



**Centre d'Etudes Doctorales : Sciences et Techniques de l'Ingénieur**

N° d'ordre : 35/2020

**THÈSE DE DOCTORAT**

Présentée par :

**HAFIDI NOUHAYLA**

**Spécialité : Génie Industriel**

Thèse en codirection préparée au sein du Laboratoire de Génie Mécanique de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès et l'équipe de Modélisation et Génie des Systèmes Industriels de l'IUT de Montreuil, France

**Sujet de la thèse :**

**Contribution au développement de nouvelles stratégies d'intégration de la maintenance, de la production et de la qualité pour un système multi-machine/multiproduit sous contrainte de la sous-traitance**

**Formation Doctorale :** Sciences de l'ingénieur Sciences Physiques, Mathématiques et Informatique.

**Thèse présentée et soutenue le mercredi 23 septembre 2020 à 10h au Centre de conférence devant le jury composé de :**

Prénom, Nom	Titre	Établissement	
Pr. Fouad JAWAB	PES	École Supérieure de Technologie, Fès	Président
Pr. Mohammed SALLAOU	PES	École nationale des Arts et des Métiers, Meknès	Rapporteur
Pr. Jalil ABOUCHITA	PES	Faculté des Sciences et Techniques, Fès	Rapporteur
Pr. Mohamed ABOUSSALEH	PH	École nationale des Arts et des Métiers, Meknès	Rapporteur
Pr. Ahmed EL BIYAALI	PES	Faculté des Sciences et Techniques, Fès	Examineur
Pr. Abdelouahhab JABRI	PH	Faculté des Sciences et Techniques, Fès	Examineur
Pr. Abdellah EL BARKANY	PES	Faculté des Sciences et Techniques, Fès	Directeur de thèse
Pr. Abderrahman EL MHAMED I	PES	IUT de Montreuil, France	Codirecteur de thèse

Morad MAHMOUDI	Docteur Nexans, Casablanca	Invité
----------------	----------------------------	--------

**Laboratoire d'accueil :** Génie Mécanique.

**Établissement :** Faculté des Sciences et Techniques de Fès.

*A mes parents*  
*A mes sœurs*  
*A tous ceux qui me sont Chers*

# Remerciements

Cette thèse est l'aboutissement d'un travail acharné réalisée dans le cadre d'une collaboration entre le Laboratoire de Génie Mécanique (GM) de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès et le Laboratoire de QUARTZ (EA 3793), équipe Modélisation et Génie des Systèmes Industriels (MGSI) de l'IUT de Montreuil en France. Cette thèse de doctorat représente une contribution individuelle réalisée avec diligence à l'aide et avec le précieux soutien de plusieurs personnes.

Tout d'abord, mes remerciements vont au Créateur de l'univers qui m'a douée d'intelligence et la santé pour mener à bien cette thèse. A travers ces lignes, je voudrais remercier plusieurs personnes sans leurs soutiens ce travail n'a pu être mené à bien.

Je tiens à remercier le Professeur Fouad JAWAB pour l'honneur qu'il m'a fait de présider le jury de ma thèse, ainsi que Messieurs les Professeurs Mohammed SALLAOU, Jalil ABOUCHITA et Mohamed ABOUSSALEH pour l'intérêt et l'attention qu'ils ont accordé à ce travail de thèse et d'avoir accepté d'en être les rapporteurs. Je vous remercie pour le temps consacré à la lecture de cette thèse, ainsi que pour les remarques pertinentes m'ayant permis de l'améliorer. Je remercie également les Professeurs Ahmed EL BIYAALI et Abdelouahhab JABRI qui me font l'honneur d'examiner mon travail de recherche et de faire partie de mon jury de thèse.

Je souhaite aussi traduire ma respectueuse reconnaissante à mon directeur de thèse Monsieur le Professeur Abdellah EL BARKANY, non seulement pour son encadrement de haute qualité, ses précieux conseils et orientations, mais aussi pour sa disponibilité tout au long de la thèse et son dévouement. Il m'est particulièrement agréable d'exprimer ma gratitude et mes remerciements pour la confiance qu'il m'a témoignée depuis le début de la thèse.

Je tiens particulièrement à témoigner toute ma gratitude à Monsieur le Professeur Abderrahman EL MHAMEDI, mon co-directeur de thèse, pour m'avoir accueilli très chaleureusement au sein de son équipe Modélisation et Génie des Systèmes Industriels (MGSI), pour la confiance et l'intérêt dont il a fait preuve envers ma recherche. Je le remercie vivement pour leurs précieux conseils techniques et pour la pertinence de leurs suggestions.

Je suis très honoré à remercier Monsieur le Professeur Mustapha IJJAALI, Doyen de la FST de Fès, pour m'avoir assuré un environnement favorable pour mes travaux de recherche. Je remercie encore Monsieur le Professeur El Mestafa El HADRAMI, Vice-Doyen chargé de la recherche, de la formation continue et des relations extérieures pour son soutien permanent et sa disponibilité. Je profite de cette occasion pour remercier très sincèrement tous les professeurs du département de Génie Mécanique de la FST de Fès pour leurs conseils, qu'ils trouvent ici un témoignage de ma gratitude. Merci également à toute les amis-chercheurs de laboratoire génie mécanique pour leurs soutiens.

J'adresse également mes remerciements les plus chaleureux à mes collègues chercheurs et doctorants de laboratoire génie mécanique et de l'équipe Modélisation et Génie des Systèmes Industriels pour leur sympathie et leur convivialité.

C'est l'occasion d'exprimer mes sincères remerciements à mes parents pour leur amour, leur confiance et leur soutien constant. Je tiens également à remercier du fond du cœur mes adorables sœurs qui m'ont toujours encouragée et soutenue le long de mes études doctorales. Ces remerciements seraient incomplets si je n'en adressais pas ma gratitude à mes amis, pour leur engagement et leur soutien moral.

Pour conclure ce préambule, je remercie toutes les personnes, de près ou de loin, qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail. Ce présent travail a été rendu possible grâce à leur soutien.

# Résumé

Dans le contexte industriel, le bon fonctionnement des machines et la qualité des produits fabriqués sont primordiaux pour la bonne marche de la production. Sur le plan pratique, la production, la maintenance et la qualité sont souvent gérées séparément, en dépit du fait qu'elles sont étroitement liées. Il est donc indispensable de gérer conjointement les stratégies de production, de maintenance et de qualité afin d'assurer la performance globale de l'entreprise. D'autre part, pour réaliser des économies et faire face aux fluctuations de la demande, la création des partenariats de sous-traitance est essentielle. Ce travail de thèse porte sur l'optimisation conjointe des stratégies de production et de maintenance dans le cadre de la sous-traitance.

Dans le cadre de cette thèse, nous considérons dans un premier lieu la dégradation des systèmes de production comme un point critique qui impacte à la fois les plans de production et de maintenance. Cependant, peu de travaux dans la littérature traitent les modèles mathématiques relatifs aux stratégies de production et de maintenance qui tiennent compte de l'impact de la dégradation. En effet, la croissance du taux de production engendre la précipitation du processus de dégradation. Pour cela, une stratégie de maintenance adaptée est nécessaire pour réduire l'occurrence des pannes et la baisse de productivité ainsi que pour ralentir la dégradation des équipements. C'est la raison pour laquelle les décideurs doivent tenir compte du processus de dégradation lors de l'élaboration des plans de production et de maintenance. En second lieu, la dégradation des équipements peut également affecter la qualité des produits fabriqués, d'où la prise en compte d'un système de production imparfait pouvant engendrer des produits non conformes. En réalité, le système de production entraîne des produits défectueux à partir d'un certain niveau de dégradation. Cependant, la bonne qualité des produits fabriqués présente un défi majeur dans le secteur industriel. En principe, afin de satisfaire les besoins des clients en termes de qualité, il est indispensable d'élaborer des stratégies de maintenance permettant d'améliorer considérablement la qualité des pièces fabriquées. Ceci justifie la forte interaction entre la planification de la production, la stratégie de contrôle qualité et la planification des activités de maintenance.

Néanmoins, lors d'une demande en quantité élevée, les capacités de l'entreprise sont parfois insuffisantes. De ce fait, l'entreprise fait appel à la sous-traitance pour répondre aux exigences de la clientèle. Bien que, le donneur d'ordres doit faire un choix optimal de sous-traitance pour garder la bonne image de l'entreprise et gagner de nouveaux marchés. A cet égard, nous considérons que ce choix est multicritère, en fonction du taux et du coût unitaire de sous-traitance. Par la suite, nous prenons également en compte la dimension logistique lors du choix d'une stratégie de sous-traitance qui définit la distance de livraison pour le client. Ce n'est pas seulement que le manque de capacité du donneur d'ordres qui justifie l'intervention de la sous-traitance, mais aussi par la bonne qualité des produits fabriqués ainsi que la minimisation des coûts.

Les contributions mentionnées antérieurement ont été appliquées premièrement pour un système de production simple consistant en une seule machine produisant un seul type de produit ensuite pour d'autres systèmes complexes tels qu'un système multi-machines et multi-produits. L'objectif principal de ce travail est de réaliser un compromis entre les plans de production interne, les plans de sous-traitance et les stratégies de maintenance en tenant compte des contraintes de dégradation et du système imparfait. Pour y parvenir, de nombreux modèles et approches d'optimisation sont développés. Pour résoudre notre problème, nous avons utilisé des approches de résolution basées sur des méthodes exactes et approchées en utilisant le solveur Matlab. Finalement, nous avons fourni des exemples numériques pour illustrer les résultats obtenus en représentant les écarts économiques ainsi nous avons montré la robustesse des modèles proposés.

**Mots clés :** Production ; maintenance ; contrôle qualité, sous-traitance ; plan intégré ; système imparfait ; modélisation ; optimisation ; système multi-machines ; système multi-produits ; algorithmes génétiques.

# Abstract

In the industrial context, the proper functioning of the machines and the quality of the products manufactured are essential for the smooth running of production. In practice, production, maintenance and quality are often managed separately, despite the fact that they are closely linked. It is therefore essential to manage production, maintenance and quality strategies jointly in order to ensure the overall performance of the company. On the other hand, in order to achieve savings and cope with fluctuations in demand, the creation of subcontracting partnerships is essential. This thesis work focuses on the joint optimization of production and maintenance strategies within the framework of subcontracting.

Within the framework of this thesis, we consider in a first place the degradation of production systems as a critical point that impacts both production and maintenance plans. However, few works in the literature deal with mathematical models relating to production and maintenance strategies that take into account the impact of degradation. Indeed, growth in the rate of production leads to the precipitation of the degradation process. For this, an adapted maintenance strategy is necessary to reduce the occurrence of breakdowns and the drop in productivity as well as to slow down the degradation of equipment. For this reason, decision-makers must take the degradation process into account when developing production and maintenance plans. Secondly, equipment degradation can also affect the quality of the products produced; hence the need to take into account an imperfect production system that can lead to non-compliant products. In reality, the production system leads to defective products from a certain level of degradation. However, the good quality of manufactured products presents a major challenge in the industrial sector. In principle, in order to satisfy customer needs in terms of quality, it is essential to develop maintenance strategies that can considerably improve the quality of the parts manufactured. This justifies the strong interaction between production planning, the quality control strategy and the planning of maintenance activities.

Nevertheless, in the case of high demand, the company's capacity is sometimes insufficient. As a result, the company uses subcontractors to meet customer requirements. Although, the client must make an optimal choice of subcontracting to keep the good image of the company and win new markets. In this respect, we consider that this choice is multi-criteria, depending on the rate of sub-contracting and the unit cost of sub-contracting. Subsequently, we also take into account the logistics dimension when choosing a subcontracting strategy that defines the delivery distance for the customer. It is not only the lack of capacity on the part of the client that justifies the use of subcontracting, but also the high quality of the products manufactured and the minimization of costs.

The contributions mentioned above were applied firstly for a simple production system consisting of a single machine producing a single type of product and then for other complex systems such as a multi-machine and multi-product system. The main objective of this work is to achieve a compromise between in-house production plans, subcontracting plans and maintenance strategies taking into account degradation constraints and the imperfect system. To achieve this, many optimization models and approaches are developed. To solve our problem, we used approaches based on exact and approximate methods using the Matlab solver. Finally, we provided numerical examples to illustrate the results obtained by representing the economic deviations, thus showing the robustness of the proposed models.

**Keywords:** Production; maintenance; quality, subcontracting; integrated plan; imperfect system; modeling; optimization; multi-machine system; multi-product system; genetic algorithms.

# Table des matières

<b>Remerciements</b> .....	<b>3</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>4</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>5</b>
<b>Table des matières</b> .....	<b>6</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>11</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>13</b>
<b>Liste des algorithmes</b> .....	<b>14</b>
<b>Acronymes</b> .....	<b>15</b>
<b>Chapitre 1</b> .....	<b>20</b>
<b>État de l'art et problématique de la thèse</b> .....	<b>20</b>
1.1 Introduction.....	20
1.2 Les systèmes de production .....	21
1.2.1 Classification des systèmes de production .....	21
1.2.1.1 Classification selon la capacité de production.....	21
1.2.1.2 Classification selon les ressources matérielles .....	22
1.2.1.3 Classification selon la nature de la demande .....	22
1.3 Dégradation des systèmes de production.....	22
1.3.1 Classification des pannes .....	24
1.3.2 Modélisation de la dégradation .....	24
1.4 Problème de dimensionnement des lots.....	25
1.4.1 Définition du problème de dimensionnement des lots .....	25
1.4.2 Les types de problème de dimensionnement de lot.....	25
1.5 Stratégies de maintenance.....	26
1.5.1 Les types de maintenance.....	27
1.5.1.1 Maintenance préventive.....	27
1.5.1.2 Maintenance corrective .....	28
1.5.2 Optimisation des stratégies de maintenance.....	28
1.5.2.1 Stratégie type âge .....	28
1.5.2.2 Stratégie type bloc .....	29
1.5.3 Modèles de la maintenance .....	29
1.5.3.1 Modèle de maintenance parfaite.....	29
1.5.3.2 Modèle de maintenance minimale.....	30
1.5.3.3 Modèle de maintenance imparfaite .....	30
1.6 Concept de la sous-traitance industrielle .....	30

1.6.1 Définition de la sous-traitance.....	30
1.6.2 Motivations de la sous-traitance.....	31
1.6.3 Diverses formes de la sous-traitance.....	31
1.6.4 Les stratégies de sous-traitance.....	32
1.6.5 Les avantages de la sous-traitance.....	33
1.6.6 Les limites de la sous-traitance.....	33
1.6.7 La sous-traitance de production et la sous-traitance de maintenance.....	34
1.6.7.1 La sous-traitance de production.....	34
1.6.7.2 La sous-traitance de maintenance.....	34
1.7 Gestion de la maintenance et de la production.....	35
1.7.1 Planification séparée de la production et de la maintenance.....	35
1.7.2 Planification intégrée de la production et de la maintenance.....	35
1.8 Intégration des politiques de contrôle de la production, de la maintenance et de la qualité.....	38
1.8.1 Optimisation conjointe des décisions de qualité et de maintenance.....	38
1.8.2 Contrôle intégré de production et de qualité.....	39
1.8.3 Gestion intégrée de la production, la maintenance et la qualité.....	40
1.9 Modélisation et optimisation des systèmes de production.....	42
1.9.1 Modélisation mathématique.....	42
1.9.2 Problème d'optimisation.....	43
1.9.2.1 Les méthodes exactes.....	45
1.9.2.2 Les méthodes approchées.....	46
1.10 Analyse et discussion de la revue de littérature.....	48
1.11 Objectif général et problématique de la thèse.....	54
1.11.1 Motivations de l'étude.....	54
1.11.2 Problématique.....	55
1.12 Conclusion.....	56
<b>Chapitre 2.....</b>	<b>59</b>
<b>Modèle de la planification conjointe de la production et de la maintenance dans le cadre de la sous-traitance.....</b>	<b>59</b>
2.1 Introduction.....	59
2.2 Capacité de production et besoin de la sous-traitance.....	60
2.3 Etude de l'analyse de l'existant.....	61
2.3.1 Stratégie de choix du sous-traitant unique.....	61
2.3.2 Stratégie de commutation entre les sous-traitants.....	63
2.3.2.1 Détermination de la période de maintenance préventive.....	63
2.3.2.2 Détermination de la date de commutation entre les sous-traitants.....	65
2.3.3 Synthèse de l'étude d'analyse de l'existant.....	66

