du taux de panne, de la maintenance imparfaite et du remanufacturing	101
5.3	Structure du chromosome	104
5.4	Taux de production par période	106
5.5	Demande par période	106
5.6	Amortissement de la valeur de la machine	107
5.7	Coûts de maintenance par période	107
5.8	Variation du taux de panne	107
5.9	Demandes pour chaque scénario	109
5.10	Effet des variations de la demande sur les plans de production et de remanufacturing	110
5.11	Effet de la variation C^{rep} sur la détérioration de la machine	114
5.12	Effet de la variation du C^{rep} sur l'amortissement de la valeur de la machine	115
A.1	Exemple illustratif de l'heuristique Fix-and-Relax	124

Liste des tableaux

1.1	Définitions de la chaîne logistique en boucle fermée	7
1.2	Définitions du terme « remanufacturing »	9
2.1	Taxonomie des travaux liés à notre recherche»	37
3.1	Demandes mensuelles moyennes	62
3.2	Paramètres liés la maintenance préventive imparfaite	62
3.3	Les résultats obtenus	63
3.4	Mesure de performance de l'approche de résolution	68
4.1	Demandes mensuelles moyennes	88
4.2	Paramètres liés la maintenance préventive imparfaite	88
4.3	Paramètres de l'algorithme génétique	88
4.4	Les résultats obtenus	94
5.1	Demandes mensuelles moyennes	104
5.2	Paramètres du problème	105
5.3	Paramètres de l'Algorithme Génétique (AG)	105
5.4	Mesure de performance de l'approche de résolution	108
5.5	Effet de la variation du r_1 sur le plan de remanufacturing	111
5.6	Effet de la variation de $Deprate_1$ sur le plan de remanufacturing	112
5.7	Effet conjoint de la variation de r_1 et $Deprate_1$ sur le plan du remanufacturing	113
5.8	The effect of C^{rep} on the remanufacturing plan	114
A.1	Demandes mensuelles moyennes	119
A.2	Exemple d'un chromosome généré par l'algorithme génétique	119
A.3	Décodage du chromosome	120
A.4	Décomposition en plusieurs cycles	120

A.5	Examination de la faisabilité de résolution des sous-problèmes $CLSP_c$	120
A.6	Demandes virtuelles du sous-problème $CLSP_1$	121
A.7	La cadence de production de la période 4 dépasse U^{max}	123
A.8	Réduction de la cadence de production de la période 4	125
A.9	La cadence de production de la période 5 dépasse U^{max}	125
A.10	Réduction de la cadence de production de la période 5	125

Liste des algorithmes

1	Pseudo-code de l'heuristique Fix-and-Relax	58
2	Pseudo-code d'optimisation de la fenêtre d'observation	60
3	Algorithme de l'horizon glissant	85

Glossaire

ABAO As Bad As Old. 4, 25, 33

ACV Analyse des Coûts du Cycle de Vie. 3, 14

AFNOR Agence Française de Normalisation. 15, 18, 19

AG Algorithme Génétique. xv, 87, 104

AGAN As Good As New. 4, 26, 33, 54, 67

AGH Algorithme Génétique Hybride. 78, 107, 108

ALM Modèle de vie accélérée. 18, 34

ARF Facteur de réduction de l'âge. 25, 26, 53, 55, 74, 99

AW Fenêtre d'approximation. 42, 57

CCV Coûts du Cycle de Vie. 3, 14

CLSC Chaîne logistique en boucle fermée. 6, 8

CLSP Problème de planification de la production à capacité limitée. 51, 59, 67, 78, 83, 84, 85

EPHM Extended Proportional Hazard Model. 34, 53, 54, 100

FdV Fin de Vie. 2, 6

FEO Fabricant des Équipements d'Origine. 6, 11

FEO-R Fabricant/Refabriquant des Équipements d'Origine. 12, 51, 114, 115

FEO-Rs Fabricants/Refabriquants des Équipements d'Origine. 2, 12, 35

FEOs Fabricants des Équipements d'Origine. 2, 6, 12, 97, 98

FR Fix-and-Relax. 42, 67, 68, 78, 79, 83, 84, 86, 122

FW Fenêtre fixée. 42, 57

HIM Modèle Hybride de Maintenance Imparfaite. 26, 33, 34, 53

HRIF Facteur d'augmentation du taux de défaillance. 26, 53, 55, 74, 99

LCA Life Cycle Assessmen. 13

MC Maintenance Corrective. 18, 19, 51, 53, 72, 97

MCF Maintenance Centrée sur la Fiabilité. 21, 22

MCR Maintenance Centrée sur le Risque. 21

MCV Maintenance basée sur les Coûts de Cycle de Vie. 21

MP Maintenance Préventive. 18

MPI Maintenance Préventive Imparfaite. 4, 24, 26, 33, 51, 53, 54, 55, 97, 100, 101, 104

MPT Maintenance Productive Totale. 21

OW Fenêtre d'observation. 42, 57, 61

PHM Modèle à risques proportionnels. 17, 32, 34, 53

RL Reverse Logistic. 6

USITC Commission du commerce international des États-Unis. 1, 2

Introduction générale

La croissance et la stabilité du modèle économique traditionnel « Extraire, produire, consommer, éliminer » dépendent fortement de la disponibilité des ressources. Actuellement, dans un monde connu par une consommation excessive des biens et une raréfaction des ressources naturelles, l'explosion des prix des matières premières est devenue impératif. Selon Mohamed Benmaradi, l'ex-ministre algérien du commerce, 65% des importations de l'Algérie sont constituées des biens et des équipements industriels. Leur facture a doublé cinq fois depuis l'année 2000 pour qu'elle dépasse actuellement 16 milliards de dollars. À la lumière de ces changements naturels, économiques et sociaux, la nécessité d'augmenter l'efficacité des matériaux et des ressources devient une préoccupation majeure de la plupart des pays du monde qui cherchent à maximiser leurs profits et contribuer au bien-être humain. Le besoin de satisfaire les exigences d'un monde en expansion nécessite une transition de l'approche d'économie traditionnelle basée sur le principe « du berceau à la tombe », qui entraîne des flux de déchets massifs, vers une approche circulaire durable, économique, sociale et environnementale basée sur le principe « du berceau à un nouveau berceau ». Ces évolutions ont créé un réel intérêt à la récupération des produits en fin de vie via l'adoption des chaînes logistiques inverses en parallèle avec les chaînes directes. L'intégration de ces deux types de chaîne forme ce qu'on appelle « une chaîne logistique en boucle fermée » - en anglais closed-loop supply chain (CLSC).

La logistique inverse inclut des activités de récupération cruciales au développement durable, tels que la réutilisation directe, la réparation, le remanufacturing des produits et/ou des composants et le recyclage des matériaux. La réutilisation directe est l'option la plus simple. Elle concerne seulement des produits fonctionnels et nécessite des traitements mineurs comme la vérification de l'état, le nettoyage et l'emballage en vue d'une réutilisation par un nouveau détenteur. La réparation implique généralement des opérations pour remettre un produit endommagé dans son état de fonctionnement, tout en préservant son intégrité. Le recyclage ne concerne généralement que l'extraction des matières premières à partir des déchets et des produits en fin de vie pour être utilisées dans la production de nouveaux produits. En revanche, le remanufacturing est la stratégie la plus pertinente pour prolonger la vie des produits. Il comprend le désassemblage du produit retourné, le nettoyage, le remplacement des composants défectueux et l'assemblage pour remettre le produit à son état neuf (Gehin et al., 2008, King et al., 2006).

L'activité de remanufacturing est devenue largement répandue dans les pays développés en général et aux États-Unis en particulier. Comme l'a rapporté la Commission du commerce international des États-Unis (USITC), ce pays est le plus grand producteur, consommateur et exportateur de produits remanufacturés au monde. Seulement entre 2009 et 2011, le profit de

l'activité du remanufacturing a augmenté de 15%, pour qu'elle atteigne au moins 43 milliards de dollars. En plus de son gain économique, cette activité assurait 180000 postes d'emploi répartis dans plus de 2 900 entreprises de 20 employés ou plus. En outre, la même commission note que les secteurs qui regroupent le plus grand nombre d'entreprises exerçant le remanufacturing incluent l'industrie des machines (742 entreprises), suivie par l'industrie des technologies de l'information et de communication (297 entreprises) et l'industrie des pièces automobiles (283 entreprises), en plus d'autres secteurs comme l'industrie aérospatiale, et les industries des dispositifs médicaux et des équipements lourds routiers et non-routiers. À l'union européenne, la production remanufacturière représente une valeur de 40 milliards d'euros et assurent 300000 postes d'emplois dont les secteurs d'activité les plus importants sont au Royaume-Uni et en Allemagne. [Matsumoto and Umeda \[2011\]](#) affirment qu'au Japon, l'industrie de remanufacturing connaît une croissance rapide qui est alimentée par les réglementations, les subventions, la pression environnementale et le marché. [Korugan et al. \[2013\]](#) affirment que 33% des activités de remanufacturing se font dans l'industrie automobile. De plus, dans les pays en développement, comme la Chine et l'Inde, le remanufacturing a également retenu de plus en plus l'attention du gouvernement, de l'industrie et du milieu académique [[Du and Li, 2014](#)].

Du point de vue de l'utilisateur, les produits remanufacturés sont souvent considérés comme des alternatives économiques aux nouveaux produits, car ils sont fonctionnellement équivalents et leur prix est en moyenne inférieur à celui d'un nouveau produit. Selon l'USITC, les produits remanufacturés aux États-Unis permettent aux consommateurs d'économiser de 30% à 50% ou plus du prix d'un nouveau produit équivalent [[USITC et al., 2012](#)]. De plus, comme le cas des véhicules à moteur, le remanufacturing permet à une technologie ancienne de rester utilisée et disponible sur le marché [[Goodall et al., 2014](#)].

Mis à part les bénéfices économiques et sociales, certains produits peuvent être remanufacturés plusieurs fois, ce qui permet de conserver l'énergie et de la matière première et ainsi de constituer une alternative plus écologique à la mise au rebut des produits en fin de vie. Par exemple, le remanufacturing du démarreur d'un moteur a le potentiel d'économiser neuf fois la quantité des matériaux et d'utiliser sept fois moins d'énergie nécessaires pour fabriquer un nouveau démarreur [[Matsumoto and Umeda, 2011](#)], tandis que le processus de remanufacturing d'un moteur a été cité qu'il utilise environ 17% de l'énergie utilisée pour fabriquer un nouveau produit [[Smith and Keoleian, 2004](#)].

En plus de son importance en termes de nombre d'entreprises, l'industrie des machines aux États-Unis est estimée le quatrième secteur en termes de valeur du remanufacturing (après l'industrie aérospatiale, l'industrie des équipements routiers et non-routiers, et l'industrie des pièces automobiles). Par ailleurs, ce secteur couvre une vaste gamme de produits, tels que les vannes industrielles, les turbines, les outils des machines, les machines textiles et les compresseurs [[USITC et al., 2012](#)]. Malheureusement, malgré le nombre croissant des voix demandant aux Fabricants des Équipements d'Origine (FEOs) d'assumer la responsabilité de la récupération de leurs machines ou pièces utilisées, un grand nombre de ces fabricants, en particulier les petites et moyennes entreprises (PME), n'ont pas les moyens de mettre en œuvre des stratégies globales de Fin de Vie (FdV). Leurs arguments sont les coûts excessifs et les demandes imprévisibles des produits remanufacturés résultant en des flux inverses inefficaces [[Karaulova and Bashkite, 2016](#)].

En réalité, la mise en œuvre d'une stratégie efficace de fin de vie s'avère une tâche très compliquée pour les Fabricants/Refabrikants des Équipements d'Origine (FEO-Rs), qui confrontent généralement à un vrai problème d'incertitude concernant les produits retournés. Les praticiens affirment que la cause principale de ce problème d'incertitude est l'absence d'une véritable collaboration entre ces FEO-Rs et leurs clients, ce qui rend plus difficile la prévision du temps de retour, de la quantité, de la qualité, de la valeur et de la localisation des produits en fin de vie. De plus, les FEO-Rs sont généralement confrontés à la concurrence croissante des refabrikants tiers qui saisissent l'opportunité du manque de communication entre les FEO-Rs et leurs clients afin de maximiser leurs profits sans tenir compte de l'intérêt commun durable. La littérature existante a soutenu que la présence des refabrikants tiers est nuisible pour les FEO-Rs qui doivent recourir au remanufacturing préemptif afin d'empêcher ou de réduire cette concurrence [Agrawal et al., 2015b].

Un produit peut être remanufacturé une fois qu'il atteint sa fin de vie, telle est l'approche générale connue des chercheurs et des praticiens, à travers lesquelles les utilisateurs peuvent profiter au maximum de leurs équipements. Hormis, lorsqu'un équipement fonctionne jusqu'à sa détérioration complète, son maintien devient coûteux. De plus, toutes les stratégies possibles de récupération nécessitent une grande quantité d'énergie et de ressources et génèrent beaucoup plus de pollution. Dans ce contexte, Liu et al. [2013] ont introduit le concept de "remanufacturing actif", également appelé "remanufacturing préventif", qui consiste à récupérer un produit une fois qu'il a atteint la durée de vie optimale prédéterminé, même s'il est toujours fonctionnel. En appliquant ce concept, les Coûts du Cycle de Vie (CCV), les coûts de remanufacturing et les charges environnementales seraient considérablement réduits; le cycle de vie du produit peut être efficacement étendu; et le problème d'incertitude lié au temps, à la qualité, à la quantité et à la valeur des produits retournés peut être partiellement résolu [Liu et al., 2016].

Remanufacturer un équipement au bon moment permet d'obtenir des bénéfices économiques importants. Une approche qui permet d'évaluer et d'analyser les bénéfices économiques d'un équipement et de prendre une décision concernant le moment optimal du remplacement ou du remanufacturing est l'approche d'Analyse des Coûts du Cycle de Vie (ACV). Il convient de noter que les coûts du cycle de vie d'un équipement dépendent essentiellement du coût d'acquisition, de l'amortissement de sa valeur, ainsi que des valeurs liées aux paramètres de fiabilité tels que le taux de défaillance, les coûts des pièces de rechange et le temps de réparation [Márquez et al., 2009]. Le concept de l'amortissement, qui est un enjeu majeur dans l'économie, joue un rôle essentiel dans la détermination de la valeur d'un actif après l'avoir utilisé pendant une longue période [Olagunju and Yaru, 2014]. De même, la fiabilité diminue avec le temps; elle dépend fortement des conditions de fonctionnement. Par exemple, dans le secteur industriel, on constate que dans plusieurs cas, les industriels utilisent leurs machines sous des conditions opérationnelles très différentes afin de satisfaire la demande en produits en évitant la surproduction et les pénuries en même temps. En effet, une machine vieillit plus vite quand elle est surchargée, plus lentement quand elle est sous-chargée et pas du tout si elle est laissée inactive. Ici, nous parlons des conditions opérationnelles. Dans ce contexte, Martorell et al. [1999] ont classifié les conditions de fonctionnement comme mauvaise, normale ou bonne. Par conséquent, les gestionnaires doivent être en mesure de fournir la quantité de

production économique adéquate pour chaque période de l'horizon de production afin d'éviter la surproduction, les pénuries et la dégradation excessive des machines.

Longtemps vue comme un mal nécessaire, la maintenance s'est affirmée comme une véritable préoccupation dans le monde industriel. Aujourd'hui, elle est perçue comme un processus industriel à part entière. Différents modèles de maintenance ont été proposés dans ce contexte dans le but de planifier soigneusement les actions de maintenance préventive. Leurs objectifs se différencient d'un cas à un autre tel que la minimisation des coûts ou des émissions de Co₂, la maximisation de la disponibilité des systèmes... etc. Toutefois, ces modèles supposent souvent qu'un système peut être restauré à son état neuf après chaque action de maintenance préventive. En pratique, cette hypothèse est souvent fautive. Une unité de production après une maintenance préventive peut être généralement plus jeune, mais peut parfois être pire qu'avant, en raison : des procédures de réparation défectueuses [Nakagawa, 1980], des limites de la technologie ou d'accessibilité au système... etc (Christer and Desa, 1992, Xu et al., 2009). Ce type de maintenance est appelé "Maintenance Préventive Imparfait (MPI)". En effet, lorsqu'une MPI est effectuée, cela améliore la machine qui passe vers un état compris entre "Aussi bon que neuf" (As Good As New (AGAN)) et "Aussi mauvais que vieux" (As Bad As Old (ABAO)). La mise au point d'un moteur est un exemple d'une maintenance imparfaite du fait qu'elle ne peut rendre le moteur aussi bon que neuf, mais elle améliore grandement ses performances.

Pour résumer, il faut noter que les décisions de production, les conditions opérationnelles, les activités de maintenance, les opérations de remanufacturing doivent devenir de plus en plus interdépendants afin d'atteindre un potentiel économique. Pour cela, notre objectif est de montrer qu'une meilleure stratégie de remanufacturing d'un système de production sera celle qui tient en compte conjointement les décisions de productions et l'efficacité des actions de maintenance durant le cycle de vie du système. Dans ce contexte, cette thèse a pour but de mettre en évidence les effets conjoints des contraintes de production et de maintenance imparfaite sur la fiabilité et la charge d'amortissement des équipements, tout en mettant l'appui sur les décisions de remanufacturing au cours d'un horizon de production fini.

Le manuscrit de la thèse est organisé en cinq chapitres :

- Le premier présente le contexte général de l'étude. Il permet d'acquiescer dans un premier temps les principaux concepts liés aux chaînes logistiques en boucle fermée. Nous accordons ensuite une attention particulière à l'activité du remanufacturing, à la maintenance, aux conditions de fonctionnement et à l'amortissement des équipements de production.
- Le deuxième chapitre présente un état de l'art général en 6 parties : les quatre premières parties sont consacrées à une revue de la littérature des axes de recherche connexes à notre travail, à savoir : le remanufacturing des équipements, le remanufacturing préventive, la sélection des pièces de rechange pour la maintenance ou le remanufacturing, les conditions de fonctionnement et la maintenance et leurs effets sur la fiabilité. Ensuite, une synthèse analytique et une évaluation critique des travaux cités est présentée. La dernière partie explique en détails les approches de ré-

solution utilisées pour résoudre les problèmes d'optimisation étudiés dans cette thèse.

- Le troisième chapitre décrit la première étape dans le développement de la stratégie du remanufacturing proposée dans cette thèse. Il est dédié à la modélisation et la résolution du problème de la planification de production durant un horizon fini avec la prise en compte de l'effet conjugué des cadences de production et de la maintenance imparfaite sur la fiabilité. Nous nous intéressons au développement d'un modèle mathématique non-linéaire en nombres entiers basé sur un modèle de dégradation afin de déterminer le meilleur plan de production sous des contraintes de satisfaction des clients et de capacité de l'équipement. L'objectif est de minimiser le coût total des opérations de maintenance et du stockage des produits finis. Pour résoudre ce problème d'optimisation, une méthode constructive de type « Fix-and-Relax » a été développée avec de trouver graduellement les meilleures cadences de production.
- Dans le quatrième chapitre, nous ajoutons un deuxième niveau décisionnel par rapport au chapitre précédent, à savoir : la planification du remplacement de la pièce principale de l'équipement en se basant sur le concept de la durée de vie économique. L'objectif de cette deuxième étape est de décrire une approche de planification intégrée dont le but est de minimiser les coûts du stockage et les coûts totaux de cycle de vie, à savoir : les coûts de maintenance, les coûts du remplacement et les charges d'amortissement. À travers des résultats obtenus, nous essayons de mettre en évidence l'impact commun du plan de production et de la qualité de maintenance sur les coûts de maintenances et le profil d'amortissement, et par conséquent, sur le moment opportun du remplacement. Vu la complexité du modèle développé, une nouvelle approche de résolution basée sur un algorithme génétique et une heuristique Fix-and-Relax est détaillée. Ce chapitre est conclu par une comparaison des nouveaux résultats avec celles obtenus dans le chapitre précédent afin de souligner les principaux avantages du remplacement basée sur la durée de vie économique.
- Le cinquième chapitre décrit la contribution principale de cette thèse. Le nouveau niveau décisionnel à considérer dans ce chapitre concerne le choix de la qualité optimale de la pièce de rechange, pour chaque opération de remanufacturing, parmi plusieurs qualités : neuves et remanufacturées. Nous présentons les principaux changements dans le modèle mathématique ainsi que dans l'approche de résolution par rapport aux chapitres précédents. L'objectif est de minimiser les coûts du stockage et les coûts de cycle de vie en mettant l'appui sur l'effet réciproque entre le timing du remanufacturing et la qualité des pièces de rechange choisies d'un côté, et les conditions opérationnelles et la qualité de maintenance d'un autre côté. Ce chapitre est conclu par une analyse de sensibilité des principaux paramètres du problème sur la planification intégrée de la production et du remanufacturing.

Chapitre 1

Contexte général de l'étude

1.1 Introduction

Vu l'importance croissante accordée aux enjeux environnementaux, juridiques, sociaux et économiques, l'ingénierie de la récupération des produits utilisés reçoit une attention particulière aux milieux académiques et industriels. Ces enjeux imposent aux FEOs d'assumer la responsabilité de leurs machines en fin de vie en adoptant des stratégies d'extension du cycle de vie respectant l'environnement tel que le remanufacturing. Du point de vue des fabricants, la mise en œuvre optimale d'une stratégie de remanufacturing nécessite une véritable collaboration avec les clients à travers une vision intégrée entre les deux chaînes logistiques directe et inverse. Ceci permet aux FEOs d'acquérir un avantage stratégique par rapport aux récupérateurs tiers. Toutefois, les bénéfices réalisés dépendent fortement de l'implication et de l'intérêt de l'utilisateur. Ce dernier est considéré comme la pompe des flux directs et inverses. Du point de vue économique de l'utilisateur, si la machine ou l'un de ses composants n'est pas remplacé ou remanufacturé au bon moment, les coûts de maintenances, les coûts de l'énergie consommée et les charges d'amortissement dépassent les bénéfices potentiels. Néanmoins, le mode d'utilisation et la qualité de maintenance appliquée sont des paramètres primordiaux pour la prédiction de la durée de vie d'une machine. Autant de plus, communiquer ces informations avec le Fabricant des Équipements d'Origine (FEO) lui permet d'avoir une idée sur le temps du retour ainsi que sur l'état de la machine/composant retourné, ce qui résout partialement le problème de l'incertitude sur les retours.

Ce chapitre permet au lecteur d'acquérir les concepts principaux liés à cette thèse en accordant une attention particulière à l'activité du remanufacturing, à la maintenance, à l'amortissement et leur relation avec les conditions de fonctionnement.

1.2 Les chaînes logistiques en boucle fermée

Avant de parler de la chaîne logistique en boucle fermée, nous voulons présenter les deux concepts qui la forment, à savoir : les chaînes logistiques directe et inverse. Une chaîne logistique directe, appelé aussi « une chaîne logistique » est un ensemble des processus destinés

Tableau 1.1 : Définitions de la chaîne logistique en boucle fermée

Auteur	Définition
Guide et al. [2003]	Une chaîne logistique en boucle fermée inclut les activités traditionnelles de la chaîne logistique directe et les activités traditionnelles de la chaîne inverse.
Geyer and Jackson [2004]	Les boucles logistiques sont des stratégies de gestion des produits en fin de vie. Ces stratégies répondent à deux critères : - Ils détournent les produits en FdV des sites d'enfouissement et d'incinération. - Les ressources secondaires résultant du traitement de ces produits en FdV remplacent les ressources principales des chaînes logistiques directes.
Quariguasi Frota Neto et al. [2010]	Une Chaîne logistique en boucle fermée (CLSC) décrit un alignement entre le monde des entreprises et l'environnement dans les chaînes logistiques et discute deux approches opposées en termes du contexte commercial.
Wells and Seitz [2005]	Une CLSC peut être considérée comme une chaîne directe complétée par des opérations inverses pour les produits récupérés qui sont retraités et finalement réintégrés dans la chaîne directe.
Guide Jr and Van Wassenhove [2006]	La gestion d'une chaîne en boucle fermée décrit les processus de conception, de contrôle et de fonctionnement d'un système pour maximiser la création de valeur sur le cycle de vie d'un produit et la récupération de valeur grâce à des retours de différents types et volumes au cours du temps.

à répondre aux demandes des clients en produits en passant par les fournisseurs, les fabricants, les transporteurs, les entrepôts et les détaillants [Chopra and Meindl, 2016]. Par autres termes, elle définit l'ensemble des ressources, moyens et techniques adoptées pour la fabrication d'un produit allant de l'approvisionnement de la matière première jusqu'à la livraison du produit fini au client final, en passant par la transformation, le stockage puis la distribution. De l'autre part, une chaîne logistique inverse, appelée aussi « la logistique inverse (Reverse Logistic (RL)) » fait référence à une séquence d'activités de récupération des produits utilisés par les clients afin de les réutiliser, de les réparer, de les reproduire, de les recycler ou de les éliminer [Agrawal et al., 2015a]. La définition de la LR a évolué avec l'intérêt des chercheurs. Selon Rogers et al. [1999], la logistique inverse est le processus de planification, de mise en œuvre et de contrôle de la circulation efficace et rentable des matières premières, des stocks en cours de traitement, des produits finis et les informations relatives du point de consommation au point d'origine dans le but d'une récupération de la valeur ou d'une élimination appropriée. Comme illustré dans la figure 1.1, le flux inverse commence par l'acquisition des produits ou des composants en fin d'utilisation. Cette première opération constitue un processus critique pour l'établissement d'une logistique inverse rentable. Rogers et al. [1999] ont rapporté que le client peut retourner des produits ayant des états très variées pour des raisons connues ou inconnues. Ensuite, les produits sont collectés dans des centres de collecte afin de les envoyer à des centres spécialisés dans l'inspection et le tri. La prochaine étape consiste à prendre une décision sur le destin des produits retournés pour un traitement spécial. À ce niveau, le concept de la logistique en boucle fermée peut être présenté. Ce concept a été introduit par Guide et al. [2003] pour représenter une série des processus, des flux directs et inverses visant une forme de réutilisation ou de valorisation des produits et des matériaux. Le tableau 1.1 présente un ensemble des définitions de ce terme données par certains chercheurs dans ce domaine.

Desport [2017] a affirmé que les chaînes logistiques en boucle fermée sont généralement conçues pour la gestion de produits à forte valeur et dont la durée de vie est longue. Elles ne peuvent pas être utilisées dans le cadre d'une consommation immédiate où les produits perdent rapidement de la valeur.

Comme son nom l'indique, la CLSC englobe quatre boucles fermées en cascade. Dans chacune d'elle, circule une catégorie particulière des retours :

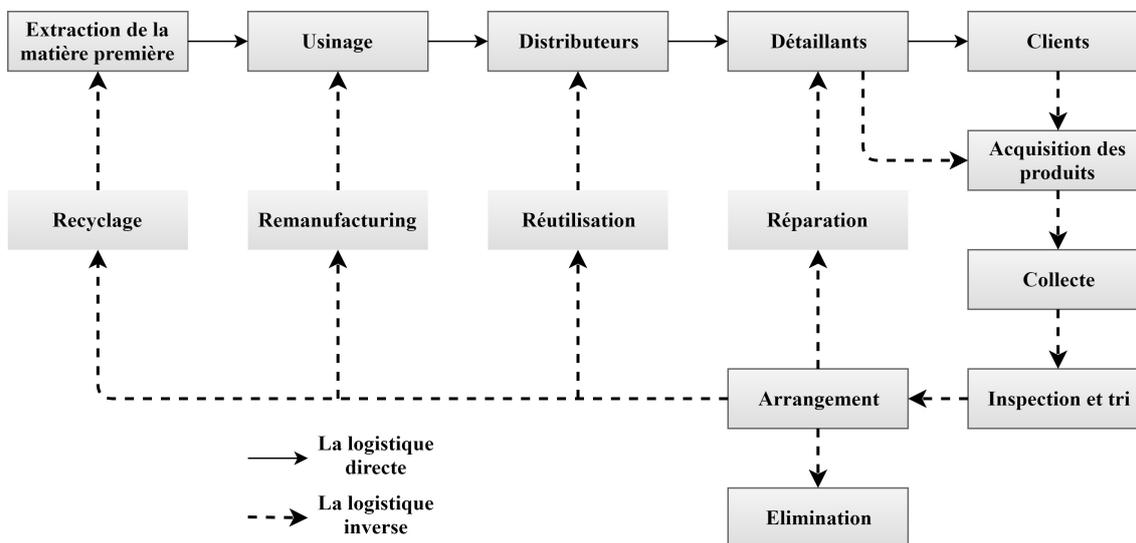


Figure 1.1 : Flux de base des processus logistiques directes et inverses [Agrawal et al., 2015a]

1.2.1 La boucle fermée de la réutilisation

Les produits destinés à une réutilisation directe nécessitent seulement une inspection, un nettoyage et parfois une maintenance mineure. Généralement, les produits de cette classe conservent leur condition initiale et ils peuvent être directement revendus par les détaillants. Ils comprennent les retours des produits achetés sur Internet pour une raison de non satisfaction d'un critère et les produits consignés ou d'occasion. La réutilisation est l'option de récupération la plus privilégiée, car elle implique le niveau le plus faible de production de déchets et le niveau le plus haut de la préservation des ressources et d'énergie. Cette option constitue une source complémentaire pour répondre à la demande du marché.

1.2.2 La boucle fermée de réparation

La réparation consiste à rectifier les défaillances d'un produit retourné afin de le remettre à un état de fonctionnement, ce qui permet de prolonger sa durée de vie. Ce type de récupération nécessite un niveau de désassemblage limité puisque seulement les pièces défectueuses doivent être réparées ou remplacées au niveau des centres de distribution ou des points de vente.

1.2.3 La boucle fermée de remanufacturing

Contrairement aux deux premières boucles, cette boucle inclut les centres de production et les centres de remanufacturing. Généralement, ces deux entités se trouvent sur le même site, étant donné que, dans la plupart des cas, le remanufacturing est effectué par le fabricant d'origine, sinon par des refabricants sous-traitants ou des refabricants indépendants. Les produits en fin de vie qui nécessitent un processus de remanufacturing sont complètement désassemblés et minutieusement inspectés. Les modules qui ne sont plus à jour sont réparés ou remplacés en fonction de leur niveau de dégradation. Le remplacement peut être effectué par des modules neufs ou remanufacturés qui sont moins dispendieux. Les produits obtenus retournent sur le marché via la chaîne directe, mais à moindre coût comparativement aux produits neufs. Par rapport à la réparation qui est plus efficace pour des produits de qualité relativement bonne, le remanufacturing est plus approprié pour des produits relativement plus endommagés. Le tableau 1.2 présente quelques définitions du terme « remanufacturing » trouvées dans la littérature, dont la première définition est la plus citée (Korugan et al., 2013, Liu et al., 2014b, Östlin et al., 2008, Sinha et al., 2016, Wei et al., 2015 ...).

Tableau 1.2 : Définitions du terme « remanufacturing »

Auteur	Définition
Lund and Mundial [1984]	Le remanufacturing est un procédé industriel permettant de remettre les produits utilisés à un état comme neuf. A travers une série de processus dans un environnement industriel, un produit abandonné est complètement désassemblé; les pièces utilisables sont nettoyées, remises à neuf et mises en stock. Ensuite, le produit est réassemblé à partir des anciennes pièces (et si nécessaire, de nouvelles pièces) pour produire une unité avec des performances entièrement équivalentes à celles d'un produit neuf original.
Amezquita et al. [1995]	Le remanufacturing est le processus qui permet de remettre un produit à un état comme neuf en remplaçant, réutilisant et reconditionnant les pièces qui le composent.
Bulmus et al. [2014]	Le remanufacturing est le processus d'amener les produits usagés à un état fonctionnel comme neuf avec une garantie équivalente. Les étapes d'un processus de remanufacturing sont la collecte des articles usagés/jetés, le désassemblage de ces pièces, le nettoyage et l'inspection de chaque pièce et enfin, le réassemblage des pièces et le test du produit remanufacturé.

1.2.4 La boucle fermée de recyclage

Cette boucle inclut les centres d'extraction (appelés aussi « centres de recyclage ») de la matière première à partir des produits ou des composants retournés endommagés qui ne peuvent être ni réparés ni remanufacturés. Contrairement aux opérations précédentes, cette opération inclut seulement la récupération de la matière première de sorte que le produit et ses composants perdent leur identité, leurs fonctionnalités et leurs dimensions géométriques. Il convient de noter que, de la réparation au recyclage, le niveau de désassemblage augmente

tandis que la possibilité de préserver la structure du produit diminue. Les matières premières obtenues sont ensuite réintroduites dans le circuit économique pour qu'elles soient utilisées dans la fabrication du même type de produit ou d'autres types, ce qui permet la préservation des ressources naturelles et la protection de l'environnement en évitant l'incinération et l'enfouissement. Notant que cette activité est caractérisée par des marges bénéficiaires faibles et nécessite des investissements importants en équipements et en installations pour un recyclage spécialisé. Pour cela, il est important de comprendre que les avantages du recyclage diminuent jusqu'à atteindre un point où il devient trop coûteux pour l'environnement ou l'économie pour offrir un profit net [Ghisellini et al., 2016].

En synthèse, l'objectif commun derrière l'adoption des quatre boucles de récupération présentées ci-dessus, allant de la réutilisation directe jusqu'à le recyclage, est de tirer au maximum du profit à partir des produits en fin de vie et de réduire au maximum les déchets générés. Cependant, certains produits retournés ne peuvent être ni réutilisés, ni réparés, ni remanufacturés ou recyclés tel que les produits n'ayant aucune valeur résiduelle ou bien les produits dont leur récupération impacte négativement la santé humaine comme les produits pharmaceutiques, les produits alimentaires, le polystyrène, les emballages salles...etc. Comme dernière alternative, les produits ou les composants de cette catégorie sont éliminés soit par l'incinération ou par l'enfouissement. L'incinération est un procédé de traitement thermique des déchets solides et liquides permettant la récupération de l'énergie sous forme d'électricité ou de chaleur par un grand investissement, tandis que l'enfouissement est le processus d'enterrement dans des surfaces spéciales appelées « décharges ». Ces deux modes d'élimination ne sont permis que pour le déchet ultime qui ne contient aucune matière dangereuse. Malheureusement, ce sont les options de fin de vie les plus couramment appliquées pour différentes gammes de produits. Aux États-Unis, 54,3% des déchets solides générés en 2009, soit 131,9 millions de tonnes, sont destinés à l'enfouissement, alors qu'en Indonésie, la quantité des déchets enterrés était d'environ 65,9 millions de tonnes en 2010 [EPA, 2014]. En France, environ 31 millions de tonnes de déchets sont rejetés chaque année, ce qui engendre un impact carbone CO₂ de 15 millions de tonnes émis dans l'atmosphère chaque année [Jimenez et al., 2016]. D'un point de vue économique, l'enfouissement de ces quantités énormes nécessite l'utilisation de nouveaux sites et de nouveaux matériels dont le coût d'investissement est important.

Pour conclure cette partie, il faut noter que les bénéfices tirés de chaque boucle sont différentes. Plusieurs chercheurs ont montré que la réduction des impacts environnementaux à travers le remanufacturing est supérieure à celle tirée de l'incinération et du recyclage. Par exemple, chez Xerox, Kerr [2000] a comparé entre deux gammes de photocopieuses. La première est orientée vers le remanufacturing, tandis que la deuxième est une gamme ordinaire conçue pour être recyclée ou incinérée. Les résultats de l'étude montrent que le remanufacturing permet d'avoir des avantages économiques et environnementaux très importants en termes de la consommation des ressources déployées et de l'impact écologiques. Néanmoins, le recyclage est systématiquement considéré plus meilleur que l'enfouissement ou l'incinération, même si son succès est souvent conditionné par la logistique inverse [Morris, 2005].

1.3 Remanufacturing des équipements de production

Avant de parler de l'activité du remanufacturing des équipements de production, il est important de comprendre les deux termes : production et équipement de production. Sachant que la signification de ces deux termes varie d'un auteur à un autre, les définitions qui sont adaptées dans cette thèse sont décrites ci-dessous : Selon l'académie internationale de l'ingénierie de la production, le terme « production » signifie l'acte de fabriquer physiquement un produit à partir de ses constituants matériels, ce qui est différent de la conception du produit, de la planification et du contrôle de sa production et de l'assurance de sa qualité [CIRP, 2013]. Cependant, le terme « équipement de production » (appelée aussi « Bien d'équipement » en anglais : Capital Equipment) est un terme collectif désignant l'ensemble des machines, dispositifs et systèmes directement nécessaires à l'exécution du processus de production.

1.3.1 Du point de vue de l'utilisateur

En général, les équipements de production sont des produits à haute valeur ajoutée qui présentent des impacts économiques et environnementaux significatifs tout au long de leur cycle de vie. Face à une concurrence mondiale de plus en plus forte, toutes les entreprises industrielles cherchent à se doter de systèmes de production plus fiables et plus robustes pour accroître leur productivité. [Deshpande \[2013\]](#) affirme que l'amélioration de l'état des équipements de production permet d'assurer la sécurité et de préserver l'environnement, d'améliorer la qualité et la performance des livraisons, de contrôler les flux et de réduire le coût global de la production. En chine, une grande partie des équipements de production qui ont été produits dans les années 1970 et 1980 sont toujours en service dans les entreprises manufacturières [[Du and Li, 2014](#)]. Face à une forte demande des produits, un ancien équipement ne peut pas répondre aux exigences d'un atelier de production. En effet, ses défaillances peuvent coûter beaucoup d'argent aux utilisateurs en termes de la qualité des produits et du temps de livraison, et parfois les défaillances ne peuvent pas être surmontées à travers une maintenance quotidienne. D'un autre côté, les produits demandés deviennent de plus en plus diversifiée, ce qui oblige les entreprises manufacturières de changer leur système de fabrication, conçu pour une génération de produits, en un système pour la prochaine génération de produits.

[Bruch and Bellgran \[2012\]](#) affirment que l'un des principaux enjeux du développement d'un système de production est le renouvellement des équipements de production. Cependant, [Yamamoto and Bellgran \[2009\]](#) affirment que pour maintenir la compétitivité d'une entreprise manufacturière, il ne suffit peut-être pas de copier les meilleures pratiques et d'acheter la dernière technologie disponible sur le marché des équipements. En effet, une nouvelle acquisition n'est pas toujours la meilleure option lorsque les industriels cherchent à moderniser leur équipement de production. Les coûts économiques et sociaux seront immenses si ces machines usagées sont remplacées par de nouvelles machines. Actuellement, le remanufacturing des équipements de production devient particulièrement une alternative importante dans l'industrie manufacturière, par laquelle les performances initiales d'un équipement usagé peuvent être récupérées.

Le remanufacturing est un procédé qui permet de revitaliser un équipement ancien. Il utilise un équipement ancien comme noyau, et fait une nouvelle fabrication sur la base d'un équipement original. Ce procédé dépend de la performance de l'équipement au moment de sa mise en arrêt. Cela va de la réparation où les pièces visiblement défectueuses sont remplacées jusqu'à une remise à neuf plus approfondie où l'équipement de production est complètement désassemblé. Les pièces et les composants sont ensuite récupérés ou remplacés dans le but d'amener l'équipement remis à neuf à un niveau qui satisfait ou dépasse les normes du nouvel équipement [Steingrímsson et al., 2011]. Il convient de noter que le remanufacturing peut être effectuées par le FEO, le propriétaire, ou par des entreprises tierces dans l'atelier du propriétaire ou du traiteur. Cette nouvelle pratique permet de réduire les coûts logistiques et le temps du processus global de remise à neuf, ce qui se traduit par une augmentation de la productivité (Cunha et al., 2011, Fügenschuh et al., 2010).

1.3.2 Du point de vue du fabricant des équipements d'origine

De nos jours, de nombreux FEOs, sous-traitants, entreprises indépendantes et virtuelles sont engagés dans le secteur du remanufacturing. En raison des avantages attendus du remanufacturing, comme l'approvisionnement en pièces de rechange, la demande croissante de produits remanufacturés ou les incitations financières des gouvernements, les FEO-Rs entrent ce marché par le traitement de leurs propres produits retournés à travers ses propres infrastructures ou à travers le recours à des récupérateurs sous-traitants. Du point de vue d'un Fabricant/Refabriquant des Équipements d'Origine (FEO-R), le remanufacturing est une série de mesures techniques qui prend l'amélioration des performances des équipements en fin de vie comme objectif, la haute qualité et la haute efficacité, la préservation d'énergie et de matériaux et la protection de l'environnement comme critère et s'appuie sur une technologie avancée de production comme moyen [Yin, 2013].

L'un des plus grands défis de l'industrie de remanufacturing est la récupération des équipements. Une solution efficace consiste à changer le comportement des clients de l'élimination directe à la réexpédition aux fabricants à travers des incitations tel que l'offre des bons d'achat, des compensations monétaires directes ou des réductions sur les futurs achats de nouveaux équipements. En offrant une telle incitation et en présentant l'impact énergétique et environnemental positif du projet du remanufacturing, les clients pourraient être intéressés par le nouveau concept. La stratégie de récupération doit être incluse dans le modèle économique général, dans la mesure où tous les équipements de production doivent être retournés au producteur après la fin de son utilisation. Des informations sur les ventes passées et sur les équipements en cours d'utilisation tel que le moment de livraison, le lieu d'utilisation, les propriétaires ainsi que les détails techniques sont nécessaires dans ce scénario. Pour faciliter l'acquisition et le contrôle de ces informations, l'utilisation des logiciels de gestion des biens mobiles en mode opérationnel est primordiale [Schraven et al., 2012].

1.4 Temps de remanufacturing des équipements de production

Les décisions de remplacement ou de remanufacturing des équipements de production sont cruciales pour le succès des entreprises manufacturières. En pratique, le processus de détermination du temps de remanufacturing se diffère d'une entreprise à une autre selon leurs perspectives. Les perspectives dépendent essentiellement de différents facteurs qui ne sont pas toujours faciles à déterminer, tel que l'horizon de la planification, le modèle de prédiction des coûts, l'impact environnemental, la technologie, la disponibilité du capital...etc. En général, le temps du remanufacturing est déterminé selon une ou plusieurs perspectives parmi celles citées ci-dessous :

1.4.1 Selon une perspective environnementale

Cette politique se base sur le concept de la durée de vie environnementale qui est définie par la période comprise entre le moment où le produit est mis en service et le moment où le produit commence à violer les réglementations environnementales telles que l'émission excessive de CO₂ et la consommation croissante en énergie. La méthode «Life Cycle Assessment (LCA)» peut être utilisée pour analyser les impacts environnementaux des produits durant leur cycle de vie.

1.4.2 Selon une perspective économique

Cette politique de remanufacturing se base sur la durée de vie économique. Dans ce cas, le remanufacturing doit être effectué une fois les coûts de cycle de vie de l'équipement, à savoir : les coûts de possession et les coûts d'opérations et de maintenance cumulés atteignent une valeur minimale. Dépasser ce moment implique que la maintenance et le remanufacturing de l'équipement va coûter plus cher. Le remanufacturing sur la base de la vie économique empêche la diminution de la rentabilité en raison de l'augmentation des coûts d'entretien et d'exploitation qui accompagne le vieillissement de l'équipement [Gransberg et al., 2006]. D'un autre côté, plus le coût de remanufacturing est bas, plus la valeur ajoutée est élevée, plus la rentabilité économique et les avantages du remanufacturing sont importants. La méthode d'analyse des coûts de cycle de vie peut être utilisée dans ce sens afin de déterminer la vie économique d'un équipement [Zhang et al., 2013].

1.4.3 Selon une perspective technique

Le temps de remanufacturing peut être déterminé aussi en fonction de la faisabilité et de la facilité technologique du processus du remanufacturing. La faisabilité et la facilité concernent le désassemblage, le nettoyage, la détection et la classification des défaillances, la planification du processus du remanufacturing, le réassemblage, etc. Cette stratégie vise principalement à assurer que l'équipement peut être amélioré grâce à l'utilisation de moyens

de remanufacturing modernes, de systèmes d'information et de technologies d'automatisation afin d'assurer sa récupération fonctionnelle et d'améliorer sa performance [Zhang et al., 2013].

1.4.4 Remanufacturing à cause de l'obsolescence

L'obsolescence est la diminution de la valeur et de la commercialité due à la concurrence de modèles plus récents ou plus productifs [Gransberg and O'Connor, 2015]. Elle peut être considérée comme un déclin de l'utilité qui n'est pas forcément lié à l'usure ou au passage du temps. Un équipement obsolète peut encore être en bon état de fonctionnement. L'obsolescence peut-être aussi à cause du développement rapide de la technologie où l'objet devient dépassé, à cause du changement des préférences personnelles de l'utilisateur, ou à cause des exigences légales, ce qui met une fin prématurée de l'objet. Dans certains cas, la modernisation par le biais du remanufacturing permet d'améliorer les performances techniques de l'équipement et de prolonger sa durée de vie.

1.4.5 Temps de remanufacturing basé sur la vie physique

La durée de vie physique, appelée aussi « la durée de vie naturelle » se réfère à la période qui s'écoule du début d'utilisation jusqu'à ce que l'équipement ne puisse plus être utilisé en raison de l'usure visible [Zhang et al., 2013]. Cette phase est fortement influencée par l'attention portée à la réparation et à l'entretien de l'équipement tout au long de sa durée de vie. Pour déterminer le niveau de la dégradation, une analyse de fiabilité est nécessaire. Pour conclure cette partie, nous signalons que ce mode du remanufacturing est le plus considéré dans le secteur industriel.

1.5 L'analyse des coûts du cycle de vie

Le cycle de vie comprend tous les événements liés à un bien, un produit ou un projet. Il commence par l'évaluation de la nécessité de l'objet et termine par la vente ou l'élimination. L'une des plus importantes considérations, dans l'élaboration d'un programme de remplacement ou du remanufacturing d'un équipement, est la compréhension du concept de coût sur le cycle de vie.

Pour les équipements, les CCV se divisent en deux parties : les coûts de propriété (ou de possession) et les coûts d'exploitation. Les coûts de propriété dépendent du coût d'acquisition, de la charge d'amortissement, de la valeur de récupération estimée, de l'assurance, des taxes et des coûts d'investissement [Peurifoy and Ledbetter, 1985]. Les coûts d'exploitation comprennent les coûts de maintenance et d'entretien et tout autre coût de bien consommable. Le terme « ACV », apparue dans la littérature depuis 1965, se réfère à une approche permettant d'estimer la somme de tous les coûts liés à l'utilisation de l'équipement encourus par le consommateur, de l'acquisition jusqu'à la vente ou l'élimination [Dhillon, 2009]. Cette approche est de plus en plus utilisée dans le secteur industriel partout dans le monde pour prendre divers types de décisions qui concernent directement ou indirectement les équipements et les

systèmes techniques. De nombreuses raisons peuvent expliquer cette tendance croissante, par exemple : la compétition, l'augmentation des coûts d'exploitation et d'entretien, les limitations budgétaires, les investissements pour des produits ou systèmes coûteux (systèmes militaires, systèmes spatiaux et aéronautiques), une inflation en augmentation ou la sensibilisation des utilisateurs de la rentabilité économique [Dhillon, 2006]. Notant que cette approche devrait être réalisée au début du processus de la planification, pendant qu'il est encore possible de raffiner la conception pour assurer une réduction des CCV.

L'ACV peut être utilisée dans d'autres domaines, à savoir [Seldon, 1979] :

- La sélection parmi les soumissionnaires concurrents pour un projet.
- La planification et la budgétisation à long terme.
- Le contrôle d'un projet en cours.
- La comparaison de projets concurrents.
- Comparaison des concepts logistiques.

Le coût du cycle de vie le plus bas est la mesure la plus simple et la plus facile à interpréter de l'évaluation économique. D'autres mesures couramment utilisées sont les économies nettes (ou les bénéfices nets), le rapport bénéfices/investissements, le taux de rendement interne et la période de remboursement des investissements [Fuller, 2010].

1.6 La défaillance sous des conditions de fonctionnement variables (modèle à risques proportionnels)

Les équipements en général sont sujets à une dégradation graduelle qui dépend non seulement du temps opérationnel, mais aussi des conditions de fonctionnement. Dans des situations réelles, un équipement peut ne pas toujours fonctionner dans des conditions opérationnelles et/ou environnementales normales. Il peut être exploité dans des conditions difficiles qui l'affectent tout au long du temps chronologique écoulé depuis le début de son utilisation. Nous définissons dans ce qui suit les principaux concepts de cette partie, à savoir : la panne, la détérioration, la fiabilité, le taux de panne, les conditions opérationnelles et les conditions environnementales.

Panne

La Agence Française de Normalisation (AFNOR) définit une panne comme étant l'état d'incapacité d'un équipement à remplir une fonction requise, excluant les causes de maintenance, d'actions planifiées et de manque de ressources extérieures. Une panne est généralement la conséquence d'une défaillance, toutefois, elle peut exister sans une défaillance préalable [AFNOR, 1998].

Détérioration

Réduction de la réserve d'usure causée par des phénomènes chimiques et/ou physiques, tels que le frottement, la corrosion, la fatigue des matériaux, le vieillissement, etc., et qui se produisent inévitablement durant le fonctionnement normal [CIRP, 2013].

Fiabilité

La fiabilité, notée par $R(t)$ est la probabilité que le système considéré ne tombe pas en panne avant un instant t donné [CIRP, 2013].

Taux de panne

Le taux de panne, notée par $\lambda(t)$, représente la probabilité d'avoir une défaillance entre $(t, t + dt)$, sachant que le système n'a pas été défaillant entre 0 et t .

$$\lambda(t) = -\frac{R'(t)}{R(t)} \quad (1.1)$$

Il représente aussi le nombre de défaillances survenant dans un laps de temps donné, divisé par ce laps de temps [CIRP, 2013].

Les conditions opérationnelles

Les conditions opérationnelles se réfèrent au mode de fonctionnement du système tel que l'intensité de production, la longueur des cycles, la charge...etc. Par exemple, pour les machines-outils, Il est bien connu que la vitesse de production (vitesse de coupe) a un effet significatif sur la durée de vie des outils de coupe. Dans l'industrie nucléaire, certaines centrales passent une grande partie de leur vie en mode veille, en particulier les systèmes liés à la sécurité, tandis que d'autres fonctionnent en continu. Une autre situation concerne les compagnies minières qui exploitent des camions à benne pour le transport de matériaux miniers de plusieurs sites à des unités de traitement. Si un camion est affecté à un terrain à forte inclinaison, il subira plus de charges et de pression qu'un camion affecté à un terrain à faible inclinaison [Husniah et al., 2015].

Les conditions environnementales

Cependant, les conditions environnementales se réfèrent à l'environnement externe du système tel que la température, la pression, le taux d'humidité, les conditions géomorphologiques et météorologiques...etc. Par exemple, un moteur d'avion est soumis à diverses conditions atmosphériques, telles que la pression, la température, l'humidité et les vibrations mécaniques lors du décollage, de la navigation et de l'atterrissage [Özekici, 1995]. Un autre exemple d'un centrale nucléaire où nous trouvons certains composants placés dans un environnement

très dur, par exemple sous des températures et des doses de rayonnement élevées, en particulier les composants à l'intérieur de confinement, tandis que d'autres restent dans un environnement très confortable [Martorell et al., 1999].