2.4 Nouveau modèle d'un plan intégré de la production et de la maintenance dans le cadre de la sous-traitance .....	67
2.4.1 Définition de la problématique industrielle.....	67
2.4.2 Modélisation du plan intégré de production et de la maintenance .....	68
2.4.2.1 Stratégie de production.....	68
2.4.2.2 Stratégie de maintenance.....	68
2.4.3 Modélisation mathématique .....	69
2.4.3.1 Notations .....	69
2.4.3.1.1 Variables de décision.....	69
2.4.3.1.2 Paramètre du modèle .....	69
2.4.3.2 Hypothèses .....	70
2.4.3.3 Coût de production .....	70
2.4.3.4 Coût de stockage .....	71
2.4.3.5 Coût des demandes perdus .....	72
2.4.3.6 Coût de maintenance .....	73
2.4.4 Formulation du modèle proposé.....	73
2.4.4.1 Scénario 1 : cas où le coût unitaire de production de sous-traitance est fixe .....	74
2.4.4.2 Scénario 2 : cas où la capacité maximale de production de sous-traitance est fixe.....	74
2.4.4.3 Scénario 3 : cas où le coût unitaire et la capacité maximale de production de sous-traitance sont variables .....	75
2.4.4.4 Signification des équations des contraintes .....	75
2.4.5 Procédure de résolution.....	76
2.4.5.1 Type de problème étudié .....	76
2.4.5.2 Description de la fonction fmicon (optimization toolbox) .....	76
2.4.6 Résultats numériques et discussion .....	78
2.4.6.1 Résolution du premier scénario .....	79
2.4.6.2 Résolution du deuxième scénario .....	80
2.4.6.3 Résolution du troisième scénario.....	81
2.4.7 Analyse de sensibilité.....	83
2.4.8 Etude comparative.....	85
2.5 Conclusion .....	85
<b>Chapitre 3 .....</b>	<b>88</b>
<b>Planification de la production et de la maintenance pour un système de production multi-machine soumis à des contraintes de dégradation et de sous-traitance .....</b>	<b>88</b>
3.1 Introduction.....	88
3.2 Contribution et objectifs de recherche .....	89
3.3 La dégradation des systèmes de production.....	90



---

3.4 Les caractéristiques des lignes de production .....	91
3.5 Description du problème : notations et hypothèses .....	93
3.5.1 Description du problème industriel .....	93
3.5.2 Hypothèses et notations.....	94
3.5.2.1 Indices .....	94
3.5.2.2 Variables de décisions .....	94
3.5.2.3 Paramètres du modèle .....	95
3.5.2.4 Hypothèses simplificatrices.....	95
3.6 Formulation du modèle mathématique .....	96
3.6.1 Politique de production .....	96
3.6.1.1 Quantité totale de production de la ligne parallèle .....	96
3.6.1.2 Niveau de stock durant chaque période.....	96
3.6.1.3 Coût de production .....	97
3.6.1.4 Coût de sous-traitance .....	97
3.6.1.5 Coût de stockage .....	97
3.6.1.6 Coût de retard .....	98
3.6.2 Stratégie de maintenance.....	98
3.7 Formulation mathématique du modèle proposé.....	101
3.8 Résolution du problème de contrôle .....	102
3.8.1 Les étapes d'approche d'optimisation.....	102
3.8.2 Transformation du problème stochastique en un problème déterministe.....	102
3.9 Résultats numériques .....	106
3.9.1 Résolution exacte .....	106
3.9.2 Résolution approchée : méthode heuristique.....	109
3.9.3 Résolution approchée : méthode métaheuristique.....	110
3.10 Analyse et discussions des résultats.....	112
3.11 Etude et analyse de sensibilité .....	115
3.12 Conclusion .....	117
<b>Chapitre 4 .....</b>	<b>119</b>
<b>Développement d'une nouvelle stratégie d'intégration de la maintenance, la production et la qualité pour un système multiproduit sous contrainte de la sous-traitance .....</b>	<b>119</b>
4.1 Introduction.....	119
4.2 Analyse de l'état de l'art pour l'intégration des plans de production, de maintenance et de qualité .....	120
4.3 Contribution du chapitre .....	125
4.4 Description du système et définition du problème .....	126
4.4.1 Hypothèses et notations.....	126

---

4.4.1.1 Indices de modèle .....	126
4.4.1.2 Variables de décision.....	126
4.4.1.3 Paramètres de modèle.....	127
4.4.2 Description du modèle .....	128
4.5 Modélisation de la dégradation du système .....	129
4.6 Formulation du modèle proposé .....	129
4.6.1 Stratégie de production.....	129
4.6.2 Stratégie de sous-traitance.....	130
4.6.3 Politique de contrôle qualité.....	131
4.6.4 Politique de maintenance .....	133
4.7 Procédure d'optimisation.....	136
4.7.1 Description de la procédure d'optimisation .....	136
4.7.2 Méthode de Taguchi.....	136
4.8 Résultats numériques .....	138
4.9 Analyse et discussions .....	139
4.10 Analyse de sensibilité .....	144
4.11 Conclusion .....	147
<b>Conclusion générale et perspectives.....</b>	<b>148</b>
<b>Production scientifique.....</b>	<b>150</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>152</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>166</b>

# Liste des figures

## Chapitre 1

Figure 1.1 : Courbes caractéristiques du taux de défaillance (Ouertani A., 2010) .....	23
Figure 1.2 : Différence entre la panne et la défaillance .....	23
Figure 1.3 : Classification des problèmes de dimensionnement de lots (Géhan M., 2014) .....	26
Figure 1.4 : Equilibre entre la maintenance préventive et corrective .....	27
Figure 1.5 : Classification des types de maintenance .....	28
Figure 1.6 : Stratégie de maintenance type bloc .....	29
Figure 1.7 : Stratégie de choix de sous-traitance .....	32
Figure 1.8 : Interaction entre la production, la maintenance et la qualité .....	38
Figure 1.9 : La dépendance entre la maintenance et la qualité .....	39
Figure 1.10 : Évolution du suivi des lots de production .....	40
Figure 1.11 : Synthèse de la gestion conjointe de la production, de la maintenance et de la qualité .....	41
Figure 1.12 : Les étapes de la modélisation .....	43
Figure 1.13 : Les types d'optimisation .....	44
Figure 1.14 : Classification des méthodes de résolution .....	47
Figure 1.15 : Processus de recherche de documents .....	48
Figure 1.16 : Évolution des publications de la maintenance intégrée à la production .....	48
Figure 1.17 : Évolution des publications de la maintenance intégrée à la production sous contrainte de sous-traitance .....	49
Figure 1.18 : Types des systèmes de production avec et sans contrainte de sous-traitance .....	49
Figure 1.19 : Pourcentage de publications par types de méthodes de résolution adoptées .....	54
Figure 1.20 : Les dimensions de la problématique de la thèse .....	56

## Chapitre 2

Figure 2.1 : Les caractéristiques des deux sous-traitants .....	61
Figure 2.2 : Courbe du choix optimal du sous-traitant unique .....	63
Figure 2.3 : Distribution de cycle de production .....	63
Figure 2.4 : Coût de maintenance en fonction de la période de maintenance préventive selon notre méthode de résolution .....	65
Figure 2.5 : Coût total en fonction de la date de commutation entre les sous-traitants selon notre méthode de résolution .....	66
Figure 2.6 : Interaction entre la production et la sous-traitance .....	67
Figure 2.7 : Stratégie du système de production .....	68
Figure 2.8 : La stratégie de maintenance adoptée pour les deux entreprises .....	69
Figure 2.9 : Evolution du stock pendant le cycle de production avec et sans perte .....	71
Figure 2.10 : Les scénarios de formulation mathématique .....	73
Figure 2.11 : Evolution du coût total $CT1$ .....	79
Figure 2.12 : Evolution du coût total $CT1$ en fonction de la capacité maximale du sous-traitant .....	80
Figure 2.13 : Evolution du coût total $CT2$ .....	80
Figure 2.14 : Evolution du coût total $CT2$ en fonction du coût unitaire de sous-traitance .....	81
Figure 2.15 : Evolution du coût total $CT3$ .....	81
Figure 2.16 : Evolution du coût total $CT3$ .....	82
Figure 2.17 : Comparaison des résultats numérique des trois scénarios .....	82
Figure 2.18 : Evolution du coût total $CTI$ .....	84

Figure 2.19 : Evolution du coût total CT1 - Coût de stockage et des demandes perdues .....84

**Chapitre 3**

Figure 3.1 : Classification du système de la ligne de production .....92  
 Figure 3.2 : Structure considérée du système de fabrication .....94  
 Figure 3.3 : Stratégie de maintenance envisagée du système de production .....99  
 Figure 3.4 : Les étapes d’approche d’optimisation de notre modèle proposé.....102  
 Figure 3.5 : La valeur du coût total optimal en fonction du nombre d’itérations .....109  
 Figure 3.6 : Les résultats obtenus par l’application des algorithmes génétiques .....110  
 Figure 3.7 : Comparaison des résultats des trois méthodes d’optimisation .....112  
 Figure 3.8 : Comparaison du coût de sous-traitance lorsque le coût unitaire constant/ variable .....113

**Chapitre 4**

Figure 4.1 : Système de production imparfait.....120  
 Figure 4.2 : Planification conjointe de la production, de la maintenance et de la qualité.....122  
 Figure 4.3 : Gestion conjointe de la production, de la maintenance et de la qualité avec la contrainte de la sous-traitance .....123  
 Figure 4.4 : Le système de production étudié .....128  
 Figure 4.5 : Dépendance entre le taux de défaillance et le processus d’inspection .....129  
 Figure 4.6 : Stratégie de contrôle qualité implémentée .....132  
 Figure 4.7 : Processus d’inspection .....133  
 Figure 4.8 : Procédure de calcul du nombre d’inspection .....133  
 Figure 4.9 : Evolution du taux de défaillance en fonction du temps .....134  
 Figure 4.10 : Représentation graphique des principaux effets du ratio (S/B).....137  
 Figure 4.11 : Répartition des coûts de l’approche proposée .....140  
 Figure 4.12 : Influence de la limite du taux de défaillance sur le coût de la qualité et le nombre d’inspection.....142  
 Figure 4.13 : Variation du taux de production et du taux de sous-traitance .....143  
 Figure 4.14 : Comparaison du coût total de production cumulé entre le taux de production variable et maximal .....143

# Liste des tableaux

## Chapitre 1

Tableau 1.1 : Synthèse des travaux de la gestion conjointe de la production et de la maintenance sous contrainte de sous-traitance .....	50
--	----

## Chapitre 2

Tableau 2.1 : Coût de maintenance préventive optimal et la période de maintenance préventive .....	64
Tableau 2.2 : Coût total et date de commutation .....	65
Tableau 2.3 : Les données numériques du problème .....	79

## Chapitre 3

Tableau 3.1 : Comparaison des références existantes et originalité .....	90
Tableau 3.2 : Les paramètres numérique du problème .....	106
Tableau 3.3 : Demande moyenne .....	106
Tableau 3.4 : Le coût total résultant par la méthode de fmincon.....	107
Tableau 3.5 : Les résultats optimales des deux méthodes fmincon et Pattern search.....	108
Tableau 3.6: Le temps de travail des machines et leurs taux de maintenance préventive des deux méthodes fmincon et Pattern search .....	108
Tableau 3.7 : Le coût total obtenu par la méthode de résolution PS (Pattern Search).....	109
Tableau 3.8 : Le coût total par la méthode de résolution GA .....	110
Tableau 3.9 : Les résultats optimales obtenus par la méthode des algorithmes génétiques.....	111
Tableau 3.10 : Le temps de travail des machines et leurs taux de maintenance préventive en utilisant la méthode des algorithmes génétiques .....	111
Tableau 3.11 : Les paramètres de l'analyse de sensibilité et de la politique de contrôle.....	115

## Chapitre 4

Tableau 4.1 : Synthèse des modèles d'intégration du triplets production, qualité et maintenance .....	124
Tableau 4.2 : Les niveaux des paramètres des algorithmes génétiques .....	137
Tableau 4.3 : Les paramètres optimaux des algorithmes génétiques.....	138
Tableau 4.4 : La demande des produits .....	138
Tableau 4.5 : Les paramètres de production .....	138
Tableau 4.6 : Les paramètres de qualité.....	137
Tableau 4.7 : Les paramètres de maintenance .....	139
Tableau 4.8 : Les paramètres de sous-traitance .....	139
Tableau 4.9 : Les résultats obtenus par la méthode des algorithmes génétiques .....	141
Tableau 4.10 : Les résultats de comparaison .....	144
Tableau 4.11 : Etude de sensibilité et paramètres du politique de contrôle.....	146

# Liste des algorithmes

## Chapitre 2

Algorithme 2.1 : Le Pseudo code de la déclaration de la fonction objectif .....	77
Algorithme 2.2 : Le Pseudo code de la déclaration des contraintes non-linéaire .....	78
Algorithme 2.3 : Le Pseudo code du fichier principal .....	78

# Acronymes

AFNOR	Association Française de Normalisation
AG	Algorithme Génétique
AGs	Algorithmes Génétiques
CLSP	Capacitated Lot-Sizing Problem
DLSP	Discrete Lot-sizing and Scheduling Problem
DO	Donneur d'ordres
ELSP	Economic lot scheduling problem
ENF	Expected number of failures
EPQ	Economic production quantity
FPA	Finite perturbation analysis
IBM	International Business Machines
IPS	Imperfect production system
JAT	Just à temps
LSP	Lot sizing problem
MC	Maintenance corrective
MCLSP	Multi-Level Capacitated Lot-sizing Problem
MCLSP	Multi-item capacitated lot sizing problem
MP	Maintenance préventive
NSGA- II	Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm- II
PA	Perturbation analysis
PL	Programmation linéaire
PLSP	Proportional Lot-Sizing and Scheduling Problem
PNL	Programmation non-linéaire
PS	Pattern search
RM	Réparation minimale
SMP	Selective maintenance problem
um	Unité monétaire
ut	Unité de temps

# Introduction générale

Au fil du temps, les entreprises sont confrontées à des défis majeurs ces dernières décennies. Toutefois, la croissance de rythme de production à l'échelle mondiale incite les entreprises à s'adapter plus rapidement aux fluctuations du marché. A cet égard, les producteurs sont soumis à des pressions pour affronter la mondialisation et la concurrence internationale. Cela amène les entreprises à utiliser certaines stratégies au niveau de l'amélioration de la productivité pour offrir les meilleurs prix aux consommateurs.

Comme dans de nombreuses entreprises, la production représente la fonction reine. Toutefois, pour être vigilant, il faut également tenir compte du rôle indispensable de la maintenance au sein de l'entreprise. En effet, la maintenance est toujours présente en termes de prévention et de prévision, au-delà de l'arrêt de la machine. Cependant, les deux fonctions ont des intérêts bien distincts, voire parfois divergents. En principe, la production et la maintenance exploitent les mêmes ressources, ce qui justifie leur dépendance. À partir de ces éléments, l'entreprise devrait gérer les planifications de la production et de la maintenance d'une manière conjointe. Le concept d'intégration, en revanche, consiste à tenir en compte des objectifs des deux fonctions d'une manière simultanée en vue de garantir l'intérêt global de l'entreprise. Autrement dit, une bonne gestion des deux fonctions ne peut qu'avoir un impact positif sur l'entreprise.