La dépendance entre la détérioration et les conditions du fonctionnement a été rarement étudiée dans la littérature académique [Ho et al., 2015]. Dans l'analyse classique de la fiabilité et de la survie, la durée de vie de l'équipement est estimée en termes de la distribution de probabilité des temps aux défaillances d'un ensemble d'équipements. Cette distribution reflète le comportement moyen des caractéristiques de la fiabilité. De nombreux chercheurs supposent dans leurs travaux que les conditions de fonctionnement sont constantes ou bien elles n'ont aucun effet sur la santé des systèmes. Il est facile d'imaginer les effets d'accélération de la dégradation d'un système soumis, par exemple, à des vibrations pour lesquelles il n'a pas été spécialement conçu. Dans ce contexte, de nombreux modèles dynamiques multi variables ont été développés pour prédire les performances de fonctionnement de tels équipements ou pièces dans un environnement d'exploitation dynamique. Ces modèles de dégradations appartiennent à la catégorie des modèles déterministes basés sur la régression. L'objectif derrière l'adoption de ces modèles est de tenir en compte, dans la loi de défaillance ou dans la fonction de fiabilité, les conditions de fonctionnement des missions futures et ainsi de pouvoir pronostiquer l'état futur du système en se basant sur des données disponibles sur son fonctionnement et son historique de pannes [Ezzeddine, 2017]. Il faut noter qu'un modèle de dégradation présente la base à partir desquelles la politique de maintenance ou de remplacement est définie.

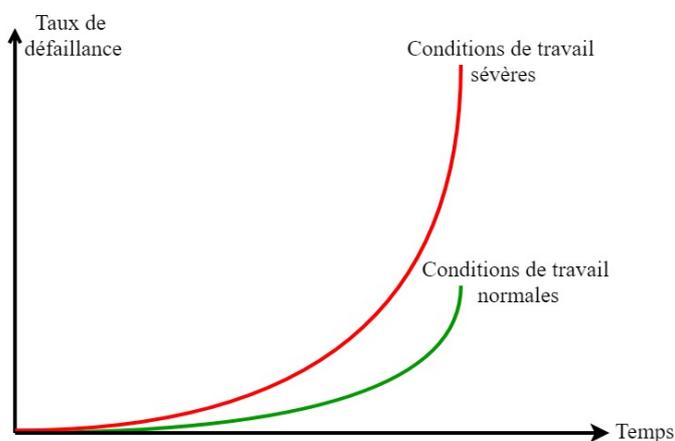


Figure 1.2 : Évolution du taux de défaillance sous des conditions de travail normales et sévères

Le Modèle à risques proportionnels (PHM), introduit par Cox [1972] est l'un des modèles de régression les plus puissants et les plus populaires qui peuvent être utilisés pour modéliser des systèmes dégradants dans des conditions de travail variables (Dao and Zuo, 2016, Jafari and Makis, 2015, Kumar and Westberg, 1997, Martorell et al., 1999, Zhao et al., 2010). L'intérêt du modèle PHM dans les applications d'ingénierie s'est développé, en raison de son efficacité dans le traitement et l'analyse des données de fiabilité. Ce modèle a été utilisé dans divers champs d'application, tels que les réacteurs à eau dans les centrales nucléaires, les turbines à gaz (domaine maritime), les sonars d'un navire et les moteurs d'avion [Ezzeddine, 2017]. Selon ce modèle, le taux de défaillance d'un système est une fonction multiplicative d'une fonction de référence $\lambda_0(t)$, qui représente le taux de panne dans les conditions nominales, et

une deuxième fonction $\psi(z(t))$, appelée "fonction de risque". Cette fonction permet de prendre en compte les effets des conditions de travail variables. La forme générale d'un modèle PHM peut être définie comme suit :

$$\lambda(t) = \Psi(z(t)) \cdot \lambda(t), \quad t \geq 0 \quad (1.2)$$

Où $z(t)$ est un vecteur qui représente les conditions de travail variables à un instant donné t .

Dans la littérature, d'autres modèles ont été développés dans ce contexte, tel que : le Modèle de vie accélérée (ALM), le modèle à intensités proportionnelles (PIM), le modèle à risque concurrent, le modèle de régression à risque étendu (EHRM), le modèle de chances proportionnelles (PCM), le modèle à risque additif (AHM), le modèle de régression linéaire d'Aalen (ALRM), le modèle mixte, le modèle à covariables proportionnelles (PCM), le modèle de la vie résiduelle moyenne proportionnelle (PMRLM), le modèle résistance-contrainte, le modèle de chocs...etc [Gorjian, 2012].

1.7 La maintenance

Selon la norme NFX 60-010 donnée par l'AFNOR, « la maintenance est l'ensemble des activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé. Bien maintenir, c'est assurer ces opérations au coût optimal. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management ». En 1997, cette définition a été remplacée par une nouvelle définition (norme NF EN 13306) comme suit : « la maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise » [AFNOR, 1998].

La définition de la maintenance fait apparaître 3 notions clé : « Maintenir », « rétablir » et « un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ». Les deux premiers termes « maintenir » et « rétablir » introduisent deux grands aspects de la maintenance. Le premier terme « Maintenir » fait référence à la notion de la surveillance et le suivi d'une entité supposée encore en fonctionnement et par conséquent, il fait référence à la notion de la Maintenance Préventive (MP). Le deuxième terme « Rétablir » fait référence à la Maintenance Corrective (MC) sur une entité qui n'est plus en mesure d'accomplir convenablement sa fonction (juste après l'occurrence d'une panne). La troisième notion fait référence à l'état du bien après avoir effectué une action de maintenance (préventive ou corrective).

Les objectifs principaux de l'activité de maintenance sont nombreux. La maintenance permet de :

- Assurer la qualité et la quantité des produits fabriqués, tout en respectant les délais.
- Consolider la compétitivité de l'entreprise.
- Contribuer à la création et au maintien de la sécurité au travail, c'est-à-dire « accroître l'aptitude du système à éviter de faire apparaître des événements critiques ou catastrophiques » (AFNOR X-06-010).

- Accroître la fiabilité du système, c'est-à-dire « accroître l'aptitude du système à accomplir une fonction requise dans des conditions données pendant un temps donné » (AFNOR X-06-501).
- Assurer la disponibilité du système, c'est-à-dire « assurer son aptitude à être en état d'accomplir sa fonction des conditions d'utilisation données pendant une période donnée. » (AFNOR X-06-010).
- Accroître la maintenabilité du système, c'est-à-dire « accroître l'aptitude du bien à être rétabli ou maintenu dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions d'utilisation données avec des moyens et procédures prescrits » (AFNOR X-06-010).
- Maintenir la valeur économique d'un bien.
- Protéger l'environnement.

1.7.1 Politiques de maintenance

La classification des activités de maintenance est effectuée en termes de développement technologique et les contraintes croissantes d'efficacité des entreprises. Dans ce qui suit, nous essayons de présenter une classification claire et exhaustive des principales stratégies considérés dans les milieux académiques et professionnels. Nous distinguons trois générations, à savoir : (i) une première génération comprend seulement des activités de maintenance de type « corrective (ii) la deuxième génération a connu l'apparition des activités de maintenance de type « préventive » tandis que (iii), la troisième présente une extension des stratégies de la deuxième génération en introduisant des nouvelles stratégies basées sur l'optimisation de différents objectifs, tel que la disponibilité, le risque, la fiabilité et le coût.

Première génération : la maintenance corrective MC

Selon la norme NF EN 13306, la maintenance corrective est une maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise [AFNOR, 2001]. En appliquant cette politique de maintenance, aucune mesure n'est prise pour prévenir les défaillances ou pour détecter la survenue d'un échec. Dans la littérature, la maintenance corrective était qualifiée de maintenance réactive. Cette qualification peut illustrer une intervention réactive suite à un événement tel qu'un aléa, une dégradation de qualité de la production, une baisse du rendement, une défaillance partielle ou complète [Auberville, 2004]. La maintenance corrective est porteuse de sens lorsque la panne de l'entité n'entraîne pas de conséquences économiques majeures ou quand les contraintes en termes de sécurité sont faibles. On distingue deux types de maintenance corrective :

La maintenance curative

La maintenance curative est une réparation définitive d'un système après l'apparition d'une défaillance. Elle peut être décidée soit immédiatement à la suite d'une défaillance, soit

après un dépannage (une maintenance palliative) [Auberville, 2004].

La maintenance palliative

La maintenance palliative est constituée d'opérations de dépannage dont le but de reprendre provisoirement une fonction requise sur le court terme. Elles devront toutefois être suivies d'opérations curatives (réparations). Le coût d'une action de maintenance palliative est élevé pour plusieurs raisons :

- Baisse de la qualité des produits.
- Absence de la sécurité.
- Augmentation du nombre d'heures supplémentaires coûteuses.
- Risque de perte des clients à cause du non-respect des dates de livraison.

Deuxième génération : Apparition de la maintenance préventive

La maintenance préventive est définie, selon la norme NF EN 13306, par la maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de dégradation d'un système [AFNOR, 2001]. Elle désigne les opérations du remplacement, de révision dans le but de prévoir la dégradation de l'équipement afin d'éviter ou de réduire les défaillances des systèmes en exploitation. Contrairement à la maintenance corrective, elle s'inscrit dans une démarche proactive, en intervenant sur une entité avant que celle-ci soit défaillante. La maintenance préventive a pour objectif de [Castanier, 2001] :

- Réduire le nombre et les coûts de défaillance,
- Augmenter la fiabilité,
- Améliorer la disponibilité du matériel,
- Assurer la sécurité des individus et de l'environnement et faciliter la gestion des stocks.

La maintenance préventive convient bien à des systèmes clé ou critiques, pour lesquels la panne est prévisible. Il existe trois formes principales de la maintenance préventive :

La maintenance systématique

C'est la première forme de maintenance préventive qui est apparue dans les années cinquante-soixante. Selon la norme NF EN 13306 X 60-319, la maintenance préventive systématique est exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unité d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien. Ce type de maintenance est très pratiqué dans le monde industriel [AFNOR, 2001]. Aucune intervention ne peut avoir lieu avant l'échéance prédéterminée. Les actions de maintenances de types « âge », « bloc » et de type « séquentielle » sont considérés systématiques. Cette stratégie concerne quatre différents types d'équipements. Le premier type d'équipements représente ceux dont leur défaillance met en cause la sécurité du matériel et des personnes. Le second type inclut les équipements dont le coût de leurs défaillances est très élevé (production laitière, production de la colle, de la

peinture...), c'est-à-dire dans le cas où la défaillance entraîne directement une grande perte matérielle. Un troisième type d'équipement est celui dont l'arrêt ou le redémarrage est long et ceci est très fréquent dans le cas d'une production nécessitant des chaudières qui fonctionnent sans arrêt (cimenterie, carrelage, céramique...). Enfin, un dernier type inclut les équipements soumis à des obligations réglementaires (service d'aviation, militaire...) [Auberville, 2004].

La maintenance conditionnelle

La maintenance préventive conditionnelle est considérée la plus intéressante pour suivre l'évolution de l'état d'une machine. Comme définie par la norme NF EN X 60 - 319, la maintenance conditionnelle correspond à la maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs (croissance, érosion, usure, température, pression, vibration, etc.) de fonctionnement [AFNOR, 2001]. Cette maintenance est définie aussi comme étant celle que l'on réalise uniquement lorsque l'état du bien le nécessite. C'est pourquoi, il faut réserver des moyens de mesure fiables et spécialisés (capteurs de seuils). Elle peut être vue par exemple comme une intervention après qu'un voyant rouge s'allume sur le tableau de bord d'un système. Cette méthode présente donc l'avantage d'éviter la surprise du dysfonctionnement. La maintenance préventive conditionnelle s'applique pour les équipements critiques qui impliquent des coûts d'arrêt de production prohibitifs, et pour les équipements dangereux pouvant mettre en cause la sécurité des personnes et des biens [Boulinger and française de normalisation, 1988]. Les exemples les plus classiques des techniques utilisées pour mettre en place la maintenance conditionnelle sont la thermographie infrarouge, l'analyse des lubrifiants et la mesure des vibrations.

La maintenance prévisionnelle

La même norme européenne NF EN 13306 X 60-319 définit la maintenance prévisionnelle (Appelée aussi : la maintenance prédictive) par : « Une maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien » [AFNOR, 2001]. C'est une approche relativement récente qui repose sur la technologie des capteurs pour prédire l'occurrence des défaillances. Son principe est d'analyser d'une manière prédictive ou prévisionnelle l'évolution de l'état dans le but d'estimer une tendance évolutive d'un dysfonctionnement et d'anticiper et de prévoir au mieux le moment où l'intervention devra être réalisée au mieux des intérêts de la production avant que l'équipement tombe en panne [Auberville, 2004].

Troisième génération : la maintenance centrée sur un objectif

La troisième génération des stratégies de maintenance vient pour répondre aux exigences de la compétitivité des entreprises et surtout la réduction des coûts de production. En réalité, on emploie généralement une maintenance mixte qui combine des opérations de maintenance préventive et corrective effectuées au plus juste en fonction des différents critères de performance. L'équilibre optimal entre préventif et correctif est déterminé grâce à

la modélisation et l'optimisation. Les quatre principales stratégies de cette génération sont la Maintenance Centrée sur la Fiabilité (MCF), la Maintenance Centrée sur le Risque (MCR), la Maintenance Productive Totale (MPT) et la Maintenance basée sur les Coûts de Cycle de Vie (MCV).

Maintenance centrée sur la fiabilité

La maintenance centrée sur la fiabilité est la stratégie la plus efficace. Elle applique la maintenance prédictive, la maintenance conditionnelle, la maintenance réactive et la maintenance proactive. L'objectif est de maximiser la disponibilité du système au meilleur coût possible, en procédant au bon entretien au bon moment. La MCF a tout d'abord été appliquée dans l'industrie de l'aviation. Ensuite, elle est utilisée dans nombreuses industries telles que l'industrie navale, l'industrie chimique, l'industrie nucléaire, etc [Selvik and Aven, 2011].

Maintenance centrée sur les risques

La maintenance basée sur les risques a pour objectif de mieux cerner les risques et de s'assurer du respect des exigences prescrites par les autorités de sûreté et au meilleur coût possible. Elle permet d'identifier la probabilité et les conséquences des défaillances potentielles tout en permettant de classer par ordre de priorité les actions de maintenance en fonction du risque de défaillance éventuelle. Ces priorités permettent d'identifier la stratégie de maintenance optimale, les intervalles des tâches de maintenance et le niveau optimal des stocks de pièces de rechange.

Maintenance productive totale

Cette stratégie a été initiée dans des compagnies japonaises dans les années 1970 et s'inscrit dans les stratégies fondamentales du juste à temps (zéro défaut, zéro délai, zéro stock et zéro panne). Elle met l'accent sur l'organisation des ressources productives pour améliorer la disponibilité des équipements. Après l'apparition de ce concept, la maintenance a devenu une philosophie complète qui comprenait un plan des activités pour la durée de vie de l'équipement, et un processus d'amélioration continue impliquant tous les individus et tous les départements. La maintenance productive totale a pour objectif [Nakajima and Sim, 1989] :

- Augmentation de la disponibilité et de la durée de vie des équipements.
- Suivre de la productivité des équipements en améliorant le Taux de Rendement Synthétique (TRS).
- Réduction du délai de mise au point des équipements.
- Pratique de la maintenance préventive systématique et conditionnelle.
- Participation des utilisateurs à la maintenance appuyés par des spécialistes de maintenance.

Maintenance centrée sur les coûts de cycle de vie

Les coûts du cycle de vie désignent la somme des coûts d'investissement de l'équipement, des coûts cumulés d'utilisation et des coûts de maintenance, sur la durée de vie de l'équipement (Voir la section 1.5).

1.7.2 Efficacité de la maintenance

En se basant sur la troisième notion évoquée dans la définition de la maintenance : « Un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise », une autre classification des actions de maintenance peut être donnée. Cette notion fait référence à l'état du système suite à une action de maintenance préventive ou corrective, et par déduction, elle fait référence au degré d'efficacité de l'action exécuté. La littérature classe les actions de maintenance préventive et corrective en trois groupes principaux selon le degré de restauration du système : la maintenance parfaite, la maintenance minimale et la maintenance imparfaite [Pham and Wang, 1996].

Maintenance minimale

Ce type d'actions de maintenance, de nature corrective, est exécuté qu'après l'apparition d'une panne en remettant le système à un état de fonctionnement sans réduire son taux de défaillance. Cet état est connu dans la littérature par « As Bad As Old » ce qui peut se traduire littéralement par « Aussi mauvais que vieux ». On considère le dépannage (maintenance palliative) comme un exemple de cette activité, puisqu'il permet à un système en panne de recommencer son fonctionnement pendant une durée limitée jusqu'à ce que la réparation ou le remplacement soit réalisé. Bahlow et al. [1965] ont été les premiers à étudier ce type de maintenance. Le lecteur peut se référer au Ouali et al. [2011] pour une synthèse des travaux sur la réparation minimale.

Maintenance parfaite

La maintenance parfaite définit un remplacement complet ou une réparation totale de l'entité permettant de la restaurer à un état « aussi bon que neuf » (en anglais « As Good As New – AGAN »). Après la maintenance, la distribution des durées de vie et la fonction du taux de défaillance sont les mêmes que celles d'une nouvelle entité. Ce type peut correspondre à une action préventive ou corrective. La plupart des théories fondamentales liées à la fiabilité sont basées sur une maintenance parfaite, ce qui implique que chaque réparation effectuée sur une entité défectueuse est considérée comme étant une maintenance parfaite.

Maintenance imparfaite

Le concept de la maintenance imparfaite a été introduit pour la première fois par Chaudhuri and Sahu [1977]. Il représente le cas intermédiaire entre la maintenance parfaite et la

maintenance minimale. Une action de maintenance imparfaite permet de restaurer une entité à un état intermédiaire entre « aussi bon que neuf » et « aussi mauvais que vieux ». Cette maintenance vise à améliorer l'état de l'entité en réduisant par exemple son niveau de dégradation, mais sans la remettre à l'état neuf. Par exemple, la mise au point d'un moteur est une action de maintenance imparfaite. Ce type d'intervention peut être appliqué pour les maintenances préventives ou correctives. Elle prend souvent plus de temps qu'un remplacement ou une réparation minimale [Do et al., 2015]. Plusieurs causes peuvent être à l'origine d'une action de maintenance imparfaite comme par exemple [Brown and Proschan, 1983] :

- La réparation partielle d'une pièce défectueuse.
- La réparation d'une pièce défectueuse mais en endommageant des pièces adjacentes.
- Des techniciens non-qualifiés.
- Des pièces de rechange de mauvaise qualité.

1.8 Quelques modèles de la maintenance préventive imparfaite

Le premier modèle de la MPI a été proposé par Nakagawa [1979]. Il a considéré que suite à une action de maintenance, le système peut être restauré à l'état parfait (maintenance parfaite) avec une probabilité p et à l'état minimal avec une probabilité complémentaire $q = 1 - p$. Dans ce cas, les actions de maintenance préventive, parfaite et minimale peuvent être considérées comme des cas particuliers de la maintenance préventive imparfaite lorsque $p = 1$ et $p = 0$ respectivement. Après, plus de 40 modèles mathématiques de maintenance imparfaite ont été proposés [Pham and Wang, 1996]. Ces modèles peuvent être classés en quatre catégories : (i) les modèles basés sur une réduction arithmétique d'âge (ii) les modèles basés sur une réduction du taux de défaillance, (iii) les modèles AGAN basés sur une accélération du taux de défaillance après la maintenance et (iv), un modèle hybride qui représente une combinaison entre le premier et le troisième type précédemment cité.

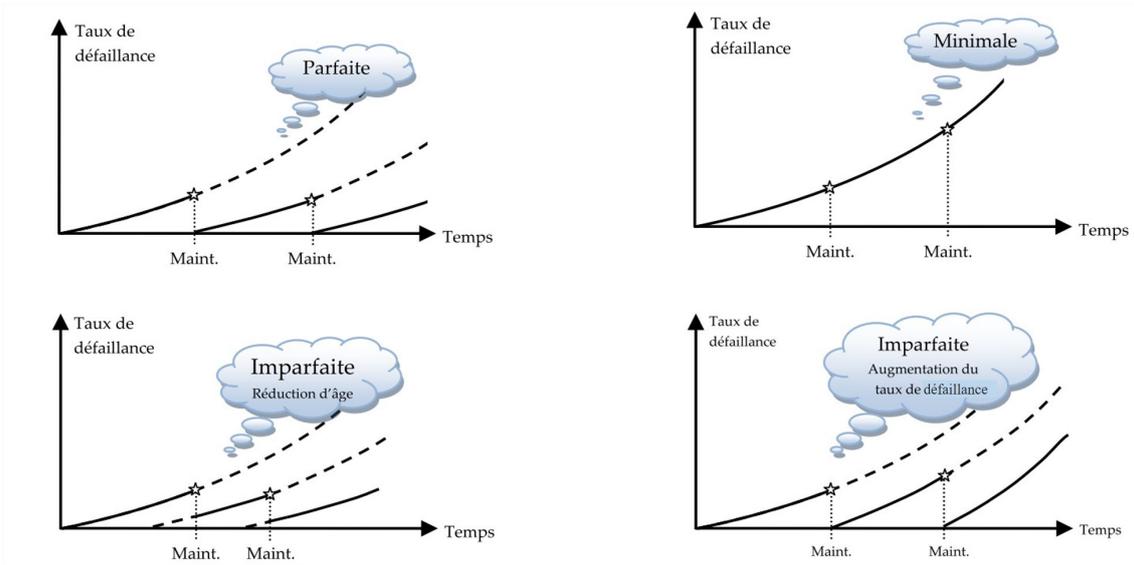


Figure 1.3 : Évolution du taux de défaillance suite à des maintenances de type parfait, minimal, et imparfait [Schutz, 2009]

La première catégorie des modèles se base sur le modèle proposé par Malik [1979], qui est basée sur l'âge virtuel. C'est le premier qui a introduit le concept du facteur d'amélioration. Il suppose qu'après la $i^{\text{ème}}$ maintenance, le système serait équivalent à un système neuf, mais ayant fonctionné durant une période A_i sans jamais tomber en panne. A_i représente donc l'âge virtuel du système après la $i^{\text{ème}}$ maintenance. Cette supposition fait aussi en sorte que le taux de défaillance après une MPI se situe entre « aussi bon que neuf » et « aussi mauvais que vieux ». En se basant sur ce concept, Kijima a défini deux classes de modèles d'âge virtuel, connus dans la littérature sous le nom de modèles de Kijima de type I et II. Selon le modèle de type I [Kijima et al., 1988], l'effet de la $i^{\text{ème}}$ maintenance préventive imparfaite est caractérisé par une réduction de l'âge virtuel $A_{i-1} + X_i$, d'une quantité proportionnelle à la durée écoulée depuis la précédente maintenance ($b_i X_i$, avec $b_i \in [0, 1]$). Mathématiquement, l'âge du système est donné par :

$$A_i = A_{i-1} + (1 - b_i)X_i, \quad \forall i \geq 1 \quad (1.3)$$

Avec :

X_i : Durée entre la $(i - 1)^{\text{ème}}$ maintenance et la $i^{\text{ème}}$ maintenance.

b_i : Facteur de réduction de l'âge (ARF) X_i .

Cependant, le modèle de type II [Kijima, 1989] suppose que la $i^{\text{ème}}$ maintenance réduit l'âge virtuel global du système $A_{i-1} + X_i$ d'une quantité qui lui est proportionnelle. Mathématiquement, l'âge du système est donné par :

$$A_i = (1 - b_i)(A_{i-1} + X_i), \quad \forall i \geq 1 \quad (1.4)$$

Si $b_i = 0$, la $i^{\text{ème}}$ action de maintenance est minimale (ABAO). Si tous les $b_i = 1$, cette action est parfaite (Aussi bon que neuf).

Par conséquent, le taux de défaillance à l'instant t est donnée par :

$$\lambda_t = \lambda(A_i + t - C_i), \quad \forall i \geq 1 \quad (1.5)$$

tel que C_i est l'âge opérationnel réel du système au moment de l'exécution de la $i^{\text{ème}}$ maintenance. D'autres modèles ont été dérivés de ces deux modèles de base [Doyen and Gaudoin, 2004].

La deuxième catégorie des modèles se base sur la réduction du taux de défaillance. Deux types de réduction du taux de défaillance ont été présentés : 1) la réduction d'une valeur constante après chaque action de maintenance, 2) la réduction d'une quantité proportionnelle (équation 1.6) à sa valeur juste avant la défaillance [Chan and Shaw, 1993].

$$\lambda_{T_i^+} = \lambda(A_{T_i^-} + \rho A_{T_i^-}), \quad \forall i \geq 1 \quad (1.6)$$

Tel que T_i^- représente la limite à gauche de l'instant de la $i^{\text{ème}}$ maintenance et T_i^+ la limite à droite.

Le modèle de base de la troisième catégorie repose sur une modification du taux de défaillance. Ce modèle, développé par [Nakagawa, 1988], se caractérise par une augmentation de l'intensité de la fonction de taux de défaillance après chaque maintenance préventive. En effet, le taux de défaillance est ramené à la valeur zéro comme si le système est restauré à l'état AGAN à cet instant précis, mais l'évolution de la variation de taux de défaillance n'est plus pareille. Autrement dit le nombre moyen de pannes après la $i^{\text{ème}}$ action maintenance est supérieur à celui avant la même action. Mathématiquement :

$$\lambda_{i+1}(\tau) > \lambda_i(\tau), \quad \forall i \geq 1 \quad (1.7)$$

Ou bien :

$$\lambda_{i+1}(\tau) = a_{i+1} \lambda_i(\tau), \quad \forall i \geq 1 \quad (1.8)$$

Avec $\lambda_{i+1}(t)$ et a_{i+1} représentent la fonction du taux de défaillance imparfaite et le Facteur d'augmentation du taux de défaillance (HRIF) après la $i^{\text{ème}}$ maintenance ($a_{i+1} \geq 1$) respectivement, avec τ est compris dans l'intervalle $[0, T_i - T_{i-1}]$.

Enfin, le Modèle Hybride de Maintenance Imparfaite (HIM), proposé par Lin et al. [2000], intègre à la fois le modèle basé sur la réduction d'âge et le modèle basé sur l'accélération du taux de défaillance après la maintenance. L'idée principale de ce modèle est la suivante : si la fonction de taux de panne est $\lambda_i(t)$ avant la $i^{\text{ème}}$ action MPI, elle devient $a_i \lambda_i(b_i y_i + t_0)$ après cette action, où y_i est l'âge virtuel de l'entité juste avant la $i^{\text{ème}}$ action MPI, t_0 est le temps écoulé depuis la $i^{\text{ème}}$ IPM et avant la $(i + 1)^{\text{ème}}$ action MPI. Rappelons que a_i et b_i représentent respectivement le HRIF et le ARF. Ces deux paramètres reflètent l'effet des actions de maintenance imparfaite sur la dégradation de l'entité ($a_i \geq 1$, et $b_i \in [0, 1]$).

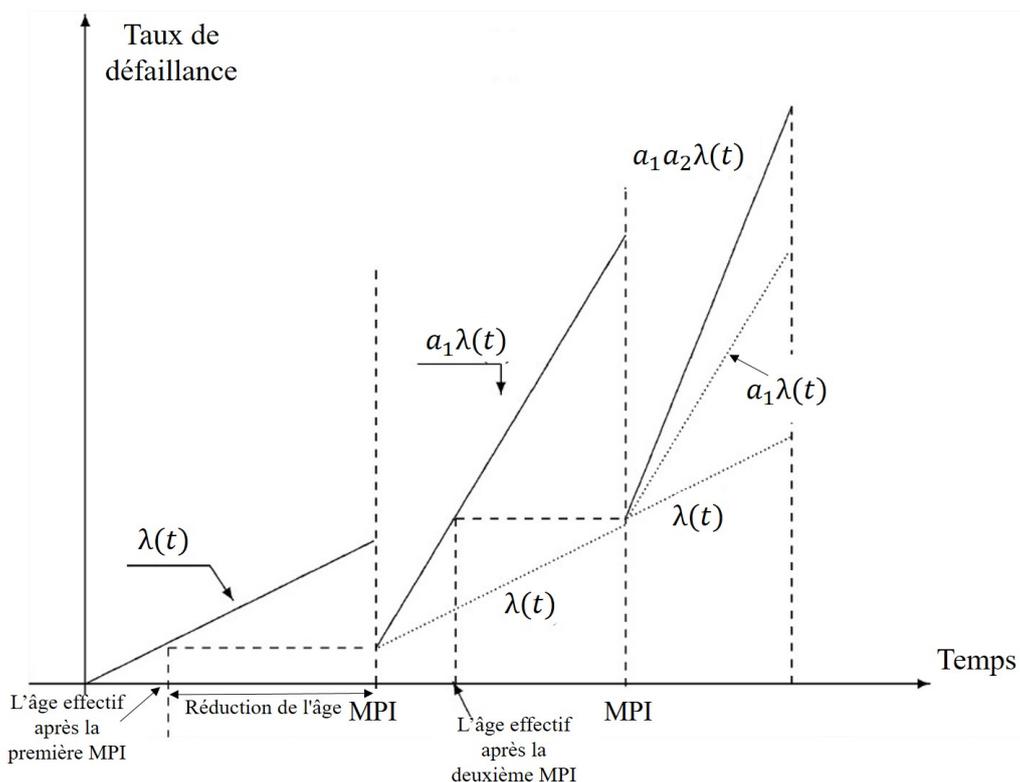


Figure 1.4 : Évolution du taux de défaillance sur la base du modèle hybride de la maintenance imparfaite

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les définitions de base relatives aux activités de la logistique inverse, du remanufacturing et de la maintenance. Nous avons expliqué que le profit potentiel des fabricants d'équipements d'origine, à travers l'adoption d'une stratégie du remanufacturing de leurs produits en fin de vie, dépend fortement de l'intérêt des utilisateurs. Nous avons mentionné aussi que, du point de vue des utilisateurs, l'intérêt pour le remplacement ou le remanufacturing résulte de différents motifs, à savoir : technique, économique, environnemental...etc. Dans un monde connu par une compétition croissante, la détermination de la durée de vie optimale des équipements sur la base de la minimisation de leurs coûts de cycle de vie attire de plus en plus l'attention des entreprises manufacturières. Ces coûts sont fortement liés au profil de détérioration de l'équipement et par conséquent, aux conditions de fonctionnement et à la qualité de maintenance appliquée tout au long de leur cycle de vie. Dans ce contexte, nous avons présenté plusieurs modèles qui tiennent en compte séparément l'effet des conditions du fonctionnement et l'effet de l'efficacité de la maintenance sur la dégradation des systèmes.

Le chapitre suivant a pour but de positionner notre stratégie du remanufacturing par rapport aux travaux existants dans la littérature. Ce positionnement sera cadré par une structuration de l'état de l'art en plusieurs axes de recherche et conclu par une synthèse analytique et une évaluation critique des travaux cités.

Chapitre 2

État de l'art et position du problème

2.1 Introduction

Au cours des dernières années, l'intérêt pour les chaînes logistiques en boucle fermée ainsi le remanufacturing est devenu en hausse croissante en raison d'une conscience forte envers la durabilité environnementale et les avantages économiques potentiels des opérations de récupération. Pour un examen complet du sujet, le lecteur peut se référer aux sources suivantes : [Abbey and Guide Jr \[2017\]](#), [Agrawal et al. \[2015a\]](#), [Atasu et al. \[2008\]](#), [Govindan et al. \[2015\]](#), [Jayant et al. \[2012\]](#), [Stindt and Sahamie \[2014\]](#), [Vahabzadeh and Yusuff \[2015\]](#). Par ailleurs, plusieurs revues de la littérature ont traité séparément des questions particulières de la prise de décision dans le domaine du remanufacturing, comme la gestion des acquisitions de produits ([Priyono et al., 2016](#), [Wei et al., 2015](#)), la faisabilité du remanufacturing [[Goodall et al., 2014](#)], les décisions d'investissement [[Kafuku et al., 2015](#)], la fiabilité et la maintenance [[Diallo et al., 2016](#)], etc.

Dans ce chapitre, une priorité absolue a été accordée à la couverture des axes liés à notre thèse. Pour commencer, nous présentons dans la section suivante quelques travaux traitant le problème du remanufacturing des équipements de production de plusieurs aspects. Ensuite, dans la section 2.3, nous abordons le concept du remanufacturing préventive avec ses deux dimensions : économique et environnementale. Puis, nous discutons dans la section 2.4, la qualité des pièces de rechange utilisées pour la maintenance ou le remanufacturing et son effet sur le rendement des équipements. Après, la section 2.5 s'articule autour des sujets liés aux conditions de fonctionnement et la maintenance et leurs impacts sur la fiabilité des systèmes. Une synthèse analytique et une évaluation critique des travaux citées sera, par la suite, présentée dans la section 2.6 afin d'affiner notre problématique et ressortir notre contribution. Ainsi, dans la dernière section, nous détaillons d'une manière explicative les approches de résolutions utilisées dans cette thèse.

2.2 Le remanufacturing dans le secteur industriel

Selon [Chari et al. \[2014\]](#), le remanufacturing est une option offerte à la fin de la vie d'un produit afin de prolonger sa durée de vie. Il s'agit également d'un processus de restauration des produits utilisés à l'état neuf par le désassemblage, le nettoyage, la réparation ou le remplacement des pièces et le réassemblage. L'exercice de cette activité devient de plus en plus attrayant pour les fabricants d'équipements d'origine qui cherchent à atteindre une meilleure rentabilité. Son impact se reflète directement sur la réduction de la consommation d'énergie, de l'utilisation des matières premières et des coûts de main-d'œuvre. Les praticiens et les chercheurs ont contribué de différentes manières à ce domaine. [Steingrímsson et al. \[2011\]](#) ont proposé une approche d'élaboration des stratégies commerciales de concurrence et de collaboration sur le marché du remanufacturing des équipements de production. L'approche développée tient en compte différents acteurs du marché ayant différentes caractéristiques. [Cunha et al. \[2011\]](#) ont établi une technique de cartographie technologique pour montrer les interrelations entre les paramètres du marché, de l'équipement et de la technologie. D'autres études ont porté sur un type particulier d'équipement de production. À titre d'exemple, [Schraven et al. \[2012\]](#) ont proposé une stratégie du remanufacturing à la commande (MTO) pour les équipements utilisés dans l'industrie automobile. La stratégie proposée comprend un concept modulaire qui permet de prendre en compte les composants récupérés des équipements retournés dans l'ingénierie et la conception. [da Silva et al. \[2012\]](#) ont présenté un prototype de mise en œuvre du remanufacturing pour une machine. À partir d'un scénarimage, il est bien possible de décrire les principales activités qui se déroulent durant le cycle de vie de la machine, y compris une analyse comparative du cycle de vie pour des scénarios de fin de vie.

Les équipements de production peuvent être classés en deux principales catégories, à savoir (i) les équipements automobiles, tels que les engins de construction, les chenilles, les tracteurs..., et (ii) les équipements de production qui comprennent toutes les formes de machines utilisées dans les systèmes de fabrication.

Un grand nombre de chercheurs, comme par exemple [Parker 1997](#), [Saavedra et al. 2013](#), [Zhang et al. 2011](#) et d'autres, s'accordent sur le fait que le remanufacturing est devenue un partenaire de croissance potentiel dans le secteur automobile, qui a sans aucun doute été le principal moteur de l'industrie jusqu'à présent. Pour ce secteur particulier, plusieurs contributions ont été trouvées dans la littérature. [Yi et al. \[2016\]](#) ont développé un modèle linéaire en nombres entiers mixtes pour déterminer une conception optimale d'une chaîne logistique en boucle fermée pour les machines de construction afin de contrôler les flux de produits utilisés. [Sharma et al. \[2015\]](#) ont proposé des services de soutien efficaces pour les équipements lourds et ont découvert que le remanufacturing est le principal moyen pour satisfaire les besoins des clients. De même, [Yan \[2013\]](#) a présenté une analyse approfondie des avantages économiques et environnementaux des valves hydrauliques remanufacturées. L'auteur a indiqué que le remanufacturing peut restaurer le fonctionnement des vannes hydrauliques défectueuses et peut économiser jusqu'à 55% sur les coûts et 90% sur les matériaux. [Zhou et al. \[2012\]](#) ont proposé un modèle d'évaluation de qualité pour mesurer le degré de réutilisation des pièces recyclées des chargeuses sur roues.

Dans l'industrie des machines, un grand nombre d'études ont abordé divers problèmes du remanufacturing, principalement du point de vue des FEO-R (Darghouth et al., 2017, Du and Li, 2014, Ferguson et al., 2009). Plusieurs de ces études ont été consacrées aux machines-outils (Darabă, 2014, Liu et al., 2014a, Ullah et al., 2016, Yaoling, 2012); certains auteurs ont exposé le remanufacturing uniquement pour un type particulier de machines de production (Geng et al., 2016, Hayashi et al., 2013, Yan, 2013, Yang, 2014, Yiqing et al., 2006). Il convient de noter que les avantages potentiels du remanufacturing dépendent certainement des exigences des clients. À notre connaissance, peu d'études ont porté sur le remanufacturing des machines, du point de vue de l'utilisateur. La conception et l'élaboration d'une grille d'aide à la décision pour un remanufacturing ou une nouvelle acquisition est assez complexe et implique souvent une collaboration entre le service d'exploitation et le service d'achats de l'entreprise manufacturière d'un côté et le fabricant des équipements d'origine d'un autre côté. Toutefois, les recherches disponibles sur la façon d'élaborer une stratégie de prise de décision pour le remanufacturing ou l'acquisition de nouveaux équipements sont encore limitées (Bengtsson and Kurdve, 2016, Subramoniam et al., 2013...).

2.3 Le remanufacturing préventive

L'ingénierie du remanufacturing préventive, qui repose sur la théorie du cycle de vie global, implique une série des processus industriels de réparation ou de modification des produits usés dans un temps approprié [Gao et al., 2016]. Dans ce cadre, Liu et al. [2016] ont proposé un modèle qui permet de déterminer le moment optimal pour le remanufacturing d'un produit du point de vue environnemental. Les auteurs ont appliqué leur modèle sur un vilebrequin de moteur dont l'impact environnemental est défini sur la base de la théorie du remplacement. Dans un autre travail, Liu et al. [2014b] ont utilisé la méthode de l'analyse du cycle de vie pour déterminer le moment optimal pour le remanufacturing d'un moteur. Le processus d'évaluation environnementale utilisé dans leur étude tient en compte les quatre étapes du cycle de vie du produit, à savoir la fabrication primaire, la première utilisation, la remanufacturing et la seconde utilisation. Qingdi and Dan [2013] ont proposé une méthode de prise de décision à intervalle de temps pour le remanufacturing actif de produits électromécaniques en se basant sur la théorie des jeux et les réseaux de neurones.

Outre l'aspect environnemental abordé dans les travaux précédents, Gao et al. [2016] ont également considéré l'aspect économique dans leur modèle afin de déterminer le moment optimal pour le remanufacturing actif de produits électromécaniques. L'impact environnemental a été converti et intégré aux coûts économiques à l'aide de la méthode « La volonté de la société à payer - Society's Willingness to Pay (WTP) ». À partir d'un modèle de temps optimal du remanufacturing, un mode d'opération du recyclage est proposé. Ce mode comprend trois couches, à savoir la couche de fabrication et de remanufacturing; puis une couche intermédiaire constituée des distributeurs et des gestionnaires; et enfin la couche de l'utilisateur final qui regroupe les entités et les individus. Afin de tester son efficacité, le mode proposé est appliqué à différents types de bielles.

Shi and Min [2014] ont étudié l'effet de l'incertitude liées aux coûts d'exploitation et

d'entretien sur les décisions du remanufacturing et de remplacement. Les auteurs ont considéré une entreprise qui prête un produit composé de pièces durables et non durables à un fournisseur de services. L'option du remanufacturing consiste à remplacer les pièces non-durables par des pièces neuves, tandis que l'option de remplacement implique le remplacement du produit dans son ensemble. Leur objectif était de déterminer le moment optimal pour effectuer le remanufacturing ou le remplacement quand les coûts d'exploitation et de maintenance suivent un mouvement brownien géométrique.

Un autre modèle pour la détermination du temps du remanufacturing préventive a été élaboré par [Liu et al. \[2013\]](#); il est basé sur les aspects de la dégradation des performances du produit et de l'état de défaillance des composants principaux. L'auteur se réfère à des produits à composants multiples. Certains d'entre eux sont des composants de grande valeur qui contiennent des pièces défectueuses dont la plupart sont remplacées pendant le processus du remanufacturing. Cependant, les études qui tiennent en compte l'effet des conditions de travail ou de la maintenance imparfaite sur le timing du remanufacturing sont presque inexistantes.

2.4 La sélection des pièces de rechange

Les deux tiers de toutes les activités du remanufacturing concernent l'industrie des pièces de rechange [[Charter and Gray, 2007](#)]. Lorsque des installations du remanufacturing sont disponibles, la récupération des produits peut être utilisée comme une option supplémentaire pour l'approvisionnement en pièces de rechange, pour répondre enfin aux demandes de maintenance (pendant le cycle de vie) ou de remanufacturing (à la fin de vie) d'autres produits. Dans ce contexte, [Chari et al. \[2013\]](#) ont abordé une problématique liée à la garantie unidimensionnelle. Pendant la période de garantie, le fabricant s'engage à réparer toutes les pannes en utilisant des pièces de rechange neuves ou reconditionnées. Afin de maximiser les profits attendus, ces auteurs ont proposé un modèle mathématique pour calculer les paramètres optimaux de production et de garantie. Comme extension de ces travaux, [Chari et al. \[2016\]](#) ont traité le même problème de garantie en ajoutant d'autres variables de décision, telles que le prix de vente, l'âge et la proportion des composants reconditionnés.

Au-delà des avantages économiques et environnementaux de l'utilisation de pièces de rechange remanufacturées, la question qui se pose encore est celle de sa capacité à répondre aux besoins de l'utilisateur. [Bhakhavatchalam et al. \[2015\]](#) affirment que la fiabilité d'un produit remanufacturé est un facteur important dans les décisions de remanufacturing. Une fois remise à neuf, la pièce est utilisée une seconde fois et censée fournir un niveau de performance élevé à l'utilisateur. Cependant, les pièces de rechange remanufacturées ont un mode de fonctionnement différent de celui des nouvelles pièces; notamment, leurs pannes sont plus fréquentes. Par conséquent, leur usage abusif peut avoir des effets indésirables sur les processus d'exploitation et de maintenance [[Dahane et al., 2015](#)]. Du point de vue de l'utilisateur, il est important pour lui, lorsqu'il décide de remanufacturer ou de remplacer son équipement, de connaître la composition économique de l'équipement en pièces de rechange neuves et remanufacturées, qui correspond au prochain mode d'utilisation. La littérature actuelle sur les machines et les équipements ne contient, à notre connaissance, que peu de travaux traitant

la question du choix des pièces de rechange pour les opérations de remanufacturing ou de maintenance du point de vue de l'utilisateur. [Boudhar et al. \[2014\]](#) ont examiné les possibilités d'utiliser des pièces de rechange neuves ou remanufacturées pour réparer une machine de production sujette à une dégradation stochastique. Ils ont proposé une heuristique pour la détermination des dates d'inspection ainsi que la qualité de la pièce de rechange à utiliser lors du prochain remplacement, en fonction du niveau de dégradation de la pièce en service. [Diallo and Aït-Kadi \[2011\]](#) ont analysé les propriétés de fiabilité des systèmes rencontrés en milieu industriel. Pour effectuer des opérations de remanufacturing ou de maintenance, des composants neufs et remanufacturés de la même distribution de vie, mais d'âge différent sont utilisés. Par ailleurs, [\[Dahane et al., 2015\]](#) ont conçu une approche multi-agents afin d'améliorer l'impact de la stratégie de gestion des pièces de rechange sur un système de turbine éolienne offshore (OWT) pendant (pour les opérations de maintenance) ou à la fin de son cycle de vie (pour le processus de remanufacturing). Cependant, très peu d'articles ont tenu compte des conditions de travail futures dans les décisions relatives au choix des composants lors du processus de remanufacturing ou de remplacement.

2.5 Conditions de fonctionnement, maintenance et fiabilité

Cette section discute plusieurs axes, à savoir : la planification de la production, l'effet des conditions de fonctionnement en général et l'activité de production en particulier sur la fiabilité, l'effet de la maintenance imparfaite sur la fiabilité et l'effet conjoint de la maintenance imparfaite dépendant des conditions de fonctionnement sur la fiabilité.

2.5.1 Planification de la production

L'objectif principal des systèmes de production est de satisfaire la demande en produits et de prévenir toute pénurie afin de fidéliser la clientèle et maximiser le profit. Toutefois, le profit dépend directement du plan de production. La surproduction entraîne une augmentation des coûts de stockage, tandis qu'une production plus faible entraîne l'insatisfaction des clients. Pour éviter ces deux situations extrêmes, les gestionnaires doivent donc être en mesure de définir la quantité de production économique adéquate pour chaque période de l'horizon. Ces sujets ont été largement étudiés dans la littérature sous différents titres, à savoir : "Dimensionnement des lots – Lot Sizing", "Quantité de production économique – Economic production Quantity (EPQ)" ou "Quantité de commande économique - Economic Order Quantity (EOQ)". Pour une rétrospective exhaustive de la littérature sur ce domaine, le lecteur peut se reporter aux sources suivantes : [Buschkühl et al. 2010](#), [Bushuev et al. 2015](#), [Copil et al. 2017](#), [Glock et al. 2014](#), [Ullah and Parveen 2010](#), [Wang et al. 2014](#). Toutefois, dans la plupart des cas, les demandes des clients peuvent varier d'une période à une autre, ce qui implique une variation de la cadence de production sur l'horizon de planification. Dans ce cas, nous pouvons dire que les machines de production fonctionnent sous des conditions opérationnelles variables.

2.5.2 L'effet des conditions de fonctionnement sur la fiabilité

La fiabilité des machines est considérée comme le principal inducteur des coûts du cycle de vie que l'utilisateur cherche à minimiser en plus des coûts du stockage et d'autres frais. Par ailleurs, les détériorations de la machine dépendent directement du temps et des conditions opérationnelles (durée des cycles ou cadence de production). La majorité des chercheurs en maintenance supposent que les conditions opérationnelles sont constantes ou qu'elles n'ont aucun effet sur la détérioration [Hu and Jiang, 2016]. Cox [1972] a proposé le premier modèle de défaillance en fonction des conditions, pour l'analyse des données sur la survie en biomédecine. Plus tard, ce modèle a été utilisé pour représenter l'effet des conditions opérationnelles et environnementales sur la fiabilité et la maintenabilité des systèmes industriels (Dao and Zuo, 2016, Kumar and Westberg, 1997, Martorell et al., 1999, Zhao et al., 2010). Dao and Zuo [2016] ont étudié le problème de la maintenance sélective des composants multi-états opérant dans des conditions de charge variables. Les auteurs ont proposé un modèle de dégradation basé sur le modèle PHM afin d'identifier la meilleure stratégie de maintenance permettant de maximiser la fiabilité du système lors des prochaines missions. Lanza et al. [2009] ont élaboré une approche exhaustive pour quantifier l'effet des charges variables sur la fiabilité. Leur objectif était de calculer le moment optimal pour fournir les pièces de rechange nécessaires et effectuer les opérations de maintenance préventive. Pour une revue plus détaillée sur le domaine de la maintenance en tenant compte des conditions d'exploitation variables, le lecteur peut se reporter aux travaux suivants : Husniah et al. 2015, Trappey et al. 2015.

En ce qui concerne les papiers traitant la problématique de l'optimisation conjointe des coûts de production, de maintenance et d'inventaire, seuls quelques-uns ont considéré l'interdépendance entre le taux de production et le taux de défaillance. Pour les machines de découpe, Cheng et al. [2016] ont proposé une stratégie conjointe de planification de la production et de la maintenance dans laquelle ils ont intégré le modèle dépendant de la charge proposé précédemment par Lanza et al. [2009]. Les auteurs ont visé à déterminer conjointement le taux de production et le nombre de remplacements d'outils de coupe afin de minimiser le coût total prévu par unité produite. Pour un système de fabrications multi produit, Dahane et al. [2012] ont développé un algorithme génétique pour déterminer le taux de production optimal qui permet de minimiser le coût total (inventaire, production et réparation) sur un horizon fini. Martinelli [2005] a considéré une seule machine, caractérisée par un processus de panne/réparation markovien, avec deux taux de défaillance différents pour des cadences de production élevées et faibles.

2.5.3 L'effet de la maintenance imparfaite sur la fiabilité

Plusieurs modèles de maintenance, y compris les modèles mentionnés ci-dessus, supposent qu'un système peut être restauré à l'état neuf après chaque intervention de maintenance [Nakagawa, 1988]. Dans la pratique, cette hypothèse n'est souvent pas vraie, car une unité après une maintenance peut généralement être plus jeune, mais peut parfois être pire qu'avant la maintenance en raison de procédures incorrectes. Ce type de maintenance préventive est considéré comme imparfaite (MPI)". En effet, lorsqu'elle est exécutée, elle améliore

la machine en la mettant dans un état entre "AGAN" et "ABAO". De nombreuses approches ont été proposées pour modéliser les effets de la maintenance préventive imparfaite. Les plus populaires sont le modèle de réduction de l'âge [Malik, 1979], le modèle d'augmentation du taux de panne [Nakagawa, 1988] et le modèle hybride de maintenance imparfaite HIM proposé par Lin et al. [2000]. Sur la base de ce dernier modèle, Ben Mabrouk et al. [2017] ont présenté un modèle mathématique permettant de déterminer les intervalles de maintenance optimaux pour les équipements loués sur une durée de location finie. Les actions de maintenance sont effectuées lorsque la fiabilité atteint un certain seuil et une pénalité est imposée à l'utilisateur si le nombre de pannes dépasse un seuil donné. Do et al. [2015] étudient les impacts positifs et négatifs des actions de maintenance imparfaite sur un système en détérioration. Ils ont proposé une politique de maintenance adaptative pour sélectionner de manière optimale les actions de maintenance (parfaite ou imparfaite) à chaque inspection. Khatab [2015] a proposé un modèle de maintenance préventive imparfaite pour optimiser conjointement le seuil de fiabilité et le nombre d'actions de maintenance afin de minimiser le coût total attendu par unité de temps. Xia et al. [2012] ont proposé un modèle de maintenance préventif séquentiel amélioré en incluant la théorie de la valeur des attributs multiples pour un système énergétique distribué soumis à la dégradation. D'autres travaux ont discuté l'utilisation de modèles hybrides de la maintenance préventive (El-Ferik and Ben-Daya, 2006, Hadidi and Rahim, 2015, Liao et al., 2010, Liu et al., 2012).

L'effet de la maintenance imparfaite est également pris en compte dans les problèmes de planification de la production. Saidi-Mehrabad et al. [2017] ont considéré le concept de la maintenance imparfaite dans un problème de planification de production et de maintenance. Leur objectif était de déterminer le niveau du stock et la quantité des produits à fabriquer ainsi que le temps et le type de maintenance à effectuer. Aghezzaf et al. [2016] ont développé un modèle non-linéaire en nombre entier mixte pour résoudre un problème de planification de la production et de la maintenance imparfaite dans un système de production sujet aux pannes. Fakher et al. [2015] ont développé un algorithme génétique pour résoudre un modèle d'optimisation non-linéaire pour un problème de lot-sizing intégré à la planification de la maintenance préventive. Fitouhi and Nourelfath [2014] a développé un algorithme de recuit simulé afin de déterminer une stratégie optimale de lot-sizing et de maintenance préventive non-cyclique pour les systèmes multi-états.

2.5.4 L'effet des conditions de fonctionnement et de la maintenance imparfaite sur la fiabilité

Peu de travaux ont étudié l'effet conjoint de la maintenance imparfaite et de conditions opérationnelles variables sur la performance des systèmes de production. Hu et al. [2017] ont combiné le modèle ALM et le modèle HIM pour une machine fonctionnant dans des conditions de fonctionnement constant par pièces. Ils ont proposé une politique de maintenance dynamique et rentable dans laquelle le plan de production est mis à jour dynamiquement. Pour traiter un problème de planification de maintenance préventive dans une cellule de fabrication flowshop flexible. Feng et al. [2018] ont intégré la maintenance préventive imparfaite et l'ordonnancement de groupe dépendant de la séquence pour examiner l'évolution de la fiabilité

des machines sous des conditions variables par groupe. You et al. [2011] ont combiné les deux modèles PHM et HIM dans un cadre unifié pour examiner les effets des actions de maintenance imparfaites et des conditions opérationnelles sur la probabilité d'occurrence des défaillances. Le modèle qui en résulte s'appelle "modèle de risque proportionnel étendu - Extended Proportional Hazard Model (EPHM)". Lu et al. [2012] ont examiné la maintenance imparfaite des systèmes fonctionnant dans un environnement variant dans le temps; elle a été modélisée en utilisant un processus Markov homogène à deux états, où un état représente une condition typique et l'autre une condition sévère. Les auteurs ont prouvé la discontinuité de la fonction du taux de panne par un processus additif de Markov.

La figure 2.1 présente les domaines de recherche en ingénierie de la production et de la fiabilité liés à notre travail.

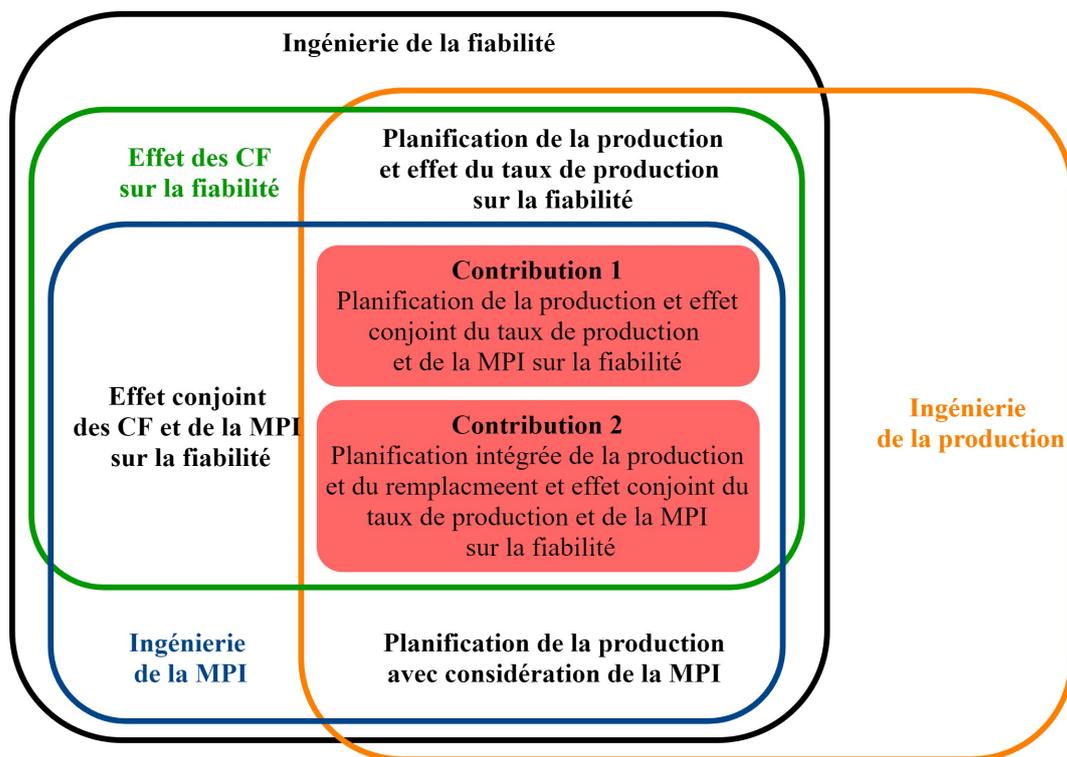


Figure 2.1 : Domaines connexes de l'ingénierie de production et de fiabilité

2.6 Synthèse de l'étude bibliographique et position du problème

Comme nous l'avons présenté au début de ce chapitre, les problèmes abordés dans cette thèse sont liés à plusieurs axes de recherche. Tout d'abord, dans la section 2.2, nous avons exposé quelques travaux liés au remanufacturing des équipements de production, traitant des questions diverses comme les stratégies commerciales, les activités intégrées de la production et de récupération des composants, l'impact environnemental des options de fin de vie, le remanufacturing dans le secteur automobile... Nous avons précisé que dans le secteur des machines, un grand nombre d'études ont porté sur divers problèmes du remanufacturing, principalement du point de vue des FEO-Rs. En plus, la plupart de ces études n'exposent le remanu-

facturing que pour un type particulier d'équipement de production ou des outils de machines. Par ailleurs, du point de vue de l'utilisateur, les études focalisées sur le remanufacturing des machines sont quasiment introuvables.

Puis, dans la section 2.3, nous avons présenté le nouveau concept du " remanufacturing préventive " introduit pour la première fois par Liu et al. [2013]. Nous avons présenté aussi les quelques travaux publiés dans ce domaine. Au meilleur de notre connaissance, aucune étude ne tient en compte de l'effet des conditions opérationnelles sur le temps du remanufacturing.

Ensuite, dans la section 2.4, nous avons souligné l'importance de la récupération des produits en fin de vie comme un moyen important de fournir des pièces de rechange pour répondre aux demandes de maintenance ou du remanufacturing. Nous avons abordé la question majeure de cette activité qui est la capacité des pièces de rechange remanufacturées à répondre aux besoins des clients. Aussi, nous avons signalé que la littérature actuelle sur les équipements de production ne contient que peu de travaux traitant la question du choix des pièces de rechange pour les opérations du remanufacturing ou de maintenance du point de vue des utilisateurs. Néanmoins, quelques travaux ont été présentés dans ce contexte. Toutefois, nous n'avons trouvé aucun travail qui tienne en compte les conditions opérationnelles futures dans les décisions du choix des composants (neufs ou remanufacturés) pour effectuer le processus de remanufacturing.

Par la suite, dans la section 2.5, nous avons mentionné, dans la première partie, que dans la plupart des cas, les demandes des clients peuvent varier d'une période à une autre, ce qui implique parfois une variation de la cadence de production (conditions opérationnelles) qui représente une forme de conditions du travail. Ainsi, la détérioration de la machine dans ce cas dépend directement du temps et de la cadence de production. La plupart des chercheurs dans le domaine de la maintenance supposent que les conditions opérationnelles sont constantes ou qu'elles n'ont aucun effet sur le phénomène de détérioration.

D'après les travaux cités dans les sections précédentes, nous constatons que les études axées sur le remanufacturing des machines/composants du point de vue de l'utilisateur sont presque inexistantes. Certaines de ces études se rapportent aux domaines du remanufacturing actif et de la sélection des pièces de rechange. De plus, les conditions opérationnelles et la maintenance imparfaite n'ont pas été prises en compte dans les décisions de planification de remplacement ou de remanufacturing, tandis que les conditions opérationnelles futures n'ont pas été prises en compte dans les décisions du choix des pièces de rechange pour l'assemblage des produits remanufacturés. Même dans la littérature relative à la maintenance et/ou à la production/maintenance, l'interdépendance entre les conditions opérationnelles (taux de production) et la fiabilité est rarement étudiée. Enfin, nous ne disposons pratiquement pas d'études sur la planification de la production avec la considération de l'effet conjoint de la maintenance imparfaite et du taux de production sur la détérioration des machines. Ce sujet fera l'objet de notre première contribution présentée dans le troisième chapitre. Le tableau 2.1 et la figure 2.2 présentent une taxonomie des études liées à notre travail.

Tableau 2.1 : Taxonomie des travaux liés à notre recherche»

Domaines connexes	Auteurs
Remanufacturing préventive	Gao et al. [2016], Liu et al. [2013, 2016, 2014b], Qingdi and Dan [2013], Shi and Min [2014].
Sélection des pièces de rechange pour les opérations de maintenance où du remanufacturing	Bhaktavatchalam et al. [2015], Boudhar et al. [2014], Chari et al. [2013, 2016], Dahane et al. [2015], Diallo and Aït-Kadi [2011].
Planification de la production	Buschkühl et al. [2010], Bushuev et al. [2015], Glock et al. [2014], Ullah and Parveen [2010], Wang et al. [2014].
Effet des conditions de fonctionnement sur la fiabilité	. Dao and Zuo [2016], Husniah et al. [2015], Kumar and Westberg [1997], Lanza et al. [2009], Martorell et al. [1999], Trappey et al. [2015], Zhao et al. [2010].
Ingénierie de la maintenance imparfaite	Ben Mabrouk et al. [2017], Do et al. [2015], El-Ferik and Ben-Daya [2006], Hadidi and Rahim [2015], Khatab [2015], Liao et al. [2010], Lin et al. [2000], Liu et al. [2012], Malik [1979], Nakagawa [1988], Xia et al. [2012].
Planification de la production avec la considération de l'effet du taux de production sur la fiabilité	Cheng et al. [2016], Dahane et al. [2012], Martinelli [2005].
Planification de la production avec la considération de l'effet de la maintenance imparfaite	Aghezzaf et al. [2016], Fakher et al. [2015], Fittouhi and Nourelfath [2014], Saidi-Mehrabad et al. [2017].
Effet conjoint des conditions de fonctionnement et de la maintenance imparfaite sur la fiabilité	Feng et al. [2018], Hu et al. [2017], Lu et al. [2012], You et al. [2011].
Planification de la production en tenant compte du l'effet conjoint du taux de production et de la maintenance imparfaite sur la fiabilité	Contribution 1
Planification intégrée de la production et du remplacement en tenant compte du l'effet conjoint du taux de production et de la maintenance imparfaite sur la fiabilité	Contribution 2
Planification intégrée de la production et du remanufacturing en tenant compte du l'effet conjoint du taux de production et de la maintenance imparfaite sur la fiabilité	Contribution principale.

Le remanufacturing des systèmes de production dépend à la fois des conditions opérationnelles et de l'efficacité de la maintenance. Dans ce contexte, cette étude permet de mettre en lumière les effets conjoints des contraintes de production et de la maintenance imparfaite sur

la fiabilité et la valeur d'amortissement des équipements, et donc sur les décisions de remplacement ou de remanufacturing dans un horizon fini. La principale contribution de cette thèse consiste à développer une approche intégrée basée sur la méthode d'analyse des coûts du cycle de vie afin de déterminer conjointement le meilleur plan de production (mode opérationnelle) et le meilleur plan du remanufacturing préventive, lorsque les actions de maintenance préventive sont imparfaites. Cette optimisation intégrée vise à minimiser les coûts du cycle de vie des équipements, qui sont notamment les coûts de maintenance, les charges d'amortissement et les coûts du remanufacturing, ainsi que les coûts de stockage des produits finis.

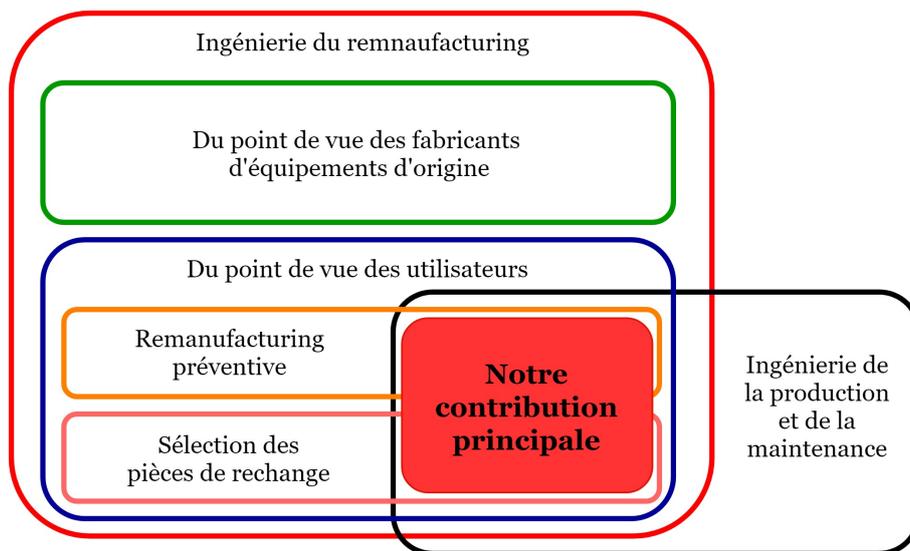


Figure 2.2 : Notre contribution principale

2.7 Présentation des méthodes d'optimisation utilisées

Pour résoudre nos trois problématiques citées ci-dessus, il est important de souligner les outils de modélisation et d'optimisation à utiliser. Dans la littérature, deux grandes familles de méthodes d'optimisation sont proposées, à savoir : les méthodes exactes et les méthodes approximatives.

Les méthodes exactes sont basées sur une modélisation mathématique et peuvent être appliquées à des problèmes de petites tailles. Elles fournissent des solutions optimales, grâce à une résolution algorithmique, une exploration intelligente ou une énumération exhaustive de l'espace de recherche. Le point faible des méthodes de cette famille se présente dans le cas des problèmes de grandes tailles ou elles nécessitent un coût de recherche souvent prohibitif en termes du temps et de ressources requises. De ce fait, la complexité de ce type de méthodes augmente exponentiellement avec la taille de l'instance à traiter, elle devient très importante face à des problèmes comprenant plusieurs variables, fonctions objectifs et/ou contraintes.

Il existe plusieurs méthodes d'optimisation exactes tel que les méthodes par séparation et évaluation (Branch and Bound, Branch and Cut, Branch and Price et Branch and Cut and Price), l'algorithme de Simplex, l'algorithme A*, la programmation dynamique, la méthode de décomposition de Benders, l'algorithme Global OPTimization (GOP), les algorithmes de retour

arrière (Backtracking)...

Par ailleurs, des méthodes approchées (appelées aussi heuristiques/métaheuristiques) ont été développées pour faire face aux limites des méthodes exactes qui est le temps de calcul important. Le recours à ces méthodes est un choix idéal dans le cas où l'optimalité n'est pas importante pour gagner en efficacité. Ces méthodes présentent deux avantages primordiaux, à savoir : (i) la possibilité d'adaptation à n'importe quel type de problèmes (nombre de variables et de contraintes important, divergence des objectifs à optimiser, imprécision des données), et (iii) la possibilité d'hybridation avec d'autres méthodes ce qui permet souvent d'améliorer la qualité des solutions.

Les méthodes heuristiques regroupent principalement les méthodes constructives et les métaheuristiques. Les méthodes constructives sont des méthodes itératives permettant de construire une solution à partir d'une solution initiale. Le principe est de compléter cette dernière au fil des itérations par des nouveaux composants de manière incrémentale. Les points forts de ces méthodes sont la rapidité et la simplicité. Leur principal défaut est qu'elles sont considérées comme étant « à courte vue ». La qualité des solutions obtenues peut être médiocre surtout dans le cas des planifications à long terme. En effet, à chaque étape, la solution courante est complétée de façon optimale sans considération des conséquences obtenues au niveau de la solution finale.

Les métaheuristiques (appelées aussi « méthodes aveugles »), apparues dans les années 1980, sont des méthodes inspirées des systèmes naturels, apparues dans les années 1980. Elles forment une famille d'algorithmes d'optimisation génériques applicable et adaptable pour résoudre une large gamme de problèmes d'optimisation difficile, pour lesquels on ne connaît pas de méthode classique plus efficace. Les métaheuristiques sont largement utilisées cette dernière décennie grâce à leur efficacité et leur simplicité d'adaptation pour n'importe quel type de problème. Leur point fort réside dans le processus aléatoire et itératif qu'elles utilisent comme moyens de faire face à des problèmes comme l'explosion combinatoire. Des solutions approchées de très bonne qualité (pas nécessairement optimales) peuvent être trouvées en temps de calcul raisonnable.

Les métaheuristiques incluent elles-mêmes deux familles : les métaheuristiques à base de solution unique (appelées aussi « méthodes de recherche par voisinage » ou encore « méthode de recherche locale ») et les métaheuristiques à base de population de solutions. La première famille utilise la notion de voisinage pour améliorer la qualité de la solution courante. À partir d'une solution initiale, choisie arbitrairement ou avec une heuristique, une méthode par voisinage réalise un processus itératif qui consiste à explorer le voisinage de la solution actuelle afin d'améliorer progressivement sa qualité. Les conditions d'arrêt peuvent être un nombre d'itérations maximal, une valeur de la fonction objectif atteinte ou bien la non-amélioration de la solution courante. De nombreuses méthodes à base de solution unique ont été proposées dans la littérature. Elles diffèrent essentiellement par le système de voisinage utilisé et la stratégie de parcours du système de voisinage. Parmi lesquelles : la recherche locale simple (la descente), la recherche locale réitérée (Iterated Local Search - ILS), la recherche locale guidée (Guided Local Search - GLS), la recherche à voisinage variable (VNS : Variable Neighbourhood Search), le recuit simulé qui est inspiré d'un processus métallurgique, la recherche tabou qui

s'inspire de la mémoire des êtres humains...etc.

Cependant, les métaheuristiques à base de population de solutions forment aujourd'hui la majorité des algorithmes utilisés pour des problèmes d'optimisation difficile. Elles débutent et manipulent la recherche avec un ensemble de solutions au lieu d'une seule solution, ce qui renforce, au fur et à mesure des itérations, la diversité de la recherche et augmente la possibilité d'émergence de solutions de bonne qualité. Nous pouvons citer à titre d'exemple : les algorithmes génétiques qui sont inspirés des principes de l'évolution Darwinienne et de la biologie, l'algorithme d'optimisation par essaim de particules, l'algorithme de colonies de fourmis, l'algorithme de colonies d'abeilles, la recherche coucou et qui s'inspirent du comportement social de certaines espèces évoluant en groupe...etc.

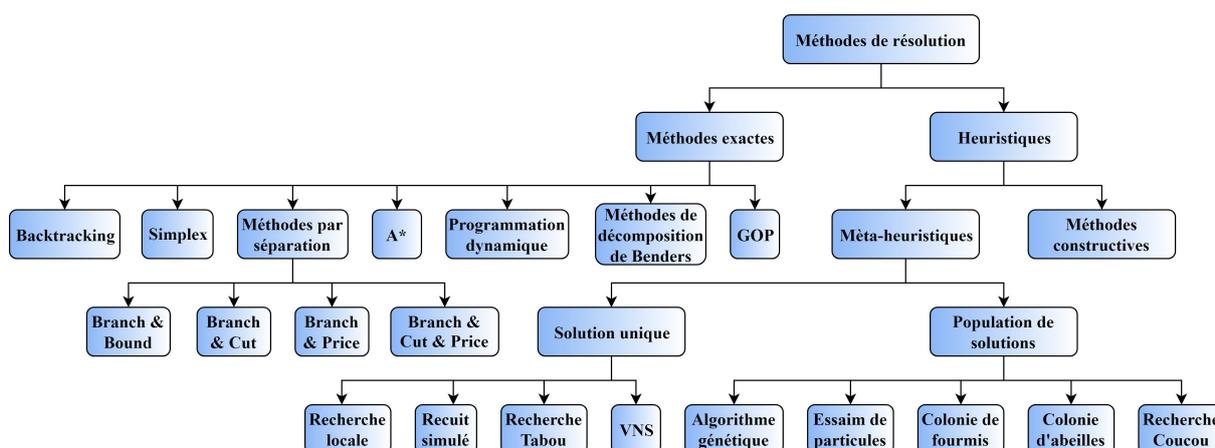


Figure 2.3 : Classification des méthodes de résolution

2.7.1 Modélisation par la programmation mathématique

Tout au long de cette thèse, les problèmes traités sont traduits en langage mathématique. La modélisation mathématique avant tout est un moyen important pour comprendre un problème d'optimisation donné, impliquant plusieurs variables inter-reliées. Modéliser consiste à écrire en notation mathématique ce qui est exprimé d'abord en mots en faisant intervenir des variables au besoin. C'est l'une des techniques classiques en recherche opérationnelle qui permet de représenter d'une manière concise l'objectif à atteindre et les contraintes à respecter à l'aide d'un ensemble des symboles et des expressions mathématiques. L'objectif cherché est traduit en une fonction à un but avec des variables dont la valeur maximale ou minimale correspond à la meilleure situation du point de vue de décideur, tandis que les contraintes sont souvent représentées par des équations ou des in-équations. L'obtention d'un modèle mathématique amène à tirer profit des techniques mathématiques et des outils informatiques de résolution les plus appropriées.

2.7.2 Solveur Lingo

Lingo est un outil complet conçu pour résoudre rapidement, facilement et efficacement une grande variété de problèmes Il comprend un ensemble de solveurs intégrés basés sur la mé-

thode exacte « Branch-and-Bound », un environnement pour la construction et l'édition de problèmes d'optimisation linéaires, non-linéaires (convexes et non-convexes/globaux), quadratiques, stochastiques et en entiers.

Pour les modèles avec des restrictions entières générales et binaires, Lingo inclut un solveur d'entiers qui fonctionne en conjonction avec les solveurs linéaires, non-linéaires, et quadratiques. Pour les modèles linéaires, le solveur des entiers inclut un pré-traitement et des dizaines de méthodes de génération de contraintes qui peut grandement améliorer les temps de solution sur des classes importantes de modèles entiers.

Lingo utilise aussi l'algorithme GOP, proposé par [Floudas and Visweswaran \[1990\]](#), pour résoudre généralement des problèmes mathématiques non-linéaires non convexes, notamment des problèmes quadratique avec contraintes linéaires ou quadratiques, des problèmes avec contraintes polynomiales, les problèmes de la mise en commun et de mélange dans les applications de génie chimique.... Son principe est de décomposer le modèle original non-convexe et non linéaire en plusieurs sous-problèmes convexes et linéaires plus petits. Une fois cette série de petits modèles résolue, il utilise la technique « Branch-and-Bound » pour rechercher de manière exhaustive la solution globale.

Le point faible du solveur est l'incapacité de résoudre des problèmes de grandes tailles ou encore des problèmes comprenant plusieurs variables, fonctions objectifs et/ou contraintes.

2.7.3 Heuristique Fix-and-Relax basée sur l'approche de l'horizon glissant

L'approche de l'horizon glissant, de la famille des approches constructives, est une technique de prise de décisions pratique et efficace dans des environnements dynamiques déterministes ou stochastiques. Cette approche est applicable dans le cas où l'horizon, fini ou infini, est considéré comme un ensemble de périodes discrètes. Son principe est de décomposer le problème initial en une série de sous-problèmes plus petits regroupant quelques périodes consécutives et de les résoudre séquentiellement. La taille limitée de ces sous-problèmes permet d'utiliser des méthodes exactes pour les résoudre, ce qui serait impossible pour tout le problème. Le nombre et la taille des sous-problèmes définissent la charge de calcul et la qualité de la solution des procédures heuristiques.

Pour les cas déterministes, l'approche de l'horizon glissant convient aux problèmes à grande échelle pour lesquels la résolution exacte globale est difficilement réalisable. Cependant, pour les problèmes stochastiques, cette pratique consiste à prendre des décisions immédiates, c'est-à-dire des décisions qui doivent être prises dès la première période, en fonction d'une prévision et une réactualisation éventuelle d'information pertinente pour un certain nombre de périodes futures ainsi que des nouvelles données devenues disponibles. Elle permet donc d'effectuer périodiquement une nouvelle planification, avec une périodicité de planification inférieure, ce qui permet d'être en mesure de réagir aux perturbations passées [[Marufuzzaman, 2014](#)].

En Ingénierie des systèmes de procédés, l'approche de l'horizon glissant a été appliquée pour l'optimisation des chaînes logistiques, la planification et l'ordonnancement de la

production, y compris la considération d'incertitude. Des exemples incluent la planification stratégique [Kostin et al., 2011], les problèmes d'expansion de la capacité (García-Ayala et al., 2012, Ryan, 1998), les problèmes d'ordonnancement et de dimensionnement des lots (Beraldi et al., 2008, Cui and Engell, 2009, Zondervan et al., 2014), les problèmes de gestion des stocks multi produits (Marques et al, 2012), l'approvisionnement d'électricité sous incertitude [Beraldi et al., 2011] et la planification de la maintenance (Vu et al., 2014a,b). Pour une revue détaillée sur l'application de cette approche, le lecteur peut se reporter aux travaux suivants : [Chand et al., 2002, Sahin et al., 2013, Sethi and Sorger, 1991].

L'heuristique Fix-and-Relax (FR), proposée par Dillenberger et al. [1994], est une application de l'approche de l'horizon roulant pour les cas d'un horizon fini. Son algorithme a un cadre général et il est facile à implémenter. Le principe de cette heuristique est de décomposer un problème, de sorte qu'à chaque itération, un sous-problème plus simple et plus petit, avec un nombre de variables et de contraintes réduit, est résolu pour construire une partie de la solution globale. Le sous-problème est donc modélisé par un programme mathématique identique à celui modélisant le problème général. Comme il est décrit dans le livre de Pochet and Wolsey [2006], l'idée consiste à décomposer l'horizon de planification en trois fenêtres, à savoir :

- Une Fenêtre fixée (FW) où les variables sont fixées à des valeurs trouvées auparavant dans le cadre d'un processus itératif;
- Une Fenêtre d'observation (OW) où le modèle mathématique est considéré en intégrité;
- Une Fenêtre d'approximation (AW) où le modèle est relaxé.

La procédure commence par la configuration d'une fenêtre d'observation (appelée aussi « fenêtre de décision ») de longueur σ , ainsi que le pas d'avancement δ avec $\delta < \sigma$. L'heuristique fonctionne par itération en modifiant à chaque itération le sous-ensemble des variables fixées en intégrant les valeurs des variables obtenues à l'itération précédente. Il est donc nécessaire de générer une solution initiale pour le premier sous-problème qui concerne les premiers σ périodes pour lancer l'heuristique. Ensuite, pour chaque période k , le modèle s'applique seulement sur la fenêtre d'observation définie par l'intervalle $[a_k, b_k]$, tandis que les résultats des itérations précédentes, ceux de l'intervalle $[1, a_k]$ (fenêtre fixe) sont fixés. L'intervalle restant $[b_k, T]$ représente la fenêtre d'approximation et ces variables ne sont pas considérées (relaxées). Puis, à l'itération $k+1$, la fenêtre d'observation est déplacée δ périodes en avance. Nous aurons donc une nouvelle fenêtre de décision $[a_{k+1}, b_{k+1}]$ où $a_{k+1} = a_k + \delta$, $b_{k+1} = \min(b_{k+\delta}, T)$. Après, le nouveau sous-problème de l'itération $k+1$ est résolu. Cette procédure est répétée jusqu'à atteindre la fin de l'horizon de planification [Shen, 2017].

L'heuristique Fix-and-Relax est considérée l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour la résolution des problèmes de planification de production à capacité limitée. À titre d'exemple, nous citons le travail d'Agra et al. [2018] dans laquelle ils ont considéré un problème stochastique de production, d'inventaire et de livraison d'un seul produit pour un seul producteur et plusieurs clients. Dans leur étude, les demandes sont incertaines et les retards de livraisons impliquent des coûts de pénalités. Pour résoudre le problème, les auteurs ont proposé une heuristique hybride qui combine l'idée de la méthode d'approximation moyenne

de l'échantillon et celle d'approche Fix-and-Relax. [Sahling \[2016\]](#) intègrent un problème de sélection des fournisseurs dans la planification de la production et de la remise à neuf, tout en respectant des contraintes environnementales. L'heuristique Fix-and-Relax et une autre heuristique qui s'appelle « Fix-and-Optimize » de la même famille ont été appliqués pour résoudre ce problème d'optimisation. [Tempelmeier and Copil \[2016\]](#) ont proposé un modèle de planification de production multi produits avec une capacité limitée pour un système de machines parallèles. Les auteurs ont traité le cas où les opérations de la configuration des machines sont effectuées par un seul opérateur, et le temps et le coût de changement varient en fonction de la séquence des produits traités. En raison du grand nombre de variables binaires liées à la dépendance de la séquence et à la coordination nécessaire des opérations de configuration, deux heuristiques de types « Fix-and-Relax » et « Fix-and-Optimize » sont développées sur la base d'un modèle mathématique en nombre entier mixte afin de résoudre ce problème pour un cas industriel réel. Aussi, [Yalaoui et al. \[2014\]](#) ont proposé un modèle linéaire en nombre entier mixte et une heuristique de type « Fix-and-Relax » afin d'optimiser conjointement les deux plans de production et de la maintenance. Ce problème concerne un système de production multi lignes, multi périodes, multi produits, soumis à une dégradation stochastique. Cette dégradation est représentée dans le modèle comme une réduction des capacités des lignes de production en fonction de l'évolution du temps.

2.7.4 Algorithmes génétiques

Les Algorithmes Génétiques, développés par J. Holland dans les années 1970 à l'université de Michigan aux États-Unis puis approfondis par [Golberg \[1989\]](#), sont des méthodes d'optimisation stochastiques conçues pour explorer des grands espaces de solutions afin de trouver une solution optimale en utilisant un minimum d'informations sur le problème. Un algorithme génétique s'inspire des mécanismes biologiques tels que la théorie de l'évolution proposée par Charles Darwin. Il utilise le même vocabulaire que celui de la biologie et la génétique classique, on parle donc de : gène, chromosome, individu, population et génération, en respectant des phénomènes d'hérédité et une loi de survie. Les algorithmes génétiques sont la classe la plus populaire des algorithmes évolutionnaires. L'évolution de l'organisme représente une suite successive des améliorations afin que l'espèce s'adapte au mieux dans son environnement. Elle commence par une population initiale composée d'un ensemble d'individus dont chacun a sa propre valeur de fitness (qui mesure son adaptation à l'environnement). La seconde génération est obtenue après avoir sélectionné les parents et avoir effectué des opérations de croisement et mutation permettant ainsi de donner naissance à des solutions meilleures. La population évolue durant une succession de générations, jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit satisfait.

L'utilisation des algorithmes génétiques suscite de plus en plus d'intérêt auprès des chercheurs. Leur utilisation a devenu très répandu vu leurs simplicités et leur efficacité dans divers domaines d'optimisation complexes combinatoire, notamment les problèmes de traitement d'image, la sécurité des systèmes de communication, les problèmes de maintenance, les problèmes de sac à dos et les problèmes liés à la chaîne logistique telle que les problèmes de tournées, de localisation, d'ordonnancement et de la planification de production. Pour une re-

vue générale des applications de l'algorithme génétique, le lecteur peut se référer à [Haupt and Haupt \[2004\]](#), [Iris and Asan \[2012\]](#), [Kumar et al. \[2010\]](#), [Mukhopadhyay et al. \[2009\]](#), [Vose \[1999\]](#). Le lecteur trouve aussi des revues spécialisées des applications des algorithmes génétiques dans le domaine de la planification de la production et de maintenance : [Aytug et al. \[2003\]](#), [Chaudhry and Luo \[2005\]](#), [Goren et al. \[2010\]](#), [Van Horenbeek et al. \[2013\]](#).

Dans ce qui suit, nous présentons les étapes d'implémentation d'un algorithme génétique :

Choix du codage

Le codage constitue une étape clef dans la conception et le développement d'un algorithme génétique pour un problème donné. Il s'agit d'une représentation génétique des solutions sous forme d'un chromosome (appelé aussi « individu »). Un chromosome est constitué d'un ensemble d'éléments, appelés « gènes » qui peuvent prendre une seule valeur (un bit, un entier, un réel ou un caractère). Les gènes représentent les variables à ajuster dans le problème à traiter (par exemple, une affectation, une quantité, une longueur, une distance, un temps ...) et sont présentés dans un ordre donné de manière qui prend en considération les contraintes du problème.

Le choix du codage est très important, il doit être adapté au problème étudié. La représentation choisie doit être complète, connexe et efficace [[Talbi, 2009](#)]. La littérature définit deux types de codage classiques, à savoir : le codage entier et le codage réel. Ces deux représentations sont largement utilisées pour résoudre une grande variété de problèmes d'optimisation. Le codage entier est utilisé dans le cas où les décisions sont de type « Oui/Non ». Il consiste à associer une valeur binaire pour chaque variable. Ainsi, la solution est codée par un vecteur de valeurs binaires. Le problème de sac à dos est un exemple simple dans lequel le codage binaire peut être utilisé. Cependant, le codage réel est utilisé pour résoudre des problèmes d'optimisation à variables continues. Il représente les solutions par des suites de type réel. Cette représentation est beaucoup plus efficace et plus robuste pour les problèmes considérés comme difficile pour le codage binaire. Ce codage inclut un type spécial, c'est le codage entier ou discret en utilisant un ensemble de valeurs entières. Ce codage peut être utilisé pour des problèmes où les variables peuvent prendre un nombre fini de valeurs, comme le problème de voyageur de commerce ou les problèmes de planification de la production. Ces représentations peuvent être combinées pour faire l'objet d'une représentation mixte utilisée, par exemple, dans les problèmes d'optimisation des paramètres qui consistent à trouver les meilleurs paramètres dans la conception d'un composant donné. Certains paramètres peuvent être associés à des valeurs réelles tandis que d'autres sont associés à des valeurs discrètes.

Génération de la population initiale

Une population est un ensemble de solutions potentielles. Un algorithme génétique commence par la génération d'une population initiale. Malgré que cette étape ne s'intervient qu'une seule fois et au début de l'exécution, mais elle joue un rôle non-négligeable dans l'efficacité de l'algorithme. En fait, la population doit être suffisamment diversifiée pour que l'algo-

rithme ne reste pas bloqué dans un optimum local. C'est ce qui rend la recherche du problème traité plus facile et plus rapide. Une première population est choisie soit aléatoirement, soit par des heuristiques ou par des méthodes spécifiques au problème, soit encore par mélange de solutions aléatoires et heuristiques.

La taille de la population, définie par le nombre d'individus, doit être en concordance avec la longueur des chromosomes et les objectifs du problème. Ce paramètre a un impact direct sur la qualité de la solution obtenue, sur le temps de calcul et l'espace de mémoire nécessaires. Plus la taille de la population est grande, plus la probabilité de convergence vers de "bonnes" solutions est grande. Cependant, le temps de calcul et l'espace de mémoire augmentent linéairement avec la taille de la population. Il est préférable donc de choisir une taille moyenne en prenant en considération les contraintes citées.

Évaluation des individus

Chaque individu, quel que soit l'opérateur génétique par lequel il a été généré, doit être évalué à travers une fonction fitness en concordance avec la fonction objectif du modèle traité. Elle consiste à mesurer l'adaptation des solutions son environnement de recherche, ce qui offre la possibilité de les comparer. L'application de cette fonction à un élément de la population donne son fitness. Le but est de favoriser la survie et la reproduction des individus les mieux adaptés à l'environnement, ce qui influence la convergence de l'algorithme.

Dans un problème d'optimisation, la fonction objectif est à maximiser ou à minimiser. Si le problème étudié consiste à maximiser la fonction objectif, cette dernière peut servir directement pour l'évaluation des individus. Dans le cas où la fonction est à minimiser, il est nécessaire de chercher son complémentaire pour se ramener au cas de la maximisation.

Sélection

L'opérateur de sélection répond, à chaque itération, à la question suivante : « Quels sont les individus de la population actuelle qui vont servir de parents et vont se reproduire ou survivre dans la nouvelle population fonction de leur fitness ? ». Généralement et conformément à la théorie darwinienne, les individus ayant les meilleurs fitness ont une plus grande probabilité d'être sélectionnés, tout en laissant une petite chance aux moins bons individus. Sachant qu'un individu ayant une faible performance, ait certains paramètres optimaux (présents dans la solution optimale). Dans la littérature, quatre stratégies de sélection ont été proposées :

- La sélection par roulette : Cette stratégie, proposée par Goldberg, (1989), est la première méthode implémentée et la plus répandue. Elle fait allusion aux roulettes des casinos, dont la surface serait décomposée en autant de secteurs que d'individus contenus dans la population et dont la taille de chacun de ces secteurs serait proportionnelle au fitness des individus concernés. Pour un problème de maximisation, la probabilité pour un individu i d'être sélectionné est $p_i = f_i / \sum_{j=1}^n f_j$ ou f_i est la valeur fitness de l'individu i . Pour un problème de minimisation, il faut proposer une formule complémentaire selon la nature du problème traité pour se ramener au cas de

la maximisation. Ensuite, un nombre aléatoire entre 0 et 1 est généré N fois (N est la taille de la population). Pour chaque cas, si le nombre généré appartient à l'intervalle $[\sum_{j=1}^{i-1} prob_j, \sum_{j=1}^i prob_j]$, l'individu i sera sélectionné pour se reproduire à travers l'opérateur du croisement.

- La sélection par rang : La sélection par rang est une variante du système de roulette. Elle consiste à ordonner les individus de la population dans un ordre décroissant de leurs fonctions fitness, puis attribuer à chacun un rang. Le mauvais individu obtient le rang 1, tandis que le meilleur obtient le rang N (N est la taille de la population). La suite de la méthode consiste uniquement à appliquer une roulette basée sur les rangs des individus et non pas à ses qualités. Ainsi, la taille du secteur attribué à chaque individu sur la roulette est proportionnelle à son rang.
- La sélection par tournoi : Cette stratégie consiste à prendre au hasard 2 individus ou plus et leur faire un tournoi. Celui qui a le meilleur fitness est sélectionné avec une certaine probabilité comme étant parent. Les individus impliqués dans le tournoi peuvent être retirés ou remis selon le choix des décideurs. Ce processus est répété jusqu'à obtenir N individus qui serviront de parents prêts à se reproduire [Mitchell, 1998].
- La sélection universelle stochastique : Son principe consiste à découper un segment en N sous-segments dont la longueur est proportionnelle à le fitness de chaque individu, puis placer sur le segment N points équidistants. Ensuite, les individus pointés dans le segment sont sélectionnés pour l'opérateur de croisement et de mutation. Il s'agit donc d'une méthode de sélection proportionnelle, mais cette fois, les individus sont sélectionnés simultanément. Cette méthode semble être très peu utilisée, car elle possède peu de diversité.

Croisement

Cet opérateur a pour objectif de générer une nouvelle population d'individus diversifiée appelée "population enfants". C'est un opérateur stochastique qui consiste à croiser, selon une certaine probabilité, les individus parents sélectionnés deux par deux en échangeant des parties de leurs chaînes entre le ou les points de croisement choisis au hasard. Le croisement de deux parents donne naissance à deux individus enfants qui héritent certaines caractéristiques des deux parents afin d'enrichir la population. D'autres types de croisement ont été proposés comme la fusion de solutions, le croisement linéaire avec des poids tirés aléatoirement, le croisement centré sur une moyenne, le croisement centré sur les parents, etc.

La probabilité de croisement représente la chance de deux parents de se croiser. Elle représente indirectement la proportion des parents sur laquelle un opérateur de croisement s'appliquera. La meilleure valeur de ce paramètre est liée à d'autres paramètres tels que la taille de la population, la probabilité de mutation et la stratégie de sélection. Les taux les plus couramment utilisés sont entre 0.45 et 0.95. Plus elle est élevée, plus la population subit une amélioration importante.

Certains points importants doivent être pris en compte dans la conception d'un opérateur de croisement :

- L'héritabilité : c'est la principale caractéristique d'un opérateur de croisement. Il doit permettre d'hériter des spécifications génétiques des deux parents.
- La validité : un bon opérateur de croisement doit produire des solutions valables. Cela n'est pas toujours possible pour des problèmes d'optimisation avec plusieurs contraintes.

Mutation

Cette stratégie est appliquée afin de garder une certaine diversité dans la population issue du croisement en modifiant quelques gènes de quelques individus. Cet opérateur permet d'introduire de façon aléatoire de nouvelles caractéristiques qui pourront se propager dans les prochaines générations, ce qui permet d'éviter à l'algorithme génétique de converger vers des optimums locaux. Dans la littérature, plusieurs types de mutation ont été proposés. Nous citons dans ce qui suit les types les plus utilisés :

- Mutation binaire : appelé aussi « un opérateur flip ». Ce type de mutation est utilisé pour les représentations binaires. La mutation s'effectue simplement en inversant un ou plusieurs gènes : gène actif en un gène inactif, ou inversement.
- Mutation discrète : elle consiste généralement à changer la valeur associée à un gène par une autre valeur de l'alphabet.
- Mutation en permutation : elle permet de choisir deux gènes sur un chromosome et de leur permuter ses valeurs.

La probabilité de mutation représente la chance d'un individu d'être modifié légèrement. Elle doit d'être faible. En effet, un taux élevé permet une grande couverture de l'espace de recherche, mais risque de perturber la convergence à proximité de l'optimal recherché. Inversement, un taux trop faible restreint la recherche et diminue d'autant les chances d'approcher de l'optimal. En revanche, un faible taux de mutation permet d'assurer une bonne exploration de l'espace de recherche sans d'autant perturber la convergence. Habituellement, la probabilité de mutation est initialisée à $1/k$ où k est le nombre de variables de décision.

Comme pour le croisement, l'opérateur de la mutation doit produire des solutions valables et doit permettre d'atteindre toutes les solutions de l'espace de recherche.

Mise à jour de la population

Les nouveaux nés issues des opérateurs génétiques rivalisent avec leurs parents pour leur place dans la génération suivante (survie des plus aptes). Comme la taille de la population est constante, il faut désigner les individus qui survivront selon une stratégie de sélection donnée. Les survivants deviennent les parents de la prochaine génération. Trois principaux schémas de remplacement sont proposés dans la littérature, mais cette liste n'est pas exhaustive, car de nouveaux schémas peuvent être facilement appliqués en fonction du problème traité :

- Remplacement générationnel : le remplacement concerne l'ensemble de la population. La population fils remplacera systématiquement la population parente. Cette stratégie est appliquée dans l'algorithme génétique canonique proposée par J. Holland.

- Remplacement élitiste : cette technique consiste à sélectionner les meilleurs individus parmi les parents et les fils. Cependant, cette approche conduit à une convergence plus rapide et prématurée. Parfois, la sélection de mauvaises personnes est nécessaire pour renforcer la diversité la population.
- Remplacement en état permanent : À chaque génération, chaque fils généré remplace le mauvais individu de la population parente.

Critère d'arrêt

Sauf l'opérateur de génération de la population initiale, l'ensemble des étapes citées ci-dessus doivent être répétées jusqu'à atteindre un critère d'arrêt, ce qui permet de mettre fin de l'exécution de l'algorithme génétique. De nombreux critères peuvent être utilisés, à savoir :

- Un nombre d'itérations fixe.
- Un nombre fixe d'itérations sans amélioration de la meilleure solution trouvée.
- Un temps d'exécution fixe.
- Une qualité de solution fixe.

Le critère d'arrêt doit être défini en fonction de la complexité du problème traité, notamment sur la base du nombre de variables de décision et la taille de l'espace de recherche. Une forte attention doit être accordée lors du choix de ce paramètre. En effet, s'il est trop petit, il peut empêcher l'algorithme génétique d'aboutir à la meilleure solution. En revanche, s'il est trop grand, il peut engendrer un temps de calcul important.

La figure 2.4 illustre la démarche intégrale d'un algorithme génétique.

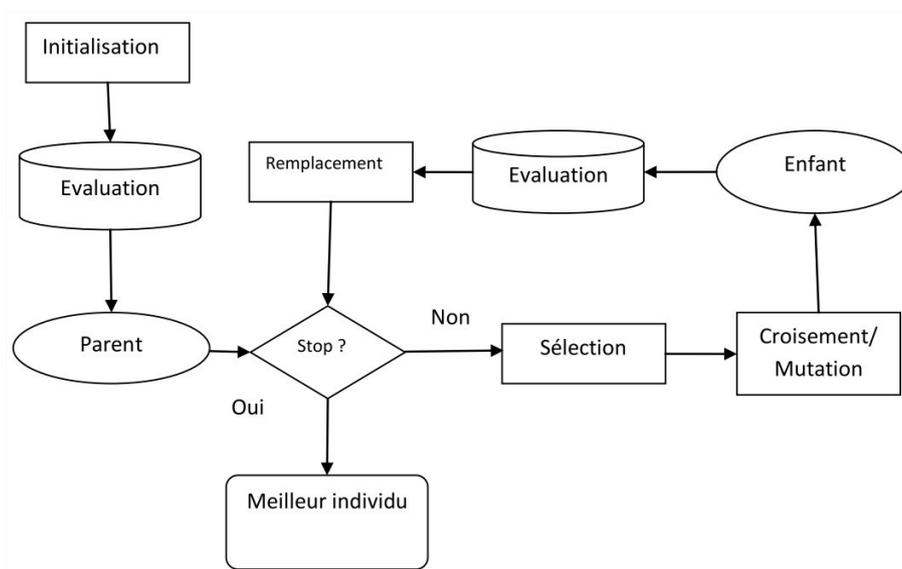


Figure 2.4 : Démarche d'un algorithme génétique [Ghali, 2005]

Pour une étude approfondie et détaillée sur l'adaptation des algorithmes génétiques, nous invitons le lecteur à consulter la section 3 du livre Talbi [2009].

Les algorithmes génétiques ont été largement utilisés dans le domaine de planification de la production, de la maintenance et du remplacement.

2.8 Conclusion

Le principal objectif de ce chapitre était la présentation des différentes recherches ayant une relation directe avec les domaines du remanufacturing et de la maintenance. Cette revue de la littérature a abouti à quatre conclusions principales :

1. Les études traitant le sujet du remanufacturing du point de vue de l'utilisateur sont presque inexistantes.
2. Le problème de planification de la production en tenant compte de l'effet conjugué de la cadence de production et de l'efficacité de la maintenance sur la détérioration des équipements n'a jamais été étudié.
3. Les conditions opérationnelles et la qualité de la maintenance imparfaite n'ont jamais été considérées dans les décisions de planification du remplacement ou du remanufacturing.
4. Les modes opérationnels futurs sont négligés dans les décisions de sélection des pièces de rechange.

Les trois dernières conclusions font l'objet de trois problématiques différentes. L'étude de ces problématiques, consécutivement, permet d'étudier la problématique principale de cette thèse d'une manière incrémentale, ce qui permet de réduire la complexité de l'analyse de l'approche proposée.

Chapitre 3

Modélisation et résolution du problème de planification de la production en tenant compte des contraintes de détérioration et de maintenance

3.1 Introduction

La préoccupation majeure des entreprises de production est d'assurer un niveau de satisfaction élevé de leur clientèle avec un minimum des frais opérationnels. L'un des piliers de la satisfaction des clients est de recevoir les produits commandés en bon moment. D'un autre côté, le profit de ces entreprises dépend directement de la fiabilité de ses équipements de production. Ces deux concepts, à savoir : la satisfaction des clients et la fiabilité des équipements sont fortement liées aux conditions de fonctionnement et à l'efficacité de la maintenance. Tout au long de ce manuscrit, le terme "conditions de fonctionnement" désigne les cadences de production adoptées dans chaque période. Elles sont exprimées en nombre d'unités produites par unité de temps.

Le sujet de ce chapitre s'articule autour du problème de la planification de la production et l'analyse de l'effet conjoint du taux de production et de la maintenance imparfaite sur la dégradation de la machine. C'est un problème qui n'a jamais été étudié dans la littérature. Une telle stratégie de planification semble prometteuse pour les entreprises qui cherchent à fidéliser ses clients et minimiser les différentes charges.

Dans ce contexte, nous proposons dans la section suivante la description du problème ainsi que les différentes hypothèses considérées. La troisième section est dédiée à la modélisation de la loi de défaillance de la machine en tenant compte l'intensité de la production et l'efficacité de la maintenance. Une formulation mathématique du problème à travers un modèle d'optimisation non-linéaire en nombre entier sera présentée dans la quatrième section. Ce modèle a pour objectif de minimiser à la fois les coûts du stockage des produits finis et les coûts de maintenance d'un système de production. Pour montrer l'applicabilité de l'approche

proposée, respectivement la cinquième et la sixième section présentent notre heuristique « Fix and Relax » et son application dans la résolution du problème traité. Afin de mettre en évidence l'efficacité de l'approche de résolution proposée, une comparaison avec le solveur Lingo est vouée dans la dernière section. Enfin, nous concluons ce chapitre par une synthèse et quelques remarques.

3.2 Description du problème et hypothèses

Le problème considéré dans ce chapitre est un Problème de planification de la production à capacité limitée (CLSP). Notre objectif est de proposer un plan de fonctionnement d'un équipement utilisé pour fabriquer un seul type de produit afin de satisfaire une demande déterministe dynamique durant un horizon du temps fini. L'horizon est composé de plusieurs périodes de la même durée. La demande pour chaque période doit être livrée, sans retard, à la fin de la période. Durant l'horizon de production, l'équipement fonctionne sous une cadence de production, variable d'une période à une autre, et constante durant la même période, exprimée en nombre d'unités produites par unité de temps.

L'équipement de production est composé d'une pièce principale et un ensemble des pièces secondaires. En termes de fiabilité, l'équipement est soumis à une dégradation graduelle qui dépend uniquement de la dégradation de sa pièce principale. Le taux de dégradation des pièces secondaires est négligeable par rapport à celui de la pièce principale. Par conséquent, les opérations de maintenance ne concernent que cette dernière. La dégradation de la pièce principale peut être mesurée par son taux de panne qui augmente avec le temps et avec l'intensité des conditions de fonctionnement (taux de production). Pour faire face au problème de la détérioration, des actions de maintenance préventive régulières sont réalisées au début de chaque période afin de réduire la probabilité de panne de l'équipement. Ces actions sont considérées comme imparfaites MPI, ce qui signifie que lorsqu'elles sont exécutées, elles sont censées améliorer la pièce principale de l'équipement en atteignant un état entre « Aussi Bon Que Neuf » et « Aussi Mauvais Qu'Ancien ». De plus, lorsqu'une panne aléatoire se produit entre deux actions de maintenance successives, une action de MC est effectuée pour remettre l'équipement dans l'état où il se trouvait avant la panne, sans réduire son taux de défaillance.

Suivant une stratégie de service après-vente, le FEO-R est responsable du remplacement de la pièce principale quand est nécessaire. Cette opération doit être effectuée seulement au début de la première période avant desquelles le taux de panne de l'équipement dépasse un seuil maximum. Elle commence par un désassemblage complet. Ensuite, les pièces secondaires sont nettoyées et la pièce principale est remplacée par une pièce de rechange neuve, puis l'ensemble des pièces sont réassemblées. Enfin, l'équipement doit être testé avant qu'il soit réutilisé par son propriétaire. Nous supposons que les pièces de rechange neuves sont disponibles à tout moment. Le système en question est illustré dans la Figure 3.1.

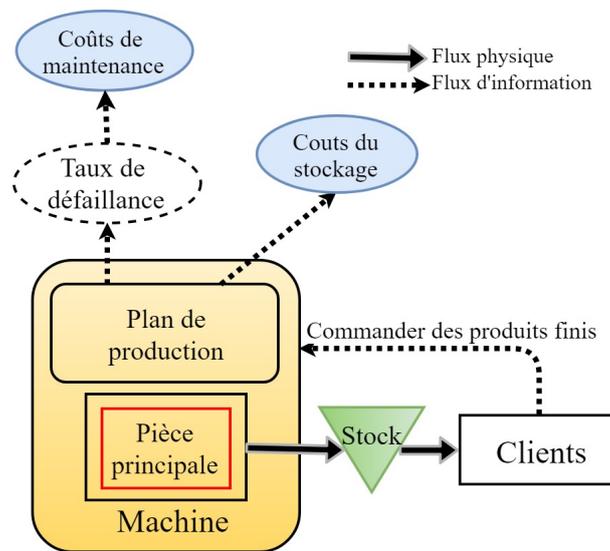


Figure 3.1 : Système étudiée

Notations mathématiques

Avant de présenter le modèle mathématique, nous définissons dans cette section les paramètres et les résultats de la performance de l'approche comme suit :

Les indices

- n Indice de périodes de production.
- t Indice du temps opérationnel.