De ce fait, la démarche de planification intégrée de la production et de la maintenance permet d'améliorer la productivité à travers le maintien des équipements de production en bonne état de fonctionnement. Cela étant le défi majeur de chaque entreprise dans le secteur industriel, dont la finalité est le bien être du consommateur. Dans le monde réel, plusieurs facteurs influencent la planification des ressources, à savoir la dégradation des équipements de production. A cet égard, il faut notamment envisager l'impact de la dégradation sur les plans de production et la stratégie de maintenance, afin de s'approcher au maximum à la réalité des systèmes production. Dans la pratique, il s'agit d'une indépendance marquée entre la production, la maintenance et la dégradation des systèmes de production. Il est donc essentiel que les décideurs prennent en compte la dégradation lors de l'élaboration des politiques de contrôles.

Dans le même contexte industriel visant à répondre aux besoins des clients, la sous-traitance est devenue de plus en plus courante dans les entreprises. La sous-traitance consiste à confier à un prestataire la responsabilité totale ou partielle d'accomplir une fonction spécifique. Cette pratique permet d'accroître la rentabilité de l'entreprise, en comblant le fossé entre la production interne et la demande de la clientèle. En effet, la sous-traitance est une pratique répandue dans les secteurs manufacturiers tels que les industries automobiles, pharmaceutique, textiles, etc. A cet effet, la création des relations de coordination et de coopération entre le donneur d'ordres et le sous-traitant permet de réaliser des économies d'échelle et de coût. Toutefois, la question qui se pose est « comment gérer la production et la maintenance dans le cadre de la sous-traitance ? ». Ainsi, « comment faire un choix optimal de sous-traitance ? »

Bien souvent, la qualité imparfaite des produits fabriqués dans le secteur manufacturier est très courante. En effet, parmi les nombreux défis auxquels fait face chaque entreprise est la bonne qualité des produits fabriqués. Cela étant la préoccupation majeure des industries. A cet effet, il est indispensable de considérer que le système de production imparfait engendre des produits conformes et d'autre non conformes lors de la planification conjointe des tâches de production et de maintenance. Compte tenu du production imparfaite, l'entreprise peut réduire la proportion des articles défectueux afin de satisfaire une part croissante des besoins du consommateur.



Dans le cadre de cette thèse, nous apportons quelques éléments de réponses au problème de la gestion conjointe de la production et de la maintenance dans le cadre des stratégies de sous-traitance. Dans un premier lieu, nous considérons un système de production constitué d'une seule machine fabriquant un seul produit. Ensuite, nous considérons le cas de plusieurs machines parallèles fabriquant un seul type produit. Finalement, une seule machine fabriquant plusieurs types produits. Dans le premier axe de notre thèse, nous prenons en compte « la dégradation des systèmes de production », comme étant un élément qui influence les performances de production. D'où la nécessité d'une stratégie de maintenance adéquate qui réduit le processus de dégradation des systèmes de production. Le deuxième axe concerne le processus de production imparfait. Pour cela, nous proposons une approche qui traite un système de production imparfait qui se détériore avec le temps et avec l'usage de la fabrication des produits conformes et non conformes. En effet, il faut rester très prudent concernant les effets des incertitudes telles la dégradation et la production imparfaite, afin de produire au moindre coût tout en respectant les délais et la qualité.

En ce qui concerne la stratégie de sous-traitance, nous considérons que le taux de la sous-traitance et le coût unitaire de sous-traitance sont dépendants. Autrement dit, que le donneur d'ordres ne peut pas sous-traiter des quantités différentes avec le même coût unitaire de sous-traitance. Pour cela, nous proposons un barème de coût de sous-traitance en fonction de la qualité sous-traitée. Par la suite, nous tenons de plus la dimension logistique lors du choix de la stratégie de sous-traitance. Cette dimension définit la distance entre le sous-traitant et le stock du contractant. L'objectif majeur est de faire un choix optimal de sous-traitance permettant de minimiser le coût et satisfaire les besoins des clients. Par conséquent, pour résoudre notre problème nous utilisons des méthodes d'optimisation exactes et approchées.

Notre travail de thèse s'articule principalement autour de quatre chapitres afin de mieux cerner le problème de la gestion intégrée de la production et de la maintenance sous contrainte de sous-traitance.

Dans le premier chapitre, nous présentons la problématique de la maintenance intégrée à la production dans le cadre de sous-traitance ainsi que les objectifs soulevés. Un intérêt particulier est accordé aux systèmes de production, les stratégies de maintenance ainsi que le concept de la sous-traitance. Nous présentons également une classification des méthodes d'optimisation : des méthodes exactes et des méthodes approchées. Ensuite, nous présentons une synthèse des travaux traitant la planification conjointe de la production et de la maintenance sous contrainte de sous-traitance afin de dégager les axes de recherche.

Dans le second chapitre, avant de construire le premier modèle, nous avons abordé une analyse de l'existant afin de définir des pistes directrices permettant d'améliorer les résultats obtenus dans la littérature. La deuxième partie s'intéresse à élaborer un modèle mathématique qui traite la planification intégrée de la production et de la maintenance faisant appel aux services d'un seul sous-traitant. Pour se faire, nous considérons un système de production d'une machine fabriquant un seul type de produit. La demande est supposée continue, constante et supérieure à la capacité maximale de l'entreprise, d'où l'intervention de la sous-traitance. Nous présentons également une formulation analytique de la fonction coût comprenant les coûts de maintenance, de production, de stockage et de pénurie. La cible principale est de déterminer simultanément, l'âge de la maintenance préventive, le seuil de stock optimal, la capacité maximale du sous-traitant et son coût unitaire de production. En effet, la détermination de l'âge optimal de la maintenance préventive et la taille optimale du stock permet d'établir une politique intégrée de maintenance et de production, en adoptant une stratégie de maintenance optimale, ainsi qu'un plan de production économique. Ensuite, le choix optimal d'un seul sous-traitant parmi plusieurs se fait en définissant la capacité de production maximale et le coût unitaire de production qui permettent de choisir le sous-traitant le plus optimal. En fait, l'entreprise doit s'assurer que le sous-traitant dispose

des ressources nécessaires pour exécuter les tâches demandées, que ce soit sur le plan financier et organisationnel.

Le troisième chapitre est une extension du chapitre précédent. Nous traitons la gestion conjointe de la production et de la maintenance dans le cas complexe. C'est-à-dire, plusieurs machines produisent un seul type de produit. Cependant, une grande partie du travail existant est consacrée à des problèmes de machines uniques. Nous étudions un système de fabrication composé de machines parallèles produisant un seul type produit, pour satisfaire une demande aléatoire sous un niveau de service donné. En effet, la demande est supérieure à la capacité totale de l'ensemble des machines, d'où la nécessité de recourir à la sous-traitance pour compléter le manque. De plus, nous considérons que le coût unitaire de la sous-traitance est variable en fonction de la quantité sous-traitée. En conséquence, nous avons développé un modèle stochastique de contrôle optimal. Ensuite, pour résoudre le problème, nous avons comparé trois méthodes d'optimisation exactes et approchées, à savoir : les algorithmes génétiques (GA), Pattern Search (PS) et enfin fmincon du logiciel Matlab. Ainsi, nous avons validé notre approche par une application numérique et une analyse de sensibilité. L'objectif est d'examiner les différentes contraintes possibles du problème du contrôle de la planification de la production et de la maintenance pour un système multi-machines sous contrainte de sous-traitance, afin de s'approcher de la réalité de l'industrie manufacturière. Nous avons présenté la solution optimale, efficace et réalisable, en comparant les différentes procédures d'optimisation. Nous avons défini également un plan de production interne, un plan de sous-traitance et une stratégie de maintenance optimaux. La solution optimale obtenue contribue considérablement à améliorer la capacité du décideur à prendre en compte des instances plus larges du modèle intégré et permet de faire le meilleur choix de la stratégie de sous-traitance.

Le dernier chapitre est consacré au problème d'intégration des stratégies de sous-traitance dans le contexte de la planification conjointe de la production, de la maintenance et du contrôle de la qualité. A cet effet, nous étudions le problème du dimensionnement capacitif de lots (MCLSP) pour un système de production composé d'une seule machine fabriquant plusieurs produits. En effet, le système de production est considéré imparfait, produisant à la fois des produits conformes et non conformes. La détérioration du système se fait en fonction du temps et de la cadence de production. Nous mentionnons que la détérioration du système affecte la qualité des produits fabriqués. Par conséquent, une stratégie de contrôle de la qualité est établie, en vue d'inspecter, d'ajuster et de contrôler les articles fabriqués. Pour résoudre notre problématique, une approche d'optimisation basée sur l'algorithme génétique (AG) est proposée. Ensuite, pour ajuster les paramètres de l'AG, nous utilisons la méthode Taguchi. L'objectif principal de ce chapitre est de proposer une politique intégrée de production, de maintenance et de contrôle qualité, en examinant l'équilibre entre la production interne et la sous-traitance. De plus, nous faisons un choix optimal d'un sous-traitant permanent parmi plusieurs. Ce choix est basé sur trois critères : le coût unitaire de la sous-traitance, la capacité maximale du sous-traitant et la distance entre le sous-traitant et le stock. L'une des originalités de ce travail de la gestion intégrée de la production et de la maintenance tenant en compte la contrainte de sous-traitance abordés dans ce chapitre est la prise en compte la contrainte logistique dans le choix de sous-traitance. A notre connaissance, ce problème n'a jamais été traité dans la littérature. Ensuite, une analyse de sensibilité est également réalisée pour illustrer la robustesse de la politique de contrôle proposée. Enfin, nous comparons nos résultats avec ceux de la littérature pour valider notre approche et mettre en évidence l'avantage de la sous-traitance pour minimiser les coûts.

Enfin, nous terminons ce mémoire par une conclusion afin d'indiquer les apports obtenus de nos travaux. Ensuite, nous prévoyons des voies possibles des futures recherches.

---

---

# Chapitre 1

---

---

**État de l'art et problématique de la thèse**

# Chapitre 1

## État de l'art et problématique de la thèse

---

### 1.1 Introduction

L'industrie manufacturière est caractérisée par une concurrence rude et mondiale. Ainsi, les exigences du client deviennent de plus en plus intenses au niveau de qualité, coût, délai et sécurité. Par conséquent, le défi relevé de chaque entreprise est l'amélioration de ses performances ainsi que l'efficacité de sa productivité. Pratiquement, les fonctions production et maintenance sont toujours très rattachées. Cependant, le conflit persiste entre elles dans la mesure où elles partagent les mêmes ressources avec des objectifs bien distincts. Pour remédier à ce problème la gestion intégrée est la bonne solution. Autrement dit, l'élément clé de la bonne marche des moyens de production est la planification conjointe de production et de maintenance. En effet, les décisions de maintenance intégrée à la production sont prises au regard du meilleur rapport entre l'augmentation de la disponibilité des équipements et l'amélioration de la productivité. Certes, il devient crucial dans le secteur industriel que l'offre dépasse largement la demande. Dans ce contexte, la nature de la demande évolue rapidement et les entreprises doivent s'y adapter. De ce fait, la production doit impérativement faire face aux fluctuations du marché d'où le recours à la sous-traitance. Pour rester compétitive, la sous-traitance est devenue une obligation et non plus un choix. En effet, l'appel à la notion de sous-traitance dans le cadre de la gestion intégrée de la maintenance et de la production a été premièrement étudié en 2007 par (Dellagi, Rezg & Xie, 2007). Cette constatation conduit à aborder les problèmes de production intégrée à la maintenance sous contrainte de la sous-traitance.

Sur le plan réel, les systèmes de production ne fabriquent pas toujours des produits de bonne qualité. De plus, la détérioration des équipements peut affecter la qualité des produits fabriqués. A cet égard, la réflexion s'est donc orientée peu à peu vers la gestion des opérations des systèmes manufacturiers, le contrôle qualité et la planification des activités de maintenance. En revanche, une compréhension de la dépendance entre la production, la maintenance et la qualité ouvrira une nouvelle voie pour les modèles intégrés. Parmi les avantages de la gestion conjointe est la réduction des coûts ainsi que l'amélioration des performances. Néanmoins, les modèles intégrés ne sont pas généralement faciles à résoudre en raison de leur nature à objectifs multiples.

Ce chapitre présente une analyse critique de la littérature scientifique traitant le problème de la gestion conjointe de la production et de la maintenance faisant appel à la sous-traitance. En premier lieu, nous présentons les systèmes de production et les stratégies de maintenance. En second lieu, nous introduisons le concept de la sous-traitance industrielle, ainsi nous allons discuter les différentes approches étudiées dans la littérature pour caractériser la planification de la maintenance et de la production. En troisième lieu, nous présentons une revue approfondie sur l'intégration des politiques de contrôle de la production, de la maintenance et de la qualité étudiées dans la littérature. Les axes de recherche précédents sont discutés du point de vue modélisation et méthodes d'optimisation. Enfin, nous procédons à analyser et à discuter l'état d'art sur la gestion intégrée de la maintenance et de la production sous contrainte de la sous-traitance, ce qui nous permettra de positionner et d'orienter nos objectifs ainsi que la problématique de la thèse.

## 1.2 Les systèmes de production

Un système de production correspond aux moyens employés pour satisfaire le client. En effet, le système de production est activé à partir du moment où la commande est passée jusqu'à sa livraison (Alahmad K., 2008). Pour rester compétitive, les entreprises doivent maîtriser leurs coûts d'exploitation et optimiser leurs outils de production. Rappelons que, le département production représente le pilier de chaque entreprise manufacturière, dont ses objectifs sont :

- Satisfaire la demande client en adaptant la capacité de production ;
- S'adapter à la variation de la demande et la flexibilité des systèmes de production ;
- Garantir une meilleure rentabilité ;
- Contrôler et améliorer l'efficacité ainsi que le gain de la productivité.

### 1.2.1 Classification des systèmes de production

Le système de production est responsable de satisfaire les besoins client, ainsi que de s'adapter aux évolutions de la demande tout en exploitant les ressources humaines et matériels. Dans ce contexte, nous proposons une classification du système de production selon différents critères tels que (Benbouzid F., 2005) :

- Classification selon la capacité de production ;
- Classification selon les ressources ;
- Classification selon la nature de la demande.

#### 1.2.1.1 Classification selon la capacité de production

A cet effet, l'entreprise est tenue à améliorer ces indicateurs de performances. Parmi ces indicateurs figure le volume ou bien la capacité de production maximale. Ce qui correspond au nombre maximal de produits manufacturés que peut générer une entité de production. En effet, la capacité de production est souvent exigée par les grands entrepreneurs lors des appels d'offres pour évaluer la résilience de la fabrication afin de répondre aux besoins en cas d'augmentation de la demande. Dans les modèles de planification de la production, la capacité de production est généralement prise en compte. Celle-ci est modélisée comme étant finie ou bien considérée infinie. Selon le type de production, les systèmes de production peuvent être classés tels que :

- **Système de production continue** : ce type de fabrication est caractérisé par une fabrication régulière des produits finis. La production continue est utilisée dans les domaines raffineries de pétrole, cimenteries, papeterie, chimie, etc.
- **Système de production en série** : le système fabrique des pièces identiques et standardisées. Ainsi, chaque pièce prend un temps déterminé. Autrement dit, le temps de cycle de la pièce est défini. Ensuite, la taille de la série varie en fonction de la demande du client.
- **Système de production par lot** : représente un ensemble d'unités de ventes fabriquées dans des circonstances pratiquement identiques. En effet, la production par lot est une production en série dont la taille est prédéterminée.
- **Système de production unitaire** : la fabrication est faite sur mesure à l'unité. Ce type de production fait toujours l'objet d'un grand projet, typiquement dans les secteurs d'aéronautique, du bâtiment et des constructions navales.