Les paramètres

- N Nombre de périodes de l'horizon de la planification
- D_n Quantité de produits demandés pour la période n (livrées à la fin de la période n).
- T_n Temps à la fin de la période n .
- U^{max} Taux de production maximal par unité de temps.
- $\lambda_0(t)$ Fonction du taux de panne nominale d'un équipement qui fonctionne sous un taux de production maximal U^{max} .
- $\lambda_n(t)$ Fonction du taux de panne de l'équipement durant la période n (elle représente le nombre de pannes par unité du temps).
- λ^{max} Seuil maximal du taux de panne pour effectuer un remplacement.
- CCM Coût d'une action de maintenance corrective.
- DM Durée d'une action de maintenance préventive imparfaite.
- DR Durée d'une opération de remplacement de la pièce principale.
- h Coût du stockage unitaire des produits finis par période.

v_1	Valeur minimale que peut prendre un taux de production élevé.
v_2	Valeur minimale que peut prendre un taux de production intense.
a_n	Facteur d'accélération du taux de défaillance (HRIF)
b_n	Facteur de réduction de l'âge (ARF).

Les variables de décision

U_n	Taux de production au cours de la période n .
-------	---

Les résultats

OT_n	Temps opérationnel prévu au cours de la période n .
DT_n	Temps d'arrêt prévu au cours de la période n .
CPM_n	Coûts engendrés en exécutant une action MPI au début de la période n .
FN_n	Nombre de pannes moyen prévu au cours de la période n .
C_n	Coût de maintenance total prévu durant la période n .
S_n	Quantité de produits manufacturés restant en stock à la fin de la période n .

3.3 Modélisation de la loi de défaillance

Dans la plupart des travaux portant sur la planification de la production et de la maintenance, les auteurs supposent généralement que l'équipement fonctionne soit sous des conditions fixées, ou soit dans des conditions qui n'ont aucun impact sur la dégradation de l'équipement. Par ailleurs, ces hypothèses sont inacceptables. En effet, il est indéniable que le taux de dégradation d'une machine de production varie en fonction de la variation des conditions de fonctionnement. De ce fait, la loi de dégradation doit permettre de tenir en compte ces conditions afin de pouvoir d'obtenir un meilleur pronostic de l'état futur de la machine et par conséquent, d'avoir une meilleure estimation des coûts de maintenance futurs.

D'un autre côté, la stratégie de maintenance considérée dans ce problème est la politique bien connue de la maintenance préventive avec des réparations minimales en cas de panne [Jardine and Tsang, 2013]. Nous supposons que les actions MPI ne sont exécutées qu'au début des périodes de production. Ces actions sont considérées comme imparfaites, ce qui signifie que lorsqu'elles sont exécutées, elles sont censées à améliorer la pièce principale de l'équipement en atteignant un état entre « Aussi Bon Que Neuf » et « Aussi Mauvais Qu'Ancien ». Aussi, à chaque fois qu'une panne aléatoire se produit entre deux actions MPI, l'équipement (la pièce principale) subit une réparation minimale MC pour le remettre dans l'état où il se trouvait avant la panne, sans réduire son taux de défaillance.

Dans cette partie, nous nous intéressons à la présentation de la loi de dégradation $\lambda_n(t)$ (appelée aussi « fonction du taux de panne » ou bien « fonction du taux de risque »). Cette fonction permet d'estimer le nombre moyen de pannes qui diffère d'une période à l'autre. Ce

nombre dépend de la cadence de production qui varie d'une période à une autre et de l'efficacité des actions de maintenance imparfaite. Pour formuler la loi de dégradation, nous nous sommes inspirés des travaux de You et al. [2011] et Lu et al. [2012]. Ces auteurs ont combiné le modèle PHM et le modèle HIM, qui ont été détaillés dans le chapitre 1. Le modèle qui en résulte est le modèle EPHM. Selon ce modèle, la fonction de taux de panne pour la période qui vient après la $(i-1)^{ème}$ action MPI et avant la $i^{ème}$ action peut être exprimée de la manière suivante :

$$\lambda_i(t) = \begin{cases} \lambda_0(t) \cdot \Psi(z(t)), & si\ i = 1 \\ A_{i-1} \lambda_0(b_{i-1} y_{i-1} + t) \cdot \Psi(z(t o t_{i-1} + t)) & sinon \end{cases} \quad t \in [0, t o t_i - t o t_{i-1}] \quad (3.1)$$

Où $t o t_i$ est le temps du fonctionnement total de l'équipement avant la $i^{ème}$ action MPI.

Afin d'adapter le modèle hybride EPHM au système à l'étude, nous développons ses principaux éléments comme suit :

1. Dans le modèle proposé dans la présente étude, nous supposons que les conditions nominales se rapportent au taux de production maximal [Dahane et al., 2012], de ce fait, la fonction de taux de panne nominale $\lambda_0(t)$ est équivalente à celle d'un système qui fonctionne sous un taux de production maximal U^{max} .
2. Durant chaque période n , l'équipement fonctionne sous un taux de production constant U_n , ainsi la forme mathématique de la fonction de risque reste constante au cours de chaque période. Dans ce cas, le vecteur $z(t)$, qui représente les conditions variables du fonctionnement à chaque instant t de la période n ($t \in [T_{n-1}, T_n]$), peut être directement représenté par le taux de production U_n . Par ailleurs, la fonction de risque pendant la période n peut être exprimée par le rapport U_n à U^{max} ($\psi(U_n) = U_n / U^{max}$). Si on considère qu'une action de MP parfaite est effectuée au début de chaque période, la fonction de taux de défaillance $\lambda_n(t)$ pour la période n peut alors être exprimée comme suit :

$$\lambda_n(t) = \frac{U_n}{U^{max}} \lambda_0(t), \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\}, t \in [0, O T_n] \quad (3.2)$$

3. Cependant, dans notre étude, l'équipement est soumis, soit à une action MPI, soit à une opération du remplacement, au début de chaque période. Par conséquent, la formule (2) devient :

$$\lambda_n(t) = \begin{cases} \frac{U_n}{U^{max}} \lambda_0(t) & si\ n=1\ ou\ \lambda_{n-1}(O T_{n-1}) \geq \lambda^{max} \\ \frac{U_n}{U^{max}} A_n \lambda_0(b_n y_n + t) & sinon \end{cases} \quad t \in [0, O T_n] \quad (3.3)$$

La formule de la première ligne du système d'équations (3.3) fait référence au taux de panne de l'équipement pour les périodes au début desquelles un remplacement est effectué, y compris la première période. Il est important de rappeler qu'après chaque remplacement de la pièce principale, l'équipement est remis à l'état « AGAN », et par conséquent, son âge est remis à zéro. $O T_n$ exprime le temps opérationnel dans la période n (formule 3.4). Il peut être estimé sur la base du temps d'arrêt nécessaire à l'exécution d'une opération de maintenance

ou du remplacement (formule 3.5).

$$OT_n = T_n - T_{n-1} - DT_n, \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3.4)$$

$$DT_n = \begin{cases} 0 & \text{si } n = 1 \\ DR & \text{si } \lambda_{n-1}(OT_{n-1}) \geq \lambda^{max} \\ DM & \text{sinon} \end{cases} \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3.5)$$

Pour les autres périodes, au début desquelles une action MPI est effectuée, la deuxième équation (3.3) peut être utilisée pour représenter le taux de panne. Sachant que A_n est donné par la formule suivante :

$$A_n = \prod_{j=P(n)+1}^n a_j \quad (3.6)$$

Tel que :

- $P(n)$ est la période au début desquelles la dernière opération du remplacement a été effectuée (si elle existe) avant la période n (Si aucune opération du remplacement n'a lieu avant la période n , alors $P(n)$ vaut 1),
- a_j est le facteur HRIF qui reflète l'effet de l'action MPI, effectuée au début de la période j , sur le taux de panne de l'équipement,
- y_n est l'âge virtuel de l'équipement à la fin de la période $n-1$, et juste avant d'effectuer une action MPI au début de la période n .

$$\begin{aligned} y_n &= OT_{n-1} + b_{n-1}y_{n-1} \\ &= OT_{n-1} + b_{n-1}(OT_{n-2} + b_{n-2}y_{n-2}) \\ &= OT_{n-1} + b_{n-1}OT_{n-2} + \dots + \prod_{j=P(n)+1}^{n-1} b_j OT_{P(n)} \end{aligned} \quad (3.7)$$

- b_n est le facteur ARF qui reflète l'effet de l'action MPI, effectuée au début de la période n , sur l'âge de l'équipement.

La Figure 3.2 montre un exemple de la variation du taux de panne lorsque des actions MPI et des remplacements sont effectués.

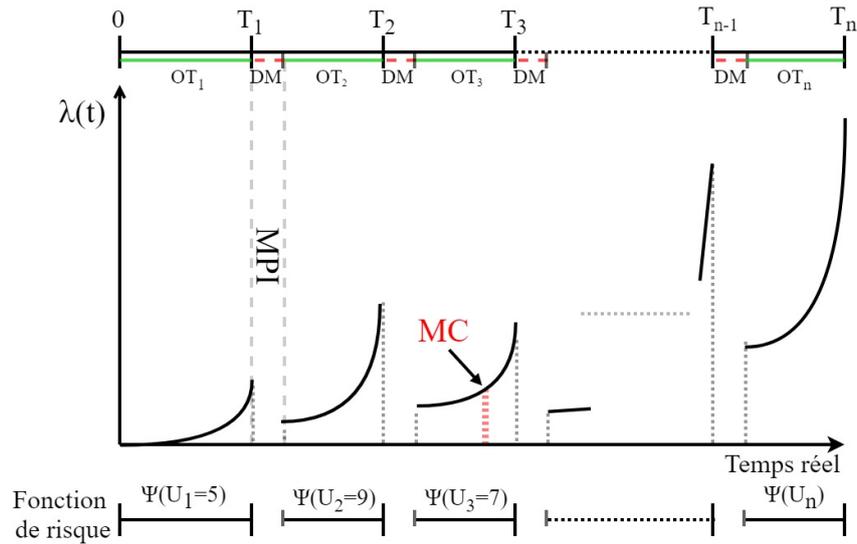


Figure 3.2 : Variation du taux de défaillance sous l'effet du taux de panne de la maintenance imparfaite

3.4 Formulation mathématique du problème

Dans cette partie, nous présentons un modèle d'optimisation du problème traité. Rappelons que le modèle proposé vise à déterminer un plan de production réalisable durant un horizon à moyen terme divisé en périodes de la même durée. Le plan de production représente la cadence de production qui doit être adoptée pendant chaque période afin de répondre aux demandes des clients. L'objectif est de minimiser le coût total de maintenance et le coût total du stockage des produits finis, sous différentes contraintes liées à la demande, à la capacité de l'équipement et à la variabilité du taux de panne.

$$\text{Minimiser } TC = \sum_{n=1}^N (C_n + h.S_n) \quad (3.8)$$

$$S_n = S_{n-1} + U_n OT_n - D_n, \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3.9)$$

$$U_n \leq U^{max}, \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3.10)$$

$$S_n \geq 0, \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3.11)$$

$$U_n \in \mathbb{N}, \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3.12)$$

La fonction objectif (3.8) minimise la somme des coûts de maintenance et du stockage, prévus au cours de l'horizon de la planification.

La contrainte (3.9) concerne l'équilibrage du stock, en assurant que les produits restants en stock à la fin de la période $n - 1$ et ceux fabriqués pendant la période n sont utilisés pour répondre aux demandes de cette période n ou pour répondre aux demandes des périodes suivantes. La contrainte (3.10) garantit que le taux de production pendant chaque période n ne dépasse pas une valeur maximale U^{max} . La contrainte (3.11) garantit que la demande pour

chaque période est livrée en temps voulu. Finalement, la contrainte (3.12) définit la nature de la variable de décision U_n .

Le coût de maintenance pour la période n peut être estimé comme suit :

$$C_n = \begin{cases} CCM.FN_n & \text{si } n=1 \text{ où } \lambda_{n-1}(OT_{n-1}) \geq \lambda^{max} \\ CPM_n + CCM.FN_n & \text{sinon} \end{cases} \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3.13)$$

La première formule correspond seulement au coût total des actions de maintenance corrective pour la période au début desquelles la pièce principale est remplacée, y a compris la première période. Ce coût est exprimé en fonction du nombre moyen de pannes FN_n , qui peut être estimé en se référant à la fonction du taux de panne $\lambda_n(t)$ pendant la période n (Formule 3.3). La deuxième partie représente le coût total prévu de maintenance pour les périodes au début desquelles une action de maintenance préventive est menée. Dans ce cas, le coût de la maintenance préventive CPM_n est estimé sur la base du taux de panne atteint à la fin de la période $n - 1$, du facteur de réduction de l'âge fonctionnel et du facteur d'augmentation du taux de panne.

$$FN_n = \int_0^{OT_n} \lambda_n(t).dt, \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3.14)$$

3.5 Approche de résolution proposée

Le problème de planification de la production à capacité limitée (CLSP) traité dans ce chapitre est un problème non-linéaire NP-difficile [Aghezzaf and Najid, 2008]. Sa résolution d'une manière analytique, exhaustive ou à l'aide d'un outil commercial peut engendrer une complexité réelle surtout pour des instances de grande taille même de moyenne taille. Ceci nous a mené à développer une heuristique de type « Fix-and-Relax » afin de trouver des solutions de bonne qualité dans un temps raisonnable. Cette approche constructive itérative est appliquée dans notre cas afin d'obtenir progressivement le plan de production de tout l'horizon en tenant compte des coûts de stockage, de maintenance et d'amortissement. Nous rappelons que cette approche commence par la mise en place d'une fenêtre d'observation (OW) de taille σ périodes. Dans un premier temps, cette fenêtre couvre les premières σ périodes; le modèle original n'est considéré que pour cette fenêtre, alors qu'il est détendu pour toutes les périodes ultérieures représentées par une fenêtre d'approximation (AW). Puis à chaque étape k :

1. La fenêtre OW est décalée δ périodes vers le futur ;
2. Les résultats obtenus pour les périodes antérieures à l'OW sont fixés (cet ensemble de périodes peut être représenté par une la fenêtre fixe (FW)) ;
3. Le modèle original est ensuite appliqué uniquement à la fenêtre d'observation, alors qu'il est détendu pour la fenêtre d'approximation, de sorte que les résultats, obtenus pour les périodes qui sont à l'intersection (intervalle de chevauchement) entre la fenêtre d'observation de l'étape $k - 1$ et celle de l'étape k , peuvent être modifiées.

Cette procédure est répétée jusqu'à atteindre la fin de l'horizon de planification.

La figure 3.3 et l’algorithme 1 illustrent le principe de l’heuristique « Fix-and-Relax » proposée. Un petit exemple illustratif du fonctionnement de l’heuristique est présenté dans l’annexe (Section A).

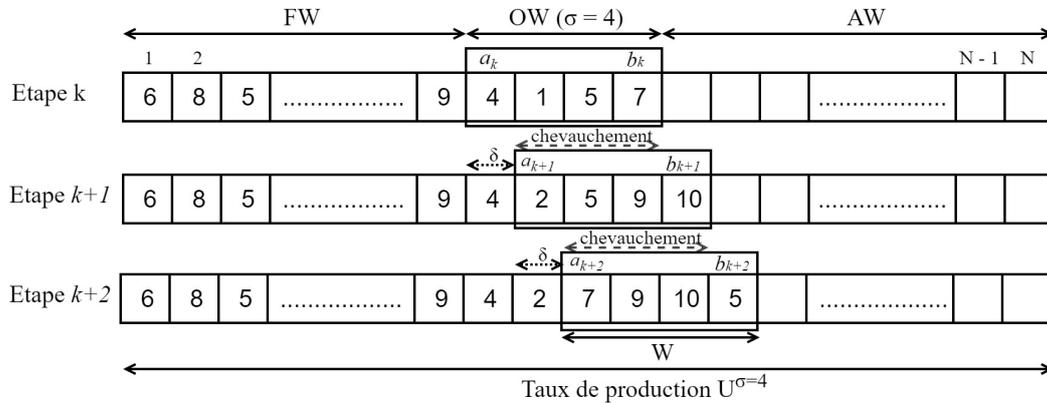


Figure 3.3 : Principe de l’heuristique Fix-and-Relax

Algorithme 1 Pseudo-code de l’heuristique Fix-and-Relax

```

Entrées : CLSP
Sorties :  $\widehat{U}$ 
1 :  $\sigma \leftarrow$  Longueur de la fenêtre d’observation OW
2 : Pour  $\sigma = 1 \rightarrow (N - 1)$  Faire
3 :    $\widehat{U}^\sigma \leftarrow$  Vecteur utilisé pour sauvegarder les solution du problème CLSP pour une fenêtre de longueur  $\sigma$ 
4 :    $\widehat{S}^\sigma \leftarrow$  Vecteur utilisé pour sauvegarder le stock de chaque période pour une fenêtre de longueur  $\sigma$ 
5 :   boolean fsblt( $x$ );
6 :   Initialiser fsblt( $\widehat{U}^\sigma$ ) = true
7 :    $[a_k, b_k] \leftarrow$  Intervalle de la fenêtre à l’étape  $k$ 
8 :    $k = 1; a_k = 1; b_k = a_k + \sigma - 1;$ 
9 :   Tant que ( $b_k \leq N$ )
10 :      $CLSPW_{a_k, b_k} \leftarrow$  Un problème CLSP appliqué uniquement sur la fenêtre à l’étape  $k$ 
11 :      $\widehat{W}^{a_k, b_k} \leftarrow$  Vecteur utilisé pour sauvegarder la solution du problème  $CLSPW_{a_k, b_k}$ 
12 :      $\widehat{S}W^{a_k, b_k} \leftarrow$  Vecteur utilisé pour sauvegarder le stock de chaque période du problème  $CLSPW_{a_k, b_k}$ 
13 :      $(\widehat{W}^{a_k, b_k}, \widehat{S}W^{a_k, b_k}) = \text{WO}(CLSPW_{a_k, b_k}, S_{a_k-1}^\sigma)$  ▷ Algorithme ??
14 :     Si fsblt( $\widehat{W}^{a_k, b_k}$ ) = false
15 :       fsblt( $\widehat{U}^\sigma$ ) = false;
16 :       Retourner : “Solution infaisable pour une fenêtre de longueur  $\sigma$ ”
17 :     Sortir de la boucle Pour
18 :     Sinon
19 :     Si ( $b_k \neq N$ )
20 :        $U_{a_k}^\sigma = W_{a_k}^{a_k, b_k}$  ▷ Fixer la solution de la période  $a_k$ 
21 :        $S_{a_k}^\sigma = SW_{a_k}^{a_k, b_k}$ 
22 :        $k ++; a_k ++; b_k ++$  ▷ Glisser la fenêtre par une période ( $\delta=1$ )
23 :     Sinon
24 :        $\widehat{U}_{a_k, b_k}^\sigma = \widehat{W}^{a_k, b_k}$  ▷ Fixer le solution de la fenêtre de la dernière étape
25 :        $\widehat{S}_{a_k, b_k}^\sigma = \widehat{S}W^{a_k, b_k}$ 
26 :   Fin Si
27 : Fin Pour
28 :
Fin Tant que
29 : Fin Pour
30 :  $\widehat{U} =$  Le meilleur  $\widehat{U}^\sigma$  obtenu;

```

. Dans ce qui suit, nous expliquons en détail l’algorithme 1. Les principaux paramètres requis sont :

- Les dates de début et de fin de chaque période de l’horizon.
- Les quantités demandées.

Les résultats de cet algorithme sont les suivants :

- Plan de production \widehat{U} .

Ligne 2 : Contrairement à d'autres travaux dans lesquels ce paramètre est fixe, nous essayons de résoudre le problème CLSP en utilisant des fenêtres d'observation de longueurs différentes. À la fin, la longueur qui donne la solution optimale est retournée (voir la ligne 30). L'objectif est de parcourir le plus grand nombre possible de solutions.

Ligne 5 : Parfois, le problème ne peut pas être résolu en utilisant certaines valeurs de σ . Ce cas peut se produire lorsqu'au moins un sous-problème $CLSPW_{a,b}$ est infaisable (voir les lignes 7 et 8 ou les lignes 24 et 25 de l'algorithme 3), c'est pourquoi le paramètre $fsblt(x)$ booléen est défini.

Lignes 8 : L'intervalle d'observation de la première itération est défini.

Lignes 9 : La boucle "while" est utilisée pour résoudre les sous-problèmes $CLSPW_{a_k,b_k}$ un par un.

Ligne 13 : Cette instruction fait appel à l'algorithme 2 pour résoudre le sous-problème $CLSPW_{a_k,b_k}$, qui correspond à la fenêtre d'observation de l'étape k .

Lignes 14 à 17 : Si la solution du $CLSPW_{a_k,b_k}$ est infaisable, le programme retourne le message de la ligne 16.

Ligne 18 : Si la solution du $CLSPW_{a_k,b_k}$ est réalisable.

Ligne 19 : Si la fenêtre d'observation n'a pas encore atteint la fin de l'horizon.

Ligne 20 : Fixer la cadence de production $U_{a_k}^\sigma$ (a_k est la première période de la fenêtre d'observation courante).

Ligne 21 : Le niveau du stock $S_{a_k}^\sigma$ à la fin de la période a_k est enregistré (il sera considéré comme un stock initial dans le sous-problème suivant $CLSPW_{a_{k+1},b_{k+1}}$, qui correspond à la fenêtre d'observation de l'étape $k+1$).

Lignes 22 : La fenêtre d'observation est décalée d'une période.

Ligne 23 : Si la fenêtre d'observation a atteint la fin de l'horizon.

Ligne 24 : Fixer les taux de production $\widehat{U}_{a_k,b_k}^\sigma$ de toutes les périodes de la fenêtre d'observation.

Ligne 30 : Toutes les solutions possibles \widehat{U}^σ ($\sigma \in [1, N-1]$) sont évaluées. Le meilleur est choisi comme étant le plan de production optimal.

L'algorithme 2 a pour but de résoudre les sous-problèmes $CLSPW_{a,b}$ (a et b remplacent a_k et b_k). Les principaux paramètres requis sont les suivants :

- L'intervalle $[a, b]$ de la fenêtre d'observation actuelle.
- Le niveau du stock S_{a-1} à la fin de la période $a-1$ (la première période de la fenêtre d'observation précédente).

Les résultats sont les suivants :

- Les taux de production $\widehat{W}^{a,b}$ pour la fenêtre d'observation actuelle.
- Le niveau du stock $\widehat{S}W^{a,b}$ à la fin de toutes les périodes de la fenêtre d'observation.

Ligne 1 : Initialiser l'attribut $fsblt(\widehat{W}^{a,b})$ comme étant vrai (voir l'explication de la ligne 5

Algorithme 2 Pseudo-code d'optimisation de la fenêtre d'observation

Entrées : $CLSPW_{a,b}, S_{a-1}$
 Sorties : $\widehat{W}^{a,b}, \widehat{S}^{a,b}$

```

1 : Initialiser  $fsblt(\widehat{W}^{a,b}) = true$ 
2 : Initialiser  $S_{a-1}^{a,b} = S_{a-1}$ 
3 : Pour  $n = a \rightarrow b$                                      ▷ Résoudre le sous-problème  $CLSPW_{a,b}$  graduellement
4 :    $W_n^{a,b} = \lceil (D_n - S_{n-1}^{a,b}) / OT_n \rceil$ 
5 :   | Si  $(W_n^{a,b} > U^{max})$                                ▷ Ajuster  $W_n^{a,b}$  afin de respecter la contrainte de capacité
6 :   | | Si  $(a = b)$ 
7 :   |    $fsblt(\widehat{W}^{a,b}) = false$ 
8 :   |   Retourner : "Solution infaisable"
9 :   |   Sortie de la boucle Pour
10 :  | | Sinon
11 :  |    $diff = D_n - S_{n-1}^{ow} - U^{max} \cdot OT_n$            ▷  $(U^{max} \cdot OT_n)$  est la capacité de production pour la période  $n$ 
12 :  |    $n' = n - 1$ 
13 :  |   Tant que  $(diff > 0)$ 
14 :  |   | Tant que  $(W_{n'}^{a,b} < U^{max})$ 
15 :  |   |    $W_{n'}^{a,b} = W_{n'}^{a,b} + 1$ 
16 :  |   |    $diff = diff - OT_{n'}$ 
17 :  |   | | Si  $(diff \leq 0)$ 
18 :  |   |    $W_n^{a,b} = U^{max}$ 
19 :  |   |   Retourner : "La contrainte de capacité est respecté pour la période  $n$ "
20 :  |   |   break while
21 :  |   | | Fin Si
22 :  |   | | Fin Tant que
23 :  |   | | Si  $((diff > 0) \text{ and } (n' = a))$ 
24 :  |   |    $fsblt(\widehat{W}^{a,b}) = false$ 
25 :  |   |   Retourner : "Solution infaisable"
26 :  |   |   break for
27 :  |   | | Sinon
28 :  |   |    $n' = n' - 1$ 
29 :  |   | | Fin Si
30 :  |   | | Fin Tant que
31 :  |   Mettre à jour  $\widehat{S}^{a,b}$ ;
32 : Fin Si
33 :
34 : Fin Si
35 : Si  $(fsblt(\widehat{W}^{a,b}) = true)$ 
36 :    $\widehat{w}^{a,b} = SF(\widehat{W}^{a,b})$                                ▷  $SF$  est une fonction de lissage du plan de production
37 :    $Z1 = OF(\widehat{W}^{a,b})$                                    ▷  $OF(x)$  retourne la valeur objectif de la solution  $x$ 
38 :    $Z2 = OF(\widehat{w}^{a,b})$ ;
39 :   | Si  $(Z1 > Z2)$ 
40 :   |    $\widehat{W}^{a,b} = \widehat{w}^{a,b}$ ;
41 :   |   Mettre à jour  $\widehat{S}^{a,b}$ ;
42 :   | Fin Si
43 : Fin Si
    
```

de l'algorithme 1).

Ligne 2 : $Sw_{a-1}^{a,b}$ est le niveau initial du stock pour le sous-problème $CLSPW_{a,b}$.

Ligne 3 : La boucle est utilisée pour résoudre graduellement (période par période) le problème $CLSPW_{a,b}$ (la procédure entre les lignes 4 et 33 est répétée de $n = a$ jusqu'à atteindre la fin de l'OW ($n = b$) ou obtenir $fsblt(\widehat{W}^{a,b}) = false$ à la ligne 24).

Ligne 4 : Cette instruction est utilisée pour calculer la valeur initiale de $W_n^{a,b}$.

Ligne 5 : Si $W_n^{a,b}$ dépasse le taux de production maximal U^{max} .

Ligne 6 : Si $a = b$ (signifie que $\sigma = 1$).

Lignes 7, 8 et 9 : Le sous-problème $CLSPW_{a,b}$ ne peut pas être résolu en utilisant une fenêtre d'observation d'une longueur $\sigma=1$, et l'algorithme retourne $fsblt(\widehat{W}^{a,b}) = false$.

Ligne 10 : Si $\sigma > 1$:

Lignes de 11 à 22 (production à l'avance) : Nous réduisons $W_n^{a,b}$ et nous augmentons $W_{n-1}^{a,b}$ jusqu'à obtenir $W_n^{a,b} = U^{max}$. Si $W_{n-1}^{a,b}$ atteint U^{max} et $W_n^{a,b}$ reste toujours supérieur à U^{max} , nous passons à $W_{n-2}^{a,b}$. Si $W_{n-1}^{a,b}$ atteint U^{max} et $W_n^{a,b}$ reste toujours supérieur à U^{max} , nous passons à $W_{n-3}^{a,b}$. Nous répétons cette procédure pour chaque $W_{n'}^{a,b}$ ($a \leq n' < n$) jusqu'à obtenir $W_n^{a,b} = U^{max}$ où $n = a$ (les lignes de 17 à 21).

Lignes du 23 au 26 : Si tous les $W_{n'}^{a,b}$ ($a \leq n' < n$) ont atteint U^{max} et $W_n^{a,b}$ reste toujours supérieur à U^{max} . Le programme sort de la boucle et retourne $fsblt(\widehat{W}^{a,b}) = false$.

Ligne 35 : Si $fsblt(\widehat{W}^{a,b})$ est demeuré « vrai » comme initialisé à la ligne 1.

Ligne 36 : La fonction SF permet d'obtenir des taux de production lissés sur l'OW (L'objectif est d'avoir des taux de production $\widehat{W}^{a,b}$ rapprochés afin d'éviter les cas où le taux de production est parfois très élevé et parfois très faible, ce qui engendre des coûts de maintenance élevés).

Lignes de 37 à 42 : Les deux solutions $\widehat{W}^{a,b}$ et $\widehat{w}^{a,b}$ sont évaluées afin de retourner la meilleure.

Un petit exemple illustratif du fonctionnement de l'algorithme de résolution du problème de la fenêtre d'observation est présenté dans l'annexe (section A).

3.6 Expériences numériques et analyse

Dans cette section, nous présentons les résultats obtenues après l'application de l'heuristique Fix-and-Relax pour la résolution du problème de la planification de la production. Les expériences ont été effectuées sur un PC i7-5500U, CPU 2.40 GHz 2.40GHz, RAM 8 GB. L'horizon de la planification est composé de $N = 36$ mois caractérisés par des demandes différentes (voir le tableau 3.1). Le nombre d'unités de temps par mois est de 30 jours.

Tableau 3.1 : Demandes mensuelles moyennes

	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Année 1	160	200	230	270	240	180	240	190	100	220	200	220
Année 2	200	290	260	220	230	380	220	240	200	190	180	140
Année 3	130	110	100	120	100	135	120	90	90	140	130	90

Les paramètres dévoilés ci-dessous concernent la fiabilité du système ainsi que les coûts et les durées associés aux actions de maintenance. Les paramètres de dégradation peuvent être obtenus auprès du service de maintenance. Comme annoncée dans la section 3.3, la loi de défaillance nominale caractérisant le taux de production maximal est définie par une distribution de type Weibull avec :

- Un paramètre de forme égal à 3.
- Un paramètre d'échelle égal à 110.
- Un paramètre de position nul.

Ainsi, la loi de défaillance nominale s'exprime par :

$$\lambda_0(t) = \frac{3}{110} \left(\frac{t}{110} \right)^2 \quad (3.15)$$

Les coûts et les paramètres associés aux maintenances préventives sont présentés dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Paramètres liés la maintenance préventive imparfaite

Failure rate (pannes/jour)	CPM_n	a_n	b_n
$\lambda_{n-1}(OT_{n-1}) < 0.003$	300	1.1	0.2
$0.003 \leq \lambda_{n-1}(OT_{n-1}) < 0.006$	400	1.15	0.25
$\lambda_{n-1}(OT_{n-1}) \geq 0.006$	500	1.17	0.35

Les paramètres restants sont comme suit :

- Le coût d'une action de maintenance corrective $CCM = 3000$ unités d'argents (ua).
- La durée d'une action de maintenance corrective $DM = 3$ jours.
- La durée d'une opération de remplacement $DR = 6$ jours.
- Le seuil maximum du taux de panne $\lambda^{max} = 0.069$ pannes/jour.
- Le coût du stockage unitaire des produits finis $h = 5$ ua.
- La cadence de production maximal $U^{max} = 10$ produits/jour.
- La valeur minimale d'un taux de production élevé $v1 = 6$ produits/jour.
- La valeur minimale d'un taux de production intensif $v2 = 8$ produits/jour.

Pour une analyse facile et exhaustive, les résultats obtenus de la planification de production sont présentés dans le tableau 3.3 et l'ensemble des figures ci-dessous. Le meilleur plan obtenu de la production est présenté dans la troisième colonne. Compte tenu de ce plan de production, le coût total de maintenance et du stockage s'élève à 47133 ua, le nombre moyen de pannes s'élève à 9.79 engendrant de ce fait un coût total de maintenance égal à 43578 ua.

Le nombre des produits finis restants en stock à la fin de l'horizon est égal à 9. Le coût total de stockage des produits finis est égal à 3555 ua.

Tableau 3.3 : Les résultats obtenus

n	D_n	D_n	$\lambda_n(OT_n)(*10^{-3})$	FN_n	C_n	HRIF (a_n)	ARF (b_n)
1	160	6	1.22	0.0122	37	1	0
2	200	7	1.89	0,0207	362	1.1	0.2
3	230	9	2.77	0,0308	392	1.1	0.2
4	270	10	3.41	0,0380	414	1.1	0.2
5	240	9	3.9	0,0454	536	1.15	0.25
6	180	6	3.06	0,0360	508	1.15	0.25
7	240	9	5.31	0,0627	588	1.15	0.25
8	190	7	4.76	0,0562	569	1.15	0.25
9	100	4	3.13	0,0369	511	1.15	0.25
10	220	8	7.19	0,0850	655	1.15	0.25
11	200	7	8.91	0,1138	842	1.17	0.35
12	220	9	14.27	0,1868	1060	1.17	0.35
13	200	8	15.17	0,2001	1100	1.17	0.35
14	290	10	22.35	0,2957	1387	1.17	0.35
15	260	10	26.21	0,3472	1542	1.17	0.35
16	220	10	30.70	0,4068	1720	1.17	0.35
17	230	10	35.93	0,4761	1928	1.17	0.35
18	380	10	42.04	0,5571	2171	1.17	0.35
19	220	8	39.35	0,5215	2065	1.17	0.35
20	240	9	51.80	0,6864	2559	1.17	0.35
21	200	8	53.87	0,7139	2642	1.17	0.35
22	190	7	55.15	0,7309	2693	1.17	0.35
23	180	6	55.31	0,7329	2699	1.17	0.35
24	140	5	53.92	0,7146	2644	1.17	0.35
25	130	5	63.09	0,8361	3008	1.17	0.35
26	110	4	59.05	0,7826	2848	1.17	0.35
27	100	4	69.09	0,9156	3247	1.17	0.35
28	120	5	0.65	0,0052	16	1	0
29	100	4	1.00	0,0106	332	1.1	0.2
30	135	5	1.52	0,0168	350	1.1	0.2
31	120	4	1.36	0,0152	345	1.1	0.2
32	90	3	1.13	0,0126	338	1.1	0.2
33	90	4	1.65	0,0185	355	1.1	0.2
34	140	5	2.27	0,0254	376	1.1	0.2
35	130	5	2.50	0,0279	384	1.1	0.2
36	90	3	1.65	0,0184	355	1.1	0.2

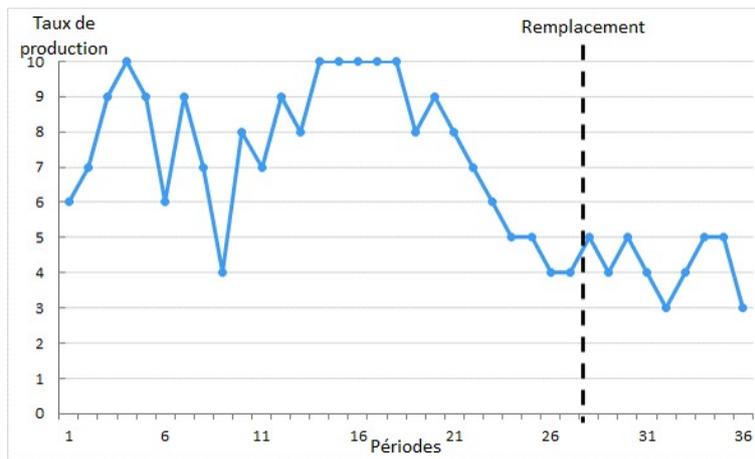


Figure 3.4 : Taux de production par période

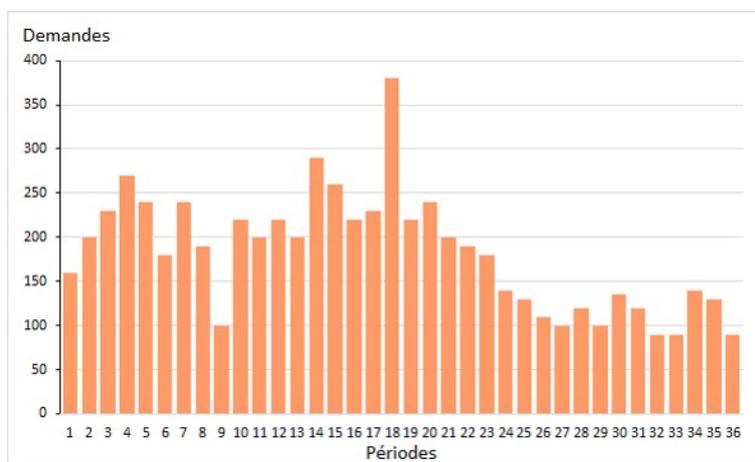


Figure 3.5 : Demande par période

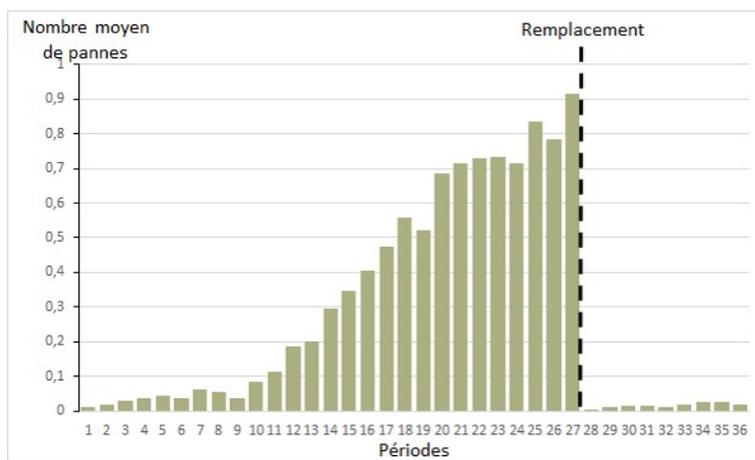


Figure 3.6 : Nombre moyen de pannes par période

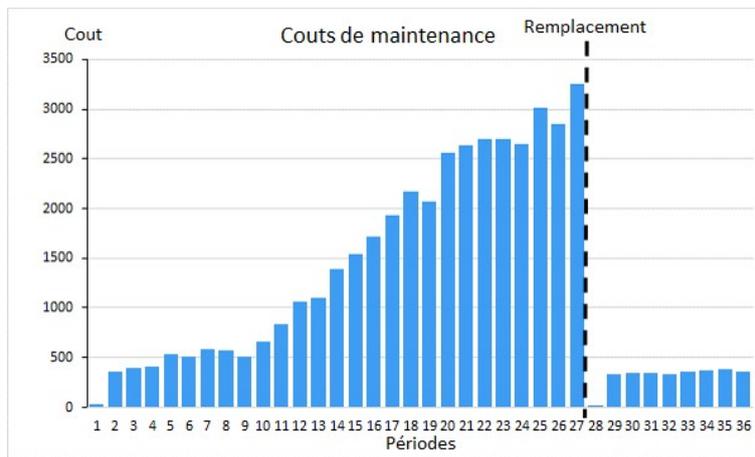


Figure 3.7 : Coûts de maintenance par période

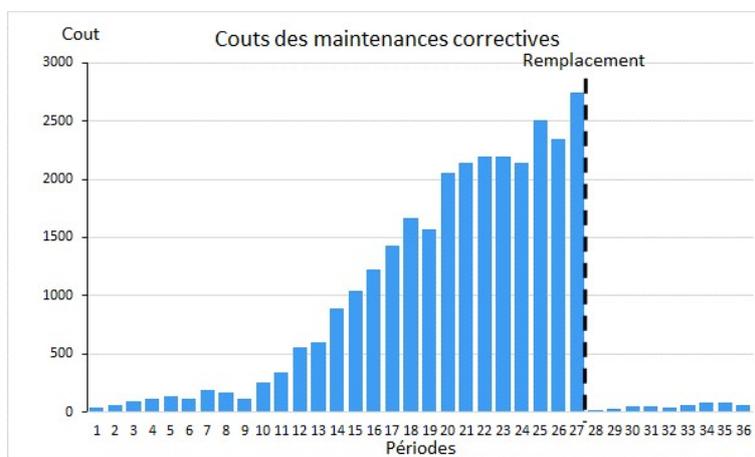


Figure 3.8 : Coûts de maintenances correctives par période

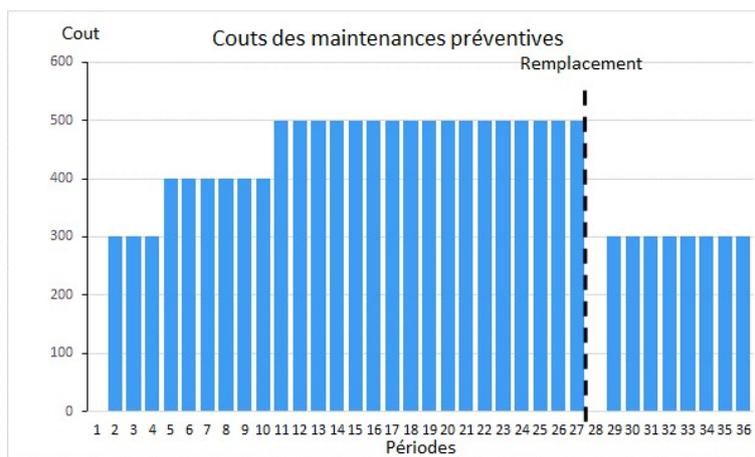


Figure 3.9 : Coûts de maintenances préventives par période

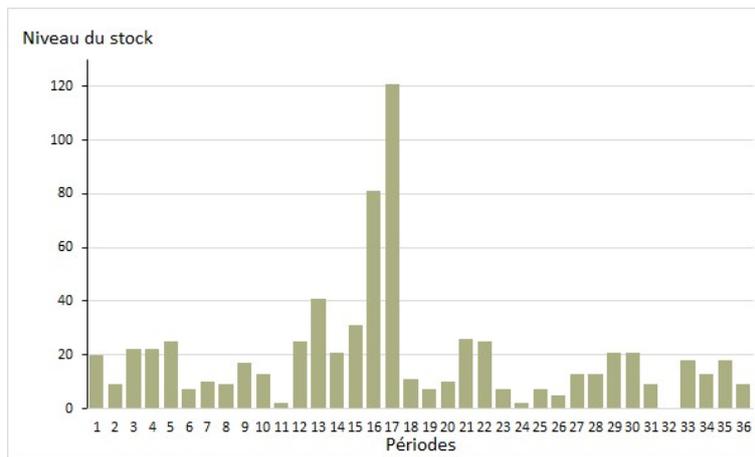


Figure 3.10 : Niveau du stock par période

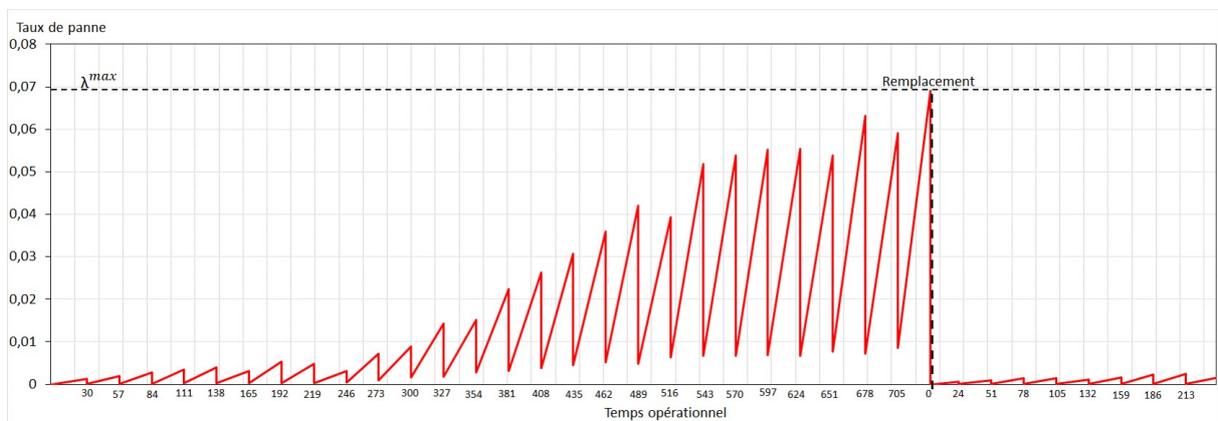


Figure 3.11 : Variation du taux de panne

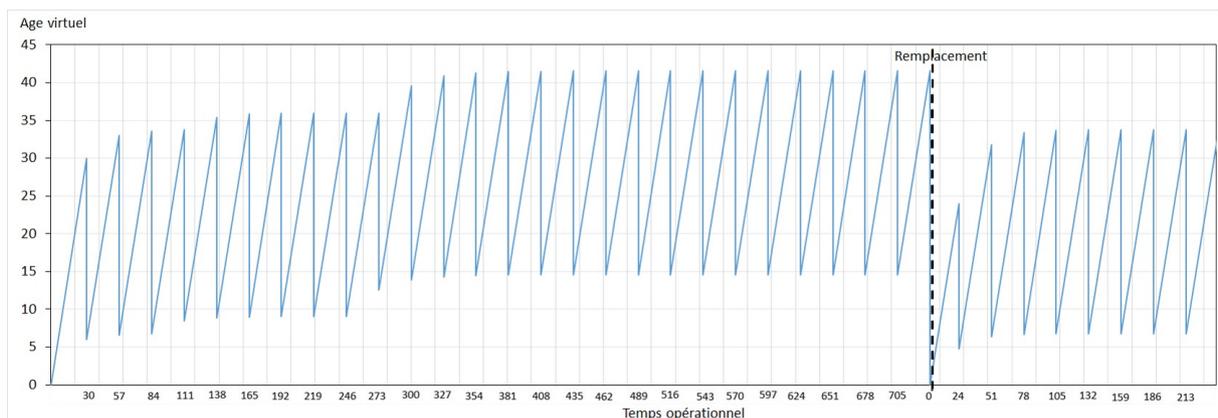


Figure 3.12 : Variation de l'âge virtuel

Durant la première moitié de l'horizon de la planification, les meilleures cadences de production obtenues varient dans la plupart du temps entre élevées et intensives ; elles prennent une valeur minimale égale à 4 produits/ut et une valeur maximale égale à U^{max} .

Comme mentionnés dans la section 3.4, l'efficacité et le coût des actions de maintenance préventives dépendent du taux de panne de la machine juste avant l'exécution de la maintenance. Après l'analyse des résultats des colonnes 4, 7 et 8 du tableau 3.3 et les deux figures 3.9

et 3.11, nous constatons que le taux de panne à la fin des 3 premières périodes de l'horizon ne dépasse pas 3.10^{-3} pannes/jour, ce qui implique que les actions de maintenance préventive effectuées au début des périodes 2, 3 et 4 ont la capacité d'un côté : (i) de réduire l'âge à 80% (paramètre b_n), et d'un autre côté, (ii) d'augmenter la vitesse de dégradation après la maintenance par 10% (paramètre a_n) à cause de procédures imparfaites effectuées par l'équipe de la maintenance.

Le niveau du taux de défaillance atteint, à la fin des périodes de l'intervalle allant de la 4ème période jusqu'à la 9ème période, est entre 3.10^{-3} et 6.10^{-3} pannes/jour (figure 3.11). Par conséquent, les actions de maintenance préventive durant cet intervalle seront moins efficaces par rapport à celles effectuées au début de l'horizon, de sorte que la réduction de l'âge sera seulement à 75%, tandis que la vitesse de dégradation après la maintenance augmentera par 15%.

Après la 9^{ème} période, le taux de défaillance de la machine passe à des niveaux supérieurs. Ceci s'explique par la nature de la production après cette période qui est relativement plus intense par rapport aux périodes précédentes. Cependant, le taux de production commence à diminuer après la période 18. Néanmoins, le taux de défaillance continue sa progression sous l'effet conjugué de : (i) la maintenance imparfaite et (ii) l'utilisation intensive, au cours des périodes précédentes. Notant que le taux de défaillance dépasse le seuil maximal λ^{max} durant la période 27 engendrant un nombre moyen de pannes proche de 1 pendant cette période (figure 3.6), ce qui met fin de la vie de la pièce principale installée. De ce fait, une opération de remplacement doit être programmée au début de la période 28 en utilisant une pièce de rechange neuve. Dépasser ce moment du remplacement engendre plus d'une panne par période au futur.

Après le remplacement, l'âge fonctionnel et le taux de défaillance reviennent à 0 (l'état « AGAN ») (voir les figures 3.11 et 3.12 respectivement). Par rapport au premier cycle, les cadences de production sont modérées en raison de la nature des demandes qui sont relativement faibles. Par conséquent, la dégradation de la machine est très lente par rapport au premier cycle, où elle atteint $1.65 * 10^{-3}$ pannes/jour à la fin de l'horizon.

3.7 Mesure de performance de l'approche de résolution adaptée à l'expérimentation numérique

L'objectif dans cette partie est d'évaluer les performances de l'heuristique Fix-and-Relax proposée afin de mettre en évidence son efficacité pour la résolution des problèmes de planification de la production CLSP dans la présence des contraintes opérationnelles et de maintenance. Pour cela, une comparaison entre l'heuristique FR et le solveur Lingo a été effectuée pour différentes longueurs de l'horizon de la planification et différents types de demandes. Cette comparaison a été faite sur la base des deux mesures suivantes :

- CPU : c'est le temps nécessaire pour la résolution du problème.
- GAP : c'est l'erreur relative entre la solution courante et la meilleure solution trouvée.

$$GAP = \frac{TC(\text{solution courante}) - TC(\text{meilleure solution})}{TC(\text{meilleure solution})} \quad (3.16)$$

Le tableau 3.4 présente les résultats de comparaison. La première colonne contient la famille d’instances qui est divisée elle-même en deux autres : la première sous-colonne indique la longueur de l’horizon de la planification et la deuxième indique la nature des demandes. Trois familles de demandes sont considérées :

- Demandes faibles : varient entre 20 et 120 dont la moyenne est entre 50 et 90.
- Demandes moyennes : varient entre 120 et 220 dont la moyenne est entre 150 et 190.
- Demandes fortes : varient entre 220 et 300 dont la moyenne est entre 250 et 270.

Les deux dernières colonnes présentent respectivement les résultats obtenus par le solveur Lingo et l’heuristique proposée FR.

Tableau 3.4 : Mesure de performance de l’approche de résolution

Problèmes		Solveur Lingo			Fix-and-Relax		
<i>N</i>	<i>D</i>	Fitness	CPU	GAP	Fitness	CPU	GAP
6	Demandes faibles	2039	12s	0	2039	1s	0
	Demandes moyennes	2243	27s	0	2243	1s	0
	Demandes fortes	3543	1s	0	3543	1s	0
12	Demandes faibles	4414	27s	0	4414	2s	0
	Demandes moyennes	6146	13m57	0	6189	1s	0.7%
	Demandes fortes	8862	23s	0	8862	1s	0
18	Demandes faibles	7807	19m05s	9%	7139	1s	0
	Demandes moyennes	19494	1h30m	35%	14392	1s	0
	Demandes fortes	17349	4m20	0	18532	1s	6.8%
24	Demandes faibles	18044	1h5m	56%	11530	1s	0
	Demandes moyennes				25054	1s	
	Demandes fortes				30596	1s	
36	Demandes faibles	Aucune solution trouvée	>1h	/	29131	2s	0
	Demandes moyennes				37520	2s	
	Demandes fortes				46828	2s	

Après l’analyse des résultats, nous remarquons que les deux méthodes ont pu obtenir la même solution pour toutes les instances dont la longueur de l’horizon ne dépasse pas 12 périodes. Cela implique que toutes ces instances, ont été résolues à l’optimalité, sauf l’instance 5 définie par une longueur d’horizon de 12 périodes et des demandes moyennes, pour laquelle la meilleure solution obtenue par l’heuristique est très proche de l’optimale (0.7%). Cependant, pour ces instances de petite taille, le solveur Lingo a nécessité un temps de calcul assez important par rapport à l’heuristique. Ceci est dû à la présence d’un terme non-linéaire dans la fonction objectif, à savoir les coûts de maintenance.