Notons que ce travail de thèse portera plutôt sur les systèmes de production en série (chapitre 2 et 3) et système de production par lot (chapitre 4), car les activités de gestion y sont les plus complexes.

### **1.2.1.2 Classification selon les ressources matérielles**

Certes, les systèmes de production peuvent se différencier aussi par la nature des ressources. Dans cette optique, l'organisation des machines définit le type de l'entreprise :

- Machine unique (Lu, Cui & Han, 2015) ;
- Machines en séries (Wang, Lu & Ren, 2020) ;
- Machines en parallèles (Nourelfath & châtelet, 2012) ;
- Atelier flow shop (Lu, Cui & Han, 2018), job shop (Fnaiech, Fitouri, Varnier, Fnaiech & Zerhouni, 2015) et open shop (Mejía & Yuraszeck, 2020).

### **1.2.1.3 Classification selon la nature de la demande**

En toute généralité, la demande client est le déclencheur du fonctionnement du système de production, dont l'objectif est de la satisfaire dans un délai prédéterminé. Dans les problèmes de planification de la production, la demande peut être considérée constante (c'est-à-dire que la demande ne varie pas sur tout l'horizon de planification). Dans d'autre problème, la demande est supposée variable. Autrement dit, chaque période de l'horizon de planification correspond à une demande différente.

Toutefois, il existe d'autres classifications qui peuvent être exploitées pour distinguer le type d'entreprise (Courtois, Pillet & Martin -Bonnefous, 2003), à savoir :

- Quantités fabriquées et répétitivités ;
- Organisation des flux de production ;
- Relations avec les clients ;
- La structure des produits ;
- La logique de pilotage ;
- La fréquence de renouvellement des produits ;
- La part de main d'œuvre.

## **1.3 Dégradation des systèmes de production**

Tous les systèmes de production se dégradent avec l'âge et avec l'usage au cours du temps, ce qui provoque la défaillance des équipements de production. Bien entendu, la modélisation de la dégradation permet d'imiter la réalité dynamique des systèmes manufacturiers. En outre, une telle modélisation développée peut être transformée en des politiques du contrôle qui peuvent être mises en pratique. La figure 1.1 indique les caractéristiques du taux de défaillance (Ouertani A., 2010).

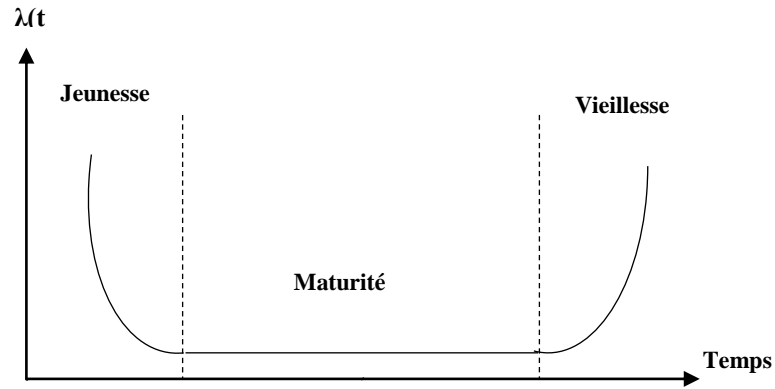


Figure 1.1 : Courbes caractéristiques du taux de défaillance (Ouertani A., 2010)

- **Définition de défaillance (failure)**

La défaillance est définie par AFNOR NF X 60-010 comme étant « Altération ou cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise ». Après la défaillance, l'entité est considérée en état de panne. Le taux de défaillance traduit le passage de l'état opérationnel à l'état de panne, il est modélisé par une loi de probabilité. En effet, la loi de probabilité la plus utilisée est la loi de Weibull de paramètres  $(\beta, \eta, \gamma)$  qui sont respectivement paramètre de forme, d'échelle et de position. Par conséquent, le taux de défaillance est défini de la manière suivante :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad \forall t > 0 \quad (1.1)$$

- **Définition de panne (breakdown)**

Une panne représente l'inaptitude d'un système de production à accomplir une fonction requise. Lorsqu'une défaillance est survenue, le système passe de l'état opérationnel à l'état de panne (figure 1.2). Une panne est généralement la conséquence d'une défaillance. Dans ce cas, la maintenance corrective est nécessaire afin de remettre le système à son état de fonctionnement.

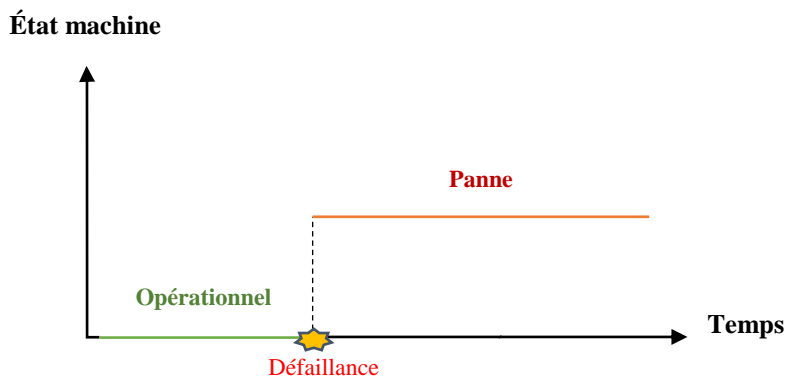


Figure 1.2 : Différence entre la panne et la défaillance

Nous considérons dans nos travaux que la défaillance est due à la détérioration du système de production.

### 1.3.1 Classification des pannes

Plusieurs facteurs contribuent à la dégradation du système de production à savoir le temps, l'opération de production ou bien les deux (le temps et l'opération). D'où la classification des pannes de la machine selon (Bouslah B., 2015) :

- **Panne dépendante du temps** : ce type de panne peut être survenu durant l'arrêt forcé de la machine (machine bloquée ou non alimentée). En effet, le taux de pannes est en fonction du temps, ainsi que l'usure par exemple qui peut être la cause de panne.
- **Panne dépendante des opérations** : la machine peut tomber en panne si la machine est en opération. Autrement dit, le taux de panne dépend du taux de production.
- **Panne dépendante du temps et des opérations** : Le dernier type de panne dépend du temps et de l'opération. C'est-à-dire que le taux de panne augmente en fonction du temps et du taux de production.

### 1.3.2 Modélisation de la dégradation

Il faut souligner que l'évolution de la dégradation d'un système aura plusieurs conséquences tels que ; l'occurrence de défaillance, la perte de productivité, le dysfonctionnement, etc. En effet, la dégradation du système de production peut être considérée dans la littérature (Géhan M., 2014) soit déterministe ou bien stochastique.

- **La dégradation déterministe** : ce type de dégradation augmente en fonction du temps écoulé (qu'elle que soit l'état du système, en fonctionnement ou en arrêt) ou bien en fonction des quantités produites. Ensuite, l'indice de dégradation est associé à l'âge du système ou au nombre de produits fabriqués depuis sa mise en fonctionnement.
- **La dégradation stochastique** : le niveau de dégradation évolue aléatoirement au cours du temps selon une loi de probabilité. L'élément déclencheur de transition de l'état à un autre est nommé « choc ». La dégradation stochastique est indépendante du temps.

Attirons l'attention sur le fait que la modélisation de la détérioration est l'une des questions principales à considérer lors du traitement des modèles de gestion intégrée de la production et de la maintenance. Nous pouvons référer notamment à (Hajej, Dellagi & Rezg, 2009) pour la dépendance entre le taux de production et le taux de défaillance. L'équation (1.2) représente le taux de défaillance  $\lambda_k(t)$  à l'intervalle  $k$  en fonction du taux de production  $U_k$  au temps  $k$ , du taux de production maximum  $U_{max}$ , la durée de la période de production  $\Delta t$  ainsi que le taux de défaillance nominal correspondant à la cadence de production maximale  $\lambda_n(t)$ .

$$\lambda_k(t) = \lambda_{(k-1)}(\Delta t) + \frac{U_k}{U_{max}} \lambda_n(t) \quad \forall t \in [0, \Delta t] \quad (1.2)$$

De plus, (Gharbi & Kenné, 2005) ont modélisé la dégradation de la machine avec l'âge de la machine  $a(t)$  en fonction du taux de production  $U(t)$ . Ce dernier est défini comme étant le nombre des produits fabriqués depuis la dernière intervention (réparation minimale ou maintenance préventive).

$$\frac{da(t)}{dt} = f(U(t)) \quad \text{avec} \quad a(0) = a \quad (1.3)$$



Certes, la détérioration de la machine affecte plusieurs indices de performance, à savoir la qualité des produits fabriqués et la fiabilité des équipements de production, d'où la perte de capacité.

## 1.4 Problème de dimensionnement des lots

### 1.4.1 Définition du problème de dimensionnement des lots

Le dimensionnement des lots appelé en anglais 'lot-sizing' est l'une des difficultés qui tient une place très importante dans les problèmes de planification de la production au niveau tactique. Toutefois, le dimensionnement des lots est caractérisé par la détermination des quantités à produire de chaque référence (produit) durant chaque période de l'horizon de planification. De plus, les questions qui se posent dans lot-sizing sont (Graves, S.C., 1999) : Quelles sont les références (produits) à produire dans chaque période ? Quelle est la quantité à produire pour chaque référence ? Sur quelle machine faut-il produire chaque référence ?

De ce fait, les modèles du dimensionnement des lots se différencient par (Belvaux & Wolsey, 2000) :

- *Le type de la demande* : constante ou variable au cours de l'horizon de planification.
- *La capacité de production* : finie ou infinie selon la contrainte des ressources.
- *Nombre des niveaux de production* : mono-niveau ou multi-niveaux.
- *Taille des périodes* : courte période (small buckets) ou à longue périodes (big buckets).
- *Nombre des produits* : une référence ou multi-référence.
- *Setup* : La considération du coût de lancement dans le problème de dimensionnement des lots.

Notons que les modèles de quantité économique à produire sont les premiers à traiter au niveau des problèmes de dimensionnement des lots. En effet, les modèles de quantité économique à produire (EPQ) se divisent principalement en deux grandes catégories. La première catégorie traite les problèmes qui tiennent compte des aspects de qualité des items de produits. Ensuite, la deuxième catégorie analyse les effets des pannes stochastiques des machines sur le dimensionnement des lots. En outre, lorsqu'on ajoute la contrainte de limitation de ressources, le modèle devient sous forme d'un problème de dimensionnement de lot.

### 1.4.2 Les types de problème de dimensionnement de lot

La complexité du problème du dimensionnement des lots correspond à leurs caractéristiques à savoir : le nombre de produits, les outils de production, la structure des installations etc. Ce type de problème peut être classé selon la longueur de la période de planification, dont nous distinguons :

- **Problème à courte période (Small Bucket)**

Les problèmes de dimensionnement de lot « *Small Bucket* » sont caractérisés par des courtes périodes durant l'horizon de planification. La taille de la période varie entre une heure et une journée sur un horizon de planification variant d'un jour à quelques semaines. Le but de tels modèles est de traiter les problèmes à court terme au niveau opérationnel. Parmi les problèmes du dimensionnement de lot « *Small bucket* », nous distinguons notamment :

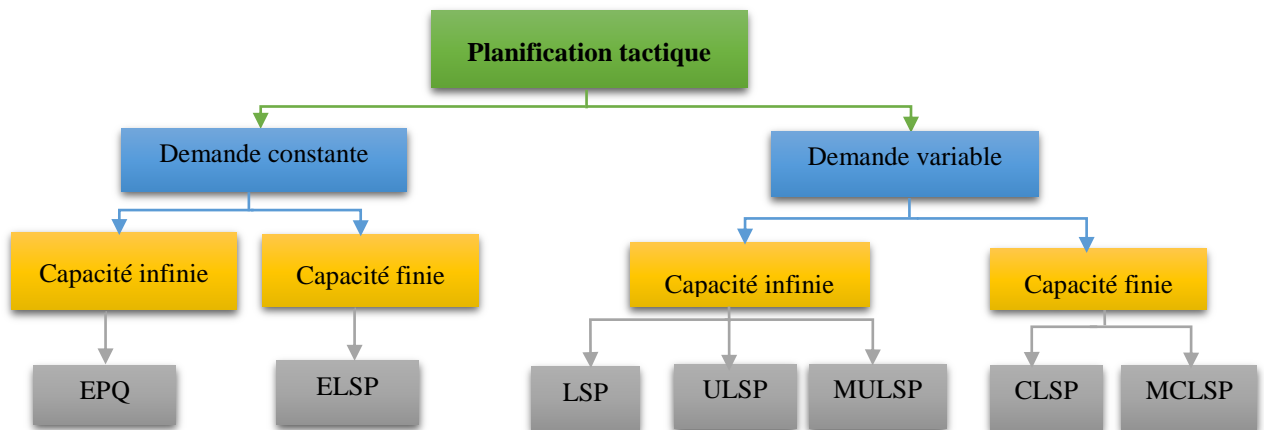
- Discrete Lot-sizing and Scheduling Problem (DLSP).
- Proportional Lot-Sizing and Scheduling Problem (PLSP).

- **Problème à longue période (Big Bucket)**

Les problèmes de dimensionnement de lots à longue période « Big Bucket » sont caractérisés par une période du temps assez longue de quelques semaines à un an pour un horizon de planification afin de produire différents types de références. Ce type de modèle est utilisé pour les problèmes tactiques à moyen terme, à savoir :

- Capacitated lot sizing problem (CLSP).
- Uncapacitated Lot-Sizing Problem (ULSP).

La figure 1.3 présente une classification des problèmes de dimensionnement de lots selon le type de la demande ainsi que la capacité de production (Géhan M., 2014).



**Figure 1.3** : Classification des problèmes de dimensionnement de lots (Géhan M., 2014)

Avec :

- CLSP : Capacitated lot sizing problem ;
- LSP : Lot sizing problem ;
- ELSP : Economic lot scheduling problem ;
- EPQ : Economic production quantity ;
- MCLSP : Multi-item capacitated lot sizing problem.

Par ailleurs, nous traitons le problème de dimensionnement de lots capacitif dans le cas de plusieurs produits dans le dernier chapitre.

### 1.5 Stratégies de maintenance

La maintenance est définie selon l'AFNOR par la norme NF EN 13306 (avril 2001) en tant que « 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 ». De plus, la maintenance occupe une place importante dans l'entreprise, elle ne se limite pas à la réparation classique des équipements en cas de panne. Cela s'inscrit dans le cadre de participation à l'augmentation des performances de l'entreprise. La maintenance a évolué à partir de l'évolution de l'industrie, elle a passé du concept entretien à la maintenance. Tout en

reconnaissant le fait que la maintenance est devenue aussi une fonction principale dans l'entreprise, toujours accompagnée à la fonction production. De ce fait, le rôle de la maintenance permet de :

- Réduire la fréquence des pannes ;
- Améliorer la disponibilité des outils de production ;
- Améliorer la sûreté ;
- Accroître la disponibilité et réduire les coûts.

### 1.5.1 Les types de maintenance

Nous distinguons deux catégories de stratégies de maintenance (Barlow & Hunter, 1960) et (Valdez-Flores & Feldman, 1989) : la maintenance préventive et la maintenance corrective. Par conséquent, il est nécessaire d'assurer l'équilibre entre la maintenance préventive et la maintenance corrective afin de minimiser le coût (figure 1.4).

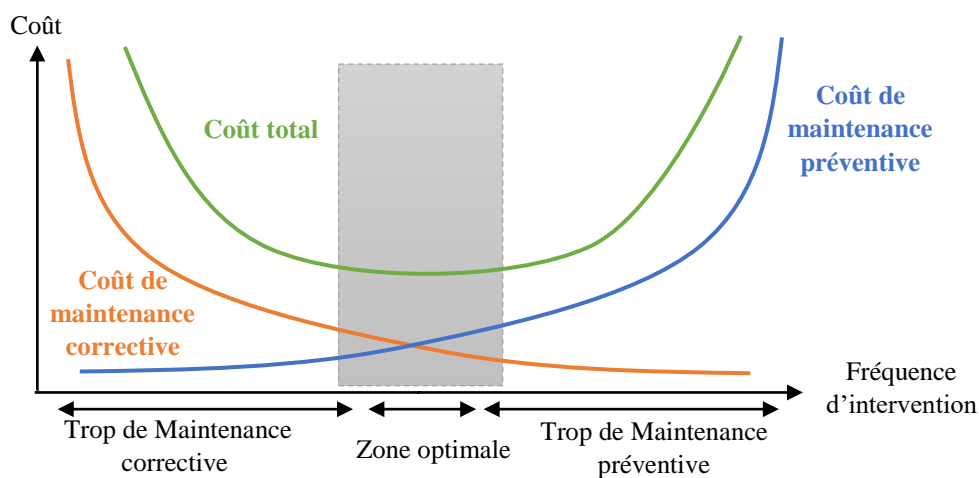


Figure 1.4 : Equilibre entre la maintenance préventive et corrective

#### 1.5.1.1 Maintenance préventive

L'objectif de la maintenance préventive est de réduire la probabilité de défaillance ainsi que de retarder la dégradation du système de production. La première catégorie se divise principalement en maintenance systématique, conditionnelle et prévisionnelle (figure 1.5).

- Maintenance préventive systématique : les actions de maintenance préventive sont réalisées dans des intervalles du temps prédéterminés. Ce type d'action se fait selon un calendrier sans contrôle préalable de l'état du système.
- Maintenance préventive conditionnelle : ce type de maintenance est basé sur la surveillance, en suivant les paramètres de dégradation mesurée caractérisant le système. L'action de maintenance préventive conditionnelle est effectuée uniquement lorsque les paramètres de dégradation atteignent un niveau critique.
- Maintenance prévisionnelle : l'action de maintenance prévisionnelle est une action de maintenance conditionnelle avec des prévisions obtenues à l'aide d'évaluation des paramètres de dégradation du système.

### 1.5.1.2 Maintenance corrective

La maintenance corrective est exécutée après la détection d'une panne. On distingue deux types : maintenance corrective palliative et maintenance corrective curative (figure 1.5).

- *Maintenance corrective palliative* : l'action de maintenance consiste à une réparation provisoire. Ce type de maintenance est réalisé lorsque la défaillance empêche de poursuivre l'exploitation du système de production.
- *Maintenance corrective curative* : ce type de maintenance permet de réparer le système à son état de fonctionnement nominal, en supprimant tout dysfonctionnement.

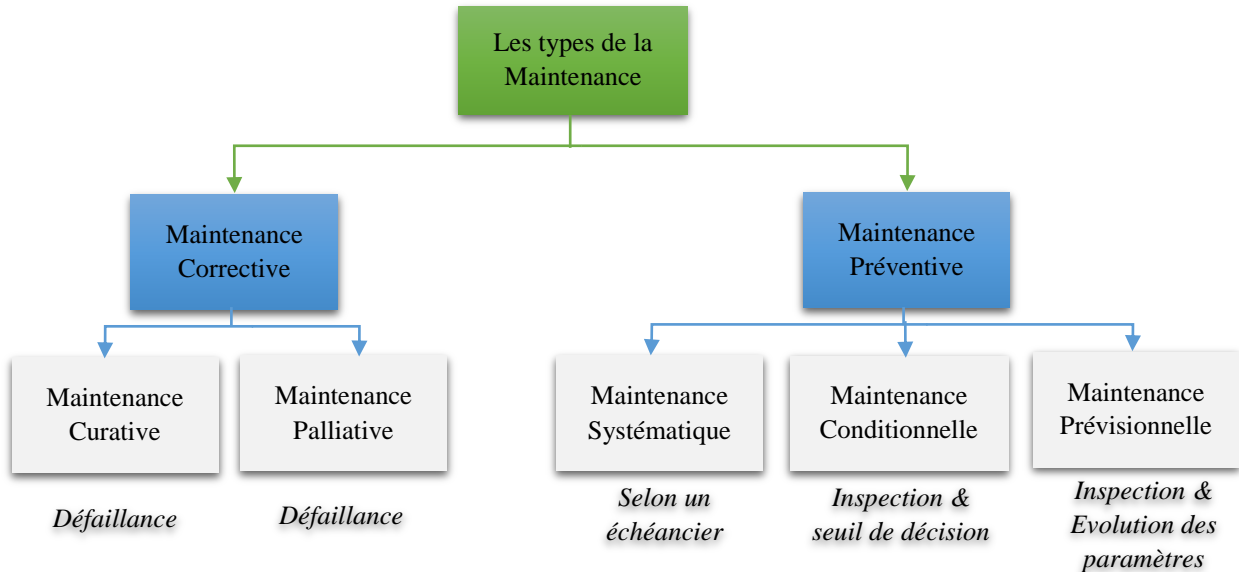


Figure 1.5 : Classification des types de maintenance

## 1.5.2 Optimisation des stratégies de maintenance

Le développement des stratégies de maintenance a fait l'objet de nombreux travaux de recherches (Nourelfath & Ait-kadi, 2007). En effet, le but de la modélisation de la maintenance est de minimiser les coûts de maintenance ainsi que de maximiser la durée du bon fonctionnement des systèmes de production. Dans la littérature (Gertsbakh, I. B., 1977), il existe deux stratégies fondamentales de maintenance, à savoir la stratégie de maintenance type âge et la stratégie de maintenance type bloc.

### 1.5.2.1 Stratégie type âge

La stratégie de maintenance type âge consiste à remplacer l'unité de production après une durée prédéterminée constante du bon fonctionnement appelé l'âge  $T$ . Ainsi, une action de maintenance corrective est effectuée si une panne se produit, en remettant l'âge de la machine à zéro. (Barlow & Proschan 1965, 1962) ont initialement traité les caractéristiques de la politique de maintenance type âge. Dans le modèle de (Barlow & Proschan, 1965), le temps de maintenance préventive et corrective n'est pas pris en compte (équation 1.4). Avec  $C_1$  et  $C_2$  sont respectivement les coûts unitaires de maintenance corrective et de maintenance préventive. Ensuite,  $F(T)$  est la fonction de défaillance de la machine et  $R(T)$  est la fonction de fiabilité de la machine.

$$C(T) = \frac{C_1 F(T) + C_2 R(T)}{\int_0^T R(T) dt} \quad (1.4)$$

Ainsi, l'optimisation de la stratégie type âge consiste à déterminer le nombre optimal des actions de maintenance préventive durant l'horizon de planification ainsi que la durée des intervalles de temps entre deux actions de maintenance successives. Du point de vue économique, l'avantage de la politique de maintenance type âge est d'éviter de remplacer un équipement neuf après une courte durée de la date de son installation. Cependant, cette stratégie est plus difficile à appliquer que celle de type bloc, car elle exige à la fois une surveillance et un enregistrement continu de l'information sur l'utilisation de l'équipement (Cléroux & Ait-kadi, 1988).

### 1.5.2.2 Stratégie type bloc

La stratégie de maintenance type bloc est initialement introduite par (Nakagawa T., 1976). Celle-ci consiste à faire des remplacements de périodicité fixe  $k.T$  ( $k=1, 2, 3\dots$ ) (figure 1.6). Toutefois, si une panne se produit entre deux actions de maintenance préventive, l'équipement est remplacé à neuf. En effet, la stratégie ne tient pas en compte l'âge du système de production et l'historique de défaillance. Ce type de stratégie est caractérisé par sa facilité d'application et d'implémentation dans l'industrie. Son inconvénient est le gaspillage des pièces de rechange, ce qui est une perte pour l'entreprise.

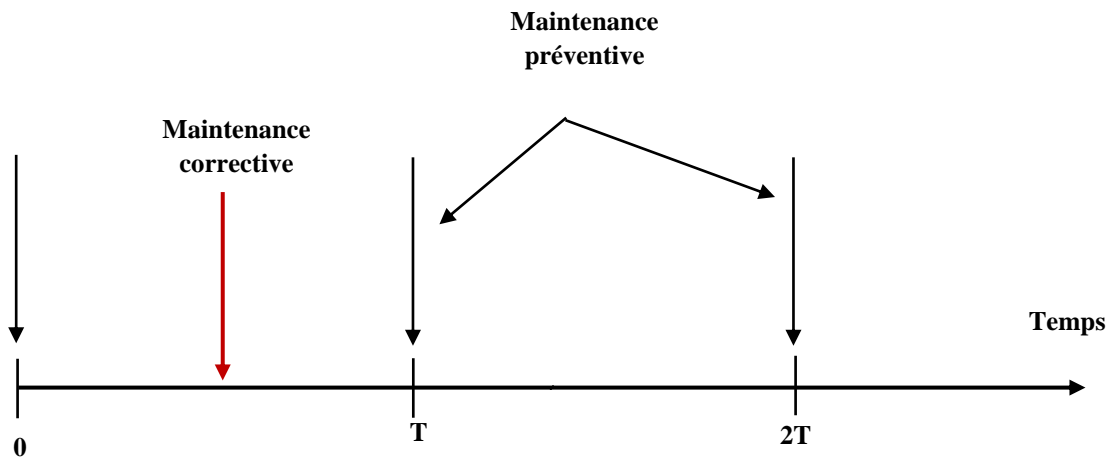


Figure 1.6 : Stratégie de maintenance type bloc

### 1.5.3 Modèles de la maintenance

Dans cet ordre d'idées, les modèles de maintenance peuvent être aussi classés selon l'impact sur le taux de défaillance du système. Nous distinguons trois modèles à savoir : modèle de maintenance parfaite, modèle de maintenance minimale et modèle de maintenance imparfaite.

#### 1.5.3.1 Modèle de maintenance parfaite

Le système est restauré à l'état neuf « as good as new » après l'action de maintenance parfaite, traduit littéralement par « aussi bon que neuf ». Sur le plan formel, la distribution de la durée de vie et la fonction du taux de défaillance subissent une réparation parfaite et elles sont identiques que celles d'une nouvelle unité.

### 1.5.3.2 Modèle de maintenance minimale

La maintenance minimale « Aussi mauvais que vieux » restaure le système dans un état opérationnel qui précède juste avant la panne « as bad as old ». En effet, le taux de défaillance ne change pas après la réparation minimale. Par conséquent, ce type de maintenance est utilisé pour modéliser principalement la maintenance corrective.

### 1.5.3.3 Modèle de maintenance imparfaite

L'action de maintenance imparfaite se situe entre la maintenance parfaite et la maintenance minimale. Ce type de maintenance restaure le système à l'état intermédiaire entre « aussi bon que neuf » et « Aussi mauvais que vieux », permettant d'améliorer considérablement les performances du système de production.

## 1.6 Concept de la sous-traitance industrielle

Aujourd'hui, la sous-traitance doit être définie selon une échelle très large. Celle-ci peut être définie comme étant la livraison des biens ou des services selon la conception et les spécifications du contractant (Cagliano & Spina, 2002). La notion de sous-traitance (ou d'externalisation) a aidé les organisations à réduire les coûts d'exploitation. En réalité, les entreprises externalisent souvent à des organisations qui possèdent des compétences complémentaires.

### 1.6.1 Définition de la sous-traitance

Le recours croissant à la sous-traitance représente une évolution structurelle lourde dans l'organisation des entreprises. La loi française n° 75-1334 du 31 décembre 1975 relative à la sous-traitance définit la sous-traitance comme étant « *l'opération par laquelle un entrepreneur confie par un sous-traité, et sous sa responsabilité, à une autre personne appelée sous-traitant l'exécution de tout ou partie du contrat d'entreprise ou d'une partie du marché public conclu avec le maître d'ouvrage* ». L'entreprise sous-traitante se substitue au donneur d'ordres dans le déroulement d'un travail en supportant une partie des risques industriels engendrés par son travail. Ainsi qu'elle se subordonne aux directives du donneur d'ordres qui seront plus ou moins précises et élaborées, le minimum étant le cahier des charges (Chaillou B., 1977).

La sous-traitance a pris de l'expansion dans le monde industriel dans pratiquement tous les domaines (Amesse, Dragoste, Nollet & Ponce, 2001). Elle permet aux entreprises de réagir avec souplesse aux demandes du marché, d'acquérir des compétences et le professionnalisme dont elles ne disposent pas, de renforcer leur investissement et donc leurs ressources internes autour de leur cœur de métier (Seillan, & Morvan, 2005). D'autres auteurs (Bandyopadhyay & Pathak, 2007) ont justifié le recours à la sous-traitance par une technologie interne insuffisante pour produire efficacement un produit ou par l'impossibilité de produire les quantités demandées dans les délais prévus. De plus, l'externalisation est une solution qui permet aux entreprises de bénéficier des compétences complémentaires des organisations externes. Les auteurs ont également modélisé l'interaction entre les employés de l'entreprise principale et ceux de l'entreprise d'externalisation.

A cet égard, la sous-traitance est considérée par de nombreux industriels comme une nécessité, dont l'ampleur a été largement soulignée (Genthon V., 2000). Elle représente donc non seulement une part croissante des activités, mais elle est aussi devenue presque indispensable. Le volume d'heures sous-traitées n'a cessé d'augmenter, en représentant une forte proposition quant au nombre d'heures travaillées (Hery M., 2002). De plus, la sous-traitance aide l'entreprise à mettre en place

des stratégies de stocks de sécurité ainsi qu'à respecter les délais de production (Aouam & Kumar, 2019).

### 1.6.2 Motivations de la sous-traitance

La sous-traitance n'est pas toujours justifiée par les coûts de production. Elle s'inscrit dans une logique de coopération et de coordination fondée, par exemple, sur des motivations technologiques, pour satisfaire les besoins des clients en termes de délai et de quantité (Andersen PH., 1999), (Bertrand & Sridharan, 2001) et (Berry A., 1997). Parfois, les entreprises se tournent vers des sources externes et collaborent avec des partenaires externes pour développer des capacités technologiques communes (Andersen PH., 2000) et (Gomes-Casseres B., 1994). Les motivations qui peuvent conduire une entreprise à externaliser ses activités et à faire confiance à un prestataire pour les réaliser peuvent être résumées comme suit :

- **Motivation financière** : l'aspect financier est l'une des premières raisons évoquées dans la littérature (Gharbi, Hajji & Dhoubi, 2011), en ligne avec la volonté de réduire les coûts en interne. Les entreprises spécialisées ont pu rationaliser leurs coûts et offrir des services qui permettent au donneur d'ordres de réaliser des économies de productivité, même si des ressources internes existent (Bravard & Morgan, 2006).
- **Motivation stratégique** : le DO sélectionne les investissements qui semblent être les plus créatifs en valeur (Bandyopadhyay & Pathak, 2007). Dans ce cas, elle peut décider d'abandonner les activités qui présentent le moins de valeur ajoutée par rapport à son activité principale (Barthélemy J., 2007).
- **Motivation basée sur les compétences** : il existe des entreprises spécialisées dans l'activité externalisée et disposant du personnel, des outils et du matériel nécessaires pour mener à bien les interventions (Genthon V., 2000) et (Barthélemy J., 2007). Il s'agit de la sous-traitance spécialisée.
- **Motivation sociale** : la sous-traitance peut être liée à un contexte social difficile et qu'elle peut être un moyen de surmonter les lois obligatoires des grandes entreprises DO (Thébaud-Mony A., 2005).