En analysant les résultats obtenus pour la famille d’instances 7, 8 et 9 dont la longueur d’horizon est 18 périodes et celles obtenue pour l’instance 10 définie par des demandes faibles et une longueur d’horizon égale à 24, nous remarquons que la qualité des solutions obtenues par l’heuristique surpasse la qualité de celles obtenues par le solveur. Nous remarquons aussi

que, dans certains cas (les instances 7 et 10), les solutions fournies par le solveur qui sont présentées comme étant des optimums globaux, ne le sont pas puisque les solutions fournies par l'heuristique les surpassent. Ceci ne conforme pas avec la littérature, sur le fait que les solutions globales fournies par Lingo sont toujours optimales. Maintenant, pour l'instance 8, la solution trouvée par le solveur est un optimum local qui est plus loin de celle obtenue par l'heuristique FR (GAP = 35%). En ce qui concerne le temps d'exécution, il augmente exponentiellement avec l'augmentation de la longueur de l'horizon pour le solveur Lingo, alors qu'il reste très petit pour l'heuristique FR. Une autre remarque est que le solveur prend plus de temps pour la résolution des instances dont les demandes sont faibles ou moyennes. Ceci s'explique par le nombre important des solutions faisables explorées pour cette famille d'instance par rapport au nombre des solutions faisables dans le cas des demandes fortes. Notant que la plupart des solutions dans ce dernier cas sont éliminées puisqu'elles ne respectent pas la contrainte de la capacité.

Cependant, le reste des instances n'ont pas pu être résolu à travers le solveur, ce qui confirme l'incapacité de ce dernier à résoudre les problèmes de grandes tailles, contrairement à l'heuristique qui a pu fournir des solutions satisfaisantes dans un temps très réduit.

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié un équipement de production dont la détérioration dépend du temps d'utilisation et des conditions opérationnelles. Nous nous sommes intéressés à la modélisation et la résolution du problème de planification de la production sous contraintes de capacité de la machine et de maintenance en tenant compte de l'effet conjoint du taux de production et de la maintenance imparfaite sur la dégradation de l'équipement. La planification de la production consistait à déterminer la cadence de production optimale à adopter durant chaque période afin de minimiser les coûts de maintenance de la machine et les coûts du stockage des produits finis durant un horizon fini. Afin de tenir compte de l'influence de la maintenance imparfaite et de la variation du taux de production, nous avons opté pour le modèle à risques proportionnels étendus suivant lequel la fonction de défaillance est influencée par les variables représentant les cadences de production et les deux facteurs de réduction de l'âge et d'accélération du taux de défaillance, relatifs à chaque action de maintenance imparfaite.

Nous rappelons que le modèle considéré dans cette étude est un modèle non-linéaire qui appartient à la classe des problèmes NP-difficiles. Ainsi, sa résolution devient plus compliquée avec l'augmentation du nombre des périodes de l'horizon de production. Pour faire face à cette complexité, nous avons proposé une approche de résolution constructive de type « Fix-and-Relax » afin de résoudre le problème dans un temps raisonnable. Les résultats obtenus ont montré l'effet négatif des cadences de production intenses et de la maintenance imparfaite sur la santé de la machine à long terme. D'autres exemples numériques ont été présentés pour montrer l'efficacité de l'heuristique proposée dans la résolution du problème pour différentes tailles.

Cependant, la stratégie du remplacement de la pièce principale considérée dans ce cha-

pitre, qui est basée sur la durée de vie physique, n'est pas optimale d'un point de vue économique puisqu'elle engendre des coûts de maintenances très élevés avant le remplacement. De ce fait, nous proposons dans le chapitre suivant une approche de planification conjointe de production et du remplacement basée sur la minimisation des coûts de cycle de vie de l'équipement.

Chapitre 4

Modélisation et résolution du problème de la planification intégrée de la production et du remplacement en tenant compte des contraintes de détérioration et de maintenance

4.1 Introduction

Les décisions du remplacement des équipements sont très critiques pour le profit global des entreprises de production. Dans la plupart des cas, c'est le manager qui estime le niveau de dégradation de son équipement et décide s'il doit le remplacer ou non. Cette stratégie de remplacement, qui est basée sur la durée de vie physique, a été considérée dans le chapitre précédent ou nous avons étudié l'influence du taux de production et de la qualité de la maintenance sur la dégradation de la machine et par conséquent, sur le moment du remplacement. Cependant, un remplacement efficace et économique ne dépend pas seulement de la détérioration du système, mais aussi de sa valeur financière. Cette stratégie de remplacement est basée sur la durée de vie économique qui est en relation directe avec les coûts de maintenances et les charges d'amortissement.

Dans le présent chapitre, le problème de la planification conjointe de la production et de remplacement sera étudié. De plus, l'effet du taux de production sur les charges de maintenance et d'amortissement et par conséquent, sur le timing optimal du remplacement est analysé. La section suivante décrit le problème étudié et les nouvelles hypothèses considérées. La troisième section présente le modèle utilisé pour l'évaluation des charges d'amortissement. Ensuite, la quatrième section présente la formulation mathématique du problème. Puis, une nouvelle approche de résolution basée sur un algorithme génétique et l'heuristique Fix-and-Relax, proposée dans le chapitre précédent, est détaillée dans la quatrième section. Après, les résultats de l'application de cette approche sont présentés et analysés dans la cinquième section. Nous concluons cette partie par une comparaison des nouveaux résultats avec celles ob-

tenus dans le chapitre précédent afin de souligner les principaux avantages du remplacement basée sur la durée de vie économique.

4.2 Description du problème et hypothèses

Le problème traité dans ce chapitre concerne une planification conjointe de la production et du remplacement. Le système de production étudié est une machine composée toujours d'une pièce principale et un ensemble des pièces secondaires. Rappelons que l'équipement doit répondre à des demandes déterministes dynamiques durant un horizon du temps fini, ce qui nécessite l'adoption d'un plan de production adéquat avec la nature variable des demandes. L'horizon de production est composé de plusieurs périodes de la même durée. La cadence de production est exprimée en nombre d'unités produites par unité de temps. Elle est constante durant la même période et variable d'une période à une autre.

L'équipement est soumis à une dégradation stochastique qui dépend uniquement de la dégradation de sa pièce principale. De ce fait, des actions de maintenance préventives imparfaites sont programmées au début de chaque période pour réduire la probabilité de défaillance. De plus, lorsqu'une panne aléatoire se produit entre deux actions de maintenance préventives successives, une action MC est effectuée pour remettre l'équipement dans l'état où il se trouvait avant la panne.

En termes d'amortissement, la valeur de l'équipement diminue progressivement avec l'augmentation de sa durée d'exploitation. Comme pour la fiabilité, la charge d'amortissement ne dépend que de celle de la pièce principale. Elle est estimée en fonction du nombre des produits fabriqués et de l'intensité de production. Nous rappelons qu'après chaque remplacement, la valeur de l'équipement est remise à la valeur initiale de la pièce de rechange neuve installée.

Contrairement au premier chapitre dans lequel nous avons traité le cas où l'utilisateur remplace la pièce principale sur la base d'un seuil maximum du taux de panne (principe de la durée de vie physique), les décisions du remplacement dans ce problème sont prises sur la base de la minimisation des coûts du cycle de vie à savoir : les coûts de maintenance et les charges d'amortissement (principe de la durée de vie économique). Comme pour les actions de maintenance, le remplacement doit être effectué, si c'est nécessaire, seulement au début des périodes de production. Le système en question est illustré dans la Figure 4.1.

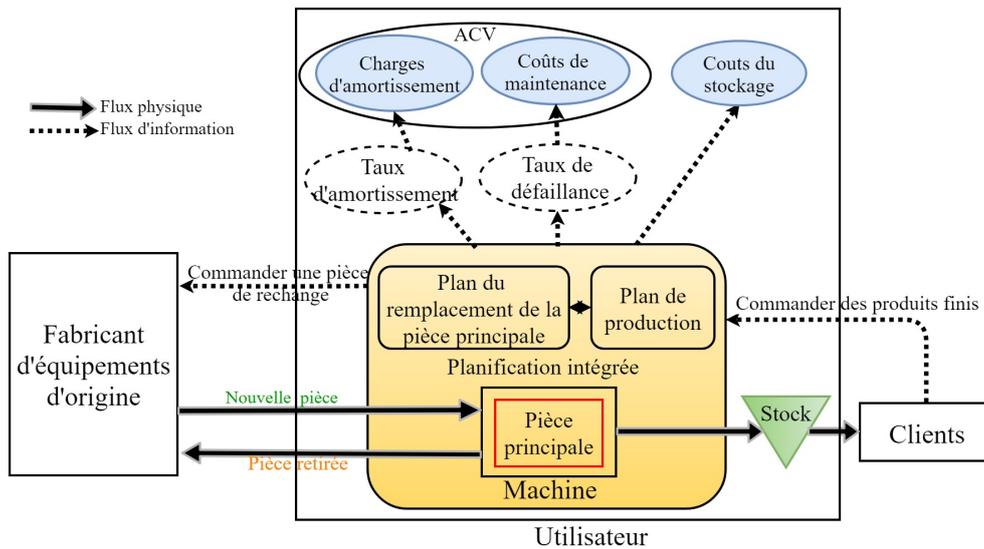


Figure 4.1 : Système étudié

4.2.1 Notations mathématiques

Les nouvelles notations considérées dans ce problème sont présentées en gras :

Les indices

- n Indice de périodes de production.
- t Indice du temps opérationnel.

Les paramètres

- N Nombre de périodes de l'horizon de la planification
- D_n Quantité de produits demandés pour la période n (livrées à la fin de la période n).
- T_n Temps à la fin de la période n .
- U^{max} Taux de production maximal par unité de temps.
- $\lambda_0(t)$ Fonction du taux de panne nominale d'un équipement qui fonctionne sous un taux de production maximal U^{max} .
- $\lambda_n(t)$ Fonction du taux de panne de l'équipement durant la période n (elle représente le nombre de pannes par unité du temps).
- λ^{max} Seuil maximal du taux de panne pour effectuer un remplacement.
- C^{rep} Coût fixe du remplacement de la pièce principale.
- CCM Coût d'une action de maintenance corrective.
- DM Durée d'une action de maintenance préventive imparfaite.
- DR Durée d'une opération de remplacement de la pièce principale.
- h Coût du stockage unitaire des produits finis par période.

v_1	Valeur minimale que peut prendre un taux de production élevé.
v_2	Valeur minimale que peut prendre un taux de production intense.
a_n	Facteur d'accélération du taux de défaillance (HRIF)
b_n	Facteur de réduction de l'âge (ARF).
AC	Coût d'acquisition d'une nouvelle pièce de rechange.
K_n	Facteur d'ajustement qui varie entre 0 et 1, utilisé afin de mesurer l'effet de l'intensité de production durant la période n sur l'amortissement de l'équipement.
TPU	Nombre maximal d'unités pouvant être produites par un équipement utilisé seulement sous un taux de production U^{max} .
SV	Valeur résiduelle d'un équipement à la fin de sa durée de vie (après la production de TPU sous un taux de production U^{max}) (en unité d'argent).

Les variables de décision

U_n	Taux de production au cours de la période n .
Z_n	$= \begin{cases} 1 & \text{si la pièce principale est remplacée au début de la période } n \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

Les résultats

OT_n	Temps opérationnel prévu au cours de la période n .
DT_n	Temps d'arrêt prévu au cours de la période n .
CPM_n	Coûts engendrés en exécutant une action MPI au début de la période n .
FN_n	Nombre de pannes moyen prévu au cours de la période n .
C_n	Coût de maintenance total prévu durant la période n .
S_n	Quantité de produits manufacturés restant en stock à la fin de la période n .
V_n	Valeur prévue de l'équipement à la fin de la période n (en unité d'argent).
Deprate	Taux d'amortissement moyen (en unité d'argent par produit) quand l'équipement fonctionne sous un taux de production intensif ($U_n \in [b, U^{max}]$).
Depr_n	Charge d'amortissement prévue durant la période n (en unité d'argent).

4.3 Évaluation des charges d'amortissement

Tout équipement est sujet à une baisse de sa valeur financière (amortissement) durant sa vie utile pour des raisons d'obsolescence dues à son âge et/ou à son usage. Une approche éventuelle pour estimer la charge d'amortissement est de recourir à l'une des méthodes acceptables par les normes comptables internationales (International Accounting Standards - IAS 16), telles que la méthode d'amortissement linéaire, la méthode d'amortissement accéléré ou

la méthode d'amortissement par activités (appelée aussi « méthode d'amortissement par unités de production»). Cependant, ces modèles supposent que la durée de vie économique d'un équipement est connue et que sa valeur diminue avec le temps ou avec son utilisation [Grover and Grover, 2015]. L'IAS 16 précise que la méthode la plus adéquate pour estimer la charge d'amortissement d'un bien est celle qui reflète le mieux le scénario attendu de son amortissement. Par exemple, la méthode d'amortissement linéaire semble compatible avec un mode de fonctionnement constant. Cette méthode est la plus couramment utilisée par les entreprises du monde entier [Marzo and Pagnozzi, 2011].

L'équipement considéré dans la présente étude est utilisé de différentes manières sur l'horizon de production, en fonction de la variation de la demande. En conséquence, la charge d'amortissement doit varier d'une période à l'autre, selon le nombre d'unités produites par période ; elle est donc en fonction du temps opérationnel et de la cadence de production. Dans ce cas, l'utilisation de la méthode de l'amortissement linéaire ne peut pas répercuter le profil réel d'amortissement. Une autre méthode alternative possible, qui semble compatible avec le problème étudié, est l'approche d'amortissement par activité, qui permet d'estimer le montant amortissable d'un bien en fonction de son mode d'utilisation. D'après Palmer and Davis [2004], le temps opérationnel est le facteur d'activité le plus populaire prescrit par les promoteurs de la comptabilité par activité (Activity-Based Costing - ABC) dans les environnements à forte utilisation des machines. Cependant, les unités de temps ne sont pas identiques. Il faut noter que « l'intensité » est un facteur qui peut modifier l'impact du temps d'utilisation sur l'amortissement. L'intensité d'utilisation est communément appelée « la charge, la vitesse, la cadence ». Par exemple, le fonctionnement à une vitesse supérieure à la normale prescrite est un facteur d'amortissement excessif. En analysant ces deux facteurs, celui du temps et celui de l'intensité, nous constatons qu'ils ne peuvent pas refléter le scénario d'amortissement de l'équipement étudié si chacun est considéré séparément. La raison est que le temps d'utilisation et l'intensité (cadence de production) sont différents pour chaque période. Pour faire face à cette situation, et en se référant à l'étude du Palmer and Davis [2004], une nouvelle version de l'approche de l'amortissement par activité est proposée ; dans cette version, le facteur d'intensité de production est combiné avec le facteur du temps opérationnel afin de remédier aux faiblesses du modèle d'évaluation de l'amortissement qui est basé uniquement sur le temps d'utilisation ou sur l'intensité de production.

Avant d'expliquer le modèle d'amortissement proposé, il convient de rappeler que la valeur des pièces durables est constante (ou bien elle est négligeable par rapport à celle de la pièce principale), de ce fait, elle n'est pas concernée par l'amortissement et n'est donc pas prise en considération. Dans ce cas, la valeur de l'équipement n'est représentée que par celle de sa pièce principale.

En se basant sur l'approche d'amortissement modifiée basée sur l'activité, la valeur d'amortissement prévue pendant une période de production n peut être estimée par l'expression suivante :

$$Depr_n = Deprate.K_n U_n OT_n, \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (4.1)$$

Où $Deprate$ désigne le taux d'amortissement moyen d'une pièce principale neuve utilisée

sous un taux de production maximal. Il peut être calculé comme suit :

$$Deprate = \frac{AC - SV}{TPU} \quad (4.2)$$

Dans ce modèle, nous supposons que la valeur résiduelle SV de l'équipement après la production de TPU unités sous un taux de production constant U^{max} est égale à zéro. De plus, K_n est un facteur d'ajustement permettant de répercuter l'effet de l'intensité de la production durant la période n sur la charge d'amortissement.

$$K_n = \begin{cases} \alpha & \text{si } U_n \in [0, v1[\quad \text{Taux de panne modéré} \\ \beta & \text{si } U_n \in [v1, v2[\quad \text{Taux de panne élevé} \\ 1 & \text{si } U_n \in [v2, U^{max}] \quad \text{Taux de panne intensif} \end{cases} \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (4.3)$$

Où α et β ($0 < \alpha < \beta < 1$) sont deux valeurs déterminées par le FEO.

Il est important de rappeler que la valeur de l'équipement après chaque action du remplacement est remise à la valeur de la nouvelle pièce de rechange installée ; et que sa valeur résiduelle attendue V_n à la fin de la $i^{ème}$ période peut être obtenue en déduisant la charge d'amortissement $Depr_n$ de sa valeur attendue à la fin de la période précédente :

$$V_n = \begin{cases} AC - Depr_n & \text{si } Z_n = 1 \\ v_{n-1} - Depr_n & \text{sinon} \end{cases} \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (4.4)$$

4.4 Formulation mathématique du problème

Le modèle mathématique présentée ci-dessous concerne un problème d'optimisation conjointe des plans de production et de remplacement. La nouvelle décision à considérer dans ce problème, représentée par la variable Z_n , consiste à déterminer les périodes optimales au début desquelles le remplacement de la pièce principale doit être effectué en se basant sur la méthode de l'analyse de cycle de vie. Rappelons que la planification de la production consiste à définir la cadence de production optimale U_n à adopter durant chaque période de l'horizon. La nouvelle contrainte à prendre en compte dans ce modèle en plus des contraintes du modèle précédent concerne la valeur financière de l'équipement qui ne doit pas descendre au-dessous d'un seuil minimum SV .

$$\text{Minimizer } TC = \sum_{n=1}^N C_n + \sum_{n=1}^N h \cdot S_n + AC + \sum_{n=1}^N Z_n (AC - V_{n-1} + C^{rep}) - V_N \quad (4.5)$$

$$S_n = S_{n-1} + U_n OT_n - D_n, \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (4.6)$$

$$U_n \leq U^{max}, \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (4.7)$$

$$S_n \geq 0, \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (4.8)$$

$$V_n \geq SV, \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (4.9)$$

$$U_n \in \mathbb{N}, Z_n \in \{0, 1\} \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (4.10)$$

La fonction objectif (4.5) exprime le coût total prévu de maintenance, d'amortissement et du stockage des produits finis durant l'horizon de production. Les deux premiers termes représentent le coût de maintenance et le coût du stockage respectivement. Le troisième terme est la valeur financière initiale de l'équipement. Le quatrième terme exprime le coût total du remplacement de la pièce principale. Si le remplacement est effectué au début de la période n : (i) un coût variable est intégré, il représente la différence entre le coût d'acquisition AC de la pièce de rechange commandée et la valeur résiduelle de la pièce enlevée; (ii) en outre, un coût fixe C^{rep} est également requis, il comprend les frais du transport de la pièce de rechange commandée, les frais de désassemblage/assemblage, du nettoyage et de tests. Finalement, le cinquième terme se réfère à la valeur résiduelle de l'équipement à la fin de l'horizon.

Comme dans le modèle précédent, les contraintes (4.6), (4.7) et (4.8) concernent respectivement l'équilibrage du stock, la capacité de la machine de production et la non-négativité du niveau du stock la fin de chaque période. La contrainte (4.9) fait en sorte que la valeur de l'équipement (de la pièce principale) ne descende pas en dessous d'un seuil minimum SV . Finalement, l'ensemble des contraintes (4.10) déterminent la nature des variables des décisions.

La première formule dans le système d'équations (4.11) est utilisée pour l'estimation du coût total des actions de maintenance corrective pour la période au début desquelles la pièce principale est remplacée, y a compris la première période. Notant que cette formule a subi un petit changement par rapport à celle utilisée dans le modèle précédent, puisque les périodes de remplacement dans ce problème sont déterminées sur la base de la durée de vie économique, ce qui nécessite l'utilisation de la variable de décision Z_n . Rappelons que la deuxième formule représente le coût total prévu de maintenance pour les périodes au début desquelles une action de maintenance préventive est menée. Dans ce cas, le coût de la maintenance préventive CPM_n est estimé sur la base du taux de panne atteint à la fin de la période $n-1$, du facteur de réduction de l'âge fonctionnel et du facteur d'augmentation du taux de panne. Dans les deux formules, le terme FN_n exprime le nombre moyen de pannes par période (formule 4.12). Il peut être estimé sur la base de la loi de défaillance $\lambda_n(t)$ (formule 4.14).

$$C_n = \begin{cases} CCM + FN_n & \text{si } n = 1 \text{ où } Z_n = 1 \\ CCM + FN_n + CPM_n & \text{sinon} \end{cases} \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (4.11)$$

$$FN_n = \int_0^{OT_n} \lambda_n(t).dt, \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (4.12)$$

Ou OT_n exprime le temps opérationnel dans la période n (formule 3.4), sachant que les actions MPI ou le remplacement impliquent la mise en arrêt de l'équipement pour certaines unités de temps DT (formule 4.13).

$$DT_n = \begin{cases} 0 & \text{si } n = 1 \\ DR & \text{si } Z_n = 1 \\ DM & \text{sinon} \end{cases} \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (4.13)$$

Comme pour le cas du système d'équations (4.11), la loi de défaillance $\lambda_n(t)$ utilisée dans ce modèle nécessite aussi un petit changement au niveau de la condition d'utilisation de la première formule. Cette dernière est utilisée pour estimer le taux de défaillance durant les périodes aux débuts desquelles une action de remplacement est effectuée, y a compris la première période de l'horizon. Rappelons que la deuxième formule est utilisée pour le même but, mais seulement pour les périodes précédées par une action de maintenance préventive imparfaite (voir la section 3.3 du chapitre 3).

$$\lambda_n(t) = \begin{cases} \frac{U_n}{U_{max}} \lambda_0(t) & \text{si } n=1 \text{ ou } Z_n = 1 \\ \frac{U_n}{U_{max}} A_n \lambda_0(b_n y_n + t) & \text{sinon} \end{cases} \quad t \in [0, OT_n] \quad (4.14)$$

4.5 Approche de résolution proposée

Les algorithmes génétiques sont le type de métaheuristiques les plus populaires grâce à leurs performances dans la résolution de problèmes complexes très variés, à leur simplicité, à leur facilité d'hybridation avec d'autres méthodes et à leur probabilité plus élevée de convergence vers une solution optimale [Xing, 2013]. Dans cette partie, nous présentons en détails notre approche pour la résolution du problème considéré. Vu le nombre important des variables de décision ($2N$), l'hybridation de plusieurs méthodes de résolution est une nécessité impérieuse. Il s'agit d'un algorithme génétique combiné avec l'heuristique Fix-and-Relax utilisée dans le chapitre précédent. La figure 4.2 illustre le schéma général de l'Algorithme Génétique Hybride (AGH) proposé qui vise principalement à explorer conjointement différentes solutions. L'idée est d'étudier les différentes possibilités du plan du remplacement à l'aide de l'algorithme génétique. Ensuite, pour chaque possibilité, une procédure de décomposition est appelée afin de décomposer le problème CLSP en plusieurs sous-problèmes $CLSP_c$ faisables sur la base du plan du remplacement. Puis, pour chaque sous-problème, l'heuristique FR est utilisée afin d'obtenir le plan de production. Enfin, les plans de production et de remplacement sont étudiés et évalués afin de déterminer le plus optimal.

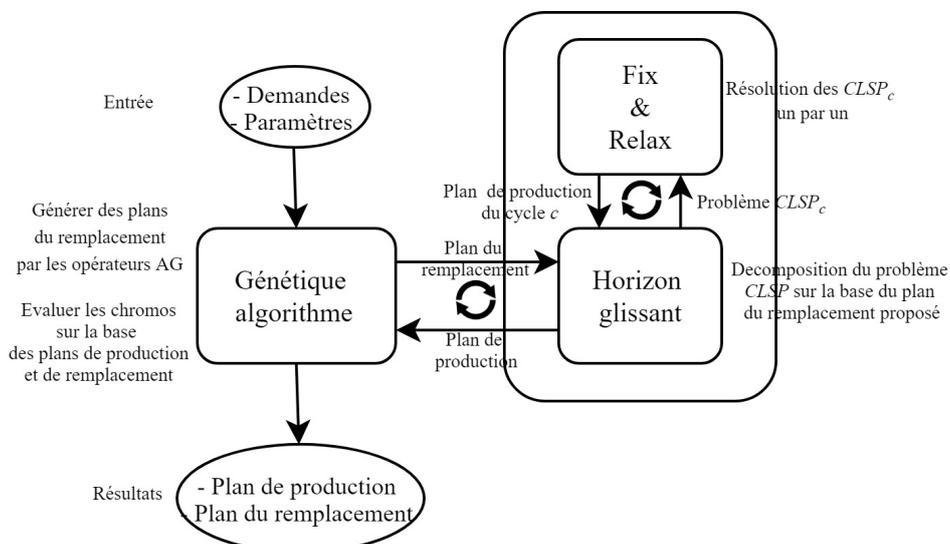


Figure 4.2 : Schéma de l'algorithme génétique hybride

4.5.1 L'algorithme génétique

L'algorithme génétique proposé dans cette étude est basé sur une approche de population unique, où chaque individu (chromosome) représente une solution possible pour le plan du remplacement.

Codage des solutions

Le choix du codage est une étape importante dans la conception d'un algorithme génétique. Le codage a un impact très important sur l'évolution de la population au cours des générations. Pour notre cas, nous choisissons un codage en nombre binaire. Chaque chromosome de la population contient les valeurs de la variable de décision (Z_n), ce qui définit une solution du plan du remplacement. Nous utilisons une représentation basée sur les entités, c'est-à-dire si on a N périodes de production, notre chromosome (solution potentielle) sera représenté sous forme d'un vecteur de taille N , où chaque gène n ($n \leq N$) comporte une information binaire (1 ou 0) indiquant si une opération du remplacement doit être effectuée au début de la période n (voir la figure 4.3); sinon, seule une intervention de maintenance préventive imparfaite doit être effectuée au début de la période n . La figure montre un exemple illustratif d'un chromosome.

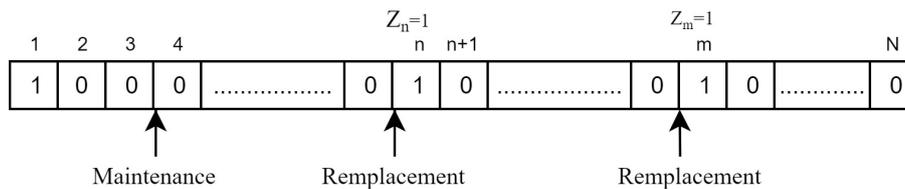


Figure 4.3 : Structure du chromosome

Création de la population initiale

L'objectif de cette étape est de générer un ensemble des plans de remplacement d'une manière itérative et aléatoire, c'est-à-dire que, la probabilité d'effectuer une opération du remplacement au début de chaque période est la même. En plus de sa simplicité, cette approche permet d'obtenir une population très diversifiée, ce qui permet de couvrir au mieux l'espace des solutions du problème. La taille NB de la population initiale est choisie en fonction de la capacité de l'algorithme à générer des solutions de bonne qualité et du temps de calcul. Notant que les chromosomes qui présentent des solutions infaisables subissent une procédure de réparation (correction). Le principe de la réparation est expliqué dans plus tard de ce chapitre.

Évaluation

Chaque fois qu'une nouvelle solution possible du plan de remplacement est générée par l'un des opérateurs de l'algorithme génétique : génération de la population initiale, croisement ou mutation, l'heuristique FR est appliquée pour obtenir progressivement le plan de production en tenant compte des coûts du stockage, de maintenance et d'amortissement.

Après l'obtention de tous les plans de production relatives à chaque chromosome, une fonction d'évaluation est appelée afin de calculer leurs fitness en se basant sur la fonction objectif du modèle mathématique. Cette évaluation permet de comparer les différentes solutions possibles. Comme nous sommes face à un problème de minimisation de la fonction objectif, les chromosomes ayant la valeur objectif la plus basse représentent les meilleures solutions.

Afin d'éviter la perte des meilleurs individus par l'opérateur de croisement ou de mutation, l'ensemble des individus de la population parente sont classés selon l'ordre croissant de leur valeur fitness. Ensuite, les premiers individus de bonne qualité (noté par « pr ») sont directement reproduits à l'identique. Par exemple, les premiers 10% sont copiés directement dans la nouvelle population. Cela est appelé « une stratégie élitiste ».

Sélection

La stratégie de sélection utilisée dans notre algorithme est celle de la roulette afin de donner une forte probabilité de sélection aux individus ayant les meilleures valeurs de fitness. D'un autre côté, cette stratégie laisse une chance aux individus faibles pour être sélectionnés, ce qui maintient la diversité de la population. Mathématiquement, ceci se traduit comme suit : soit fit_{ch} la valeur fitness du chromosome ch , et $prob_{ch}$ sa probabilité de sélection, telle que :

$$prob_{ch} = \frac{fit_{ch}}{\sum_{c=1}^{NB} fit_c} \quad (4.15)$$

Néanmoins, cette formule est applicable seulement pour les problèmes de maximisation. Par contre, le problème traité dans ce travail est un problème de minimisation, ainsi les individus considérés de bonne qualité sont ceux ayant les valeurs fitness les plus bas. Dans ce cas, l'utilisation de cette formule permet d'affecter une probabilité de sélection faible aux bons individus. Pour faire face à cette situation, la formule suivante peut être utilisée :

$$prob_{ch} = \frac{fit^{max} - fit_{ch} + 100}{\sum_{c=1}^{NB} (fit^{max} - fit_{ch} + 100)} \quad (4.16)$$

Où fit^{max} est la valeur fitness la plus élevée (celle du mauvais individu). Ensuite, $(1-pr)$ individus sont sélectionnés à partir de toute la population parente. Le principe de la sélection consiste à générer N fois un nombre aléatoire entre 0 et 1. Si ce dernier appartient à l'intervalle $[\sum_{i=1}^{ch-1} prob_i, \sum_{i=1}^{ch} prob_i]$, le chromosome ch sera sélectionné pour se reproduire à travers l'opérateur du croisement.

Croisement

L'opérateur du croisement adapté est celui avec un seul point de coupure. Soit p_c la probabilité du croisement. Pour chaque paire des parents sélectionnés (le premier avec le deuxième, le troisième avec le quatrième, et ainsi de suite), le programme génère un nombre aléatoire r entre 0 et 1.

- Si $r < p_c$, la paire actuelle est croisée à l'aide d'une méthode de croisement aléatoire à un point de coupure, pour créer deux nouveaux descendants qui remplacent leurs parents. Puisque notre chromosome est un vecteur de taille N , le point de coupure sera un nombre généré aléatoirement entre 1 et N . L'individu « Fils 1 » prend la partie gauche du « Parent 1 » et la partie droite du « Parent 2 ». Au contraire, l'individu « Fils 2 » prend la partie droite du « Parent 1 » et la partie gauche du « Parent 2 ».
- Sinon, aucun croisement n'est effectué, et la paire en question garde sa position.

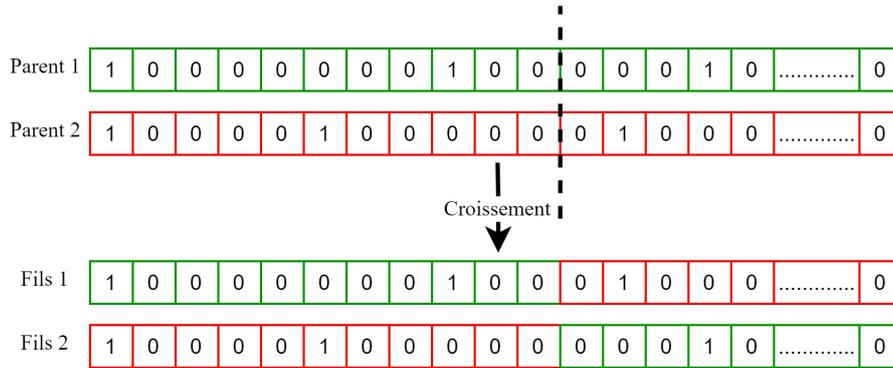


Figure 4.4 : Opérateur du croisement

En appliquant cette méthode, la taille de la population résultante du croisement reste $(1 - pr)$ (flèche 3 de la figure 4.6). Ensuite, l'ensemble des individus de cette population sont classés dans l'ordre croissant de leur fitness, puis ils sont placés directement à la population des enfants – Matrice B (flèche 4) au-dessous des pr parents qui ont été reproduits à l'identique dans la nouvelle population. Cette technique permet d'éviter toute destruction possible des bons individus par l'opérateur de mutation.

Mutation

Cette opération permet tout au long de l'algorithme de maintenir une certaine homogénéité dans la population et ainsi d'éviter la convergence vers un optimum local. La mutation ne s'applique pas à tous les individus de la population. Pour cela, nous définissons un taux de mutation p_m . Pour chaque chromosome résultant de l'opérateur du croisement (flèche 3), on génère un nombre aléatoire r entre 0 et 1 :

- Si $r < p_m$, le chromosome subira une mutation par inversion en inversant les valeurs de deux gènes dont un comporte la valeur 1 et l'autre 0 (flèche 5);
- Sinon, aucune mutation n'est appliquée à ce chromosome.

Soit N_m le nombre de chromosomes mutés. Ces chromosomes sont enregistrés dans la matrice B en écrasant les derniers N_m chromosomes (flèche 6).

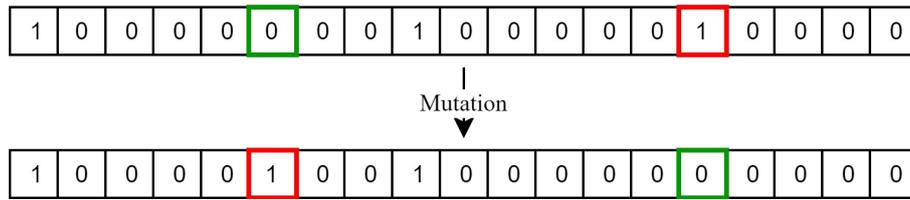


Figure 4.5 : Opérateur de mutation

Correction

Cette opération a pour objectif de corriger les chromosomes fils qui présentent des solutions infaisables par rapport à la contrainte (4.7) de la capacité où par rapport à la contrainte (4.9) de la valeur de l'équipement.

La contrainte (4.7) ne peut être respectée pour une période n que dans le cas où la demande cumulée jusqu'à la période n dépasse la capacité de production cumulée de l'équipement jusqu'à la même période, c.à.d. :

$$\sum_{n'=1}^n D_n > \sum_{n'=1}^n U^{max} OT_n \quad (4.17)$$

Dans ce cas, il faut modifier le chromosome de telle sorte l'équation ci-dessus ne sera jamais réalisée. Une solution possible est de réduire le nombre des opérations du remplacement programmées avant la période n pour augmenter le temps opérationnel total $\sum_{n'=1}^n OT_n$. Une autre solution consiste à remplacer carrément le chromosome en question.

Pour la contrainte (4.9), après l'obtention du plan de production à travers l'heuristique FR, si la valeur de l'équipement descend au-dessous du SV , il faut planifier une opération du remplacement dans la dernière période au début de laquelle la valeur de l'équipement était positive. Mathématiquement, si $V_n \geq SV$ et $V_{n+1} < SV$ alors le gène n doit être modifié de 0 à 1 afin d'obtenir $Z_n = 1$.

Dans le cas où aucun chromosome ne peut respecter ces deux contraintes, nous pouvons dire que le problème en cours de résolution n'a pas de solution.

Remplacement

À la fin de chaque itération, Nous obtenons donc une nouvelle population (matrice B) qui sert de parents pour la prochaine itération. La formation est composée des meilleures 10% de la population parente de l'itération courante (pour ne pas les faire altérer par les opérateurs génétiques), tous les chromosomes issus de l'opérateur de mutation et le reste, qui représente la majorité de la formation, sont les meilleurs chromosomes issus de l'opérateur de croisement (voir la figure 4.6).

Les différentes étapes de l'AG proposée sont expliquées d'une manière concise comme suit :

1. Générer aléatoirement une population initiale de NB chromosomes (matrice A).
2. Créez une matrice B vide de NB lignes et N colonnes. Cette matrice sera utilisée pour sauvegarder la population enfant.
3. Utilisez l'heuristique FR afin d'obtenir un plan de production pour chaque chromosome de la population initiale.
4. Évaluer chaque chromosome par rapport à ses plans de production et de remanufacturing obtenus, puis les classer (les chromosomes) dans la matrice A selon un ordre croissant de leur valeur objectif.
5. Sauvegarder le premier chromosome de la matrice A dans un vecteur « *bestsol* ».
6. Répétez les étapes suivantes jusqu'à atteindre le critère d'arrêt (voir la figure 4.6) :
 - (a) Sauvegarder les premiers chromosomes pr de la population parent (matrice A) dans la matrice B (garder les meilleurs parents pour la prochaine itération) (flèche 1).
 - (b) Utiliser le mécanisme de sélection de la roulette pour sélectionner $(1 - pr)$ parents de la matrice A pour l'opérateur du croisement (flèche 2).
 - (c) Appliquer l'opérateur de croisement avec une probabilité p_c (flèche 3).
 - (d) L'heuristique FR est utilisée afin d'obtenir le plan de production pour chaque chromosome fils créé par l'opérateur du croisement, ensuite les chromosomes fils sont évalués.
 - (e) Classer les chromosomes résultants de l'étape (c) selon un ordre croissant de leur valeur objectif (flèche 3) et ajoutez-les à la matrice B (flèche 4).
 - (f) Appliquer l'opérateur de mutation avec une probabilité p_m (flèche 6).
 - (g) Utiliser l'heuristique FR pour obtenir le plan de production de chaque chromosome muté, puis les évaluer.
 - (h) Initialiser la matrice A.
 - (i) Classer, dans un ordre croissant, les chromosomes de la matrice B dans la matrice A initialisée (flèche 7), enregistrer le premier chromosome dans un vecteur *bestnew*, puis initialiser la matrice B.
 - (j) Si la solution *bestnew* est meilleure que la solution *bestsol*, mettre $bestsol = bestnew$.
 - (k) Si le critère d'arrêt (un nombre prédéfini d'itérations i sans amélioration de la meilleure solution) est atteint, arrêter et retourner *bestsol* comme une meilleure solution ; sinon, aller à l'étape (a).

Chaque fois qu'une nouvelle solution possible du plan du remplacement est générée par l'un des opérateurs de l'algorithme génétique, une procédure de décomposition du problème CLSP globale est appliquée afin d'obtenir un ensemble de sous-problèmes $CLSP_c$ faisables séparés, dans la mesure où chacun correspond à un intervalle de remplacement que nous appelons "cycle". Ensuite, pour chaque sous-problème, l'approche « Fix-and-Relax » est appliquée pour obtenir progressivement le plan de production du cycle c en tenant compte des coûts de stockage, de maintenance et d'amortissement.

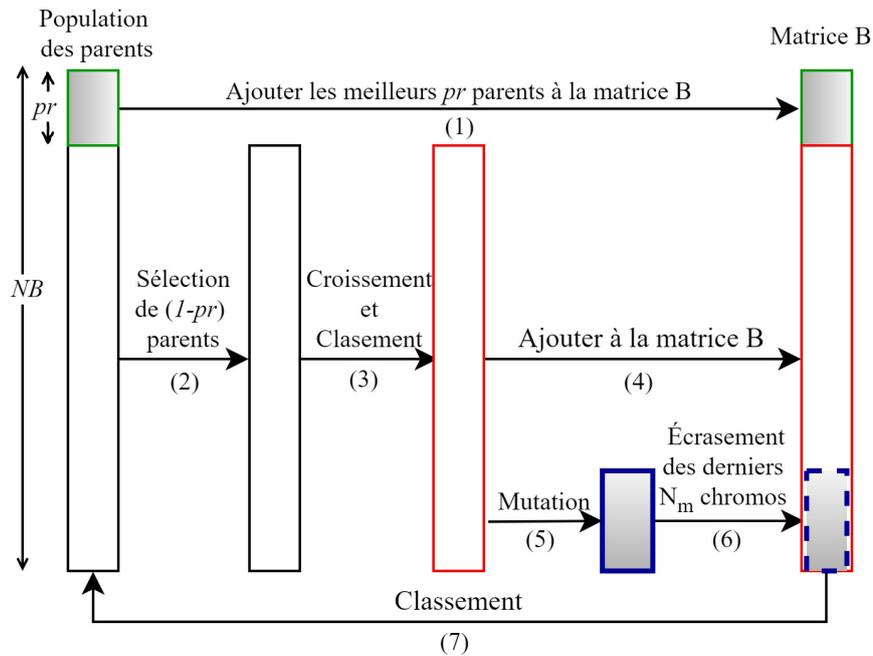


Figure 4.6 : Opérateurs de l'algorithme génétique proposé

4.5.2 Algorithme de l'horizon glissant basée sur une procédure de décomposition

Cet algorithme a trois missions :

- Décomposer le problème CLSP global en C sous-problèmes $CLSP_c$ faisables.
- Appeler l'heuristique FR pour résoudre chaque sous-problème $CLSP_c$.
- Regrouper et envoyer les plans de production du chaque cycle (retournés par l'heuristique FR) à l'algorithme génétique pour une évaluation globale des plans intégrés.

La procédure de décomposition proposée permet de diviser le problème CLSP global en C sous-problèmes $CLSP_c$ ($c = 1, \dots, C$) séparés, sur la base du plan de remplacement généré par l'algorithme génétique. La mise en œuvre de cette procédure est conçue de manière à ce que les sous-problèmes $CLSP_c$ soient toujours réalisables si le problème CLSP est réalisable.

Chaque sous-problème $CLSP_c$ concerne un cycle du remplacement défini par un intervalle $[f_c, l_c]$, tel que $f_1 = 1$; $f_c = l_{c-1} + 1$ et $l_C = N$ (voir la figure 4.7 et l'Algorithme 3). Les demandes traitées dans un sous-problème $CLSP_c$ sont les demandes des périodes de l'intervalle qui le concerne, sauf la demande D_{l_c} de la dernière période (l_c) de l'intervalle, qui peut être modifiée dans le cas où des demande de certaines périodes au futur (Demandes des sous-problèmes $CLSP_{c'}$ suivants ($c > c'$)) ne peuvent pas être livrées dues à l'incapacité opérationnelle de la machine (c.à.d. l'un des $CLSP_{c'}$ suivants est infaisable). Cette procédure applique la stratégie de la production à l'avance pour les cycles durant lesquels les demandes dépassent la capacité de production de la machine.

Le modèle mathématique qui correspond aux sous-problèmes $CLSP_c$ est présenté dans la section suivante.

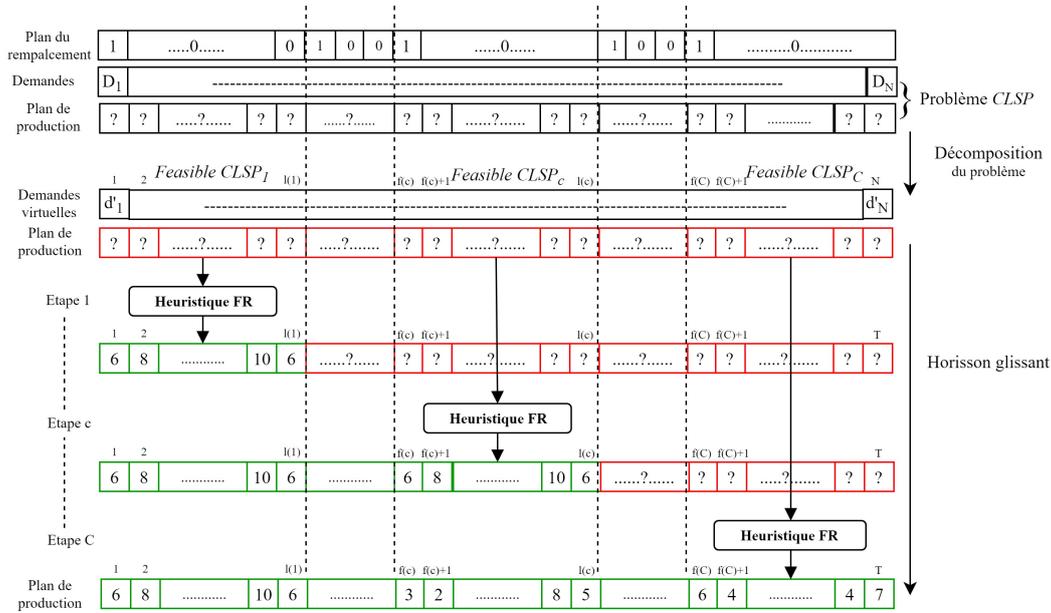


Figure 4.7 : Principe de l'horizon glissant

Algorithme 3 Algorithme de l'horizon glissant

Entrées : Chromosome ch , Demandes en produits \widehat{d}

Sorties : Plan de production intégral \widehat{U}

- 1 : Lire ch
- 2 : $C \leftarrow$ Nombre d'intervalles du remplacement (cycles) dans l'horizon de planification
- 3 : $\widehat{d}' \leftarrow$ Créer des demandes virtuelles
- 4 : $\widehat{d}' \leftarrow \widehat{d}$
- 5 : Pour $c = 1 \rightarrow C$ Faire
- 6 : $f_c \leftarrow$ La première période du cycle c
- 7 : $l_c \leftarrow$ La dernière période du cycle c
- 8 : Fin Pour
- 9 : Pour $c = 1 \rightarrow C$ Faire
- 10 : | Pour $n = f_c \rightarrow l_c$ Faire
- 11 : | | $cd \leftarrow 0; cpc \leftarrow 0$
- 12 : | | | Pour $m = f_c \rightarrow n$
- 13 : | | | | $cd = cd + d'_m; cpc = cpc + U^{max} OT_m$
- 14 : | | | Fin Pour
- 15 : | | Si $cd > cpc$
- 16 : | | | $d'_n = d'_n - (cd - cpc)$
- 17 : | | | $d'_{l_{c-1}} = d'_{l_{c-1}} + (cd - cpc)$
- 18 : | | | $c = c - 2$
- 19 : | | Sortir de la boucle Pour
- 20 : | | Fin Si
- 21 : | Fin Pour
- 22 : Fin Pour
- 23 : Pour $c = 1 \rightarrow C$
- 24 : | $\widehat{d}^c \leftarrow$ Demandes virtuelles au cours du cycle c
- 25 : | $\widehat{U}^c \leftarrow$ Plan de production pendant c
- 26 : | $S_{l_c} \leftarrow$ Niveau du stock à la fin du cycle c
- 27 : | $(\widehat{U}^c, S_{l_c}) = FR(CLSP_c, q_c, S_{l_{c-1}})$
- 28 : Fin Pour
- 29 : $\widehat{U} = \bigcup_{c=1}^C \widehat{U}^c$;

Dans ce qui suit, nous présentons une explication détaillée de l'algorithme 3. Les principaux paramètres requis sont les suivants :

- Le plan du remplacement (chromosome) générée par l'algorithme génétique.
- Les demandes en produits.

Le résultat de cet algorithme est le plan de production intégral du problème CLSP.

Ligne 1 : Lire le chromosome et identifier les cycles du remplacement.

Ligne 2 : C désigne le nombre de cycles.

Lignes 3 et 4 : Créer et initialiser un vecteur de demande virtuel de sorte que la solution de tous les sous-problèmes soit réalisable.

Lignes de 5 à 7 : Définir la première période, la dernière période et la qualité de la pièce principale utilisée de chaque cycle c .

Lignes de 9 à 22 : Cette étape consiste à examiner la faisabilité de chaque problème $CLSP_c$. Dans le cas où au moins un $CLSP_c$ est infaisable, des demandes virtuelles doivent être créées (lignes 16 et 17) de manière à ce que les modèles $CLSP_c$ infaisables puissent être résolus. La vérification (ligne 15) consiste à comparer, à chaque période, les demandes cumulées cd avec la capacité de production cumulée cpc depuis le début du cycle en cours.

$$cd_n = \sum_{m=f_c}^n d_m, \quad \forall c \in \{1, 2, \dots, C\}, n \in [f_c, l_c] \quad (4.18)$$

$$cpc_n = U^{max} \sum_{m=f_c}^n OT_m, \quad \forall c \in \{1, 2, \dots, C\}, n \in [f_c, l_c] \quad (4.19)$$

Le réajustement des demandes virtuelles consiste à réduire d_n (n est la période où cd_n dépasse cpc_n) par $(cd_n - cpc_n)$ et augmenter la demande $d'_{l_{c-1}}$ de la dernière période l_{c-1} du cycle précédent $c - 1$ par $(cd_n - cpc_n)$.

Ligne 18 : L'instruction $c = c - 2$ est utilisée pour répéter la procédure pour le cycle précédent dans le cas où les demandes virtuelles sont ajustées.

Lignes de 24 à 28 : Pour chaque sous-problème $CLSP_c$, utiliser l'heuristique FR (Algorithme 1) afin d'obtenir les taux de production \widehat{U}^c durant le cycle c .

Un exemple illustratif du fonctionnement de l'algorithme de l'horizon glissant est présenté dans l'annexe (A).

4.5.3 L'heuristique Fix-and-Relax

La même heuristique Fix-and-Relax présentée dans le chapitre précédent est utilisée pour résoudre graduellement les sous-problèmes de planification de la production $CLPC_c$. Rappelons que cette heuristique permet d'obtenir progressivement le plan de production du chaque cycle c en tenant compte des coûts du stockage, de maintenance et d'amortissement. Un exemple illustratif du fonctionnement de l'heuristique est présenté dans l'annexe (A).

En ce qui concerne la formulation mathématique des problèmes $CLSP_c$, il convient de noter que sa structure ressemble à celle du modèle du problème principal. Les quelques chan-

gements sont mentionnés en couleur rouge.

$$\text{Minimizer } TC = \sum_{n=1}^N (C_n + h \cdot S_n) + AC - V_{l_c} \quad (4.20)$$

$$S_n = S_{n-1} + U_n OT_n - D_n, \quad \forall n \in [f_c, l_c] \quad (4.21)$$

$$U_n \leq U^{max}, \quad \forall n \in [f_c, l_c] \quad (4.22)$$

$$S_n \geq 0, \quad \forall n \in [f_c, l_c] \quad (4.23)$$

$$V_n \geq SV, \quad \forall n \in [f_c, l_c] \quad (4.24)$$

$$U_n \in \mathbb{N}, Z_n \in \{0, 1\} \quad \forall n \in [f_c, l_c] \quad (4.25)$$

La fonction objectif (4.5) est simplifiée à (4.20) en remplaçant le troisième, quatrième et cinquième terme par la charge d'amortissement totale du cycle c ; il n'est ensuite appliqué qu'au cycle c ($[f_c, l_c]$). Les contraintes de (4.21) à (4.25) sont identiques aux contraintes (4.6) de (4.10), respectivement, mais elles sont appliquées uniquement au cycle c .