### 1.6.3 Diverses formes de la sous-traitance

Au sens pratique, la sous-traitance peut être décrite de trois manières, selon le point de vue adopté tels que, les moyens nécessaires aux opérations, la localisation des opérations ou le degré de sous-traitance. Chacun de ces trois axes détermine trois catégories de sous-traitance :

- **Sous-traitance de capacité et sous-traitance de spécialité** : si l'on se concentre sur les moyens. La sous-traitance de capacité constitue un renforcement de l'activité, dont le DO peut lui-même réaliser une partie de cette activité (Gorgeu A., 1993). En revanche, la sous-traitance spécialisée désigne la reprise par un sous-traitant d'activités hautement spécialisées et qualifiées pour lesquelles le DO ne fournit pas au maximum (Doniol-Shaw G., 1993).
- **Sous-traitance interne et sous-traitance externe** : avec indication de la localisation. Dans le cadre de la sous-traitance interne, une entreprise dite "utilisatrice", qui confie sur son site et dans le cadre de sa propre activité des travaux à une entreprise appelée "extérieure" (Hery M., 2002). La sous-traitance externe est particulièrement pertinente pour l'industrie automobile et l'information téléphonique (Grusenmeyer C., 2007).

- *Sous-traitance en cascade et sous-traitance à un seul rang* : selon le degré de sous-traitance. Lorsqu'une entreprise DO confie une ou plusieurs opérations à une entreprise extérieure dans le cadre d'un contrat d'entreprise. Ensuite, l'entreprise sous-traitante de niveau 1 confie à son tour tout ou partie des opérations qui lui ont été confiées à une société tierce. Ce dernier devient alors une entreprise sous-traitante de niveau 2. Bien entendu, ce type de sous-traitance permet souvent de répondre aux demandes de flexibilité et d'accroître la réactivité des entreprises (Hery M., 2002) et (Doniol-Shaw G., 1993).

Nous soulignons que la sous-traitance de capacité est appelée aussi sous-traitance de production. De ce fait, nous nous intéressons à ce type de sous-traitance dans nos travaux.

#### 1.6.4 Les stratégies de sous-traitance

On s'est rendu compte que le donneur d'ordres est confronté à deux stratégies possibles pour le choix de la stratégie de sous-traitance adoptée (figure 1.7) (Hafidi, El Barkany & Mahmoudi, 2018).

- *La première stratégie* est mono-outsourcing, c'est-à-dire que le DO recourt à un sous-traitant permanent, d'où la nécessité d'un programme permettant de fournir le produit au moment voulu et avec la quantité souhaitée.
- *La deuxième stratégie* est multiple-outsourcing ; le DO choisit un sous-traitant pour une période donnée, puis il commute vers un autre sous-traitant selon les avantages et les caractéristiques des sous-traitants existants ainsi que de la situation de l'entreprise DO.

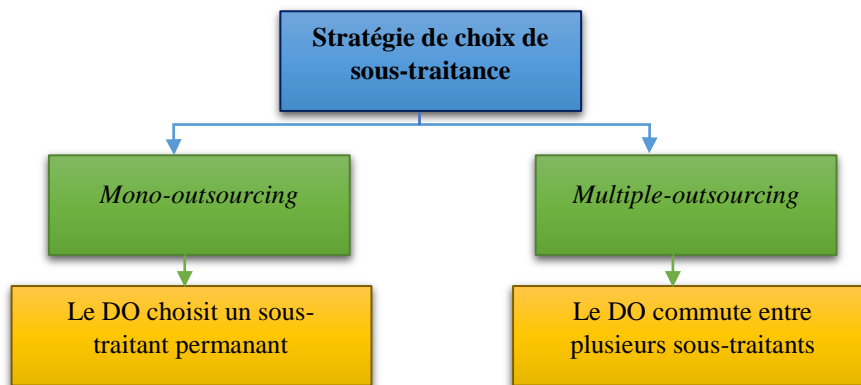


Figure 1.7 : Stratégie de choix de sous-traitance

Certes, le choix du sous-traitant dépend généralement de trois critères (Hafidi, El Barkany & Mahmoudi, 2018) :

- Le premier critère est le coût de sous-traitance. Ce facteur est déterminant dans le choix du sous-traitant parmi les candidats sous-traitants potentiels. A titre d'exemple, dans le domaine industriel, le donneur d'ordres ne peut pas attribuer toute ou une partie de la demande qu'auprès d'un sous-traitant offrant un barème de prix minimale.
- Le deuxième critère est le délai de livraison. Le DO est responsable de faire un choix optimal des sous-traitants avec lesquels il va collaborer qui respectent les délais. En contrepartie, les sous-traitants sont aussi responsables à fournir les produits ou d'exécuter les prestations dans les délais prédéterminés.



- Finalement, le facteur qualité se traduit par toutes les caractéristiques et les propriétés d'un produit permettant de répondre aux besoins et aux attentes de la clientèle. En effet, la qualité des produits est un élément important lors du choix du sous-traitant. De plus, le DO est responsable de choisir le sous-traitant qui est apte à fournir des produits répondant parfaitement aux exigences souhaitées dans son cahier des charges. Ainsi, le contrôle qualité doit être préalablement effectué aux produits fournis par le sous-traitant afin de s'assurer que ceux-ci correspondent réellement aux besoins.

### 1.6.5 Les avantages de la sous-traitance

La décision de produire en interne ou bien de sous-traiter est une décision stratégique au niveau de l'entreprise manufacturière. Il est très important de souligner que le recours à la sous-traitance se justifie non seulement par le manque de capacité du donneur d'ordres et la réduction des coûts de production, mais aussi par la haute qualité des produits fabriqués. En effet, l'adoption de l'option de sous-traitance apporte généralement des bénéfices et des avantages pour les deux parties (le DO et le sous-traitant), tels que :

- *Réduction des coûts* : la sous-traitance engendre des économies de coûts de production par rapport à la production interne, en minimisant les coûts de main-d'œuvre (Abraham, & Taylor, 1996).
- *Meilleure qualité* : l'appui sur les connaissances d'experts de la sous-traitance représente un avantage pour les entreprises au niveau de spécialisation des opérations (Abraham & Taylor, 1996).
- *Amélioration des performances* : des études empiriques affirment que la sous-traitance est liée à l'amélioration des performances de l'entreprise (Morrison & Yasar, 2004).
- *Partage des risques* : la sous-traitance contribue à la protection contre les risques du marché qui découlent de variations imprévisibles de la demande (Abraham & Taylor, 1996). Ensuite, les entreprises peuvent alléger la charge du travail de leur main-d'œuvre en sous-traitant des tâches pendant les périodes de pointe de la demande.
- *Nouveaux marchés* : la sous-traitance des activités de production est habituellement utilisée pour les grandes entreprises d'agglomération industrielle, les entreprises les plus âgées ainsi que les entreprises à salaires élevés (Holl A., 2008). La sous-traitance permet aux entreprises de répondre à des demandes souvent croissantes et fluctuantes. Ceci contribue à l'acquisition de nouveaux marchés.

### 1.6.6 Les limites de la sous-traitance

Il est évident que les limites d'externalisation seront atteintes lorsqu'elles touchent l'outil de production. Ces limites peuvent rendre difficile le maintien du savoir-faire interne sur les équipements sensibles, même si des opérations complexes sont parfois confiées à des spécialistes. En outre, il existe une forte dépendance à l'égard du sous-traitant et un manque de motivation de ce dernier pour impacter la qualité du produit (Tazi D., 2010).

## **1.6.7 La sous-traitance de production et la sous-traitance de maintenance**

### **1.6.7.1 La sous-traitance de production**

Signalons que la sous-traitance totale ou partielle de production est largement utilisée dans l'industrie manufacturière. En effet, la combinaison entre la production interne et la sous-traitance des produits peut être une solution efficace pour l'entreprise. Dans le même sens (Cortinhal, Lopes & Melo, 2019) et ( Lu Zhen., 2012) ont analysé les compromis entre les deux modes de fabrication : la sous-traitance et la stratégie de fabrication interne. Certes, des économies significatives peuvent être obtenues en adoptant la stratégie de sous-traitance lorsque le taux moyen de la demande est élevé. (Shine-Der Lee & Shu-Chuan Lan, 2013) ont étudié un modèle de quantité économique de production (EPQ) avec l'option de sous-traitance qui complète la taille de lot en faisant face à la demande aléatoire. Rappelons que, la sous-traitance est utilisée lorsque la demande totale est supérieure à la taille du lot dans un cycle de réapprovisionnement. En outre, le risque de perturbation et l'incertitude d'allocation des capacités justifient aussi le recours à la sous-traitance de production. A cet effet, l'entreprise est incitée à sous-traiter lorsque le risque de perturbation est tellement élevé (Kebing Chen & Tiaojun Xiao, 2015).

Néanmoins, l'externalisation de la production a un effet sur le rendement opérationnel global de l'entreprise à savoir plus particulièrement sur : le temps du cycle de fabrication, les délais de commande, la livraison, l'efficacité de l'équipement d'exploitation, ainsi que la fidélité de la clientèle (Kenyon, Meixell & Westfall, 2016). Leur analyse a montré que l'externalisation de la production affecte le rendement opérationnel, ce qui réduit l'efficacité de l'équipement d'exploitation et le délai des livraisons.

### **1.6.7.2 La sous-traitance de maintenance**

Notons que la sous-traitance n'est pas toujours associée aux activités de production. La maintenance des équipements peut être aussi externalisée à un prestataire expert dans le domaine. Essentiellement, le but d'externalisation de la maintenance est le fait de se focaliser sur l'activité principale de l'entreprise.

Certes, la qualité des actions de maintenance dans l'industrie aérienne est pratiquement critique. Autrement dit, si les actions de maintenance sont mal effectuées, cela peut conduire considérablement à des accidents. Dans le même contexte, ( Quinlan, Hampson & Gregso, 2013) ont étudié le risque d'externalisation de la maintenance dans l'industrie aérienne. Ils ont cherché à établir une association statistique entre le taux d'externalisation et les taux d'accidents et d'incidents dans l'industrie aérienne américaine. En contrepartie, (Hakkı Bağan & Ender Gerece, 2019) ont montré que l'externalisation de la maintenance dans l'industrie aérienne permet de réduire les coûts et le temps des actions de maintenance. En effet, la maintenance des avions engendre des risques humaines et matériels, en influant directement leur sécurité. Ensuite, (Chaabane, Khatab, Aghezzaf, Diallo & Venkatadri, 2018) ont étudié le problème de maintenance sélective (SMP) avec deux alternatives de maintenance, interne et externalisée. Ils ont montré à travers une formulation de programmation non-linéaire intégrée l'avantage de l'exécution conjointe la maintenance interne et externalisée. Néanmoins, lorsque la maintenance est externalisée, il est nécessaire d'assurer une bonne gestion des données permettant à la prise de décision (Murthy, Karim & Ahmadi, 2015). Ainsi, le recours à la sous-traitance de maintenance des instruments médicaux dans les hôpitaux est toujours en progrès. Toutefois, il existe très peu de recherches dans ce domaine (Cruz & Rincon, 2012).

## **1.7 Gestion de la maintenance et de la production**

La maintenance intégrée peut être définie comme étant la combinaison de la gestion de maintenance et celle de production pour éviter les conflits entre les deux services et afin d'obtenir un profit maximal pour l'entreprise. Par conséquent, le concept d'intégration est de plus en plus adopté dans le contexte industriel. Cette approche consiste à considérer simultanément les paramètres de production (par exemple : taux de production, niveaux de stocks, demande des clients, etc.) et ceux de la maintenance à savoir le taux de pannes, périodicité des actions préventives, etc. Le but est de maximiser le profit de l'entreprise et d'améliorer ses performances.

### **1.7.1 Planification séparée de la production et de la maintenance**

La gestion séparée de la maintenance et de la production se manifeste au point où la gestion de la maintenance ne tient pas compte de l'impact des contraintes de production et inversement. Au sens pratique, la maintenance est souvent considérée comme étant une source de perturbation supplémentaire de la production. Puisque les deux fonctions sont toujours en conflit au niveau de la planification ainsi qu'au niveau du partage des ressources. En outre, la gestion séparée de la maintenance et de la production peut conduire au non-respect du plan de maintenance préventive. D'où, la défaillance des équipements du système de production et le non-respect des attentes de la clientèle, essentiellement en termes de délai. Notons que le respect des délais étant une priorité absolue de la part des clients. Le principal défi auquel est confrontée l'industrie manufacturière est de produire plus de produits en utilisant moins de ressources (Mohamed NMZN & Khan MK, 2012).

Dans cet ordre d'idées, le chevauchement entre les interventions de maintenance et les opérations de production se manifeste au niveau de la planification. En effet, la planification de la production exige une disponibilité maximale des équipements. En contrepartie, la planification de la maintenance attend les arrêts des équipements de production pour effectuer les interventions de maintenance préventive. Néanmoins, des travaux dans la littérature ont traité le problème séparément en considérant chaque axe individuellement.

Compte tenu des modèles, qu'il s'agisse des plans de maintenance ou de planification de la production, certains travaux (Shahin A., 2008) ont traité la planification de la production, qui consistait à satisfaire les commandes clients en intégrant la qualité afin de rester compétitif. De plus, les modèles de planification de maintenance trouvés dans la littérature ne tiennent pas explicitement en compte de leur impact sur la planification de la production et inversement. Certains auteurs ont proposé des politiques de maintenance préventive concernant l'âge critique de la machine en comparant les stratégies de maintenance pour évaluer la performance des systèmes de production soumis à des pannes (Buzacott & Shanthikumar, 1993), (Dallery & Gershwin, 1992) et (Xie X., 1993). De même, le contrôle des systèmes de production avec la stratégie de maintenance préventive est modélisé en développant une approche basée sur la modélisation Markovienne (Van der Duyn Schouten & Vanneste, 1995) et (Meller & Kim, 1996).

### **1.7.2 Planification intégrée de la production et de la maintenance**

Nous retrouvons dans la littérature une relation entre la maintenance et la production, cette relation existe selon plusieurs façons. Nous classons les modèles intégrés de production et de maintenance traités en quatre grandes catégories (Hafidi, El Barkany & Mahmoudi, 2017) :

- **La première catégorie**

La première catégorie présente les modèles d'optimisation conjointe du taux de production et du taux de maintenance. Cette catégorie a été traitée par (Kenné, Boukas & Gharbi, 2003), (Gharbi & Kenné, 2000), (Bergeron, Jamali & Ait-Kadi, 2009), (Kenné & Boukas, 2003), (Kenné & Gharbi, 2004), (Gharbi & Kenné, 2005), (Charlot, Kenné & Nadeau, 2007), (Kenné & Nkeungoue, 2008), (Ben-Salem, Gharbi & Hajji, 2015). Ces modèles portent sur le problème du contrôle optimal, dont les variables de décision sont le taux de production et celui de maintenance en minimisant le coût total. Dans cette optique, (Ouali, Rezg & Xiaolan, 2002) ont optimisé à la fois les flux de production et la maintenance préventive. L'approche développée a permis de considérer l'interaction entre la stratégie de maintenance et la politique de contrôle. (Yalaoui, Chaabi & Yalaoui, 2014) ont proposé un modèle de programmation linéaire étendu pour calculer le plan de production optimal avec un coût total minimal. Ce problème du double objectif de la planification de la production et de la maintenance a été traité comme étant un programme linéaire mixte. Certains ont présenté l'optimisation de la maintenance préventive par un modèle de simulation qui combine la maintenance et la production (Roux, Duvivier, Quesnel & Ramat, 2013). Leur but est d'assurer simultanément une faible fréquence de défaillance par une maintenance préventive périodique efficace ainsi que de minimiser l'indisponibilité du système de production, ce qui implique un impact minimal sur la production. Dans le même contexte, (Hajej, Dellagi & Rezg, 2009) ont développé une combinaison du plan de production et de maintenance pour un système de fabrication répondant à une demande aléatoire. Ensuite, une optimisation commune a été réalisée afin d'établir une stratégie optimale pour la production et la maintenance (Hajej, Dellagi & Rezg, 2011). Leur objectif est d'établir un plan de production économique répondant à une demande aléatoire et un plan de maintenance préventive (MP) optimal utilisant le plan de production qui a été déjà établi. En bref, l'optimisation conjointe du taux de production et taux de maintenance permet de :

- Augmenter la disponibilité des systèmes de production.
- Améliorer la productivité des systèmes de production.
- Minimisation du coût total constitué du coût de production et de maintenance.

- **La deuxième catégorie**

La deuxième catégorie développe les modèles de planification conjointe de la production et de la maintenance. Toutefois, l'exécution de la gestion de la maintenance et de la production exige leur coopération, dont on peut notamment se référer à la thèse de (Géhan M., 2014). L'auteur a apporté des réponses au problème de la planification conjointe et intégrée des tâches de maintenance et ceux de production tenant compte des aléas liés aux défaillances. Signalons que le système de production possède plusieurs états, à savoir état opérationnel, en panne et en réparation (Gharbi, Kenné & Beit, 2007). De ce fait, (Fitouhi, & Nourelfath, 2014) ont présenté un modèle intégré de production et de planification de la maintenance préventive pour un système multi-états. Du côté production, le modèle a généré, pour chaque produit et pendant chaque période de planification de la production, la quantité de stock et le délai de livraison. Du point de vue maintenance, les auteurs ont proposé l'instant pour effectuer chaque action de maintenance préventive pendant la période de la planification de production. Par ailleurs, le traitement de l'aspect environnemental avec la planification de la production a fait l'objet de l'article de (Bousslah, Gharbi & Pellerin, 2013). Les auteurs ont abordé le problème de la planification de la production, en interagissant avec la problématique environnementale dans une perspective de dégradation. Les auteurs ont proposé l'étude de trois politiques de contrôle de la production et celles de la politique des activités de

maintenance. Par la suite, (Cheng, Zhou & Li, 2016) se sont concentrés sur une méthode de modélisation intégrée qui détermine simultanément la planification de la production et celle de la maintenance dans le système d'usinage, compte tenu du remplacement de l'outil de défaillance de la machine, ainsi que de la demande constante et de la pénurie. Sur la base d'un modèle de programmation numérique mixte linéaire, (Alaoui-Selsouli, Mohafid & Najid, 2012) ont planifié conjointement les activités de production et de maintenance. L'action de MP a été effectuée à des dates prédéterminées, tandis que la maintenance corrective a été effectuée pour remettre le système à son état de fonctionnement sans modifier la fonction du taux de défaillance.

Dans le cas de la production par lot, pour (Aghezzaf, Jamali & Ait-Kadi, 2007), l'objectif était d'étudier un système fabriquant multiproduit avec des équipements défaillants en combinant la gestion de production et celle de maintenance. (Xiang, Cassady, Jin & Zhang, 2014) ont proposé des modèles conjoints de production et de maintenance tenant compte de l'incertitude du rendement, ce qui a permis d'éviter la pénurie et la perte de la clientèle. Les auteurs ont formulé un problème de planification intégrée comme un processus de décision markovien. De plus, ils ont démontré que les politiques optimales de production et maintenance avaient une structure de limites de contrôle. Pour (Bennour, Bloch, & Zerhouni, 2001), ils s'intéressent à la modélisation intégrée de l'ordonnancement des activités de maintenance préventive et de production. D'autre part, (Najid, Alaoui-Selsouli, & Mohafid, 2011) ont présenté un modèle commun de planification de la production et de la maintenance d'un système de production soumis à des défaillances aléatoires. Leur modèle a réduit à la fois la pénurie de la demande et donne plus de flexibilité aux actions de MP. Nous concluons que les objectifs de la deuxième catégorie qui consiste à la gestion conjointe de la production et de la maintenance sont :

- Minimiser les retards de maintenance.
- Assurer la disponibilité et la pérennité des systèmes de production.
- Maximiser la rentabilité de l'entreprise.

- **La troisième catégorie**

La troisième catégorie concernait les modèles visant à déterminer conjointement la taille optimale du stock tampon et l'âge optimal de MP qui désigne une période prédéterminée pour effectuer l'action de maintenance préventive. (Kenné, Gharbi & Beit, 2007) ont proposé un modèle analytique pour étudier l'effet de la politique de MP adoptée et l'âge de l'équipement sur les niveaux de stock tampon. De plus, (Chelbi & Rezg, 2006) ont également développé un modèle mathématique pour trouver le couple optimal (stock tampon et âge de maintenance préventive), en minimisant le coût total moyen par unité de temps. De la même optique, (Rezg, Xie & Mati, 2004) ont étudié une chaîne de production composée de  $n$  machines, en présentant une optimisation commune entre l'âge de la MP et le stock de contrôle. Ensuite, en élaborant un modèle analytique, l'objectif de (Chelbi & Aït-Kadi, 2003) est de déterminer à la fois la taille du stock tampon et la période de MP pour une unité de production peu fiable et soumise à une MP régulière de durée aléatoire. En principe, la troisième catégorie consiste à :

- Minimiser le coût total moyen par unité de temps.
- Satisfaire la contrainte de disponibilité.

- **La quatrième catégorie**

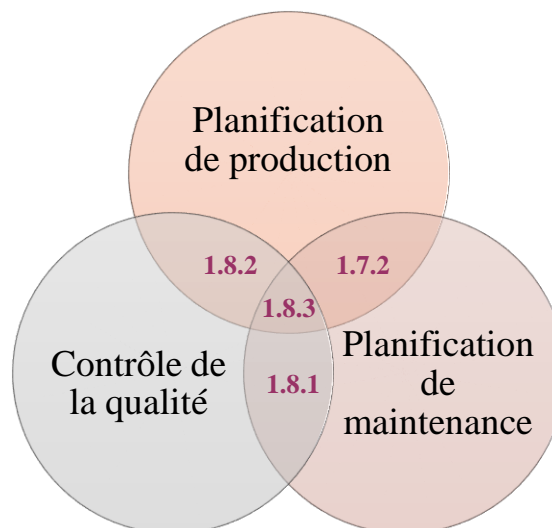
En réalité, les systèmes de production fabriquent des produits conformes et d'autres non conformes. En effet, pour éviter la livraison des produits de mauvaise qualité aux clients et afin de

garder la bonne image de l'entreprise, il est nécessaire de mettre l'accent sur la nécessité de la fonction qualité. De ce fait, la dernière catégorie concernait l'intégration de la notion qualité au problème de la gestion conjointe de la production et de la maintenance. Nous détaillerons d'avantage cette catégorie dans le paragraphe suivant.

### 1.8 Intégration des politiques de contrôle de la production, de la maintenance et de la qualité

Bien évidemment que la production, la maintenance et la qualité sont trois fonctions aux objectifs différents. Dans la littérature, les trois fonctions sont fréquemment traitées séparément. Afin de maximiser les profits de l'entreprise, une gestion conjointe est nécessaire. En effet, plusieurs études ont estimé l'importance de la qualité sur le problème d'optimisation conjointe de la production et de la maintenance. Dans cet ordre d'idées, nous proposons dans ce qui suit une classification des modèles existant dans la littérature qui intègre la notion qualité à la gestion de production et de maintenance tels que (figure 1.8) :

- Optimisation conjointe des décisions de qualité et de maintenance ;
- Contrôle intégré de production et de qualité ;
- Intégration des stratégies de production, maintenance et qualité.

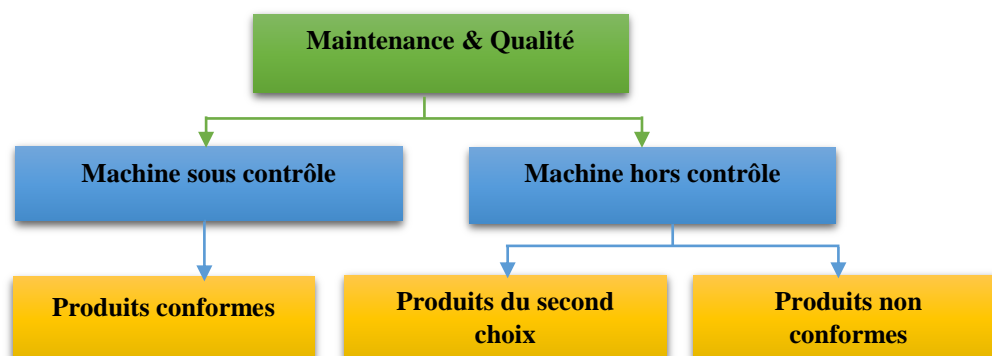


**Figure 1.8** : Interaction entre la production, la maintenance et la qualité

#### 1.8.1 Optimisation conjointe des décisions de qualité et de maintenance

Il convient de mentionner qu'il existe un lien étroit entre la maintenance des équipements de production et le contrôle qualité des produits fabriqués. En effet, le rapport entre la maintenance et le contrôle qualité dépend de la conformité des produits fabriqués ainsi que de la dégradation des équipements de production. De plus, nous avons constaté dans la littérature qu'il existe deux approches de planification des actions de maintenance et du contrôle qualité (Radhoui M., 2008). La première approche consiste à utiliser des outils de qualité afin de déterminer le taux du rejet en utilisant la carte de contrôle (Zhou & Zhu 2008) et (Radhoui M., 2008). En ce qui concerne la deuxième approche, il est prévu que l'unité de production puisse avoir deux états (Ben daya, 2002) et (Chakraborty, Giri & Chaudhuri, 2009). Le premier état est appelé état sous contrôle, où l'unité de production fabrique des produits de qualité acceptable. Le second est un état hors contrôle dans

lequel l'équipement produit des articles de deuxième choix (qualité inférieure) ou bien des produits non conformes (figure 1.9).



**Figure 1.9** : La dépendance entre la maintenance et la qualité

Toutefois, l'augmentation du taux de détérioration influence la qualité des produits fabriqués, d'où la nécessité d'intervention de maintenance préventive et corrective. Dans le même contexte, (Radhoui, Rezg & Chelbi, 2010) ont traité la politique de contrôle conjoint de la maintenance et la qualité. Les auteurs ont considéré un système de production avec un taux de défaillance croissant, le système fabrique des articles conformes ainsi que d'autres non conformes. Leur objectif est de déterminer simultanément le taux du rejet et la taille optimale du stock tampon. En outre, (He, Liu, Cui, Han, Zhao, Chen, Zhou & Zhang, 2019) ont présenté un modèle d'optimisation conjointe de la maintenance préventive et du contrôle qualité en utilisant une carte de contrôle. De plus, les auteurs ont présenté l'impact du processus de fabrication sur la fiabilité finale du produit, en supposant que la dégradation de la fiabilité du produit fini est due principalement à des défauts de fabrication.

Ainsi, (Siener & Aurich, 2011) ont utilisé un réseau de neurones artificiel pour prédire l'influence des machines sur la qualité du produit final. En effet, la stratégie de maintenance conditionnelle adoptée est basée sur un seuil du taux de non-conformité, ce qui justifie le lien entre la stratégie de maintenance et le contrôle qualité. C'est ainsi que la stratégie de maintenance conditionnelle basée sur la qualité a été aussi au centre du travail de (Lu, & Zhou, 2019). Les auteurs ont montré que la maintenance peut réduire la détérioration des machines ainsi que la non-qualité des produits fabriqués. Par conséquent, ils ont proposé une stratégie de maintenance conditionnelle basée sur l'évaluation de la qualité des produits finis. Puis, ils ont suggéré une comparaison avec un seuil qui active les actions de maintenance préventive. Notons que la plupart des recherches présentes ont confirmé un lien étroit entre la maintenance et la qualité. Récemment, (Khanh Nguyen, Phuc Do, Khac Tuan Huynh, Christophe Bérenguer & Antoine Grall, 2019) ont examiné le rôle d'ajustement de la qualité sur la réduction du coût du programme de la maintenance. Les auteurs ont proposé un processus décisionnel de Markov basé sur une politique dynamique de maintenance et d'inspection. Par ailleurs, (Khatab & Aghezzaf, 2016) ont traité le concept de la qualité, du point de vue qualité des actions de maintenance. Les auteurs ont introduit une variable aléatoire qui identifie la qualité de la maintenance.

### 1.8.2 Contrôle intégré de production et de qualité

Par souci de clarté, la gestion du service de production est généralement liée à la qualité du service. Le contrôle de la qualité des produits finis ou en cours de fabrication s'effectue soit par échantillonnage, soit par contrôle qualité à 100 %, selon la criticité du produit fabriqué. Par

conséquent, le contrôle de la qualité et l'inspection processus sont nécessaires pour évaluer l'état du système, en détectant les variations instantanées du processus.

Certes, parmi les problèmes des systèmes de production est le manque de la qualité des produits fabriqués. Partant de ce constat, les produits de qualité inférieure ne sont pas généralement vendus à leur prix régulier. Autrement dit, les produits de qualité inférieure sont vendus à un prix plus bas. En fait, il y a des entreprises qui favorisent la mise en place d'actions de retouche pour les articles de qualité inférieure. Cependant, la décision d'adopter la stratégie de retouche dépend de la criticité du produit. En d'autres termes, si le produit est d'une criticité plus élevée, la probabilité d'effectuer l'action de retouche est minime. De plus, l'inspection des procédés et le contrôle de la qualité permettent d'évaluer l'état caché d'un système et de détecter les variations du processus (Fakher, Nourelfath, & Gendreau, 2016). En outre, (Colledani, Tolio & Yemane, 2018) ont abordé le problème l'amélioration de la performance de qualité et de production pendant la phase de montée en puissance du système. Néanmoins, les produits se distinguent par leur prix et leur niveau de qualité (Jalali, Carmen, Van Nieuwenhuysse & Boute, 2018). Les auteurs ont examiné l'impact de la capacité de production infinie sur les décisions optimales en matière de qualité. La figure 1.10 montre les différentes étapes de suivi de qualité des lots de production (Hafidi, El Barkany, El Mhamdi & Mahmoudi, 2019).

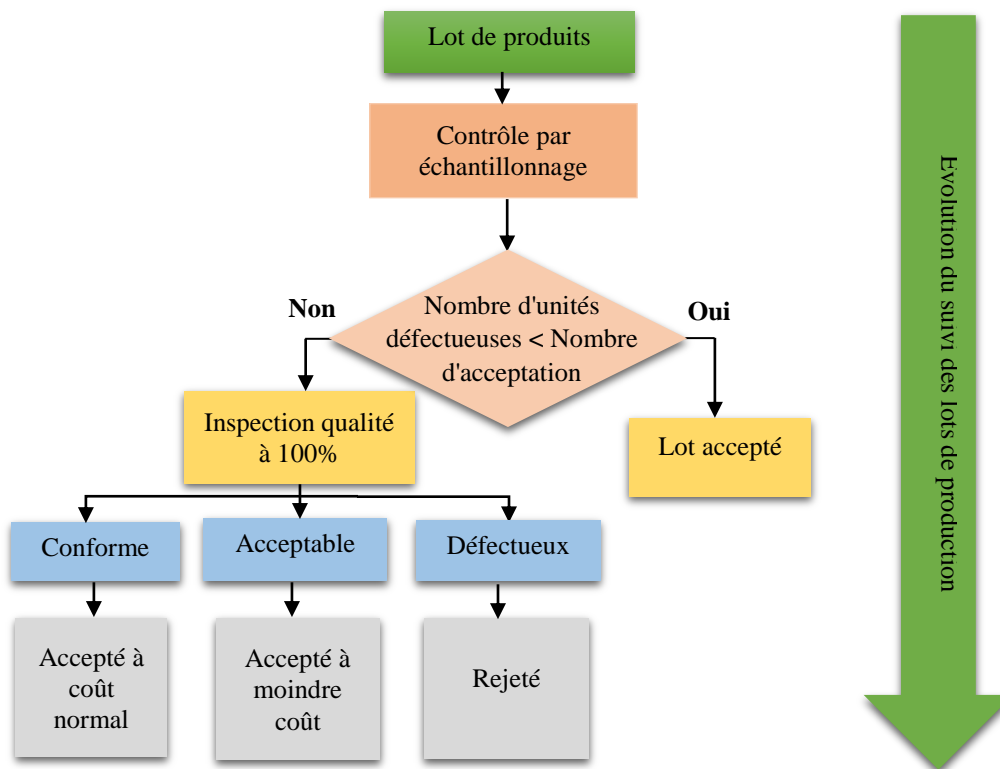


Figure 1.10 : Évolution du suivi des lots de production

### 1.8.3 Gestion intégrée de la production, la maintenance et la qualité

Les modèles classiques de planification assument que tous les produits ont une qualité acceptable. Néanmoins, le système de production fabrique des produits de bonne qualité et d'autres de qualité inférieure. Ainsi, les planificateurs peuvent donner de l'importance à certaines fonctions et à d'autres moins. Récemment, les chercheurs s'intéressent davantage aux systèmes de production



imparfaits. La figure 1.11 présente une synthèse des travaux de gestion conjointe de la production, de la maintenance et de contrôle qualité.