Pour évaluer les charges d'amortissement et les coûts de maintenance durant le cycle c , les mêmes formules, c'est-à-dire les formules de (4.1) à (4.4) et les formules de (4.11) à (4.14), sont utilisés, mais seulement pour l'intervalle $[f_c, l_c]$.

Dans le cas où aucune solution n'est trouvée pour l'un des sous-problèmes $CLSP_c$ (par exemple, aucune solution ne répond à la contrainte de la demande), la solution actuelle du plan de remplacement proposée par l'AG est infaisable. Elle peut être corrigée par la mise à jour des gènes du chromosome en question. S'il n'y a aucune possibilité de correction, le chromosome doit être éliminé.

4.6 Expériences numériques et analyses

Pour tester l'applicabilité de l'approche de la planification conjointe de la production et du remplacement, nous considérons les mêmes demandes et les mêmes paramètres considérés dans l'exemple numérique du chapitre précédent, en plus de nouveaux paramètres, ceux liés à l'amortissement. Rappelons que les expériences ont été effectuées sur un PC i7-5500U, CPU 2.40 GHz 2.40GHz, RAM 8 GB.

Tableau 4.1 : Demandes mensuelles moyennes

	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Année 1	160	200	230	270	240	180	240	190	100	220	200	220
Année 2	200	290	260	220	230	380	220	240	200	190	180	140
Année 3	130	110	100	120	100	135	120	90	90	140	130	90

– Paramètres de fiabilité

$$\lambda_0(t) = \frac{3}{110} \left(\frac{t}{110} \right)^2 \quad (4.26)$$

Tableau 4.2 : Paramètres liés la maintenance préventive imparfaite

Failure rate (pannes/jour)	CPM_n	a_n	b_n
$\lambda_{n-1}(OT_{n-1}) < 0.003$	300	1.1	0.2
$0.003 \leq \lambda_{n-1}(OT_{n-1}) < 0.006$	400	1.15	0.25
$\lambda_{n-1}(OT_{n-1}) \geq 0.006$	500	1.17	0.35

– Paramètre d’amortissement

- La valeur minimale d’un taux de production élevé $\nu 1 = 6$.
- La valeur minimale d’un taux de production intensif $\nu 2 = 8$.
- Coût d’acquisition d’une nouvelle pièce de rechange $AC = 50000$.
- Valeur résiduelle d’un équipement à la fin de sa durée de vie $SV = 0$.
- Nombre maximal d’unités pouvant être produites sous un taux de production maximal (U^{max}), $TPU = 5000$ produits.
- $\alpha = 0.6$
- $\beta = 0.8$

– Les paramètres restants sont comme suit :

- Le coût d’une action de maintenance corrective $CCM = 3000$ unités d’argents (ua).
- La durée d’une action de maintenance corrective $DM = 3$ jours.
- La durée d’une opération de remplacement $DR = 6$ jours.
- Le coût du stockage unitaire des produits finis $h = 5$ ua.
- La cadence de production maximal $U^{max} = 10$ produits/jour.

Tableau 4.3 : Paramètres de l’algorithme génétique

NB	i	pr	p_c	p_m
100	100	10	0.9	0.1

La figure 4.8 résume les principaux résultats obtenus du problème étudié. Nous remarquons que la pièce principale doit être remplacée deux fois : un premier remplacement doit être effectué au début de la période 12 et le deuxième au début de la période 22. En adoptant ces plans, le coût total de maintenance, du stockage et d’amortissement s’élève à 85768 ua, dont :

- Le coût total de maintenance égal à 15843 ua.

- Le coût total du stockage égal à 3495 ua.
- La charge totale d’amortissement égal à 56430 ua.
- Le nombre moyen de pannes égal à 1.44.

Nous remarquons que la meilleure cadence de production obtenue durant le premier cycle varie entre élevée et intensive ; elle prend une valeur minimale égale à 6 produits/ut et une valeur maximale égale à U^{max} . Le timing de la première opération du remplacement est justifié par le taux de panne élevé à la période 11 (voir la figure 4.8), quand il est économiquement préférable de remplacer la pièce principale afin de freiner l’augmentation excessive des coûts de maintenance et la diminution de la valeur de l’équipement, comme le montrent les figures 4.11 et 4.15, respectivement.

Selon les résultats du deuxième cycle, l’équipement doit fonctionner intensivement pendant ce cycle. La cadence de production atteint un niveau maximal U^{max} cinq fois. Ainsi, ce mode de fonctionnement entraîne une détérioration accélérée de l’équipement et une augmentation excessive des coûts de maintenance, ce qui nécessite l’exécution d’une deuxième opération du remplacement au début de la période 22.

Quant à la valeur de l’équipement (représentée par la valeur de sa pièce principale), l’analyse des figures 4.8 et 4.15 permet d’observer une corrélation significative entre le taux de production et l’amortissement de la valeur de l’équipement. La comparaison de deux cycles différents, telle que le cycle 1 et le cycle 2, permet de constater que la valeur de l’équipement diminue rapidement avec l’augmentation de l’intensité de production. Durant le premier cycle, la valeur de l’équipement diminue jusqu’à atteindre une valeur résiduelle égale ou presque à 30146 ua, après 11 périodes de service ; en revanche, à la fin du deuxième cycle, la valeur résiduelle atteint près de 25190 ua, après seulement 10 périodes. Ce profil d’amortissement se justifie par l’intensité de production qui est plus élevée au cours du deuxième cycle (entre 8 et 10 produits/ut) par rapport à celle du premier cycle (entre 6 et 10 produits/ut). Cependant, l’amortissement pendant le troisième cycle est significativement faible par rapport à celui pendant les deux cycles précédents, ceci s’explique par la nature faible des cadences de production durant ce cycle.

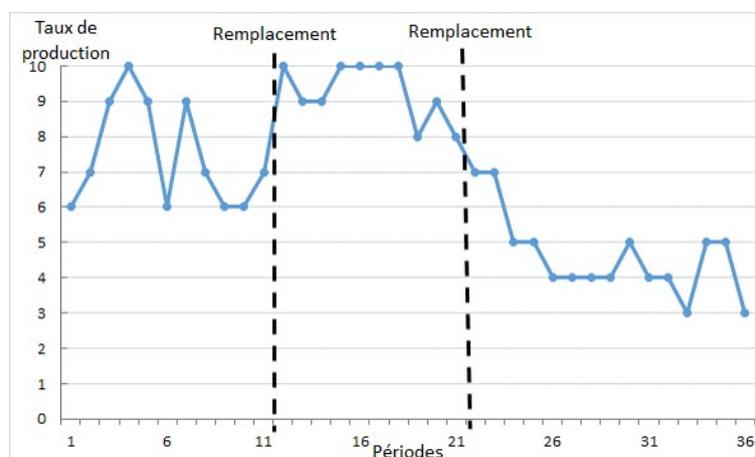


Figure 4.8 : Taux de production par période

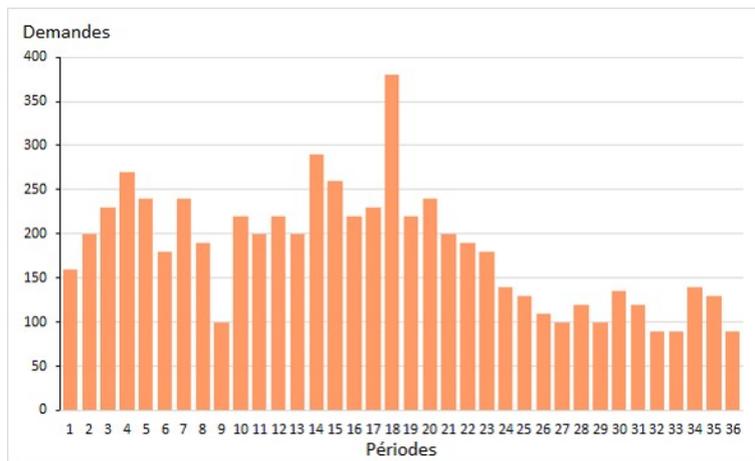


Figure 4.9 : Demande par période

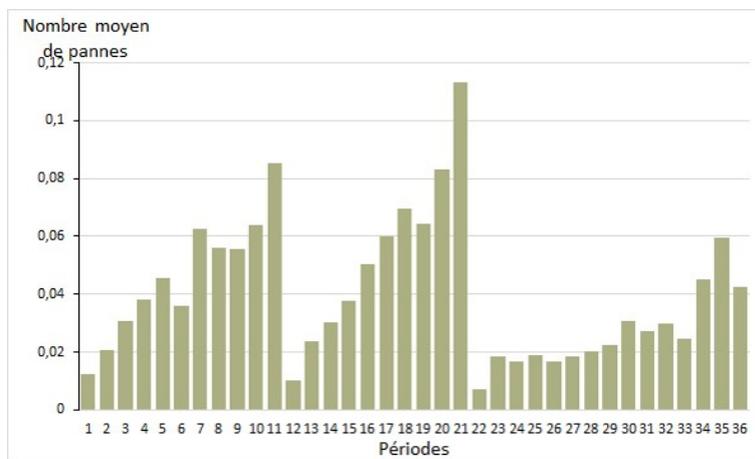


Figure 4.10 : Nombre moyen de pannes par période

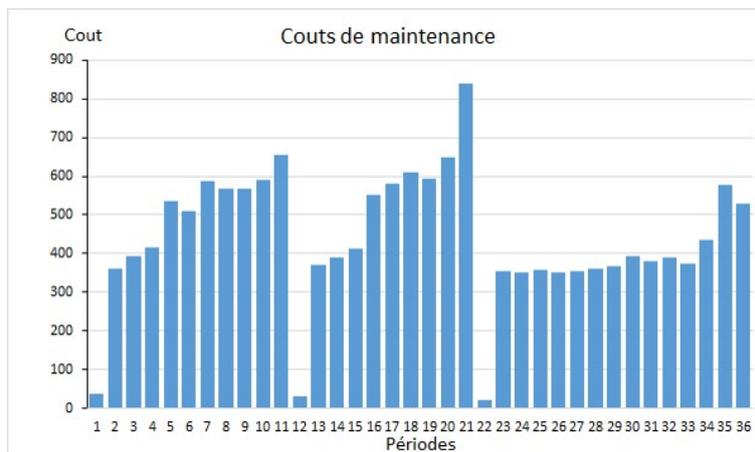


Figure 4.11 : Coûts de maintenance par période

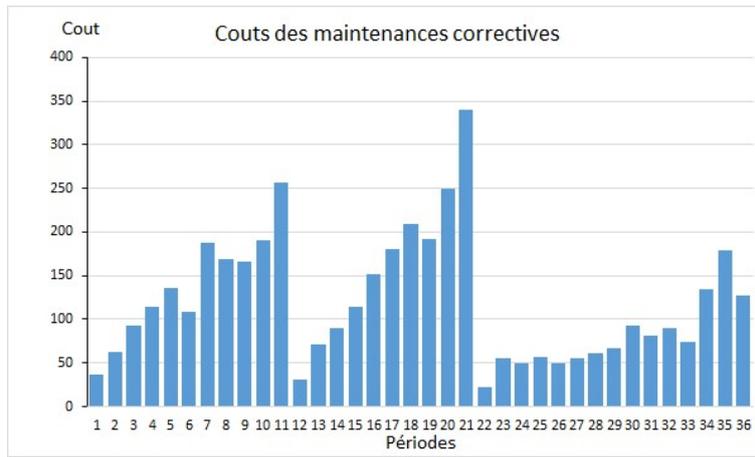


Figure 4.12 : Coûts de maintenances correctives par période

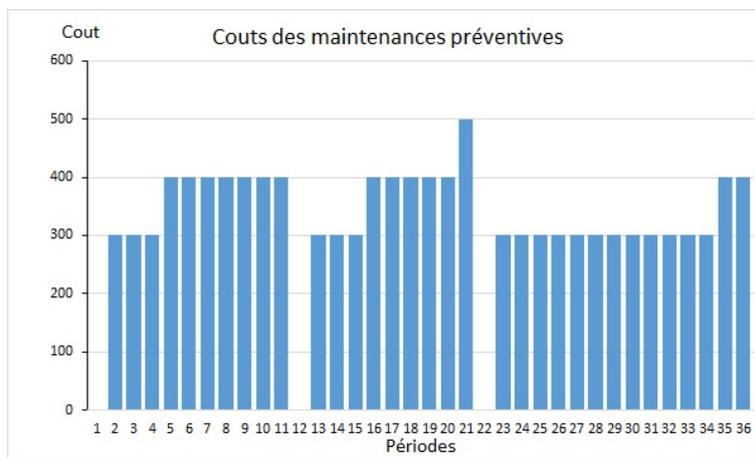


Figure 4.13 : Coûts de maintenances préventives par période

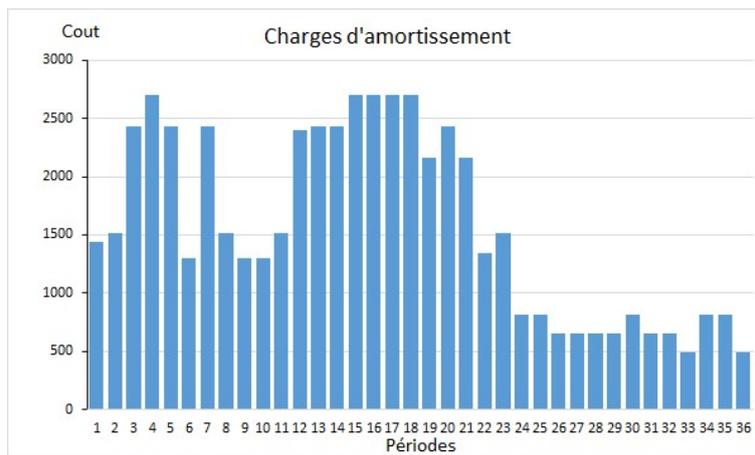


Figure 4.14 : Charges d'amortissement par période



Figure 4.15 : Amortissement de la valeur de la machine

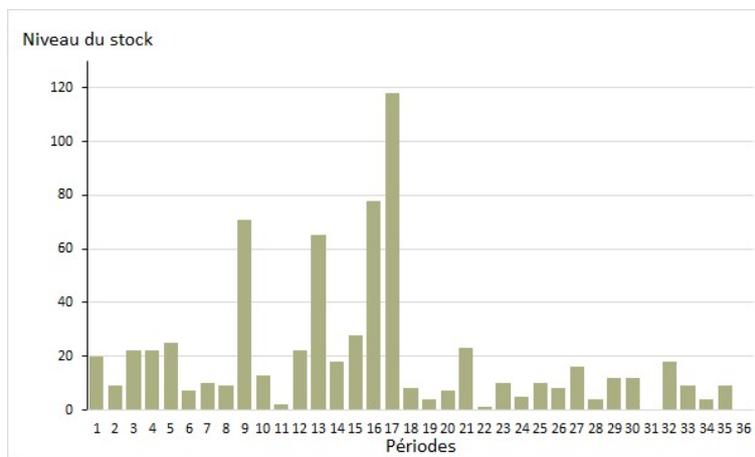


Figure 4.16 : Niveau du stock par période

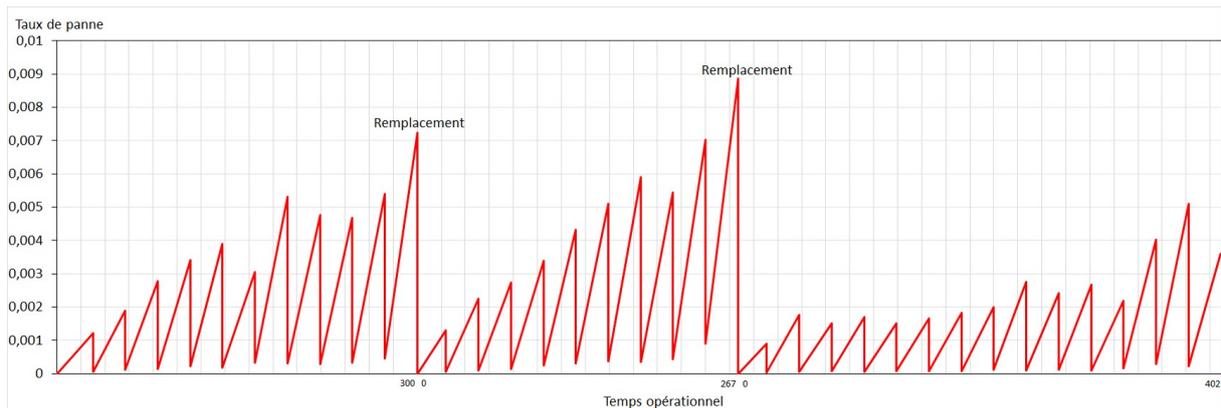


Figure 4.17 : Variation du taux de panne

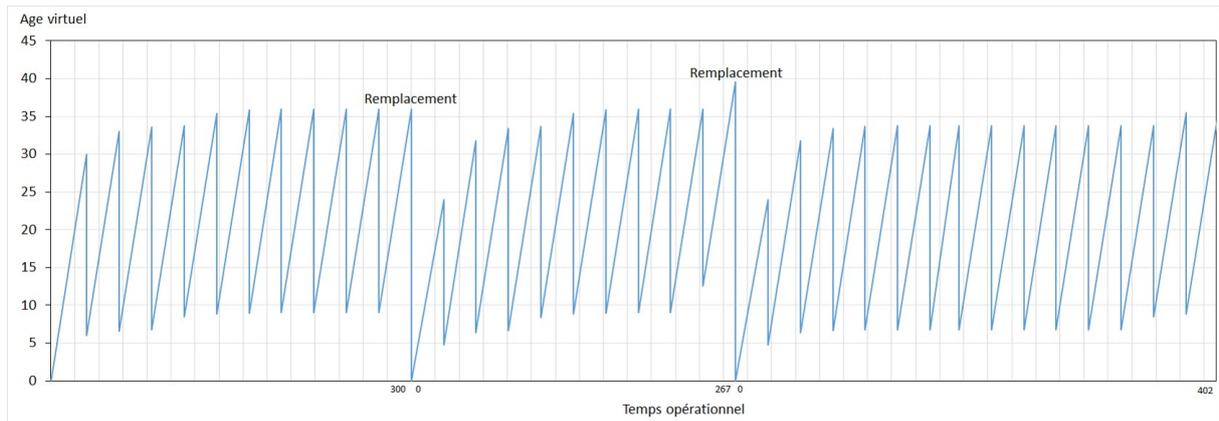


Figure 4.18 : Variation de l'âge virtuel

Tableau 4.4 : Les résultats obtenus

n	D_n	D_n	$\lambda_n(OT_n)(*10^{-3})$	FN_n	C_n	HRIF (a_n)	ARF (b_n)	$Depr_n$	V_n
1	160	6	1,22	0,0122	37	1	0	1440	48560
2	200	7	1,89	0,0207	362	1.1	0.2	1512	47048
3	230	9	2,77	0,0308	392	1.1	0.2	2430	44618
4	270	10	3,41	0,0380	414	1.1	0.2	2700	41918
5	240	9	3,90	0,0454	536	1.15	0.25	2430	39488
6	180	6	3,06	0,0360	508	1.15	0.25	1296	38192
7	240	9	5,31	0,0627	588	1.15	0.25	2430	35762
8	190	7	4,76	0,0562	569	1.15	0.25	1512	34250
9	100	6	4,69	0,0554	566	1.15	0.25	1296	32954
10	220	6	5,40	0,0637	591	1.15	0.25	1296	31658
11	200	7	7,24	0,0855	657	1.17	0.35	1512	30146
12	220	10	1,30	0,0104	31	1	0	2400	47600
13	200	9	2,26	0,0238	372	1.1	0.2	2430	45170
14	290	9	2,73	0,0302	390	1.1	0.2	2430	42740
15	260	10	3,40	0,0379	414	1.1	0.2	2700	40040
16	220	10	4,33	0,0504	551	1.15	0.25	2700	37340
17	230	10	5,10	0,0600	580	1.15	0.25	2700	34640
18	380	10	5,90	0,0696	609	1.15	0.25	2700	31940
19	220	8	5,44	0,0642	593	1.15	0.25	2160	29780
20	240	9	7,04	0,0831	649	1.15	0.25	2430	27350
21	200	8	8,86	0,1131	839	1.17	0.35	2160	25190
22	190	7	0,91	0,0073	22	1	0	1344	48656
23	180	7	1,76	0,0185	356	1.1	0.2	1512	47144
24	140	5	1,52	0,0168	350	1.1	0.2	810	46334
25	130	5	1,70	0,0189	357	1.1	0.2	810	45524
26	110	4	1,50	0,0168	350	1.1	0.2	648	44876
27	100	4	1,65	0,0185	355	1.1	0.2	648	44228
28	120	4	1,82	0,0203	361	1.1	0.2	648	43580
29	100	4	2,00	0,0223	367	1.1	0.2	648	42932
30	135	5	2,75	0,0307	392	1.1	0.2	810	42122
31	120	4	2,42	0,0270	381	1.1	0.2	648	41474
32	90	4	2,66	0,0297	389	1.1	0.2	648	40826
33	90	3	2,20	0,0245	374	1.1	0.2	486	40340
34	140	5	4,03	0,0450	435	1.1	0.2	810	39530
35	130	5	5,11	0,0595	579	1.15	0.25	810	38720
36	90	3	3,61	0,0425	527	1.15	0.25	486	38234

En comparant ces résultats avec celle obtenus dans le chapitre précédent, nous remarquons que le coût total de maintenance engendré (15843 ua) quand la planification du remplacement est basée sur la durée de vie physique est presque 3 fois plus celui engendré (43578 ua)

en se basant sur la durée de vie économique. Le remplacement dans le premier cas s'effectue systématiquement après l'atteinte d'un taux de défaillance limite égale à 0.069 pannes/jour ce qui engendre une augmentation excessive des coûts de maintenance, tandis que dans le deuxième cas, le remplacement s'effectue d'une manière optimale à des niveaux plus bas du taux de panne (7.24 et 8.86 pannes/jour), ce qui permet d'éviter une détérioration très accélérée de la machine due à l'effet négatif des actions de maintenances imparfaites (facteur HRIF). Ainsi, cette dernière stratégie semble saine pour l'activité de production puisqu'elle cause un nombre moyen de pannes égal à seulement 1.44 qui est très faible par rapport à celui obtenu (9.79) en adoptant la première stratégie.

4.7 Conclusion

Le présent chapitre était consacré à la modélisation et à la résolution d'un problème de planification conjointe de la production et du remplacement sous contraintes de capacité de la machine et de maintenance. L'objectif était de déterminer à la fois les meilleures cadences de production et les meilleurs moments du remplacement de la pièce principale afin de minimiser les coûts totaux de la maintenance, d'amortissement, du remplacement et les coûts totaux du stockage des produits finis. Vu la complexité du modèle proposé, une nouvelle approche de résolution a été proposée combinant à la fois l'heuristique Fix-and-Relax et un algorithme génétique. Rappelons que l'idée de cette approche hybride est d'étudier les différentes possibilités du plan du remplacement à l'aide de l'algorithme génétique puis, pour chaque possibilité, une procédure de décomposition est appelée afin de décomposer le problème de production principal en plusieurs sous-problèmes de production faisables et les résoudre graduellement à travers l'heuristique Fix-and-Relax. Un exemple numérique a été présenté pour montrer la faisabilité de l'approche de la planification conjointe proposée. Les résultats obtenus ont montré aussi le profit économique et l'efficacité technique de la stratégie du remplacement basée sur la durée de vie économique par rapport à celle basée sur la durée de vie physique qui a été présenté dans le chapitre précédent.

Une extension de ce travail est détaillée dans le chapitre suivant, dans laquelle, nous supposons que les pièces de rechange utilisées pour le remplacement sont de différents types : neuves et remanufacturées.

Chapitre 5

Modélisation et résolution du problème de la planification intégrée de la production et du remanufacturing en tenant compte différentes qualités de la pièce de rechange

5.1 Introduction

La fin de vie des équipements de production devient actuellement une préoccupation majeure non seulement des fabricants, mais aussi des utilisateurs. Les décisions prises tout au long du cycle de vie, tel que le plan de production, le plan de maintenance ainsi que la qualité des opérations du remanufacturing, sont cruciales et interdépendantes.

Dans le chapitre précédent, nous avons étudié un problème de planification intégrée de la production et du remplacement. Nous avons mis en évidence l'impact commun du plan de production et de la qualité de maintenance sur les coûts de maintenances et le profil d'amortissement, et par conséquent, sur le moment opportun du remplacement. Nous avons étudié le cas où le remplacement peut être effectué seulement par des pièces de rechange neuves, ce qui permet d'assurer un niveau de fiabilité élevé après le remplacement. Cependant, nous trouvons dans certaines situations que les équipements sont utilisés sous un régime opérationnel modéré dont la performance de l'équipement cherché peut être assuré seulement par l'utilisation des pièces remanufacturées moins coûteuses par rapport à une pièce neuve. Du point de vue de l'utilisateur, il est important de déterminer à l'avance le type optimal de la pièce de rechange appropriée au prochain mode de fonctionnement.

Dans ce qui suit, nous utilisons le terme « remanufacturing de l'équipement » pour se référer à toute opération du remplacement de la pièce principale par l'une des pièces de rechange disponibles : neuve ou remanufacturée. L'objectif considéré dans ce chapitre est d'étudier l'effet réciproque entre la qualité des pièces de rechange choisies d'un côté, et les conditions opérationnelles et la qualité de maintenance d'un autre côté. Nous présentons dans la prochaine section une description détaillée de la nouvelle problématique ainsi que les différentes hypo-

thèses. Puis, dans la troisième section, nous décrivons les principaux changements dans la loi de défaillance en tenant compte à la fois le taux de production, l'efficacité de la maintenance et la qualité des pièces utilisées. Ensuite, nous exposons une formulation mathématique non-linéaire à variables entières mixtes dont les décisions de remanufacturing tiennent en compte différentes qualités de pièces de rechange. Vu la complexité de la résolution du problème dans un temps réduit, quelques modifications sur l'approche de résolution par rapport au chapitre précédent seront présentées dans la cinquième section. Afin de valider notre approche numériquement, la sixième section montre les résultats obtenus de la résolution du problème considéré. Afin de mettre en évidence l'efficacité de l'approche de résolution proposée, une comparaison avec le solveur Lingo est vouée dans la septième section. Enfin, à la dernière section de cette thèse, nous exposons une analyse de sensibilité des principaux paramètres du problème sur la planification intégrée de la production et du remanufacturing.

5.2 Description du problème et hypothèses

Le problème traité dans ce chapitre est le sujet principal de cette thèse. L'objectif est de déterminer conjointement le meilleur plan de production, les moments opportuns des opérations du remanufacturing et les meilleures qualités des pièces de rechange à choisir afin de minimiser le coût total du cycle de vie et le coût du stockage des produits finis. Comme dans les deux chapitres précédents, le système de production étudié est une machine composée toujours d'une pièce principale et d'un ensemble des pièces secondaires. Rappelons que l'équipement doit répondre à des demandes déterministes dynamiques durant un horizon du temps fini, ce qui nécessite l'adoption d'un plan de production adéquat avec la nature variable des demandes. L'horizon de production est composé de plusieurs périodes de la même durée. La cadence de production est exprimée en nombre d'unités produites par unité de temps. Elle est constante durant la même période et variable d'une période à une autre.

En termes de fiabilité, l'équipement est soumis à une dégradation stochastique qui dépend uniquement de la dégradation de sa pièce principale. Le taux de dégradation des pièces secondaires est négligeable par rapport à celui de la pièce principale. Par conséquent, les opérations de maintenance ne concernent que cette dernière. La dégradation de la pièce principale peut être mesurée par son taux de panne qui augmente avec le temps du fonctionnement et l'intensité de production. Pour faire face au problème de la détérioration, des actions de maintenance MPI régulières sont réalisées au début de chaque période afin de réduire la probabilité de panne de l'équipement. De plus, lorsqu'une panne aléatoire se produit entre deux actions MPI successives, une action MC est effectuée afin de restaurer l'équipement à son état avant la panne.

Suivant une stratégie de service après-vente, le FEOs est responsable du remanufacturing de l'équipement quand est nécessaire. Cette opération peut être effectuée seulement au début d'une période de production. Elle commence par un désassemblage complet. Ensuite, les pièces secondaires sont nettoyées et la pièce principale est remplacée par une pièce de rechange neuve ou remanufacturée, puis l'ensemble des pièces sont réassemblées. Enfin, l'équipement remanufacturé doit être testé avant qu'il soit réutilisé par son propriétaire. Les nouvelles pièces

de rechange sont supposées être de qualité $q = 0$. Les pièces récupérées sont soumises à un processus du remanufacturing au niveau de la filiale FEOs afin de prolonger leur durée de vie. Nous supposons que les pièces neuves et remanufacturées sont disponibles en tout moment. Il est à noter que les pièces de rechange remanufacturées :

- sont classées en Nq qualités en fonction de l’efficacité du processus de remanufacturing qu’elles ont subi chez le FEOs.
- ont un état initial similaire à ce d’une pièce neuve, c’est-à-dire, après l’installation d’une pièce de rechange remanufacturée, l’équipement revient à son état neuf (Aussi Bon Que Neuf).
- Leur coût est inférieur à celui d’une pièce neuve ($AC_{Nq-1} < \dots < AC_1 < AC_0$).
- En utilisant une pièce principale remanufacturée de qualité $q \geq 1$, l’équipement se détériore rapidement par rapport à un équipement constitué d’une pièce principale de qualité $q - 1$.
- Le nombre maximal d’unités pouvant être produites par un équipement constitué d’une pièce principale remanufacturée de qualité $q \geq 1$ sous un taux maximal est inférieur à celui d’un équipement constitué d’une pièce principale de qualité $q - 1$.

En termes de possession, la valeur de l’équipement diminue graduellement avec l’augmentation de sa durée d’exploitation. La charge d’amortissement dépend seulement de celle de la pièce principale. Elle peut être estimée en fonction de l’intensité de production et du temps de fonctionnement. Toutefois, la valeur de l’équipement est remise à la valeur initiale de la pièce de rechange installée après chaque opération du remanufacturing. Le système en question est illustré dans la figure 5.1.

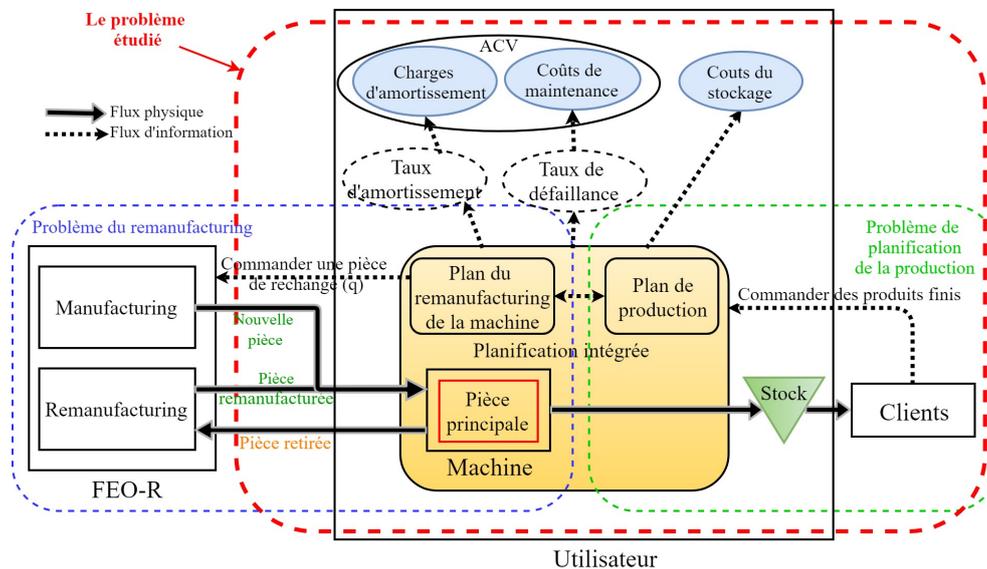


Figure 5.1 : Système étudié

5.2.1 Notations mathématiques

Nous définissons en gras les nouveaux paramètres et variables de décisions du modèle comme suit :

Les indices

n	Indice de périodes de production.
t	Indice du temps opérationnel.
q	Indice du temps opérationnel.

Les paramètres

N	Nombre de périodes de l'horizon de la planification.
Nq	Indice du temps opérationnel.
D_n	Quantité de produits demandés pour la période n (livrées à la fin de la période n).
T_n	Temps à la fin de la période n .
U^{max}	Taux de production maximal par unité de temps.
λ^{max}	Seuil maximal du taux de panne pour effectuer un remplacement.
$\lambda_{0q}(t)$	fonction du taux de panne d'un équipement qui ne fonctionne qu'avec une pièce principale de qualité q sous un taux de production U^{max} .
r_q	Facteur multiplicateur du taux de panne relatif au type de la pièce de rechange utilisée.
$\lambda_n(t)$	Fonction du taux de panne de l'équipement durant la période n (elle représente le nombre de pannes par unité du temps).
C^{rep}	Coût fixe du remplacement de la pièce principale.
CCM	Coût d'une action de maintenance corrective.
DM	Durée d'une action de maintenance préventive imparfaite.
DR	Durée d'une opération de remplacement de la pièce principale.
h	Coût du stockage unitaire des produits finis par période.
v_1	Valeur minimale que peut prendre un taux de production élevé.
v_2	Valeur minimale que peut prendre un taux de production intense.
a_n	Facteur d'accélération du taux de défaillance (HRIF)
b_n	Facteur de réduction de l'âge (ARF).
AC_q	Coût d'acquisition d'une pièce de rechange de qualité q .
K_n	Facteur d'ajustement qui varie entre 0 et 1, utilisé afin de mesurer l'effet de l'intensité de production durant la période n sur l'amortissement de l'équipement.
TPU_q	Nombre maximal d'unités pouvant être produites par un équipement constitué d'une pièce principale de qualité q sous un taux de production U^{max} .
SV	Valeur résiduelle d'un équipement à la fin de sa durée de vie (après la production de TPU sous un taux de production U^{max}) (en unité d'argent).

Les variables de décision

$$\begin{aligned}
 U_n & \text{ Taux de production au cours de la période } n. \\
 X_{q,n} & = \begin{cases} 1 & \text{si la pièce principale est remplacé par une pièce de rechange de qualité } q \\ & \text{au début de la période } n \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \\
 Y_{q,n} & = \begin{cases} 1 & \text{si la pièce principale utilisée durant la période } n \text{ est de qualité } q \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}
 \end{aligned}$$

Les résultats

$$\begin{aligned}
 OT_n & \text{ Temps opérationnel prévu au cours de la période } n. \\
 DT_n & \text{ Temps d'arrêt prévu au cours de la période } n. \\
 CPM_n & \text{ Coûts engendrés en exécutant une action MPI au début de la période } n. \\
 FN_n & \text{ Nombre de pannes moyen prévu au cours de la période } n. \\
 C_n & \text{ Coût de maintenance total prévu durant la période } n. \\
 S_n & \text{ Quantité de produits manufacturés restant en stock à la fin de la période } n. \\
 V_n & \text{ Valeur prévue de l'équipement à la fin de la période } n \text{ (en unité d'argent).} \\
 \text{Deprate}_q & \text{ Taux d'amortissement moyen (en unité d'argent par unité du temps) en utilisant} \\
 & \text{une pièce principale de la qualité } q \text{ sous un taux de production intensif. } (U_n \in [b, U^{max}]). \\
 Depr_n & \text{ Charge d'amortissement prévue durant la période } n \text{ (en unité d'argent).}
 \end{aligned}$$

5.3 Modélisation de la loi de défaillance en tenant compte du remanufacturing

Dans le présent problème, les opérations du remanufacturing sont effectuées en utilisant une des divers types de pièces de rechange (neuves ou remanufacturées) ayant différents modes de dégradation (taux de panne différents). En réalité, il y a une forte probabilité que la vitesse de dégradation d'une pièce de rechange remanufacturée soit supérieure à celle d'une pièce neuve [Diallo et al., 2014]. Ainsi, la loi de défaillance EPHM utilisée dans les modèles précédents pour mesurer la détérioration de la machine ne peut pas être utilisée dans la présente situation (elle est valable seulement dans le cas où les pièces de rechange ont le même profil de dégradation). Dans cette optique, soit $\lambda_{00}(t)$ la fonction de taux de panne nominal d'un nouvel équipement (nouvelle pièce) lorsqu'il fonctionne sous un taux de production maximal, et $\lambda_{0q}(t)$ la fonction du taux de panne d'un équipement composé d'une pièce principale de qualité q lorsqu'il fonctionne sous un taux de production U^{max} .

$$\lambda_{0q}(t) = r_q \lambda_{00}(t), \quad \forall q \in \{0, 1, \dots, Nq-1\}, t \in [0, OT_n] \quad (5.1)$$

Où r_q représente le facteur multiplicateur du taux de panne relatif au type de la pièce de rechange utilisée. Ce facteur est utilisé pour refléter l'effet du processus du remanufacturing des pièces récupérées sur leurs modes de dégradation par rapport à une pièce nouvelle. Ainsi, la fonction du taux de panne $\lambda_n(t)$ pendant une période donnée n peut être exprimée comme suit :

$$\lambda_n(t) = \begin{cases} \frac{U_n}{U_{max}} \lambda_{0q}(t) & \text{si } X_{q,n} = 1 \\ \frac{U_n}{U_{max}} A_n \lambda_{0q}(b_n y_n + t) & \text{si } X_{q,n} = 0 \text{ et } Y_{q,n} = 1 \end{cases} \quad \forall t \in [0, OT_n], q \in \{0, 1, \dots, Nq - 1\} \quad (5.2)$$

La figure 5.2 montre un exemple de la variation du taux de panne lorsque des actions MPI et des opérations du remanufacturing sont effectuées.

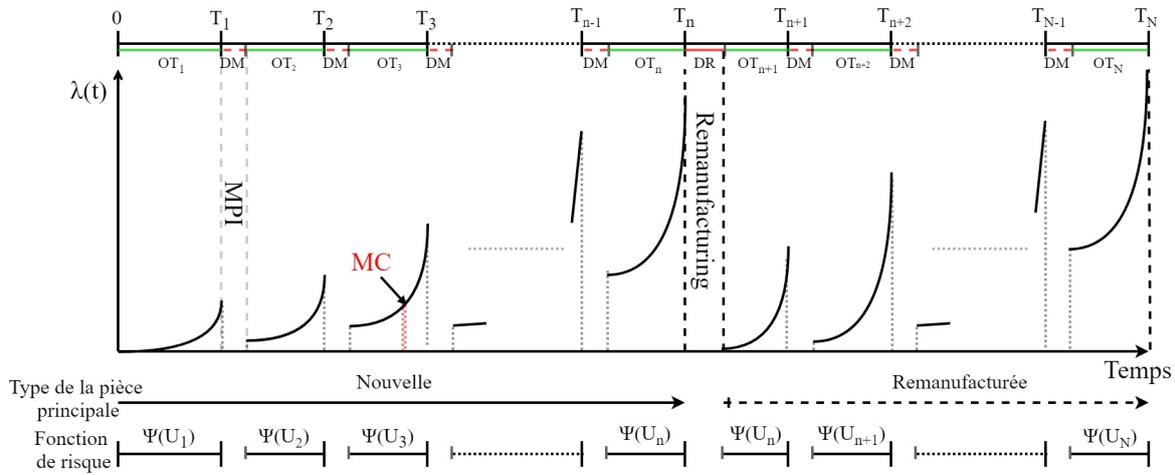


Figure 5.2 : Exemple de la variation du taux de défaillance sous l'effet conjugué du taux de panne, de la maintenance imparfaite et du remanufacturing

5.4 Formulation mathématique du problème

Le modèle mathématique présenté dans cette section est un modèle non-linéaire en nombres entiers mixte qui vise à résoudre le problème de la planification intégrée de la production et du remanufacturing. Comme dans les modèles précédents, une variable de décision entière U_n est utilisée pour représenter le taux de production de chaque période. En ce qui concerne le plan du remanufacturing, la variable de décision binaire $X_{q,n}$ est utilisée pour représenter à la fois le calendrier des actions du remanufacturing et le type de la pièce de rechange à sélectionner pour chaque action. En outre, la variable de décision complémentaire $Y_{q,n}$ est adoptée pour identifier le type de la pièce de rechange (neuve ou remanufacturée) installé durant chaque période n .

Le problème de planification intégrée considéré peut maintenant être modélisé comme

suit :

$$\begin{aligned} \text{Minimize } TC = & \sum_{n=1}^N C_n + \sum_{n=1}^N h.S_n + \sum_{q=0}^{Nq-1} X_{q,1} AC_q \\ & + \sum_{n=2}^N \left[\sum_{q=0}^{Nq-1} (X_{q,n} (AC_q - V_{n-1})) + C^{rep} \sum_{q=0}^{Nq-1} X_{q,n} \right] - V_N \end{aligned} \quad (5.3)$$

$$S_n = S_{n-1} + U_n OT_n - D_n, \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (5.4)$$

$$U_n \leq U^{max}, \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (5.5)$$

$$S_n \geq 0, \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (5.6)$$

$$V_n \geq SV, \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (5.7)$$

$$\sum_{q=0}^{Nq-1} X_{q,n} \leq 1, \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (5.8)$$

$$Y_{q,n} = \begin{cases} Y_{q,n-1} & \text{si } \sum_{q'=0}^{Nq-1} X_{q',n} = 0 \\ X_{q,n} & \text{sinon} \end{cases} \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\}, q \in \{0, 1, \dots, Nq-1\} \quad (5.9)$$

$$U_n \in \mathbb{N}, X_{q,n} \in \{0, 1\} \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\}, q \in \{0, 1, \dots, Nq-1\} \quad (5.10)$$

Le premier terme de la fonction objectif (5.3) représente le coût total de maintenance. Le deuxième terme représente le coût total du stockage des produits finis. Le troisième terme est le coût d'acquisition de la pièce de rechange utilisée au début de l'horizon. Le quatrième terme représente le coût total du remanufacturing. Si une action du remanufacturing est effectuée au début de la période n : (i) un coût variable est intégré, cette variable représente la différence entre le coût d'acquisition AC_q de la pièce de rechange commandée de qualité q et la valeur résiduelle de la pièce enlevée ; (ii) en outre, un coût fixe C^{rep} est également requis, il comprend les frais du transport de la pièce de rechange commandée, les frais de désassemblage/assemblage, du nettoyage et de tests. Finalement, le cinquième terme se réfère à la valeur résiduelle de la pièce en cours d'utilisation à la fin de l'horizon.

Comme dans les modèles précédents, la contrainte (5.4) concerne l'équilibrage du stock. La contrainte (5.5) concerne la capacité de production par unité de temps. La contrainte (5.6) garantit la non-négativité du niveau du stock à la fin de chaque période. La contrainte (5.7) empêche la valeur de l'équipement (de la pièce principale) de descendre au-dessous d'une valeur minimale SV . La contrainte (5.8) garantit l'unicité du type de la pièce de rechange sélectionnée pour remplacer la pièce retirée dans le cas où une opération du remanufacturing est effectuée au début de la période n . La contrainte (5.9) relie entre les variables de décision $Y_{q,n}$ et $X_{q,n}$ afin de garantir que le type de la pièce en service ne peut être modifié avant la prochaine opération du remanufacturing. Finalement, la contrainte (5.10) définit la nature des variables de décision.

Pour estimer les coûts de maintenance, nous nous référons aux formules utilisées dans le modèle principal présenté dans le chapitre 4. Les quelques changements mineurs sont men-

tionnées en couleur rouge.

$$C_n = \begin{cases} CCM + FN_n & \text{si } \sum_{q'=0}^{Nq-1} X_{q',n} = 1 \\ CCM + FN_n + CPM_n & \text{sinon} \end{cases} \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (5.11)$$

$$DT_n = \begin{cases} 0 & \text{si } n=1 \\ DR & \text{si } \sum_{q'=0}^{Nq-1} X_{q',n} = 1 \\ DM & \text{sinon} \end{cases} \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (5.12)$$

Le système d'équations (5.11) est utilisé pour l'estimation des coûts de maintenance dans les deux types de période suivants : (i) Les périodes au début desquelles une opération du remanufacturing est effectuée y a compris la première période, et (ii) les périodes au début desquelles une action de maintenance préventive est effectuée. De la même manière, le temps d'arrêt DT_n au début de chaque période n peut être estimé.

De même, le modèle d'amortissement modifié basée sur l'activité subit des modifications mineures en tenant compte du coût d'acquisition et de la nature variée du profil d'amortissement des pièces de rechange.

$$Depr_n = \sum_{q=0}^{Nq-1} (Y_{q,n} Depr_{te_q}) K_n U_n OT_n, \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (5.13)$$

Rappelons que la valeur de l'équipement est améliorée après chaque opération du remanufacturing de la machine ; et que sa valeur résiduelle attendue V_n à la fin de la $i^{\text{ème}}$ période peut être obtenue en déduisant la charge d'amortissement $Depr_n$ de sa valeur attendue à la fin de la période précédente.

$$V_n = \begin{cases} \sum_{q'=0}^{Nq-1} AC_{q'} - Depr_n & \text{si } \sum_{q'=0}^{Nq-1} X_{q',n} = 1 \\ V_{n-1} - Depr_n & \text{sinon} \end{cases} \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (5.14)$$

5.5 Approche de résolution proposée

Le problème traité dans ce chapitre présente les mêmes caractéristiques de celui du chapitre précédent. Ainsi, l'algorithme génétique hybride proposé dans le chapitre précédent peut être adopté pour la résolution du présent problème. Néanmoins, la variable de décision liée à la planification du remanufacturing dans ce problème détermine à la fois le timing des opérations du remanufacturing et les types des pièces de rechanges à choisir, ce qui nécessite une modification légère au niveau du codage du chromosome.

Dans la nouvelle représentation, chaque chromosome de la population contient les valeurs des variables $X_{q,n}$ ce qui définit une solution du plan du remanufacturing. La structure des chromosomes reste la même : elle est basée sur les entités, c'est-à-dire si on a N périodes de production, notre chromosome (solution potentielle) sera représenté sous forme d'un vecteur

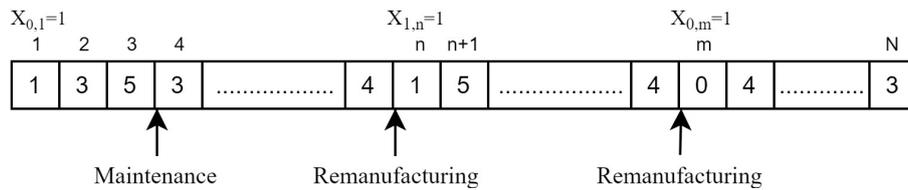


Figure 5.3 : Structure du chromosome

de taille N , où chaque gène n ($n \leq N$) comporte une information sur le type d'opération qui doit être accomplie à la période pertinente n (voir la figure 5.3). Cependant, l'information dans cette nouvelle représentation est exprimée par un nombre entier compris entre 0 et $2Nq - 1$. Si ce nombre vaut une des valeurs possibles de q ($0, 1, Nq - 1$), alors une opération de remanufacturing doit prendre place au début de cette période en utilisant une pièce de rechange de qualité q ($X_{q,n} = 1$); sinon, seule une intervention de maintenance préventive imparfaite doit être effectuée au début de la période n . La figure 5.3 montre un exemple illustratif d'un chromosome.

La solution présentée par le chromosome 5.3 consiste à remanufacturer l'équipement deux fois : (i) une première fois au début de la période n en utilisant une pièce de rechange de qualité $q = 1$; (ii) une deuxième opération au début de la période m en utilisant une pièce neuve $q = 0$. Notant que la pièce installée au début de l'horizon est neuve.

5.6 Expériences numériques et analyse

5.6.1 Les données numériques

Dans cette section, nous reprenons les mêmes demandes et paramètres considérés dans le chapitre précédent. Trois types de pièces de rechange avec des paramètres différents sont considérés. La loi de défaillance nominale (taux de panne relative à l'utilisation d'une pièce neuve sous un taux de production maximal) est définie par une distribution Weibull avec un paramètre d'échelle égal à 3 et un paramètre de forme égal à 110.

Tableau 5.1 : Demandes mensuelles moyennes

	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Année 1	160	200	230	270	240	180	240	190	100	220	200	220
Année 2	200	290	260	220	230	380	220	240	200	190	180	140
Année 3	130	110	100	120	100	135	120	90	90	140	130	90

$$\lambda_0(t) = \frac{3}{110} \left(\frac{t}{110} \right)^2 \quad (5.15)$$

L'ensemble des tableaux ci-dessous illustrent les valeurs des différents paramètres considérés.

Tableau 5.2 : Paramètres du problème

(a) Paramètres liés aux pièces de rechange			
q	$AC (ua)$	r	$Deprate$
0	50000	1	10
1	32000	1.09	9.86
2	25000	1.2	9.72

(b) Paramètres liés à la MPI				(c) Facteur d'ajustement de l'amortissement	
Taux de défaillance	CPM	a	b	Intensité de la production	K_n
$\lambda_{n-1}(OT_{n-1}) < 0.003$	300	1.1	0.2	$U_n < 6$	0.6
$0.003 \leq \lambda_{n-1}(OT_{n-1}) < 0.006$	400	1.15	0.25	$6 \leq U_n < 8$	0.8
$\lambda_{n-1}(OT_{n-1}) \geq 0.006$	500	1.17	0.35	$8 \leq U_n \leq U^{max}$	1

(d) Paramètres restants					
U^{max}	DM	DR	CCM	h	C^{rep}
10	3 jours	6 jours	3000 ua	5 ua	5000 ua

Tableau 5.3 : Paramètres de l'AG

NB	i	pr	p_c	p_m
100	100	10	0.9	0.1

5.6.2 Les résultats obtenus

La figure 5.4 résume les résultats obtenus par l'AGH. Il présente les meilleurs plans de production et du remanufacturing obtenus avec un coût total égal à 85711 ua.

Les résultats obtenus permettent de constater que l'équipement doit être remanufacturé pour la première fois après 11 périodes de service. La meilleure cadence de production obtenue durant le premier cycle varie entre élevée et intensive; elle prend une valeur minimale égale à 6 produits/ut et une valeur maximale égale à U^{max} sur le choix de la pièce de rechange, l'analyse des demandes (tableau 5.1) nous permet de relever que les périodes qui suivent la période 11 sont caractérisées par des demandes élevées. Cette contrainte oblige l'équipement à fonctionner intensivement tout au long de ces périodes; il est donc préférable de choisir une nouvelle pièce de rechange ($q = 0$) pour le procédé de remanufacturing afin d'assurer un niveau de performance élevé en adéquation avec la nature des conditions de fonctionnement futures.

Selon les résultats du deuxième cycle, l'équipement doit fonctionner intensivement au début et au milieu de ce cycle pendant lequel la cadence de production atteint le niveau maximal U^{max} trois fois. Ainsi, ce mode de fonctionnement entraîne une augmentation accélérée du taux de panne et des coûts de maintenance. Par conséquent, une deuxième opération du remanufacturing doit être effectuée au début de la période 22. Dans ce cas, la pièce de rechange à sélectionner est de type "remanufacturée", en raison de la nature de la prochaine cadence de

production qui prend une valeur modérée par rapport à celles des cycles de production précédents. Concernant le profil de dégradation au cours de ce cycle, une différence significative dans le taux de panne est clairement notée durant ce cycle par rapport à celui des cycles précédents. Cette différence confirme évidemment l'impact de l'intensité de production sur l'état général de l'équipement.

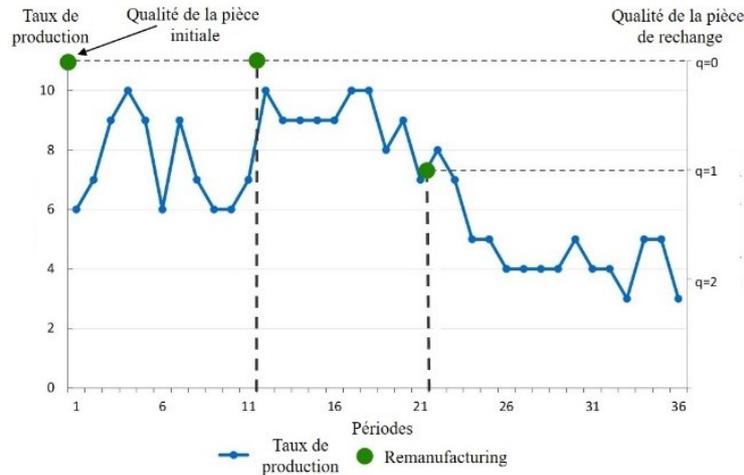


Figure 5.4 : Taux de production par période

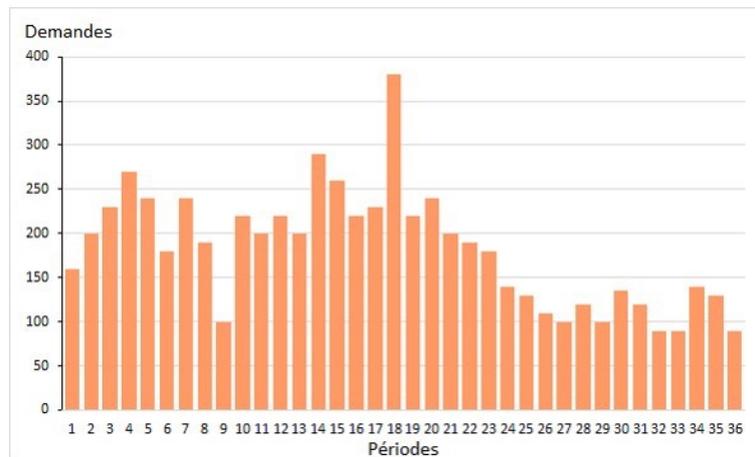


Figure 5.5 : Demande par période

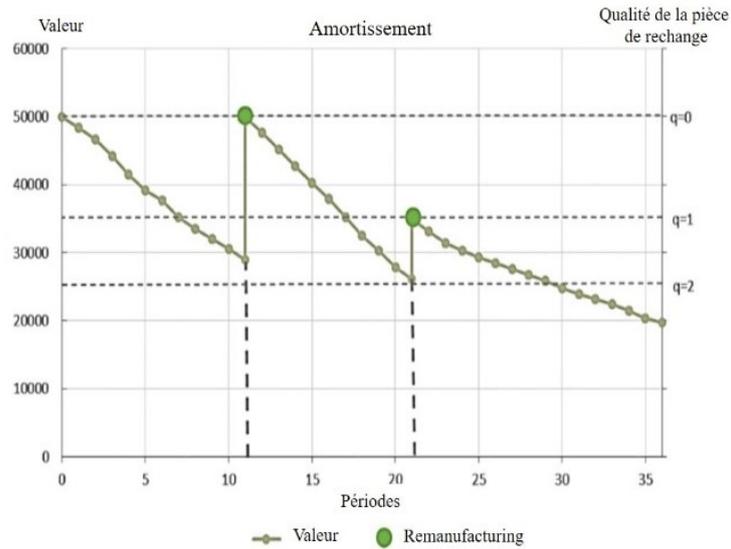


Figure 5.6 : Amortissement de la valeur de la machine

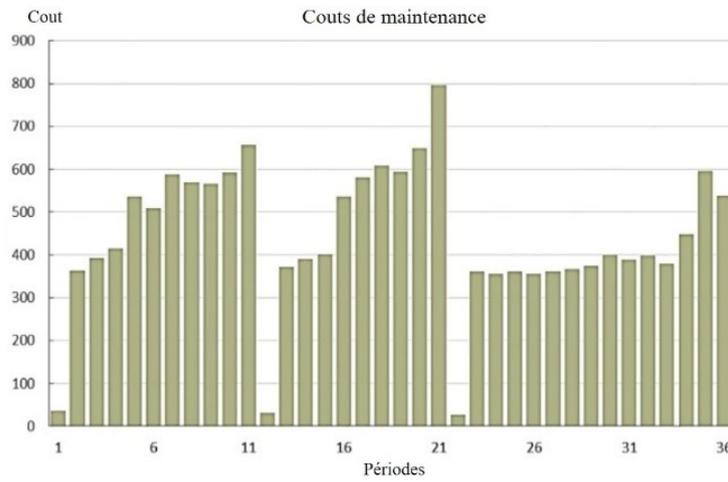


Figure 5.7 : Coûts de maintenance par période

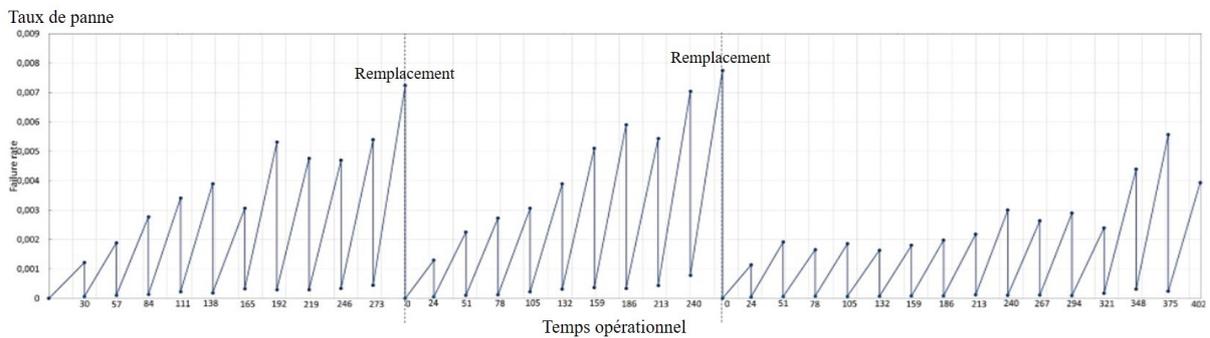


Figure 5.8 : Variation du taux de panne

5.7 Mesure de performance de l'approche de résolution

Afin de prouver l'efficacité de l'algorithme génétique hybride, nous avons comparé les résultats obtenus par ce dernier avec ceux obtenus par le solveur Lingo. Les expérimentations de la section 5.6 ont été effectuées pour un horizon de $N = 36$ périodes, $Nq = 3$ types de pièces de rechange et un intervalle de cadence de production U_n de 0 à 10, ce qui donne un espace de recherche de $3^{36}.11^{36}$ solutions faisables et non faisables. Pour cette taille d'espace de recherche et avec un modèle non-linéaire, la résolution par le solveur Lingo est impossible pour un horizon de 36 périodes. Pour cette raison, nous avons effectué des tests avec des horizons réduits (6 périodes, 9 périodes, 12 périodes.....). Le tableau 5.4 présente les résultats de comparaison entre l'AGH et ceux donnés par le solveur Lingo.

Tableau 5.4 : Mesure de performance de l'approche de résolution

N	Solveur Lingo			AGH		
	Fitness	CPU	GAP	Fitness	CPU	GAP
6	14431	4m30s	0	14509	4s	0.5%
9	21551	16m30s	2.5%	21017	7s	/
12	31253	4h40m	5%	29684	11s	/
18	59023	21m08s	10%	53639	13s	/
24				69686	22s	/
30	Aucune solution trouvée *	>1h	/	77899	24s	/
36				85711	43s	/

* : Le solveur est arrêté à cause de l'instabilité numérique.

En analysant ces résultats, nous pouvons identifier deux classes d'instances différentes : la première classe concerne les instances dont l'horizon ne dépasse pas 18 périodes ; la deuxième classe regroupe les instances avec 24 périodes où plus. Pour la première classe, nous remarquons que l'AGH surpasse le solveur Lingo en termes de la qualité de la solution avec une erreur relative significative, sauf pour le cas de la première instance (6 périodes) dont le solveur donne la meilleure solution avec une erreur relative faible (5%) par rapport à l'AGH. Quant au temps d'exécution, l'AGH a montré son efficacité dans la résolution du problème dans un temps très court par rapport au solveur.

Pour la deuxième classe, la remarque principale est que le solveur Lingo présente une incapacité totale à cause de la complexité importante du problème, vu la taille de l'espace de recherche d'une part, et la non-linéarité du modèle d'une autre part. Par contre, cette complexité n'a pas empêché l'AGH de résoudre le problème en moins d'une minute. Il convient de noter que le temps de calcul pour l'AGH reste faible pour toutes les instances et il est directement proportionnel à la longueur de l'horizon.

5.8 Analyse de sensibilité

5.8.1 Effet de la variation de la demande sur les plans de production et de remanufacturing

La section précédente portait sur l'analyse d'un exemple où les demandes variaient entre élevées, moyennes et faibles, tout au long du même horizon de planification. Dans cette section, trois scénarios sont comparés. Dans chaque scénario, l'équipement utilisé est supposé répondre à une demande homogène : forte (scénario1), moyenne (scénario 2), ou faible (scénario3), pendant le même horizon de planification. L'objectif visé est d'analyser l'impact des variations de la demande sur le plan du remanufacturing. La figure 5.9 présente les demandes pour chaque scénario ; dans le premier scénario, l'équipement est utilisé pour répondre à des demandes élevées ; dans le deuxième scénario, il est utilisé pour répondre à des demandes moyennes ; dans le troisième scénario, il est utilisé pour répondre à des demandes faibles.

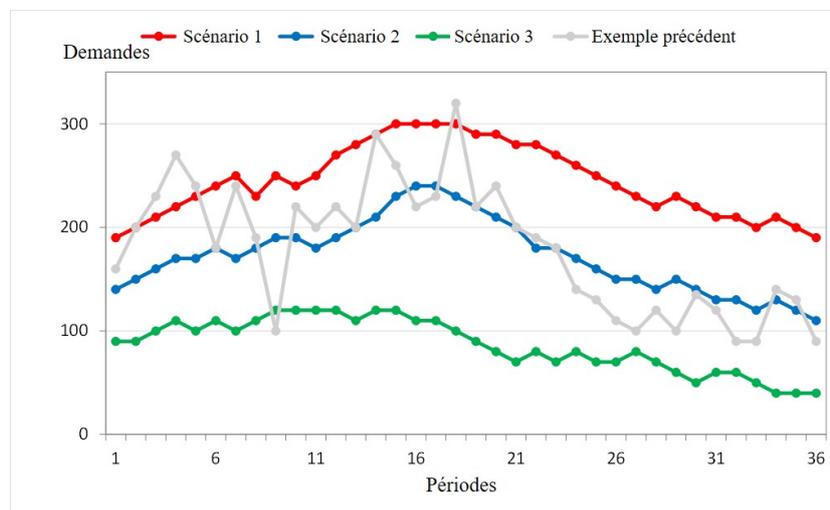


Figure 5.9 : Demandes pour chaque scénario

La figure 5.10 illustre les résultats obtenus pour les trois cas. Pour répondre aux demandes reçues, le taux de production doit varier :

- En situation 1 : entre 7 et 10 produits/jour,
- En situation 2 : entre 4 et 9 produits/jour,
- En situation 3 : entre 1 et 5 produits/jour.

La première remarque concerne les demandes fortes qui correspondent à des valeurs très élevées de la cadence de production. La seconde remarque se rapporte au fait que dans le scénario 1, les demandes des périodes de 13 à 22 dépassent la capacité de production des équipements (270 produits par période) ; ainsi, la production à l'avance et le stockage des produits fabriqués au cours des périodes précédentes sont nécessaires afin d'éviter la rupture du stock, même si les coûts du stockage sont élevés.

Pour assurer ces conditions opérationnelles avec un coût minimal, l'équipement du scénario 1 et 2 doit être neuf (contient une nouvelle pièce principale) au début de l'horizon de la

planification ; il est par ailleurs préférable de remanufacturer l'équipement deux fois. Pour le scénario 1, il est remanufacturé au début de la période 12 (la première fois) et au début de la période 25 (la deuxième fois). Pour le scénario 2, l'équipement est remanufacturé au début de la période 14 (la première fois) et au début de la période 24 (la deuxième fois).

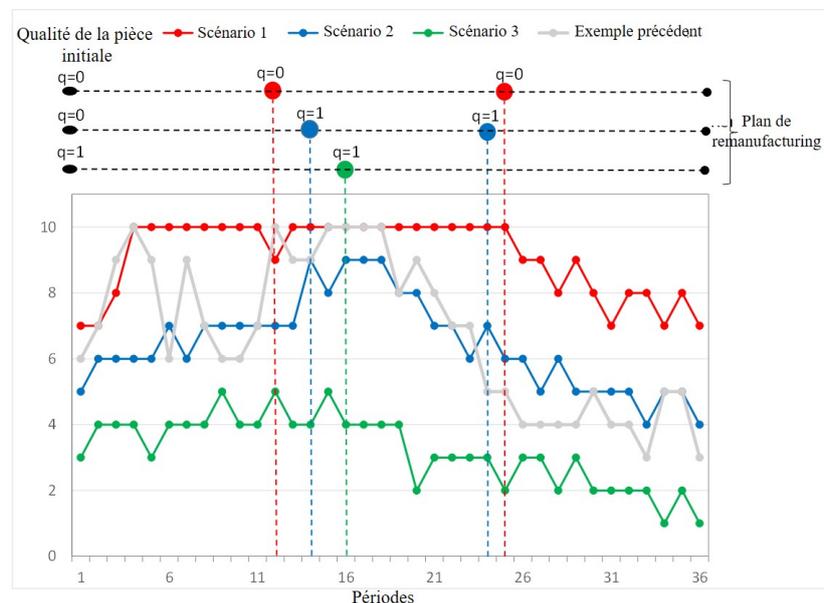


Figure 5.10 : Effet des variations de la demande sur les plans de production et de remanufacturing

Pour le scénario 3, la machine commence ses opérations avec une pièce remanufactuée dès le début. Cette pièce est remplacée une fois au début de la période 16.

Partant de la comparaison des résultats de ces différents scénarios, les observations suivantes peuvent être faites :

- Au sujet du timing des actions du remanufacturing : nous pouvons constater que les actions du remanufacturing ont lieu tôt, lorsque l'équipement fonctionne de manière intensive (scénario 1). Toutefois, lorsque le taux de production est faible, il est préférable de retarder le remanufacturing, même si la pièce utilisée est de type "remanufactuée" (scénario 3).
- À propos de la qualité du processus du remanufacturing : l'intensité de production accomplie par l'équipement du scénario 1 au cours de tout l'horizon nécessite l'utilisation d'une pièce de rechange de qualité « neuve ». Toutefois, dans le scénario 3, dans lequel l'équipement est utilisé dans des conditions opérationnelles faibles, il est économiquement plus souhaitable d'utiliser une pièce de rechange remanufactuée plutôt qu'une pièce neuve (afin de profiter du prix bas de la pièce de rechange remanufactuée). Toutefois, dans le scénario 2, deux solutions (plans du remanufacturing) méritent d'être mentionnées. Selon la première solution (la meilleure), présentée à la figure 5.9, une pièce de rechange remanufactuée ($q = 1$) est sélectionnée pour le processus du remanufacturing aux périodes 14 et 24. Pour la deuxième solution, une nouvelle pièce ($q = 0$) est sélectionnée à la période 14 et une pièce remanufactuée ($q = 1$) est sélectionnée à la période 24. À partir de cette observation, et en référence

à l'exemple précédent, nous pouvons déduire que si la prochaine cadence moyenne de production sera inférieure à 6 produits/jour, il est préférable de choisir une pièce remanufacturée, et si elle sera supérieure à 8 produits/jour, une nouvelle pièce est nécessaire. De même, dans le cas où la cadence varie entre 6 et 8 produits/jour, les pièces neuves et remanufacturés ($q = 1$) peuvent toutes deux être utilisées.

5.8.2 Effet du taux de panne des pièces de rechange remanufacturées sur le plan de remanufacturing

Dans cette sous-section, nous cherchons à analyser l'effet de la détérioration de la pièce de rechange sur le coût total du cycle de vie. Un seul type de pièces de rechange remanufacturées est considéré afin de mener une analyse plus claire et plus intelligible. Tous les paramètres sont tenus fixes, sauf r_1 , afin d'analyser l'évolution des décisions de remanufacturing au fur et à mesure que r_1 augmente (Rappelons que r_q est un facteur multiplicateur du taux de panne correspondant à la pièce utilisée ; ici $q = 1$). Nos expériences numériques dans cette sous-section sont menées pour différentes valeurs de r_1 , allant de 1 à 1,15.

Tableau 5.5 : Effet de la variation du r_1 sur le plan de remanufacturing

r_1	[1 , 1.01]	[1.02 , 1.09 [[1.09 , 1.15]
TC	[84978 , 85021]	[85380 , 85768 [85768
Temps du reman	0 - 12 - 22	0 - 12 - 22	0 - 12 - 22
Qualité de la pièce	1 - 1 - 1	1 - 0 - 1	0 - 0 - 0

Le tableau 5.5 illustre la diversité de la pièce de rechange choisie et l'augmentation du coût total en fonction de l'augmentation de r_1 . Avec $r_1 \leq 1.01$, l'utilisateur considère les pièces de rechange neuves et remanufacturées comme pratiquement identiques en termes de fiabilité. Toutefois, dans la présente analyse, les résultats montrent qu'il est économiquement préférable de choisir une pièce remanufacturée à chaque moment de remanufacturing. Cela tient au fait que le taux d'amortissement d'une pièce remanufacturée est inférieur à celui d'une pièce neuve ($Deprate_1 < Deprate_0$).

Dans le cas où $1.01 < r_1 < 1.09$, une nouvelle pièce ne doit être sélectionnée que si les conditions de fonctionnement passent à intense (période 12). Cependant, quand $r_1 \geq 1.09$, alors le taux de détérioration d'une pièce remanufacturée, dans le cas d'une production maximale, est supérieur d'au moins 8% à celui d'une nouvelle pièce. Dans ce cas, seules les pièces neuves doivent être sélectionnées pour effectuer les opérations du remanufacturing. Il est donc évident que $r_1 = 1.09$ est le seuil à partir duquel le choix d'une pièce remanufacturée n'est pas recommandé.

5.8.3 Effet du taux d'amortissement des pièces de rechanges remanufacturées sur le plan de remanufacturing

Toutes les données d'entrée sont maintenues constantes, sauf AC_1 et TPU_1 . Le tableau 5.6 illustre le coût total quasi-optimal pour différentes valeurs de $Deprate_1$. La principale remarque à souligner est que dans le cas où $Deprate_1$ dépasse $Deprate_0$ (i.e. $Deprate_1 \geq 10$), la pièce de rechange remanufacturée n'est pas recommandée même si son prix d'acquisition est le plus bas (voir les cellules avec texte bleu).

Tableau 5.6 : Effet de la variation de $Deprate_1$ sur le plan de remanufacturing

		AC_1			
		25000	30000	35000	40000
3000	$Deprate_1$	8.33	10	11.66	13.33
	TC	77030	85768	85768	85768
	Temps du rem	0 - 12 - 22	0 - 12 - 22	0 - 12 - 22	0 - 12 - 22
	Qualité	1 - 1 - 1	0 - 0 - 0	0 - 0 - 0	0 - 0 - 0
TPU_1 4000	$Deprate_1$	6.25	7.5	8.75	10
	TC	65264	72340	79381	85768
	Temps du rem	0 - 11 - 19	0 - 12 - 22	0 - 12 - 22	0 - 12 - 22
	Qualité		1 - 1 - 1		0 - 0 - 0
5000	$Deprate_1$	5	6	7	8
	TC	58189	63849	69506	75149
	Temps du rem	0 - 11 - 19	0 - 11 - 19	0 - 11 - 19	0 - 11 - 19
	Qualité		1 - 1 - 1		

5.8.4 Effet conjoint des taux de défaillance et d'amortissement des pièces de rechange remanufacturées sur le plan de remanufacturing

Nous analysons dans cette partie l'effet conjoint de la variation du taux de détérioration et d'amortissement de la pièce remanufacturée sur la décision de sélection des pièces de rechange. Nous varions le premier paramètre r_1 entre 1 et 1.2, et le deuxième $Deprate_1$ entre 7 et 11 en même temps pour avoir plusieurs combinaisons. Le tableau 5.7 montre les résultats obtenus de la sélection des pièces de rechange. Sachant que le nombre des opérations du remanufacturing obtenus dans tous les scénarios est égal à 2, la première valeur dans chaque case indique la qualité de la pièce installée au début de l'horizon tandis que la deuxième et la troisième valeur indiquent la qualité des deux pièces de rechange utilisées pour les deux opérations du remanufacturing.

Tableau 5.7 : Effet conjoint de la variation de r_1 et $Deprate_1$ sur le plan du remanufacturing

		$Deprate_1$						
		7	8	9.25	9.5	9.75	10	11
	1	1-1-1	1-1-1	1-1-1	1-1-1	1-1-1	0-0-0	0-0-0
	1.06	1-1-1	1-1-1	1-1-1	1-1-1	1-1-1	0-0-0	0-0-0
	1.09	1-1-1	1-1-1	1-1-1	1-1-1	1-1-1	0-0-0	0-0-0
r_1	1.12	1-1-1	1-1-1	1-1-1	1-1-1	0-0-0	0-0-0	0-0-0
	1.15	1-1-1	1-1-1	1-1-1	1-1-1	1-0-0	0-0-0	0-0-0
	1.2	1-1-1	1-1-1	1-1-0	1-1-0	0-0-0	0-0-0	0-0-0
	1.3	1-1-1	1-1-0	0-0-0	0-0-0	0-0-0	0-0-0	0-0-0

Les principales conclusions sont les suivantes :

1. La pièce remanufacturée représente toujours le meilleur choix dans les cas où (les cases en vert) :
 - Son taux d’amortissement est inférieur ou égal à 9, quel que soit son taux de défaillance dans l’intervalle [1, 1.2].
 - Son taux d’amortissement est entre 9 et 9.5, et son taux de défaillance ne dépasse pas 1.15.
 - Son taux d’amortissement est entre 9.5 et 9.75, et son taux de défaillance ne dépasse pas 1.09.
2. La pièce remanufacturée n’est pas préférable dans les cas où (les cases en rouge) :
 - Son taux d’amortissement dépasse celui de la pièce neuve ($Deprate_0 = 10$), quel que soit son taux de défaillance r_1 .
 - Son taux d’amortissement est entre 9.75 et 10 et son taux de défaillance dépasse 1.12.
 - Son taux d’amortissement est entre 9.25 et 9.75 et son taux de défaillance égal à 1.3.
3. Les deux types de pièce sont utilisés durant l’horizon dans les cas restants (les cases en noir).

5.8.5 Effet du coût fixe du remanufacturing sur le plan de remanufacturing

Une analyse est conduite avec tous les paramètres de la section 5.5, à l’exception du coût fixe du remanufacturing C^{rem} qui varie entre 2000 mu et 9000 ua. L’augmentation de ce coût de 2000 ua à 8800 ua n’a aucun impact sur le timing et la qualité des opérations du remanufacturing. Comme le montre le tableau 5.8, la première opération est accomplie à la période 12 en utilisant une nouvelle pièce de rechange, tandis que la seconde est accomplie à la période 22 en utilisant une pièce remanufacturée. Cependant, lorsque C^{rep} atteint 8800 ua, les décisions du remanufacturing sont modifiées. Les résultats obtenus permettent de constater que l’équipement ne doit pas être remanufacturée qu’une seule fois à la période 15 en recourant à une pièce neuve. À noter que la pièce installée au début de l’horizon est neuve.

Tableau 5.8 : The effect of C^{rep} on the remanufacturing plan

C^{rep}	[2000 , 8800 [[8800 , 9000 [
TC	[79711 , 93506 [[93506 , 93706]
Temps du rem	0 - 12 - 22	0 - 15
Qualité de la pièce	0 - 0 - 1	0 - 0

Les figures 5.11 et 5.12 montrent les différences dans l'état et la valeur des pièces retournées quand C^{rep} prend les deux valeurs de 5000 ua dans le cas 1 et 9000 ua dans le cas 2, respectivement. Concernant l'état du matériel, dans le premier cas, son remanufacturing précoce (après 12 périodes d'utilisation) permet à l'utilisateur d'éviter la détérioration accélérée de son bien durant les périodes suivantes; ceci est clairement apparent lorsque C^{rep} dépasse 8800 ua (cas 2). De plus, l'FEO-R peut, dans le premier cas, bénéficier de deux pièces retournées ayant un taux de panne bien inférieur à celui de la pièce retournée dans le deuxième cas. Cet avantage permet de réduire les heures du travail et la consommation de ressources lors du remanufacturing de ces pièces dans l'usine de l'FEO-R, ce qui permet de réduire les coûts.

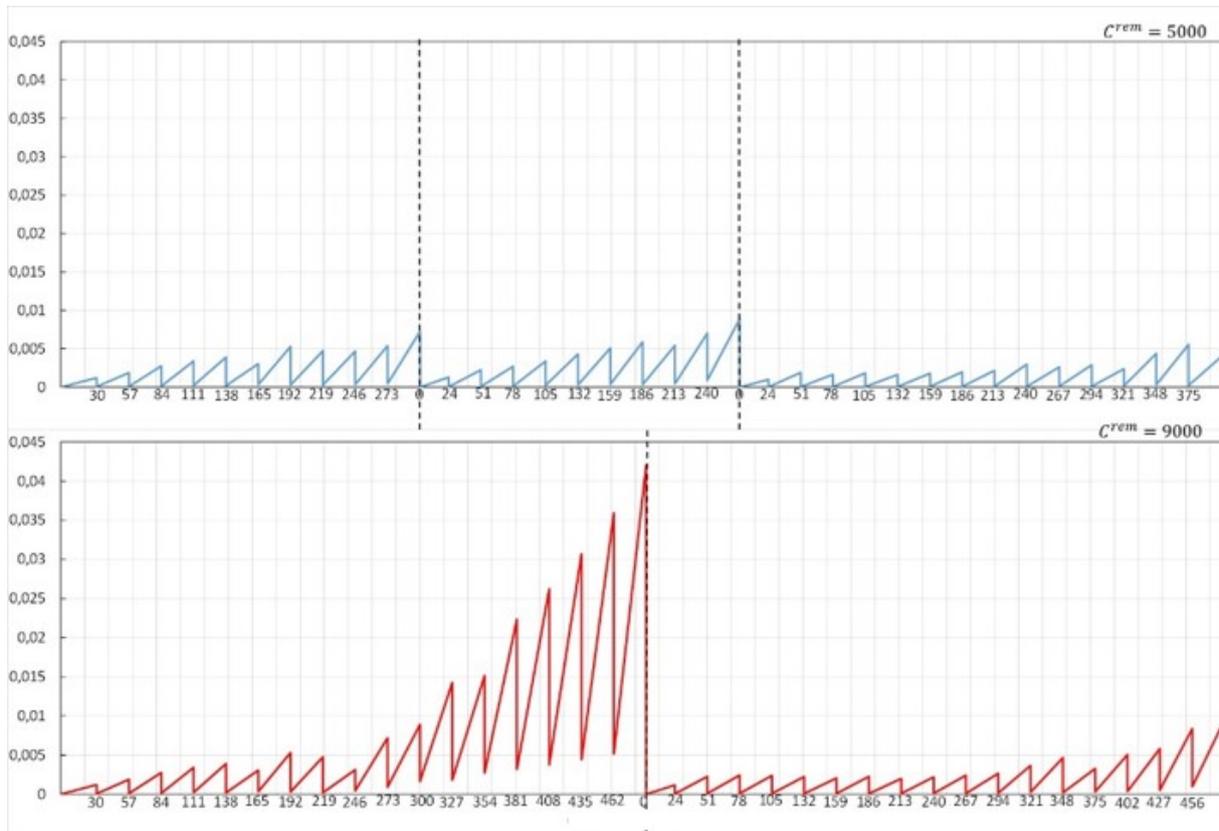


Figure 5.11 : Effet de la variation C^{rep} sur la détérioration de la machine

Quant à la valeur résiduelle de l'équipement, nous pouvons clairement constater que les pièces récupérées dans le premier cas sont plus précieuses que celles récupérées dans le deuxième cas. Dans le premier cas, les deux pièces retournées ne perdent qu'environ la moitié de leur valeur originale, ce qui est économiquement plus avantageux pour l'utilisateur lors du remplacement des pièces; alors que dans le deuxième cas, la pièce retournée perd presque quatre cinquièmes (4/5) de sa valeur originale. Par inférence, il est préférable de procéder au

remanufacturing précoce, tant d'un point de vue économique que technique, mais dans le cas où le C^{rep} est très élevé, le remanufacturing n'est pas recommandée et il est préférable de le reporter le plus longtemps possible.

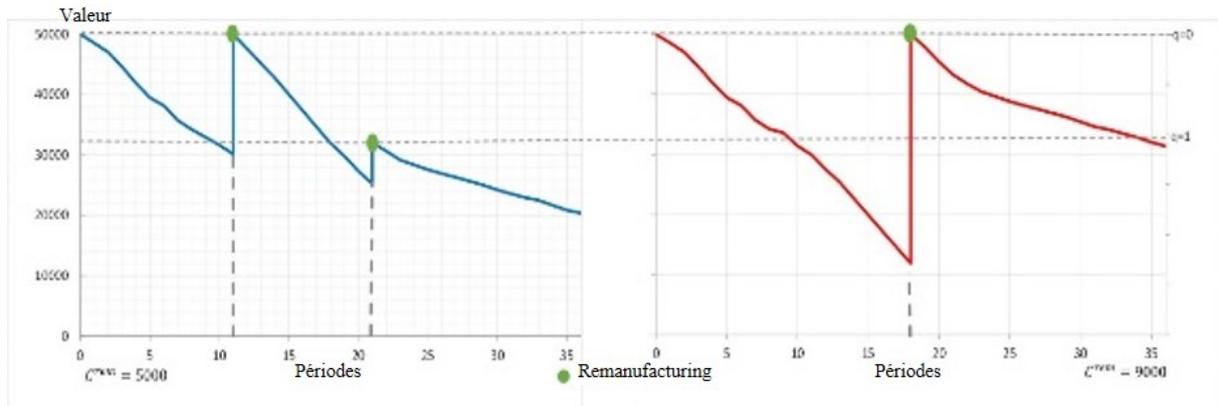


Figure 5.12 : Effet de la variation de C^{rep} sur l'amortissement de la valeur de la machine

5.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé dans un premier temps une nouvelle modélisation de la loi de défaillance en intégrant à la fois des paramètres représentant l'intensité de production, l'efficacité de la maintenance imparfaite et le profil de dégradation des pièces de rechange utilisées pour le remanufacturing. Ensuite, nous avons proposé une nouvelle formulation mathématique en nombre entier mixte afin d'optimiser conjointement pendant un horizon fini les cadences de production, le timing des opérations du remanufacturing, ainsi que le type des pièces de rechange à sélectionner (nouvelle ou remanufacturée) pour le remanufacturing. Les pièces de rechanges remanufacturées sont supposées de qualités différentes en fonction de l'efficacité de l'opération du remanufacturing subie chez le FEO-R. Ce problème a été considéré d'un point de vue économique. Pour se rapprocher de la réalité, l'interdépendance entre les conditions opérationnelles, la qualité des actions de maintenance et la dégradation du système a été considérée. Dans ce contexte, de nombreux paramètres techniques et économiques ont été pris en compte dans la modélisation telle que le taux de défaillance, les coûts de maintenance et du remanufacturing et le taux d'amortissement. L'objectif recherché est de minimiser d'un côté les coûts totaux du cycle de vie représentés par les coûts de maintenance, les coûts du remanufacturing et les charges d'amortissement, et le coût du stockage des produits finis d'un autre côté.

La richesse du modèle proposé réside dans sa capacité de traiter simultanément les trois décisions citées. Son véritable utilité se présente dans la résolution des vrais problèmes liés au remplacement ou remanufacturing des équipements lourds et coûteux. L'approche proposée vise à garantir la rentabilité de la production et du remanufacturing pour les utilisateurs ainsi que pour les fabricants d'équipements d'origine.

Conclusions et perspectives

Dans cette thèse, nous avons examiné l'interdépendance entre les conditions opérationnelles, les activités de maintenance, les décisions du remanufacturing lorsque des pièces de rechange neuves et remanufacturées sont utilisées dans le processus du remanufacturing. Pour cela, nous avons considéré un type d'équipement destiné à satisfaire des demandes déterministes et dynamiques sur un horizon fini, composé de plusieurs périodes de la même durée. Pour satisfaire les différentes demandes, l'équipement fonctionne sous une cadence de production, variable d'une période à une autre, et constante durant la même période. Durant son fonctionnement, l'équipement est soumis à une dégradation graduelle qui dépend uniquement de la dégradation de sa pièce principale. Nous avons étudié le cas où la dégradation est influencée par le temps d'utilisation et l'intensité de la production. Afin de réduire son taux de défaillance, l'équipement subit régulièrement des actions de maintenance préventive imparfaite. D'un autre côté, la valeur de l'équipement est sujette à un amortissement basé sur l'activité, dans lequel l'intensité d'utilisation et le temps de fonctionnement sont pris en compte.

Nous avons donc commencé le premier chapitre de cette thèse par la présentation des principaux concepts de la chaîne logistique en boucle fermée. Nous nous sommes focalisés ensuite sur le remanufacturing des équipements dans le secteur industriel du point de vue des fabricants et des utilisateurs. Puis, nous avons illustré les principales stratégies de planification du remplacement ou du remanufacturing des équipements de production. Après, nous avons évoqué l'influence des conditions de fonctionnement sur la détérioration des équipements. Quelques modèles de défaillance ont été présentés dans ce sens. Enfin, nous avons mis en évidence l'importance de la maintenance comme un procédé indispensable pour faire face au problème de la détérioration des biens. Une dernière partie du premier chapitre a été dédiée à la présentation des principaux modèles de défaillance intégrant l'effet de la maintenance imparfaite sur les systèmes.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté une revue détaillée de la littérature, répartie en plusieurs axes de recherche dont les plus pertinents à cette thèse sont les travaux traitant les problèmes du remanufacturing préventive, les problèmes de sélection des pièces de rechange et les problèmes de la détérioration et de la maintenance. Une dernière partie de ce chapitre a été consacrée à la présentation des approches d'optimisation utilisées dans cette thèse.

Les problématiques étudiées dans cette thèse ont été réparties en trois chapitres :

Le troisième chapitre concernait un problème de planification de la production sous contraintes de capacité de la machine et de maintenance avec la prise en considération de

l'effet conjoint du taux de production et de la maintenance imparfaite sur la détérioration de la machine. Dans un premier temps, nous avons adopté le modèle à risque proportionnel étendu pour représenter le profil de détérioration de la machine en fonction de l'intensité de la production et de la maintenance imparfaite. Ensuite, nous avons proposé une modélisation mathématique en nombre entier et une heuristique Fix-and-Relax afin de déterminer les meilleures cadences de production qui minimisent le coût total de maintenance et le coût du stockage des produits finis durant un horizon fini. Les résultats obtenus ont montré l'effet négatif des cadences de production intenses et de la maintenance imparfaite sur la santé de la machine à long terme.

Dans le quatrième chapitre, nous avons rajouté un deuxième niveau décisionnel par rapport au chapitre précédent, à savoir : la planification du remplacement de la pièce principale de la machine sur la base du concept de la durée de vie économique. L'objectif cherché à travers cette stratégie du remplacement est de faire face au problème de la détérioration accélérée de la machine à la fin de sa vie et par conséquent, de mettre une fin à l'augmentation excessive des coûts de maintenance. Pour résoudre ce problème de planification conjointe de la production et du remplacement, une approche d'optimisation hybride composée d'un algorithme génétique et une heuristique Fix-and-Relax a été proposée afin de déterminer simultanément le meilleur plan de production et le meilleur plan du remplacement qui minimisent le coût total du cycle de vie (de maintenance, d'amortissement et du remplacement) et le coût total du stockage des produits finis durant l'horizon de production. Les résultats obtenus ont montré la performance de la planification intégrée à long terme.

Enfin, le cinquième chapitre a décrit notre contribution principale dans cette thèse [Bensmain et al., 2019]. Nous avons étudié un problème de planification intégrée de la production et du remanufacturing sous des contraintes de capacité de production et de maintenance. La planification du remanufacturing consistait à déterminer les moments opportuns pour exécuter les opérations du remanufacturing ainsi la qualité optimale des pièces de rechange à choisir pour chaque opération. Pour modéliser ce problème, nous avons proposé dans un premier temps une nouvelle formulation de la loi de défaillance en tenant compte l'intensité de production, l'efficacité des actions de maintenance ainsi que la qualité des pièces utilisées, ensuite nous avons présenté un modèle mathématique non-linéaire en nombre entier mixte afin de minimiser les coûts considérés. Pour résoudre ce problème, quelques modifications ont été apportées sur l'approche de résolution présentée dans le chapitre précédent en tenant compte différents types des pièces de rechange.

Quelques exemples illustratifs ont été présentés pour montrer que les moments opportuns du remanufacturing est plus sensible au mode d'utilisation de l'équipement. Plus la cadence de production augmente, il serait préférable de remanufacturer l'équipement de façon anticipée afin d'éviter l'augmentation excessive des coûts de maintenance et des frais d'amortissement. Cependant, dans le cas où les coûts du remanufacturing sont élevés, il est préférable de le reporter. De plus, le choix du type de pièce de rechange à utiliser est directement lié à la nature du mode de fonctionnement au cours des prochaines périodes. En effet, il est préférable d'effectuer des opérations du remanufacturing en utilisant des pièces de rechange neuves lorsque des cadences de production intenses sont programmées. Cependant, dans le cas d'un mode de production modéré, les pièces remanufacturées à faible taux d'amortissement (faible

coût et capacité de production élevée) s'avèrent plus intéressantes, car elles offrent un meilleur avantage économique à l'utilisateur par rapport aux pièces neuves.

De plus, l'approche intégrée proposée ici permet de générer des profits importants, non seulement pour l'utilisateur, mais aussi pour le fabricant des équipements d'origine, surtout dans le cas où une collaboration intime et fructueuse existe entre les deux partenaires. L'application de cette approche aide les Fabricants/Refabriquants des Équipements d'Origine à réduire les problèmes des récupérateurs tiers et à résoudre partiellement les problèmes d'incertitude en obtenant périodiquement des informations approximatives sur la valeur, l'état et l'emplacement des équipements en service.

Bien que la performance de l'approche proposée ait été étudiée, montrées et analysées à travers plusieurs configurations (liées aux demandes, au taux de panne et d'amortissement des pièces de rechange, au coût du remanufacturing...), nous soulignons certaines limites, notamment : la nature déterministe de la demande, l'absence de l'aspect « durabilité » de l'activité du remanufacturing. Dans ce contexte, une éventuelle extension des travaux présentés dans cette thèse consiste à considérer des demandes stochastiques. De plus, d'autres recherches seraient peut-être nécessaires pour examiner les impacts environnementaux des activités de production sur le plan du remanufacturing. L'objectif sera l'étude et l'analyse des opportunités du remanufacturing et des décisions opérationnelles du point de vue de la durabilité, afin de réduire l'impact carbone de toutes les opérations exécutées durant le cycle de vie de l'équipement.

Ce modeste travail et ses extensions ont un impact à la fois académique et industriel. Son véritable objectif est de s'attaquer aux vrais problèmes liés au remanufacturing des équipements lourds et coûteux afin de garantir la rentabilité des activités de la production et du remanufacturing pour les utilisateurs ainsi que pour les fabricants d'équipements d'origine.

Enfin, comme l'a dit Socrate, « seule la connaissance qui nous rend meilleurs est utile », nous espérons que cette thèse contribuera au développement de ce domaine de recherche.

Annexe A

Exemple numérique détaillé de l'exécution des algorithmes proposés

Pour expliquer comment fonctionnent les trois algorithmes présentés dans cette thèse, nous considérons les demandes ci-dessous avec $U^{max} = 10$ produits/ut, $DM=3$ ut, $DR=6$ ut, durée des périodes = 30 ut. Les autres paramètres sont présentés dans le chapitre 5.

Tableau A.1 : Demandes mensuelles moyennes

	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Année 1	160	200	230	270	240	180	240	190	100	220	200	220
Année 2	200	290	260	220	230	380	220	240	200	190	180	140
Année 3	130	110	100	120	100	135	120	90	90	140	130	90

A.1 Algorithme de l'horizon glissant basée sur une procédure de décomposition (Algorithme 3)

Nous supposons que le chromosome suivant (plan de remanufacturing) a été généré par l'un des opérateurs de l'algorithme génétique, à savoir : la création de la population initiale, le croisement ou la mutation.

Tableau A.2 : Exemple d'un chromosome généré par l'algorithme génétique

Gène	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Valeur	1	5	4	3	5	5	4	3	4	2	4	3
Gène	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Valeur	5	4	5	3	4	5	5	4	4	3	5	0
Gène	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Valeur	4	4	5	3	5	3	3	5	4	1	3	3

Sur la base du chromosome ci-dessus, la pièce principale initiale (gène 1) est de qualité $q = 1$ et l'équipement doit être remanufacturé trois fois comme suit :

Tableau A.3 : Décodage du chromosome

Plan du rem	$X_{1,1} = 1$	$X_{2,10} = 1$	$X_{0,24} = 1$	$X_{1,34} = 1$
Périodes du rem	$n = 1$	$n = 10$	$n = 24$	$n = 34$
Qualité de la pièce	$q = 1$ (État initial)	$q = 2$	$q = 0$	$q = 1$

Le plan de remanufacturing ci-dessus décompose l'horizon en $C = 4$ cycles comme suit :

Tableau A.4 : Décomposition en plusieurs cycles

Cycle c	1	2	3	4
f_n	1	10	24	34
l_n	9	23	33	36
q_n	1	2	0	1

La procédure présentée dans la section de la ligne 9 à la ligne 22 est appliquée pour examiner la faisabilité de résolution des sous-problèmes de $CLSP_c$

Tableau A.5 : Examen de la faisabilité de résolution des sous-problèmes $CLSP_c$

Cycle 1					Cycle 2				
n	cd_n	OT_n	cpn	$cd_n < cpn??$	n	cd_n	OT_n	cpn	$cd_n < cpn??$
1	160	30	300	Oui	10	220	27	240	Oui
2	360	27	570	Oui	11	420	27	510	Oui
3	590	27	840	Oui	12	820	27	780	Non
4	890	27	1110	Oui	13				
5	1180	27	1380	Oui	14				
6	1360	27	1650	Oui	15				
7	1600	27	1920	Oui	16				
8	1790	27	2190	Oui	17				
9	1890	27	2460	Oui	18				

Nous pouvons remarquer que la demande cumulée dépasse la capacité de production cumulée à la période 12 qui a une demande très élevée égale à 400 produits. Cette demande ne peut pas être satisfaite même si la machine est utilisée sous une cadence de production maximale U^{max} depuis le début du cycle. La quantité qui ne peut pas être livrée à la fin de la période 12 est la suivante : $cd_{12} - cpn_{12} = 820 - 780 = 40$. La solution proposée consiste à réduire la demande à la période 12 de 40 produits ($d'_{12} = d_{12} - 40$) (ligne 16) et augmenter celle à la dernière période ($l_1 = 9$) du cycle précédent (cycle 1) de 40 produits ($d'_9 = d_9 + 40$) (ligne 17). Cette solution signifie qu'une partie de la quantité à livrer à la période 12 doit être produite à l'avance afin d'éviter l'insatisfaction des clients. Après, la faisabilité de résolution du

sous-problème $CLSP_1$ doit être réexaminé, mais en considérant la demande virtuelle modifiée d .

Dans le cas où la quantité ($cd_{12} - cpc_{12} = 40$) ne peut pas être préparée même si la machine est utilisée sous une cadence de production maximale U^{max} depuis le début de l'horizon de production, le chromosome proposé (plan du remanufacturing) doit être corrigé ou remplacé.

Ensuite, tous les $CLSP_c$ sont résolus par l'heuristique Fix-and-Relax (Algorithme 3.1) un par un en considérant les demandes virtuelles d' au lieu des demandes réelles (de la ligne 23 à la ligne 28).

A.2 Algorithme Fix and Relax (Algorithme 1)

Notre proposition pour l'amélioration de l'heuristique « Fix and Relax » est d'essayer de résoudre les sous-problèmes $CLSP_c$ en utilisant différentes configurations de la fenêtre d'observation (différentes longueurs σ).

Dans cette section, la procédure de résolution du sous-problème $CLSP_1$ est expliquée en détails.

Tableau A.6 : Demandes virtuelles du sous-problème $CLSP_1$

Cycle 1	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d'	160	200	230	300	290	180	240	190	140

La longueur du cycle égal à : $L = 9$.

$\sigma = 1$

Au début, σ est fixé à 1, ce qui signifie que $CLSP_1$ est résolu progressivement en résolvant neuf sous-sous-problèmes $CLSPW_{1,1}, CLSPW_{2,2}, CLSPW_{3,3}, \dots, CLSPW_{9,9}$ (voir le figure A.1), ou chacun concerne une seule période ($a = b$) en tenant compte la quantité restante en stock après chaque livraison.

Nous observons que $W_4^{4,4}$ (=11) dépasse U^{max} (=10), ainsi $fsblt(\widehat{W}^{4,4})$ est faux (la ligne 7 de l'algorithme 3.2), et par conséquent $fsblt(\widehat{U}^{1,1})$ est faux (la ligne 15 de l'algorithme 3.1). Dans ce cas, le programme quitte la boucle et retourne : "Solution infaisable lorsque $OW.length = 1$ " (lignes 16 et 17).

$\sigma = 2$

En adoptant cette configuration, le sous-problème $CLSP_1$ est résolu graduellement en résolvant huit sous-sous-problèmes $CLSPW_{1,2}, CLSPW_{2,3}, CLSPW_{3,4}, \dots, CLSPW_{8,9}$, où chacun concerne deux périodes ($b = a + 1$). L'utilisation de cette configuration implique que le

stockage n'est pas autorisé pour plus de deux périodes, car chaque sous-sous-problème est résolu séparément comme dans le premier cas ($\sigma = 1$). Notant qu'une quantité négligeable peut rester en stock après chaque livraison. Comme dans le premier cas, $W_5^{4,5}$ (=11) dépasse U^{max} lors que celle de la période précédente $W_4^{4,5}$ est égal à U^{max} ainsi la résolution du problème $CLSP_{W_{4,5}}$ est infaisable (voir la ligne 24 de l'algorithme 3.2), et par conséquent, $CLSP_1$ ne peut pas être résolu en utilisant une fenêtre d'observation de longueur $\sigma = 2$ ($fsblt(\widehat{U}^{1,2}) = false$) (la ligne 15 de l'algorithme 3.1). Dans ce cas, le compilateur sort de la boucle et retourne : « Solution infaisable lorsque $OW.length = 2$ ». Une autre remarque est que la cadence de production de la période 3 a été modifié de 9 produits/ut dans l'étape $k = 2$ à 10 produits/ut dans l'étape $k = 3$ parce que la demande de la période 4 dépasse la capacité de production dans la même période ($300 > 10 * 27 = 270$), par conséquent, une partie de la quantité à livrer à la fin de la période 4 doit être préparée pendant la période 3.

$\sigma = 3$

L'utilisation de cette configuration implique que le stockage n'est pas autorisé pour plus de trois périodes. Comme dans les deux cas précédents ($\sigma = 2$), le compilateur quitte la boucle à la période 5 où la cadence de production dépasse U^{max} lors que celle des périodes précédentes $W_3^{3,5}$ et $W_4^{3,5}$ sont égales à U^{max} .

$\sigma = 4$

En utilisant cette configuration, le stockage n'est pas autorisé pour plus de quatre périodes. La remarque principale est que la solution de sous-problème $CLSP_1$ en utilisant une fenêtre d'observation de longueur $\sigma = 4$ est réalisable avec un coût total $TC^1 = 23020$. La deuxième remarque est que le problème de la période 5 rencontré dans le cas où $\sigma = 3$ est résolu par cette nouvelle configuration (comparer entre $W_5^{3,5}$ et $W_5^{2,5}$), ce qui signifie qu'une partie de d'_5 est préparée à l'avance pendant la période 2 (comparer entre $W_2^{3,5}$ et $W_2^{2,5}$), puisque le stockage dans le cas précédent ($\sigma = 3$) n'est pas autorisé pour plus de trois périodes. La troisième remarque est que $W_2^{1,4}$, $W_6^{1,4}$ and $W_7^{1,4}$ ont été modifié une fois aux étapes 2, 5 et 5 respectivement.

$\sigma = 5, \sigma = 6, \sigma = 7$

Ces configurations, en plus de la configuration précédente, donnent la solution optimale avec un coût total égal à $TC^{1*} = 23020$.

$\sigma = 8$

La solution, obtenue en deux étapes, donne un coût total égal à $TC^1 = 23153$.

$\sigma = 9$

Dans ce cas, $CLSP_1$ est résolu après une seule étape, ce qui signifie que l'heuristique FR n'a pas été appliquée. Ce cas exceptionnel implique que le sous-problème $CLSP_1$ a été résolu directement par l'algorithme 3.2. La solution donne un coût total $TC^1 = 23274$.

La figure A.1 résume l'exemple illustratif présenté dans cette section.

A.3 Algorithme d'optimisation du problème de la fenêtre d'observation (Algorithme 2)

Dans cette section, nous avons choisi le problème $CLSP_{W_{2,5}}$ ($\sigma = 4$, $k = 2$) comme un exemple afin d'expliquer l'algorithme 3.2.

Au début de la fenêtre d'observation, le niveau du stock est égal à $S_1 = 20$.

Tableau A.7 : La cadence de production de la période 4 dépasse U^{max}

n	2	3	4	5
OT_n	27	27	27	27
d'_n	200	230	300	290
$OT_n^{2,5}$ (Ligne 4)	7	9	11	
$W_n^{a,b} > U^{max}$ (Ligne 5)	Oui	Oui	Non	
$Sw_n^{2,5}$	9	22		

Le taux de production $W_4^{2,5}$ à la période 4 dépasse U^{max} (ligne 5). Notant que la longueur de la fenêtre d'observation égale à 4, le pseudo-code entre la ligne 6 et la ligne 9 a été sauté. La quantité qui ne peut pas être préparée à la fin de la période 4 est :

$$dif = d'_4 - Sw_4^{2,5} - U^{max} OT_4 = 300 - 22 - 10 * 27 = 8$$

Le tableau A.8 résume les résultats obtenus en exécutant le pseudo-code de la ligne 13 à la ligne 29.

		$\widehat{W}^{a,b}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\sigma=1$	k=1	$\widehat{W}^{1,1}$	6								
	k=2	$\widehat{W}^{2,2}$	6	7							
	k=3	$\widehat{W}^{3,3}$	6	7	9						
	k=4	$\widehat{W}^{4,4}$	6	7	9	11					
Solution		$\widehat{U}^{1,1}$	Solution infeasible								
$\sigma=2$	k=1	$\widehat{W}^{1,2}$	6	7							
	k=2	$\widehat{W}^{2,3}$	6	7	9						
	k=3	$\widehat{W}^{3,4}$	6	7	10	10					
	k=4	$\widehat{W}^{4,5}$	6	7	10	10	11				
Solution		$\widehat{U}^{1,2}$	Solution infeasible								
$\sigma=3$	k=1	$\widehat{W}^{1,3}$	6	7	9						
	k=2	$\widehat{W}^{2,4}$	6	7	10	10					
	k=3	$\widehat{W}^{3,5}$	6	7	10	10	11				
Solution		$\widehat{U}^{1,3}$	Solution infeasible								
$\sigma=4$	k=1	$\widehat{W}^{1,4}$	6	7	10	10					
	k=2	$\widehat{W}^{2,5}$	6	8	10	10	10				
	k=3	$\widehat{W}^{3,6}$	6	8	10	10	10	6			
	k=4	$\widehat{W}^{4,7}$	6	8	10	10	10	6	9		
	k=5	$\widehat{W}^{5,8}$	6	8	10	10	10	7	8	7	
	k=6	$\widehat{W}^{6,9}$	6	8	10	10	10	7	8	7	7
Solution	$TC^1=23020$	$\widehat{U}^{1,4}$	6	8	10	10	10	7	8	7	5
$\sigma=5$	k=1	$\widehat{W}^{1,5}$	6	8	10	10	10				
	k=2	$\widehat{W}^{2,6}$	6	8	10	10	10	6			
	k=3	$\widehat{W}^{3,7}$	6	8	10	10	10	6	9		
	k=4	$\widehat{W}^{4,8}$	6	8	10	10	10	7	8	7	
	k=5	$\widehat{W}^{5,9}$	6	8	10	10	10	7	8	7	7
Solution	$TC^{1*}=23020$	$\widehat{U}^{1,5}$	6	8	10	10	10	7	8	7	5
$\sigma=6$	k=1	$\widehat{W}^{1,6}$	6	8	10	10	10	6			
	k=2	$\widehat{W}^{2,7}$	6	8	10	10	10	6	9		
	k=3	$\widehat{W}^{3,8}$	6	8	10	10	10	7	8	7	
	k=4	$\widehat{W}^{4,9}$	6	8	10	10	10	6	9	7	7
Solution	$TC^{1*}=23020$	$\widehat{U}^{1,6}$	6	8	10	10	10	7	8	7	5
$\sigma=7$	k=1	$\widehat{W}^{1,7}$	6	8	10	10	10	6	9		
	k=2	$\widehat{W}^{2,8}$	6	8	10	10	10	6	9	7	
	k=3	$\widehat{W}^{3,9}$	6	8	10	10	10	7	8	7	7
Solution	$TC^{1*}=23020$	$\widehat{U}^{1,7}$	6	8	10	10	10	7	8	7	5
$\sigma=8$	k=1	$\widehat{W}^{1,8}$	6	8	10	10	10	6	9	7	
	k=2	$\widehat{W}^{2,9}$	6	9	9	10	10	7	8	7	7
Solution	$TC^1=23153$	$\widehat{U}^{1,8}$	6	9	9	10	10	7	8	7	7
$\sigma=9$	$TC^1=23274$	$\widehat{U}^{1,9}$	6	8	10	10	10	6	9	7	5

Figure A.1 : Exemple illustratif de l'heuristique Fix-and-Relax

Tableau A.8 : Réduction de la cadence de production de la période 4

	n=4	n'	3	2
Valeurs initiales	$W_4^{2,5} = 11$	$W_{n'}^{2,5}$	9	7
$dif > 0$:? (Ligne 13)	Oui			
$W_{n'}^{2,5} < U^{max}$:? (Ligne 14)	/	/	Oui	
Modifier le taux (Ligne 15)	$W_4^{2,5} = 11$	$W_{n'}^{2,5}$	9+1=10	7
Update dif (Ligne 16)	-19			
$dif > 0$:? (Ligne 17)	Non (La contrainte de capacité est respecté dans la période 4)			
Modifier le taux (Ligne 18)	$W_4^{2,5} = 10$	$W_{n'}^{2,5}$	10	7
Stock (Ligne 31)	$Sw_4^{2,5} = 19$	$Sw_{n'}^{2,5}$	49	9

Nous mettons à jour les valeurs du tableau A.7, et nous continuons la procédure de résolution pour la période 5.

Tableau A.9 : La cadence de production de la période 5 dépasse U^{max}

n	2	3	4	5
OT_n	27	27	27	27
d'_n	200	230	300	290
$OT_n^{2,5}$ (Ligne 4)	7	10	10	11
$W_n^{a,b} > U^{max}$ (Ligne 5)	Non	Non	Non	Oui
$Sw_n^{2,5}$	9	49	19	

Comme le cas de la période 4, le taux de production $W_5^{2,5}$ de la période 5 dépasse U^{max} . La quantité qui ne peut pas être produite durant la période 5 est égal à :

$$dif = d'_5 - Sw_4^{2,5} - U^{max} OT_5 = 290 - 19 - 10 * 27 = 1$$

Ainsi, la procédure de la ligne 12 et la ligne 28 est réexécutée en essayant d'ajuster le taux de production $W_5^{2,5}$.

Tableau A.10 : Réduction de la cadence de production de la période 5

	n=5	n'	4	3	2
Valeurs initiales	$W_5^{2,5} = 11$	$W_{n'}^{2,5}$	10	10	7
$dif > 0$:? (Ligne 13)	Oui				
$W_{n'}^{2,5} < U^{max}$:? (Ligne 14)	/	/	Non	Non	Oui
Modifier le taux (Ligne 15)	$W_4^{2,5} = 11$	$W_{n'}^{2,5}$	10	10	7+1=8
Update dif (Ligne 16)	-26				
$dif > 0$:? (Ligne 17)	Non (La contrainte de capacité est respecté dans la période 5)				
Modifier le taux (Ligne 18)	$W_4^{2,5} = 10$	$W_{n'}^{2,5}$	10	10	8
Stock (Ligne 31)	$Sw_4^{2,5} = 19$	$Sw_{n'}^{2,5}$	46	76	36

Bibliographie

- Abbey, J.D., Guide Jr, V.D.R., 2017. Closed-loop supply chains : a strategic overview, in : Sustainable Supply Chains. Springer, pp. 375–393. URL : https://doi.org/10.1007/978-3-319-29791-0_17, doi :10.1007/978-3-319-29791-0_17.
- AFNOR, N., 1998. Recueil des normes françaises x06, x60. X50. AFNOR .
- AFNOR, N., 2001. Terminologie de la maintenance. NF-EN 13306, X60–319.
- Aghezzaf, E.H., Khatab, A., Le Tam, P., 2016. Optimizing production and imperfect preventive maintenance planning' s integration in failure-prone manufacturing systems. Reliability Engineering & System Safety 145, 190–198. URL : <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.09.017>, doi :10.1016/j.ress.2015.09.017.
- Aghezzaf, E.H., Najid, N.M., 2008. Integrated production planning and preventive maintenance in deteriorating production systems. Information Sciences 178, 3382–3392. URL : <https://doi.org/10.1016/j.ins.2008.05.007>, doi :10.1016/j.ins.2008.05.007.
- Agra, A., Requejo, C., Rodrigues, F., 2018. A hybrid heuristic for a stochastic production-inventory-routing problem. Electronic Notes in Discrete Mathematics 64, 345–354.
- Agrawal, S., Singh, R.K., Murtaza, Q., 2015a. A literature review and perspectives in reverse logistics. Resources, Conservation and Recycling 97, 76–92. URL : <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.02.009>, doi :10.1016/j.resconrec.2015.02.009.
- Agrawal, V.V., Atasu, A., Van Ittersum, K., 2015b. Remanufacturing, third-party competition, and consumers' perceived value of new products. Management Science 61, 60–72. URL : <https://doi.org/10.1287/mnsc.2014.2099>, doi :10.1287/mnsc.2014.2099.
- Amezquita, T., Hammond, R., Salazar, M., Bras, B., 1995. Characterizing the remanufacturability of engineering systems, in : ASME advances in design automation conference, Citeseer. pp. 271–278.
- Atasu, A., Guide, V.D.R., Wassenhove, L.N., 2008. Product reuse economics in closed-loop supply chain research. Production and Operations Management 17, 483–496. URL : <https://doi.org/10.3401/poms.1080.0051>, doi :10.1007/10.3401/poms.1080.0051.
- Auberville, J.M., 2004. Maintenance industrielle : de l'entretien de base à l'optimisation de la sûreté.

- Aytug, H., Khouja, M., Vergara, F., 2003. Use of genetic algorithms to solve production and operations management problems : a review. *International Journal of Production Research* 41, 3955–4009.
- Bahlow, R., Proschan, F., Hunter, L., 1965. *Mathematical theory of reliability*.
- Ben Mabrouk, A., Chelbi, A., Radhoui, M., 2017. Optimal hybrid imperfect preventive maintenance policy for leased equipment. *IFAC-PapersOnLine* 50, 13698–13703. URL : <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2542>, doi :10.1016/j.ifacol.2017.08.2542.
- Bengtsson, M., Kurdve, M., 2016. Machining equipment life cycle costing model with dynamic maintenance cost. *Procedia CIRP* 48, 102–107. URL : <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.110>, doi :10.1016/j.procir.2016.03.110.
- Bensmain, Y., Dahane, M., Bennekrouf, M., Sari, Z., 2019. 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. URL : <https://doi.org/10.1016/j.res.2018.09.001>, doi :10.1016/j.res.2018.09.001.
- Beraldi, P., Ghiani, G., Grieco, A., Guerriero, E., 2008. Rolling-horizon and fix-and-relax heuristics for the parallel machine lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent set-up costs. *Computers & Operations Research* 35, 3644–3656. URL : <https://doi.org/10.1016/j.cor.2007.04.003>, doi :10.1016/j.cor.2007.04.003.
- Beraldi, P., Violi, A., Scordino, N., Sorrentino, N., 2011. Short-term electricity procurement : A rolling horizon stochastic programming approach. *Applied Mathematical Modelling* 35, 3980–3990.
- Bhakthavatchalam, S., Diallo, C., Venkatadri, U., Khatab, A., 2015. Quality, reliability, maintenance issues in closed-loop supply chains : A review. *IFAC-PapersOnLine* 48, 460–465. URL : <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.124>, doi :10.1016/j.ifacol.2015.06.124.
- Boudhar, H., Dahane, M., Rezg, N., 2014. New dynamic heuristic for the optimization of opportunities to use new and remanufactured spare part in stochastic degradation context. *Journal of Intelligent Manufacturing* , 1–18URL : <https://doi.org/10.1007/s10845-014-0989-1>, doi :10.1007/s10845-014-0989-1.
- Boulenger, A., française de normalisation, A., 1988. *Vers le zero panne avec la maintenance conditionnelle*. Association française de normalisation.
- Brown, M., Proschan, F., 1983. Imperfect repair. *Journal of Applied probability* 20, 851–859.
- Bruch, J., Bellgran, M., 2012. Design information for efficient equipment supplier/buyer integration. *Journal of Manufacturing Technology Management* 23, 484–502.
- Bulmus, S.C., Zhu, S.X., Teunter, R., 2014. Competition for cores in remanufacturing. *European Journal of Operational Research* 233, 105–113.

- Buschkühl, L., Sahling, F., Helber, S., Tempelmeier, H., 2010. Dynamic capacitated lot-sizing problems : a classification and review of solution approaches. *Or Spectrum* 32, 231–261. URL : <https://doi.org/10.1007/s00291-008-0150-7>, doi :10.1007/s00291-008-0150-7.
- Bushuev, M.A., Guiffrida, A., Jaber, M., Khan, M., 2015. A review of inventory lot sizing review papers. *Management Research Review* 38, 283–298. URL : <https://doi.org/10.1108/MRR-09-2013-0204>, doi :10.1108/MRR-09-2013-0204.
- Castanier, B., 2001. Modélisation stochastique et optimisation de la maintenance conditionnelle des systèmes à dégradation graduelle. Ph.D. thesis. Troyes.
- Chan, J.K., Shaw, L., 1993. Modeling repairable systems with failure rates that depend on age and maintenance. *IEEE Transactions on Reliability* 42, 566–571.
- Chand, S., Hsu, V.N., Sethi, S., 2002. Forecast, solution, and rolling horizons in operations management problems : A classified bibliography. *Manufacturing & Service Operations Management* 4, 25–43.
- Chari, N., Diallo, C., Venkatadri, U., 2014. State of the art on performability across the sustainable value chain. *International Journal of Performability Engineering* 10, 543–556.
- Chari, N., Diallo, C., Venkatadri, U., Aït-Kadi, D., 2013. Manufacturing strategy using new and reconditioned rotatable spare parts. 10.14279/depositonce-3753 URL : <http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-4720>, doi :10.14279/depositonce-4720.
- Chari, N., Diallo, C., Venkatadri, U., Khatab, A., 2016. Modeling and analysis of a warranty policy using new and reconditioned parts. *Applied Stochastic Models in Business and Industry* 32, 539–553. URL : <https://doi.org/10.1002/asmb.2178>, doi :10.1002/asmb.2178.
- Charter, M., Gray, C., 2007. Remanufacturing and product design : Designing for the 7th generation. *Journal of manufacturing systems* URL : https://research.uca.ac.uk/695/2/Remanufacturing_and_Product_Design.pdf.
- Chaudhry, S., Luo, W., 2005. Application of genetic algorithms in production and operations management : a review. *International Journal of Production Research* 43, 4083–4101.
- Chaudhuri, D., Sahu, K.C., 1977. Preventive maintenance interval for optimal reliability of deteriorating system. *IEEE Transactions on Reliability* 26, 371–372.
- Cheng, G.Q., Zhou, B.H., Li, L., 2016. Joint optimisation of production rate and preventive maintenance in machining systems. *International Journal of Production Research* 54, 6378–6394. URL : <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1174343>, doi :10.1080/00207543.2016.1174343.
- Chopra, S., Meindl, P., 2016. Supply chain management : Strategy, planning, and operation .
- Christer, A., Desa, M., 1992. Maintenance and availability modelling of bus transport in malaysia : issues and problems, in : *International Conference on Operational Research for Development*.

- CIRP, P., 2013. Wörterbuch der Fertigungstechnik Bd. 3/Dictionary of Production Engineering Vol. 3/Dictionnaire des Techniques de Production Mécanique Vol. 3 : Produktionssysteme/-Manufacturing Systems/Systèmes de Production. Springer-Verlag.
- Copil, K., Wörbelauer, M., Meyr, H., Tempelmeier, H., 2017. Simultaneous lotsizing and scheduling problems : a classification and review of models. *OR spectrum* 39, 1–64.
- Cox, D.R., 1972. Regression models and life-tables. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* 34, 187–220.
- Cui, J., Engell, S., 2009. Scheduling of a multiproduct batch plant under multiperiod demand uncertainties by means of a rolling horizon strategy, in : *Computer Aided Chemical Engineering*. Elsevier. volume 26, pp. 423–428.
- Cunha, V., Balkaya, I., Palacios, J., Rozenfeld, H., Seliger, G., 2011. Development of technology roadmap for remanufacturing oriented production equipment, in : *Advances in Sustainable Manufacturing*. Springer, pp. 203–208. URL : https://doi.org/10.1007/978-3-642-20183-7_30, doi :10.1007/978-3-642-20183-7_30.
- Dahane, M., Rezg, N., Chelbi, A., 2012. Optimal production plan for a multi-products manufacturing system with production rate dependent failure rate. *International Journal of Production Research* 50, 3517–3528. URL : <https://doi.org/10.1080/00207543.2012.671585>, doi :10.1080/00207543.2012.671585.
- Dahane, M., Sahnoun, M., Bettayeb, B., Baudry, D., Boudhar, H., 2015. Impact of spare parts remanufacturing on the operation and maintenance performance of offshore wind turbines : a multi-agent approach. *Journal of Intelligent Manufacturing* , 1–19URL : <https://doi.org/10.1007/s10845-015-1154-1>, doi :10.1007/s10845-015-1154-1.
- Dao, C.D., Zuo, M.J., 2016. Optimal selective maintenance for multi-state systems in variable loading conditions. *Reliability Engineering & System Safety* URL : <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.11.006>, doi :10.1016/j.ress.2016.11.006.
- Darabă, D., 2014. Static and dynamic verification of machine tools before remanufacturing, in : *Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publ.* pp. 458–466. URL : <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.656.458>, doi :10.4028/www.scientific.net/AMM.656.458.
- Darghouth, M.N., Chelbi, A., Ait-kadi, D., 2017. Investigating reliability improvement of second-hand production equipment considering warranty and preventive maintenance strategies. *International Journal of Production Research* , 1–19URL : <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1277277>, doi :10.1080/00207543.2016.1277277.
- Deshpande, A., 2013. An empirical study to evaluate machine tool production readiness and performance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 64, 1285–1296.
- Desport, P., 2017. Planification tactique de chaîne d’approvisionnement en boucle fermée : modélisation, résolution, évaluation. Ph.D. thesis. Université d’Angers.

- Dhillon, B.S., 2006. Creativity for engineers. volume 3. World Scientific.
- Dhillon, B.S., 2009. Life cycle costing for engineers. Crc Press.
- Diallo, C., Aït-Kadi, D., 2011. Optimal mixture strategy of two identical subpopulations with different ages, in : International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, pp. 1152–1161.
- Diallo, C., Ait-Kadi, D., Venkatadri, U., 2014. Reliability analysis and optimal mixture strategy for a lot composed of new and reconditioned systems. International Journal of Performability Engineering 10, 557–566.
- Diallo, C., Venkatadri, U., Khatab, A., Bhakthavatchalam, S., 2016. State of the art review of quality, reliability and maintenance issues in closed-loop supply chains with remanufacturing. International Journal of Production Research , 1–20URL : <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1200152>, doi :[10.1080/00207543.2016.1200152](https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1200152).
- Dillenberger, C., Escudero, L.F., Wollensak, A., Zhang, W., 1994. On practical resource allocation for production planning and scheduling with period overlapping setups. European Journal of Operational Research 75, 275–286. URL : [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)90074-4](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)90074-4), doi :[10.1016/0377-2217\(94\)90074-4](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)90074-4).
- Do, P., Voisin, A., Levrat, E., Iung, B., 2015. A proactive condition-based maintenance strategy with both perfect and imperfect maintenance actions. Reliability Engineering & System Safety 133, 22–32. URL : <https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.08.011>, doi :[10.1016/j.ress.2014.08.011](https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.08.011).
- Doyen, L., Gaudoin, O., 2004. Classes of imperfect repair models based on reduction of failure intensity or virtual age. Reliability Engineering & System Safety 84, 45–56.
- Du, Y., Li, C., 2014. Implementing energy-saving and environmental-benign paradigm : machine tool remanufacturing by oems in china. Journal of Cleaner Production 66, 272–279. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.033>, doi :[10.1016/j.jclepro.2013.10.033](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.033).
- El-Ferik, S., Ben-Daya, M., 2006. Age-based hybrid model for imperfect preventive maintenance. IIE Transactions 38, 365–375. URL : <https://doi.org/10.1080/07408170500232545>, doi :[10.1080/07408170500232545](https://doi.org/10.1080/07408170500232545).
- EPA, 2014. Global greenhouse gas emissions data URL : <https://www.epa.gov/environmental-topics>.
- Ezzeddine, W., 2017. Dispositif de fiabilisation de la mesure d’une sonde de Pitot par prise en compte de l’évolution des conditions opérationnelles et environnementales. Ph.D. thesis. Université de Lorraine.
- Fakher, H.B., Nourelfath, M., Gendreau, M., 2015. Joint production-maintenance planning in an imperfect system with quality degradation, in : Industrial Engineering and Systems Management (IESM), 2015 International Conference on, IEEE. pp. 910–919. URL : <https://doi.org/10.1109/IESM.2015.7380264>, doi :[10.1109/IESM.2015.7380264](https://doi.org/10.1109/IESM.2015.7380264).

- Feng, H., Xi, L., Xiao, L., Xia, T., Pan, E., 2018. Imperfect preventive maintenance optimization for flexible flowshop manufacturing cells considering sequence-dependent group scheduling. *Reliability Engineering & System Safety* 176, 218–229. URL : <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.04.004>, doi :10.1016/j.ress.2018.04.004.
- Ferguson, M., Guide, V.D., Koca, E., Souza, G.C., 2009. The value of quality grading in remanufacturing. *Production and Operations Management* 18, 300–314. URL : <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2009.01033.x>, doi :10.1111/j.1937-5956.2009.01033.x.
- Fitouhi, M.C., Nourelfath, M., 2014. Integrating noncyclical preventive maintenance scheduling and production planning for multi-state systems. *Reliability Engineering & System Safety* 121, 175–186. URL : <https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.07.009>, doi :10.1016/j.ress.2013.07.009.
- Floudas, C.A., Visweswaran, V., 1990. A global optimization algorithm (gop) for certain classes of nonconvex nlp*s*—i. theory. *Computers & chemical engineering* 14, 1397–1417.
- Fügenschuh, A., Gausemeier, P., Seliger, G., Severengiz, S., 2010. Scenario technique with integer programming for sustainability in manufacturing, in : *International Heinz Nixdorf Symposium*, Springer. pp. 320–331.
- Fuller, S., 2010. Life-cycle cost analysis (lcca). *Whole building design guide* .
- Gao, W., Li, T., Peng, S.t., Wang, L., Zhang, H.c., 2016. Optimal timing and recycling operation mode for electro-mechanical products active remanufacturing. *Frontiers of Engineering Management* 3, 115–122.
- García-Ayala, G., Ríos-Mercado, R.Z., Chacón-Mondragón, Ó.L., 2012. A disjunctive programming model and a rolling horizon algorithm for optimal multiperiod capacity expansion in a multiproduct batch plant. *Computers & Chemical Engineering* 46, 29–38.
- Gehin, A., Zwolinski, P., Brissaud, D., 2008. A tool to implement sustainable end-of-life strategies in the product development phase. *Journal of Cleaner Production* 16, 566–576.
- Geng, X., Gong, X., Chu, X., 2016. Component oriented remanufacturing decision-making for complex product using dea and interval 2-tuple linguistic topsis. *International Journal of Computational Intelligence Systems* 9, 984–1000. URL : <https://doi.org/10.1080/18756891.2016.1237195>, doi :10.1080/18756891.2016.1237195.
- Geyer, R., Jackson, T., 2004. Supply loops and their constraints : the industrial ecology of recycling and reuse. *California Management Review* 46, 55–73.
- Ghali, K., 2005. Méthodologie de conception système à base de plateformes reconfigurables et programmables. Ph.D. thesis. ENSTA ParisTech.
- Ghisellini, P., Cialani, C., Ulgiati, S., 2016. A review on circular economy : the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner production* 114, 11–32.

- Glock, C.H., Grosse, E.H., Ries, J.M., 2014. The lot sizing problem : A tertiary study. *International Journal of Production Economics* 155, 39–51. URL : <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.12.009>, doi :10.1016/j.ijpe.2013.12.009.
- Golberg, D.E., 1989. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison wesley 1989, 36.
- Goodall, P., Rosamond, E., Harding, J., 2014. A review of the state of the art in tools and techniques used to evaluate remanufacturing feasibility. *Journal of Cleaner Production* 81, 1–15. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.014>, doi :10.1016/j.jclepro.2014.06.014.
- Goren, H.G., Tunali, S., Jans, R., 2010. A review of applications of genetic algorithms in lot sizing. *Journal of Intelligent Manufacturing* 21, 575–590.
- Gorjian, N., 2012. *Asset health prediction using the explicit hazard model*. Ph.D. thesis. Queensland University of Technology.
- Govindan, K., Soleimani, H., Kannan, D., 2015. Reverse logistics and closed-loop supply chain : A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research* 240, 603–626. URL : <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.012>, doi :10.1016/j.ejor.2014.07.012.
- Gransberg, D.D., O'Connor, E.P., 2015. *Major Equipment Life-cycle Cost Analysis*. Technical Report. Minnesota Department of Transportation, Research Services & Library.
- Gransberg, D.D., Popescu, C.M., Ryan, R., 2006. *Construction equipment management for engineers, estimators, and owners*. CRC Press.
- Grover, R., Grover, C., 2015. Obsolescence—a cause for concern? *Journal of Property Investment & Finance* 33, 299–314. URL : <https://doi.org/10.1108/JPIF-02-2015-0016>, doi :10.1108/JPIF-02-2015-0016.
- Guide, V.D.R., Harrison, T.P., Van Wassenhove, L.N., 2003. The challenge of closed-loop supply chains. *Interfaces* 33, 3–6.
- Guide Jr, V.D.R., Van Wassenhove, L.N., 2006. Closed-loop supply chains : an introduction to the feature issue (part 1). *Production and Operations Management* 15, 345–350.
- Hadidi, L.A., Rahim, A., 2015. Reliability for multiple units adopting sequential imperfect maintenance policies. *International Journal of System Assurance Engineering and Management* 6, 103–109. URL : <https://doi.org/10.1007/s13198-014-0249-y>, doi :10.1007/s13198-014-0249-y.
- Haupt, R.L., Haupt, S.E., 2004. *Practical genetic algorithms*. John Wiley & Sons.
- Hayashi, T., Katase, Y., Maejima, H., Yamaguchi, Y., Ueda, K., 2013. Recent renovations of dead-weight type force standard machines at nmij. *Measurement* 46, 4127–4134. URL : <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.07.027>, doi :10.1016/j.measurement.2013.07.027.

- Ho, V.T., Hajej, Z., Le Thi, H.A., Rezg, N., 2015. Solving the production and maintenance optimization problem by a global approach, in : *Modelling, Computation and Optimization in Information Systems and Management Sciences*. Springer, pp. 307–318. URL : https://doi.org/10.1007/978-3-319-18167-7_27, doi :10.1007/978-3-319-18167-7_27.
- Hu, J., Jiang, Z., 2016. Optimal preventive maintenance for system in time-varying operation condition, in : *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 2016 IEEE International Conference on, IEEE. pp. 496–500. URL : <https://doi.org/10.1109/IEEM.2016.7797925>, doi :10.1109/IEEM.2016.7797925.
- Hu, J., Jiang, Z., Liao, H., 2017. Preventive maintenance of a single machine system working under piecewise constant operating condition. *Reliability Engineering & System Safety* 168, 105–115. URL : <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.05.014>, doi :10.1016/j.res.2017.05.014.
- Husniah, H., Pasaribu, U., Cakravastia, A., ISKANDAR, B.P., 2015. Maintenance contract with dynamic operating conditions. *Proc. of MMR*, Tokyo URL : <https://www.researchgate.net/publication/291335929>.
- Iris, C., Asan, S.S., 2012. A review of genetic algorithm applications in supply chain network design, in : *Computational Intelligence Systems in Industrial Engineering*. Springer, pp. 203–230.
- Jafari, L., Makis, V., 2015. Joint optimal lot sizing and preventive maintenance policy for a production facility subject to condition monitoring. *International Journal of Production Economics* 169, 156–168. URL : <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2007.02.017>, doi :10.1016/j.rcim.2007.02.017.
- Jardine, A.K., Tsang, A.H., 2013. *Maintenance, replacement, and reliability : theory and applications*. CRC press.
- Jayant, A., Gupta, P., Garg, S., 2012. Perspectives in reverse supply chain management (r-scm) : A state of the art literature review. *JJMIE* 6.
- Jimenez, F., Pompidou, S., Perry, N., 2016. Environmental-energy analysis and the importance of design and remanufacturing recycled materials. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* 10, 241–249.
- Kafuku, J.M., Saman, M.Z.M., Sharif, S., Zakuan, N., et al., 2015. Investment decision issues from remanufacturing system perspective : literature review and further research. *Procedia CIRP* 26, 589–594. URL : <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.043>, doi :10.1016/j.procir.2014.07.043.
- Karaulova, T., Bashkite, V., 2016. Decision-making framework for used industrial equipment. *Engineering Economics* 27, 23–31. URL : <http://dx.doi.org/10.5755/j01.ee.27.1.8618>, doi :10.5755/j01.ee.27.1.8618.
- Kerr, W., 2000. *Remanufacturing and eco-efficiency : A case study of photocopier remanufacturing at fuji xerox australia*. IEEE Communications 2000.

- Khatab, A., 2015. Hybrid hazard rate model for imperfect preventive maintenance of systems subject to random deterioration. *Journal of Intelligent Manufacturing* 26, 601–608. URL : <https://doi.org/10.1007/s10845-013-0819-x>, doi :10.1007/s10845-013-0819-x.
- Kijima, M., 1989. Some results for repairable systems with general repair. *Journal of Applied probability* 26, 89–102.
- Kijima, M., Morimura, H., Suzuki, Y., 1988. Periodical replacement problem without assuming minimal repair. *European Journal of Operational Research* 37, 194–203.
- King, A.M., Burgess, S.C., Ijomah, W., McMahon, C.A., 2006. Reducing waste : repair, recondition, remanufacture or recycle? *Sustainable development* 14, 257–267.
- Korugan, A., Dingerç, K.D., ÖNen, T., Ateş, N.Y., 2013. On the quality variation impact of returns in remanufacturing. *Computers & Industrial Engineering* 64, 929–936.
- Kostin, A.M., Guillén-Gosálbez, G., Mele, F.D., Bagajewicz, M., Jiménez, L., 2011. A novel rolling horizon strategy for the strategic planning of supply chains. application to the sugar cane industry of argentina. *Computers & Chemical Engineering* 35, 2540–2563.
- Kumar, D., Westberg, U., 1997. Maintenance scheduling under age replacement policy using proportional hazards model and ttt-plotting. *European journal of operational research* 99, 507–515. URL : [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(96\)00317-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00317-7), doi :10.1016/S0377-2217(96)00317-7.
- Kumar, M., Husian, M., Upreti, N., Gupta, D., 2010. Genetic algorithm : Review and application. *International Journal of Information Technology and Knowledge Management* 2, 451–454.
- Lanza, G., Niggeschmidt, S., Werner, P., 2009. Optimization of preventive maintenance and spare part provision for machine tools based on variable operational conditions. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 58, 429–432. URL : <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.030>, doi :10.1016/j.cirp.2009.03.030.
- Liao, W., Pan, E., Xi, L., 2010. Preventive maintenance scheduling for repairable system with deterioration. *Journal of Intelligent Manufacturing* 21, 875–884. URL : <https://doi.org/10.1007/s10845-009-0264-z>, doi :10.1007/s10845-009-0264-z.
- Lin, D., Zuo, M.J., Yam, R.C., 2000. General sequential imperfect preventive maintenance models. *International Journal of reliability, Quality and safety Engineering* 7, 253–266. URL : <https://doi.org/10.1142/S0218539300000213>, doi :10.1142/S0218539300000213.
- Liu, M., Ke, Q., Song, S., Zhou, X., 2013. Active remanufacturing timing determination based on failure state assessment, in : *Reengineering Manufacturing for Sustainability*. Springer, pp. 615–619. URL : https://doi.org/10.1007/978-981-4451-48-2_100, doi :10.1007/978-981-4451-48-2_100.
- Liu, T.B., Kang, J.S., Luo, G.K., Lv, Y., Wang, Y., 2012. The hybrid imperfect maintenance model based on improvement factor of hazard rate and effective age, in : *Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (ICQR2MSE)*, 2012 International Conference on, IEEE.

- pp. 536–539. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6246292>, doi :10.1109/ICQR2MSE.2012.6246292.
- Liu, Y., Ong, S., Nee, A., et al., 2014a. Modular design of machine tools to facilitate design for disassembly and remanufacturing. *Procedia CIRP* 15, 443–448. URL : <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.085>, doi :10.1016/j.procir.2014.06.085.
- Liu, Z., Afrinaldi, F., Zhang, H.C., Jiang, Q., 2016. Exploring optimal timing for remanufacturing based on replacement theory. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 65, 447–450. URL : <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.064>, doi :10.1016/j.cirp.2016.04.064.
- Liu, Z., Jiang, Q., Li, T., Zhang, H., 2014b. An optimal timing of engine remanufacturing—a real option approach. *Procedia CIRP* 15, 223–227. URL : <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.035>, doi :10.1016/j.procir.2014.06.035.
- Lu, X., Chen, M., Liu, M., Zhou, D., 2012. Optimal imperfect periodic preventive maintenance for systems in time-varying environments. *IEEE Transactions on Reliability* 61, 426–439. URL : <https://doi.org/10.1109/TR.2012.2182817>, doi :10.1109/TR.2012.2182817.
- Lund, R.T., Mundial, B., 1984. *Remanufacturing : the experience of the United States and implications for developing countries*. volume 31. World Bank.
- Malik, M.A.K., 1979. Reliable preventive maintenance scheduling. *AIEE transactions* 11, 221–228. URL : <https://doi.org/10.1080/05695557908974463>, doi :10.1080/05695557908974463.
- Márquez, A.C., León, P., Fernández, J., Márquez, C.P., Campos, M.L., 2009. The maintenance management framework : A practical view to maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 15, 167–178. URL : <https://doi.org/10.1108/13552510910961110>, doi :10.1108/13552510910961110.
- Martinelli, F., 2005. Control of manufacturing systems with a two-value, production-dependent failure rate. *Automatica* 41, 1943–1948. URL : <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2005.05.016>, doi :10.1016/j.automatica.2005.05.016.
- Martorell, S., Sanchez, A., Serradell, V., 1999. Age-dependent reliability model considering effects of maintenance and working conditions. *Reliability Engineering & System Safety* 64, 19–31. URL : [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(98\)00050-7](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(98)00050-7), doi :10.1016/S0951-8320(98)00050-7.
- Marufuzzaman, M., 2014. *Models for a carbon constrained, reliable biofuel supply chain network design and management*. Mississippi State University.
- Marzo, G., Pagnozzi, T., 2011. Can depreciation be a variable cost? a comparison between the straight-line method and the units of production method in a lean company context. URL : <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1968821>, doi :10.2139/ssrn.1968821.

- Matsumoto, M., Umeda, Y., 2011. An analysis of remanufacturing practices in japan. *Journal of Remanufacturing* 1, 2.
- Mitchell, M., 1998. *An introduction to genetic algorithms*. MIT press.
- Morris, J., 2005. Comparative lcas for curbside recycling versus either landfilling or incineration with energy recovery (12 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment* 10, 273–284.
- Mukhopadhyay, D.M., Balitanas, M.O., Farkhod, A., Jeon, S.H., Bhattacharyya, D., 2009. Genetic algorithm : A tutorial review. *International journal of grid and distributed computing* 2, 25–32.
- Nakagawa, T., 1979. Optimum policies when preventive maintenance is imperfect. *IEEE Transactions on Reliability* 28, 331–332.
- Nakagawa, T., 1980. A summary of imperfect preventive maintenance policies with minimal repair. *Revue française d'automatique, d'informatique et de recherche opérationnelle. Recherche opérationnelle* 14, 249–255. URL : http://www.numdam.org/item?id=RO_1980__14_3_249_0.
- Nakagawa, T., 1988. Sequential imperfect preventive maintenance policies. *IEEE Transactions on Reliability* 37, 295–298. URL : <https://doi.org/10.1109/24.3758>, doi :10.1109/24.3758.
- Nakajima, S., Sim, Y., 1989. *La maintenance productive totale (TPM) : mise en oeuvre*. Afnor.
- Olagunju, M., Yaru, S., 2014. Economic usability values of machine performance using computer algorithm. *Computing, Information Systems, Development Informatics and Allied Research Journal* 5, 13–16.
- Östlin, J., Sundin, E., Björkman, M., 2008. Importance of closed-loop supply chain relationships for product remanufacturing. *International Journal of Production Economics* 115, 336–348.
- Ouali, M.S., Tadj, L., Yacout, S., Ait-Kadi, D., 2011. A survey of replacement models with minimal repair, in : *Replacement Models with Minimal Repair*. Springer, pp. 3–100.
- Özekici, S., 1995. Optimal maintenance policies in random environments. *European Journal of Operational Research* 82, 283–294.
- Palmer, R.J., Davis, H.H., 2004. Connecting concepts of business strategy and competitive advantage to activity-based machine cost allocations, in : *Advances in Management Accounting*. Emerald Group Publishing Limited, pp. 219–236.
- Parker, S., 1997. *Remanufacturing : The ultimate form of recycling*. Technical Report. Air and Waste Management Association, Pittsburgh, PA (United States).
- Peurifoy, R.L., Ledbetter, W.B., 1985. *Construction planning, equipment, and methods*. Technical Report.

- Pham, H., Wang, H., 1996. Imperfect maintenance. *European journal of operational research* 94, 425–438.
- Pochet, Y., Wolsey, L.A., 2006. *Production planning by mixed integer programming*. Springer Science & Business Media.
- Priyono, A., Ijomah, W., Bititci, U., 2016. Disassembly for remanufacturing : A systematic literature review, new model development and future research needs. *Journal of Industrial Engineering and Management* 9, 899.
- Qingdi, L., Dan, S.S.Z., 2013. Time interval decision-making methods for active remanufacturing product based on game theory and neural network. *Journal of Mechanical Engineering* 7, 006.
- Quariguasi Frota Neto, J., Walther, G., Bloemhof, J., Van Nunen, J., Spengler, T., 2010. From closed-loop to sustainable supply chains : the weee case. *International Journal of Production Research* 48, 4463–4481.
- Rogers, D.S., Tibben-Lembke, R.S., et al., 1999. *Going backwards : reverse logistics trends and practices*. volume 2. Reverse Logistics Executive Council Pittsburgh, PA.
- Ryan, S.M., 1998. Forecast frequency in rolling horizon hedging heuristics for capacity expansion. *European journal of operational research* 109, 550–558.
- Saavedra, Y.M., Barquet, A.P., Rozenfeld, H., Forcellini, F.A., Ometto, A.R., 2013. Remanufacturing in brazil : case studies on the automotive sector. *Journal of Cleaner Production* 53, 267–276. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.038>, doi :10.1016/j.jclepro.2013.03.038.
- Sahin, F., Narayanan, A., Robinson, E.P., 2013. Rolling horizon planning in supply chains : review, implications and directions for future research. *International Journal of Production Research* 51, 5413–5436.
- Sahling, F., 2016. Integration of vendor selection into production and remanufacturing planning subject to emission constraints. *International Journal of Production Research* 54, 3822–3836.
- Saidi-Mehrabad, M., Jabarzadeh, A., Alimian, M., 2017. An integrated production and preventive maintenance planning model with imperfect maintenance in multi-state system. *Journal of Industrial and Systems Engineering* 10, 28–42. URL : http://www.jise.ir/article_46253.html.
- Schraven, M., Heyer, S., Rütthard, N., 2012. Remanufacturing and reuse of production equipment at an automotive oem, in : *Sustainable Manufacturing*. Springer, pp. 125–130. URL : https://doi.org/10.1007/978-3-642-27290-5_19, doi :10.1007/978-3-642-27290-5_19.
- Schutz, J., 2009. *Contribution à l'optimisation des plans d'exploitation et de maintenance, selon une approche basée sur le pronostic : application au domaine naval*. Ph.D. thesis. Université Paul Verlaine-Metz.

- Seldon, M.R., 1979. Life cycle costing : A better method of government procurement. Westview Press Boulder, Colorado.
- Selvik, J.T., Aven, T., 2011. A framework for reliability and risk centered maintenance. *Reliability Engineering & System Safety* 96, 324–331.
- Sethi, S., Sorger, G., 1991. A theory of rolling horizon decision making. *Annals of Operations Research* 29, 387–415.
- Sharma, V., Garg, S., Sharma, P., 2015. Remanufacturing process : the case of heavy equipment support services. *International Journal of Services and Operations Management* 22, 40–59. URL : <https://doi.org/10.1504/IJSOM.2015.070882>, doi :10.1504/IJSOM.2015.070882.
- Shen, X., 2017. Complex lot Sizing problem with parallel machines and setup carryover. Ph.D. thesis. PSL Research University.
- Shi, W., Min, K.J., 2014. Product remanufacturing and replacement decisions under operations and maintenance cost uncertainties. *The Engineering Economist* 59, 154–174. URL : <https://doi.org/10.1080/0013791X.2014.884662>, doi :10.1080/0013791X.2014.884662.
- da Silva, E.J., Ometto, A.R., Rozenfeld, H., Silva, D.A.L., Pigosso, D.C.A., Reis, V.R.A., 2012. Prototypical implementation of a remanufacturing oriented grinding machine, in : *Leveraging Technology for a Sustainable World*. Springer, pp. 257–262. URL : https://doi.org/10.1007/978-3-642-29069-5_44, doi :10.1007/978-3-642-29069-5_44.
- Sinha, P., Muthu, S.S., Dissanayake, G., 2016. The remanufacturing industry and fashion, in : *Remanufactured Fashion*. Springer, pp. 1–9. URL : https://doi.org/10.1007/978-981-10-0297-7_1, doi :10.1007/978-981-10-0297-7_1.
- Smith, V.M., Keoleian, G.A., 2004. The value of remanufactured engines : life-cycle environmental and economic perspectives. *Journal of Industrial Ecology* 8, 193–221.
- Steingrímsson, J., Bilge, P., Heyer, S., Seliger, G., 2011. Business strategies for competition and collaboration for remanufacturing of production equipment, in : *Advances in Sustainable Manufacturing*. Springer, pp. 91–97. URL : https://doi.org/10.1007/978-3-642-20183-7_14, doi :10.1007/978-3-642-20183-7_14.
- Stindt, D., Sahamie, R., 2014. Review of research on closed loop supply chain management in the process industry. *Flexible Services and Manufacturing Journal* 26, 268–293. URL : <https://doi.org/10.1007/s10696-012-9137-4>, doi :10.1007/s10696-012-9137-4.
- Subramoniam, R., Huisingh, D., Chinnam, R.B., Subramoniam, S., 2013. Remanufacturing decision-making framework (rdmf) : research validation using the analytical hierarchical process. *Journal of Cleaner Production* 40, 212–220.
- Talbi, E.G., 2009. *Metaheuristics : from design to implementation*. volume 74. John Wiley & Sons.

- Tempelmeier, H., Copil, K., 2016. Capacitated lot sizing with parallel machines, sequence-dependent setups, and a common setup operator. *OR spectrum* 38, 819–847. URL : <https://doi.org/10.1007/s00291-015-0410-2>, doi :10.1007/s00291-015-0410-2.
- Trappey, A.J., Trappey, C.V., Ma, L., Chang, J.C., 2015. Intelligent engineering asset management system for power transformer maintenance decision supports under various operating conditions. *Computers & Industrial Engineering* 84, 3–11. URL : <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.12.033>, doi :10.1016/j.cie.2014.12.033.
- Ullah, H., Parveen, S., 2010. A literature review on inventory lot sizing problems. *Global Journal of Research In Engineering* 10.
- Ullah, S.M.S., Muhammad, I., Ko, T.J., 2016. Optimal strategy to deal with decision making problems in machine tools remanufacturing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 3, 19–26. URL : <https://doi.org/10.1007/s40684-016-0003-9>, doi :10.1007/s40684-016-0003-9.
- USITC, et al., 2012. Remanufactured goods : An overview of the us and global industries, markets, and trade. United States International Trade Commission (USITC) Publication 4356, 332–525.
- Vahabzadeh, A.H., Yusuff, R.B.M., 2015. A content analysis in reverse logistics : A review. *Journal of Statistics and Management Systems* 18, 329–379. URL : <https://doi.org/10.1080/09720510.2014.927605>, doi :10.1080/09720510.2014.927605.
- Van Horenbeek, A., Buré, J., Cattrysse, D., Pintelon, L., Vansteenwegen, P., 2013. Joint maintenance and inventory optimization systems : A review. *International Journal of Production Economics* 143, 499–508.
- Vose, M.D., 1999. *The simple genetic algorithm : foundations and theory*. volume 12. MIT press.
- Vu, H.C., Do, P., Barros, A., Bérenguer, C., 2014a. Maintenance grouping strategy for multi-component systems with dynamic contexts. *Reliability Engineering & System Safety* 132, 233–249.
- Vu, H.C., Do, P., Barros, A., Bérenguer, C., 2014b. Maintenance planning and dynamic grouping for multi-component systems with positive and negative economic dependencies. *IMA Journal of Management Mathematics* 26, 145–170.
- Wang, D., Tang, O., Zhang, L., 2014. A periodic review lot sizing problem with random yields, disruptions and inventory capacity. *International Journal of Production Economics* 155, 330–339. URL : <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.02.007>, doi :10.1016/j.ijpe.2014.02.007.
- Wei, S., Tang, O., Sundin, E., 2015. Core (product) acquisition management for remanufacturing : a review. *Journal of Remanufacturing* 5, 4. URL : <https://doi.org/10.1186/s13243-015-0014-7>, doi :10.1186/s13243-015-0014-7.

- Wells, P., Seitz, M., 2005. Business models and closed-loop supply chains : a typology. *Supply Chain Management : An International Journal* 10, 249–251.
- Xia, T., Xi, L., Zhou, X., Du, S., 2012. Modeling and optimizing maintenance schedule for energy systems subject to degradation. *Computers & Industrial Engineering* 63, 607–614. URL : <https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.01.014>, doi :10.1016/j.cie.2012.01.014.
- Xing, B., 2013. *Computational intelligence in remanufacturing*. IGI Global.
- Xu, Z., Ji, Y., Zhou, D., 2009. A new real-time reliability prediction method for dynamic systems based on on-line fault prediction. *IEEE transactions on reliability* 58, 523–538.
- Yalaoui, A., Chaabi, K., Yalaoui, F., 2014. Integrated production planning and preventive maintenance in deteriorating production systems. *Information Sciences* 278, 841–861.
- Yamamoto, Y., Bellgran, M., 2009. Production management infrastructure that enables production to be innovative, in : 16th Annual International EurOMA Conference, 2009, Göteborg, Sweden, 14-17 June.
- Yan, C., 2013. Remanufacturing and benefits analysis of construction machinery hydraulic valves, in : *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publ. pp. 2266–2270.
- Yang, Q., 2014. Remanufacturing versus new acquisition of production equipment : Definitions and decision-making checklist. URL : <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A775806&dswid=-7371>.
- Yaoling, H., 2012. International comparison and the enlightenment on machine tool remanufacturing industry development [j]. *Recyclable Resources and Circular Economy* 2, 015. URL : http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-ZSZY201202015.htm.
- Yi, P., Huang, M., Guo, L., Shi, T., 2016. A retailer oriented closed-loop supply chain network design for end of life construction machinery remanufacturing. *Journal of Cleaner Production* 124, 191–203. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.070>, doi :10.1016/j.jclepro.2016.02.070.
- Yin, Y., 2013. Remanufacturing research on recycling products of machinery and equipment base on erm, in : *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publ. pp. 1090–1094.
- Yiqing, Z., Zhiyong, Z., Yun, X., Wen, W., 2006. Research and application of automation technology in renovation for old import machine tool, in : *IET Conference Publications*, pp. 2134–2137. URL : <http://dx.doi.org/10.1049/cp:20061125>, doi :10.1049/cp:20061125.
- You, M.Y., Li, H., Meng, G., 2011. Control-limit preventive maintenance policies for components subject to imperfect preventive maintenance and variable operational conditions. *Reliability Engineering & System Safety* 96, 590–598. URL : <https://doi.org/10.1016/j.ress.2010.12.015>, doi :10.1016/j.ress.2010.12.015.
- Zhang, H., Liu, S., Lu, H., Zhang, Y., 2013. Remanufacturing and remaining useful life assessment. *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology* , 1–49.

- Zhang, T., Chu, J., Wang, X., Liu, X., Cui, P., 2011. Development pattern and enhancing system of automotive components remanufacturing industry in china. *Resources, Conservation and Recycling* 55, 613–622. URL : <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.09.015>, doi :10.1016/j.resconrec.2010.09.015.
- Zhao, X., Fouladirad, M., Bérenguer, C., Bordes, L., 2010. Condition-based inspection/replacement policies for non-monotone deteriorating systems with environmental covariates. *Reliability Engineering & System Safety* 95, 921–934. URL : <https://doi.org/10.1016/j.ress.2010.04.005>, doi :10.1016/j.ress.2010.04.005.
- Zhou, J., Huang, P., Zhu, Y., Deng, J., 2012. A quality evaluation model of reuse parts and its management system development for end-of-life wheel loaders. *Journal of Cleaner Production* 35, 239–249. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.037>, doi :10.1016/j.jclepro.2012.05.037.
- Zondervan, E., Kaland, M., van Elzakker, M.A., Fransoo, J.C., Meuldijk, J., 2014. Integrating planning and scheduling in an oil refinery with a rolling horizon approach, in : *Computer Aided Chemical Engineering*. Elsevier. volume 33, pp. 439–444.

Résumé

Cette thèse a pour but d'étudier les possibilités du remanufacturing des équipements de production du point de vue de l'utilisateur. Les équipements considérés sont utilisés pour fabriquer un seul type de produit afin de répondre à des demandes déterministes et dynamiques durant un horizon fini. Les actions de maintenance préventive sont supposées imparfaites. En effet, lorsqu'elles sont effectuées, ces actions sont censées améliorer l'équipement en atteignant un état entre « Aussi Bon Que Neuf » et « Aussi Mauvais Qu'Ancien ». Nous supposons que les partenaires (l'utilisateur de l'équipement et le fabricant/re-fabricant d'équipements d'origine) sont intéressés par toute opportunité du remanufacturing. Notre objectif dans cette thèse est d'examiner l'interdépendance entre les conditions opérationnelles, les activités de maintenance, et les décisions du remanufacturing dans le secteur des équipements de production lorsque des pièces de rechange neuves et remanufacturées sont utilisées dans le processus du remanufacturing. Dans ce contexte, nous proposons une approche de planification intégrée afin d'optimiser conjointement le plan de production, le plan du remanufacturing et la qualité des pièces de rechange utilisées pour chaque action du remanufacturing.

Mots-clés : Remanufacturing préventive, maintenance imparfaite, planification de la production, algorithme génétique, Heuristique Fix-and-Relax.

Abstract

These thesis aims at investigating the remanufacturing opportunities of production equipment from the user's perspective. The considered equipment are used to produce a single product in order to meet deterministic and dynamic demands over a finite horizon. Preventive maintenance actions on equipment are assumed to be imperfect. Indeed, when performed, these actions can improve the equipment to reach a state between the "As-good-as-new" level and the "As-bad-as-old" level. It is assumed that the stakeholders (the equipment's user and the original equipment manufacturer-remanufacturer) are interested by all remanufacturing opportunities. We aimed at investigating the interdependence between the operating conditions, the maintenance activities, and the remanufacturing decisions in production equipment sector when new and remanufactured spare parts are used in the remanufacturing process. In this context, we propose an integrated planning approach to jointly optimize the production plan, the remanufacturing plan and the quality of spare parts used in each remanufacturing action.

Keywords: Preventive remanufacturing, Imperfect maintenance, Production planning, Genetic algorithm, Fix and Relax heuristic.

ملخص

تهدف هذه الأطروحة إلى دراسة فرص إعادة تصنيع معدات الإنتاج من منظور المستخدم، والتي تستخدم لإنتاج منتج واحد من أجل تلبية مطالب متغيرة متوقعة مسبقاً على مدى أفق محدود. نفترض أن إجراءات الصيانة الوقائية على المعدات غير تامة، حيث أنها تسمح بتحسين المعدات للوصول بها إلى حالة بين المستوى "الجيد كالجديد" والمستوى "السيء كالعديم". نفترض أيضاً أن الأطراف الفاعلة (مستخدم الآلة والشركة المصنعة للمعدات الأصلية) مهتمون بجميع فرص إعادة التصنيع. نهدف إلى دراسة الترابط بين ظروف التشغيل، أنشطة الصيانة، وكذا قرارات إعادة التصنيع في قطاع معدات الإنتاج في حالة استخدام قطع الغيار الجديدة والمعاد تصنيعها في عملية إعادة تصنيع المعدات. في هذا السياق، نقترح منهجية تخطيط مشترك لتحديد وتيرة الإنتاج المناسبة، أوقات إعادة التصنيع الملائمة وكذا النوعية المناسبة لقطع الغيار المستخدمة في كل عملية إعادة تصنيع

الكلمات المفتاحية: إعادة التصنيع الوقائي، الصيانة غير الكاملة، تخطيط الإنتاج، الخوارزمية الجينية، طريقة التثبيت والتخفيف