En effet, il existe des travaux traitant la gestion conjointe des trois fonctions (production, maintenance et qualité) avec et sans la contrainte de sous-traitance. Nous remarquons que l'intégration des trois fonctions dans le même modèle est nouvelle dans la littérature. Généralement, la modélisation conjointe consiste à déterminer la quantité de production, le nombre d'action de maintenance préventive et le taux d'inspection. Nous constatons des lacunes au niveau de manque des revues de ce type des modèles intégrés. Cette catégorie de problème est rarement étudiée dans la littérature. A ce jour, il n'y a aucun modèle qui traite la gestion intégrée des trois fonctions prenant en compte la contrainte de sous-traitance. En effet, les références ont considéré un système de fabrication composé soit d'une seule machine ou bien d'une ligne de production, fabriquant un ou plusieurs produits. En principe, la modélisation conjointe détermine le taux de production, la fréquence des actions de maintenance préventive, le taux d'inspection etc. En pratique, les résultats de notre analyse de revue de littérature existante affirment que (Hafidi, El Barkany, El Mhamdi & Mahmoudi, 2019) :

- L'intégration des trois fonctions dans le même modèle est rarement présentée dans la littérature ;
- La gestion conjointe du trio permet à la fois d'éviter les conflits entre les départements, de maximiser les profits de l'entreprise et d'améliorer ses performances ;
- La majorité des travaux traite généralement le cas simple (seule machine / seul produit) ;
- La variation de la cadence de production influence la détérioration des équipements ;
- La détérioration des équipements de production influence la qualité des produits fabriqués ;
- L'augmentation du taux de détérioration entraîne une augmentation du taux de pièces défectueuses ;
- La stratégie de maintenance influe sur la détérioration de l'équipement et sur le taux de défaillance.

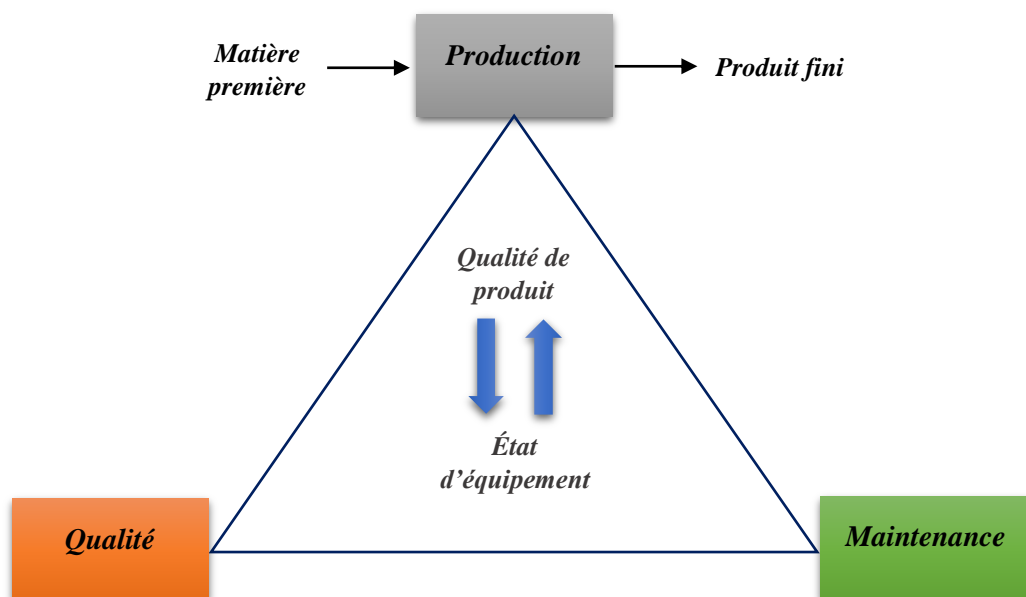


Figure 1.11 : Synthèse de la gestion conjointe de la production, de la maintenance et de la qualité

## 1.9 Modélisation et optimisation des systèmes de production

### 1.9.1 Modélisation mathématique

En général, la modélisation consiste à représenter un système réel dans le temps, dans l'intention de tirer des conclusions et des observations. En effet, la réussite de la modélisation d'un système étudié nécessite que le modèle soit fidèle le plus possible au comportement que l'on veut reproduire. Ainsi, la modélisation mathématique consiste à représenter le problème sous forme des équations permettant de mettre en évidence l'ensemble des contraintes à respecter ainsi que les variables du modèle. L'objectif désiré à atteindre par l'entreprise se traduit par une fonction objectif à optimiser. Certes, il existe différentes classifications des modèles, dont nous distinguons principalement :

- *Modèle déterministe / stochastique*

Un modèle est dit déterministe si les valeurs des variables dépendantes du système sont déterminées à partir des paramètres et des conditions initiales du modèle (Sergio & Rey, 2015). Ainsi, les paramètres de ce type de modèle sont des valeurs exactes. A cet effet, les modèles déterministes donnent lieu à une erreur beaucoup plus faible et plus facile à analyser par rapport aux modèles stochastiques.

Tandis qu'un modèle stochastique est un modèle aléatoire qui se base sur la probabilité. En effet, un modèle stochastique ou probabiliste implique la notion des variables aléatoires, de telle façon que les résultats du modèle sont des distributions de probabilité plutôt que des valeurs uniques. Ainsi, si on peut varier une ou plusieurs hypothèses de façon totalement aléatoire on a un modèle dit "stochastique". Le domaine stochastique se base généralement sur des fluctuations aléatoires. Ces variables aléatoires présentent entre elles des relations de dépendances complexes, traduisant la façon d'interaction entre les éléments aléatoires du modèle. En effet, les modèles stochastiques sont plus réalistes pour les petits échantillons.

- *Modèle statique / dynamique*

Le modèle statique décrit le comportement des systèmes dont le temps n'intervient pas. En revanche, l'utilisation du modèle dynamique est réalisée afin de décrire un comportement qui évolue au cours du temps. Nous signalons que les modèles dynamiques et les modèles statiques font partie modèles déterministes.

Dans le cas des systèmes de production, certaines méthodes de modélisation mathématique ont pourtant été développées et appliquées avec succès. Nous résumons les étapes d'étude d'un modèle en cinq étapes présentées ci-dessous.

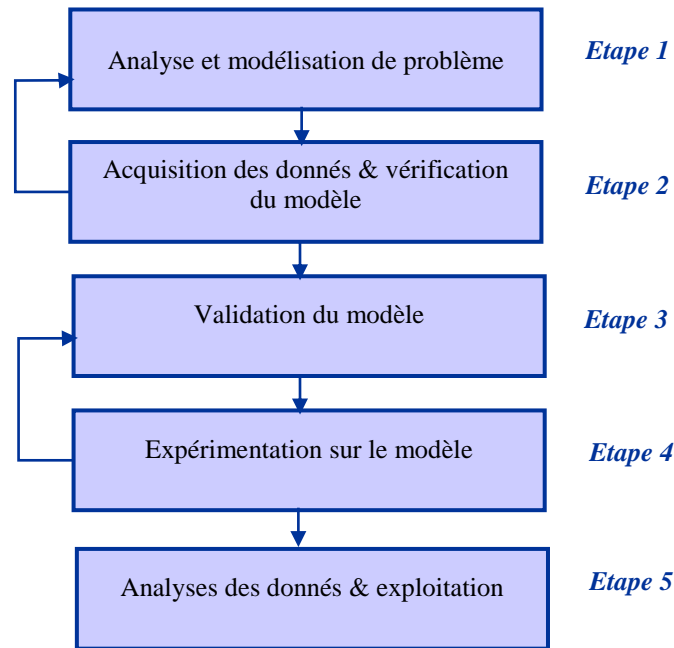


Figure 1.12 : Les étapes de la modélisation

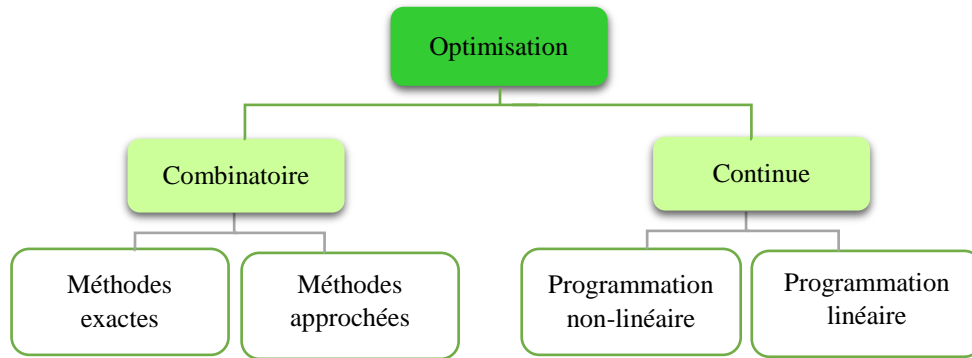
### 1.9.2 Problème d'optimisation

Le but principal du problème d'optimisation est d'obtenir le meilleur résultat dans des circonstances données. L'optimisation consiste à déterminer les extrémités d'une fonction, appelée fonction objectif en littérature. Cette dernière correspond à une relation algébrique entre une ou plusieurs variables de sortie du système étudié, appelée " variables de décision ". D'une manière générale le problème d'optimisation s'écrit de la manière suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Minimiser } f(X), \quad X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \\ \text{Sous les contraintes} \quad g_i(X) \leq 0; \quad i = 1, 2, \dots, m \\ \quad \quad \quad \quad \quad h_j(X) = 0; \quad j = 1, 2, \dots, p \\ \text{Où} \quad \quad \quad \quad \quad X \in C \subset \mathfrak{R}^n \end{array} \right. \quad (1.5)$$

Soit  $f$  la fonction objectif à optimiser,  $X$  représente le vecteur des variables d'optimisation appelée variables de décision,  $g_i$  représente l'ensemble des contraintes d'inégalité et  $h_j$  est l'ensemble des contraintes d'égalité. Finalement  $C$  définit l'espace de définition des variables appelé aussi l'espace de recherche (Ouriemchi M, 2005).

Le succès de la procédure d'optimisation dépend du choix de la fonction objectif et de sa relation fonctionnelle avec les paramètres de contrôle (Hilgers & Boersma, 2001). Afin d'optimiser la maintenance et la production de manière simultanée, il est plutôt nécessaire d'aller vers une approche algorithmique performante. Le but d'un algorithme d'optimisation est de trouver automatiquement et rapidement une solution à un problème très complexe. Dans ce sens, plusieurs méthodes de résolution ont été développées (Lebbar G., 2019) (figure 1.13).



**Figure 1.13** : Les types d'optimisation

- **Programmation linéaire**

La programmation linéaire (PL) est une technique mathématique largement utilisée pour trouver des solutions optimales à des problèmes réels. Nous parlons d'un PL si la fonction objectif  $f$  est linéaire et les fonctions contraintes  $g_i$  et  $h_j$  sont toutes linéaires. Un problème linéaire continue peut-être résolue en temps polynomial, par exemple, "*points intérieurs*" (Karmarkar N., 1984). Ainsi, l'algorithme de "*Simplex*" de Dantzig en 1947 (Nash JC., 2000) le plus célèbre des algorithmes de résolution non polynomiale. Parmi les solveurs de résolution du PL, nous citons : Cplex (IBM), Xpress Gurobi (microsoft), Matlab ou Excel.

- **Programmation non-linéaire**

L'objectif de la programmation non-linéaire (PNL) est l'étude des problèmes non-linéaire ainsi que la détermination des méthodes pour les résoudre. Dans la littérature la programmation mathématique non-linéaire est apparue en 1950 (Slater M., 1950) et (Kuhn & Tucker, 1951). Elle représente une technique mathématique d'optimisation dont au moins la fonction objectif  $f$  ou l'une des contraintes ( $g_i$  et  $h_j$ ) est non-linéaire. Cet outil d'optimisation représente une généralisation de la programmation quadratique et la programmation linéaire. Le solveur Matlab propose la fonction "*fmincon*" pour la résolution des problèmes d'optimisation multidimensionnelle avec contraintes. Le principe de la fonction est basé sur la programmation séquentielle quadratique. Notons que, la géométrie d'un programme non-linéaire est plus complexe que celle d'un programme linéaire.

Tel est le cas, par exemple, des méthodes plus avancées dans le domaine de l'optimisation combinatoire appelée aussi optimisation discrète. Ces méthodes peuvent être résumées en deux grandes familles :

- **Les méthodes exactes** : ces méthodes permettent de garantir une solution optimale unique. Elles offrent des solutions optimales pour des problèmes de taille raisonnable. Elles sont appelées aussi méthodes complètes.
- **Les méthodes approchées** : ces méthodes constituent une alternative très intéressante pour traiter les grands problèmes d'optimisation si l'optimalité n'est pas primordiale. Elles sont appelées aussi méthodes incomplètes et perdent leur complétude pour améliorer l'efficacité.

Un modèle d'optimisation de la maintenance intégré à la production est un modèle mathématique dans lequel les coûts et les avantages de la maintenance et de la production sont évalués pour obtenir un équilibre optimal entre les deux. En effet, les méthodes de résolution et d'optimisation

sont de plus en plus utilisées depuis longtemps. Les exemples les plus connus de ces méthodes sont : la recherche Tabou et le Recuit Simulé. Ainsi, les algorithmes génétiques, l'optimisation par essaim de particules et les algorithmes de colonies de fourmis présentent les exemples les plus connus des méthodes qui travaillent avec une population (Hao, Galinier & Habib, 1999), (Belavendram N., 2010) et (Kamal & Rahman, 2015). Au cours des dernières décennies, des progrès importants ont été réalisés avec l'émergence d'une nouvelle génération d'approches puissantes et générales, souvent appelées métaheuristiques (Reeves CR., 1993) et (Aarts & Lenstra, 1997). Plusieurs approches ont été développées pour résoudre le problème de la planification et du maintien de la production conjointe. De plus, certaines propositions et propriétés mathématiques ont été suggérées et appliquées dans l'heuristique proposée pour résoudre ce problème intégré basé sur la relaxation lagrangienne des contraintes de capacité et l'optimisation du sous-gradient (Alaoui-Selsouli, Mohafid & Najid, 2012). De plus, des heuristiques basées sur des algorithmes génétiques ont été utilisées pour résoudre un modèle d'optimisation intégré pour l'ordonnancement de la production et la planification de la maintenance préventive (Cassady & Kutanoğlu, 2005). L'optimisation de la maintenance intégrée est développée comme une discipline mathématique de la recherche opérationnelle. Ainsi, le choix de la méthode d'optimisation a un impact sur la prise de décision concernant la stratégie adoptée.

### 1.9.2.1 Les méthodes exactes

Les méthodes exactes permettent de trouver une solution optimale pour un problème de taille finie dans un temps limité. Elles sont capables de trouver l'optimum et de prouver son optimalité (Puchinger & Raidl, 2005). L'inconvénient des méthodes exactes est le temps de calcul de l'optimalité risque d'augmenter exponentiellement en fonction de la taille de problème. Nous présentons quelques méthodes exactes les plus utilisées dans la littérature :

- **Branch and Bound**

La méthode d'évaluation et de séparation est connu en anglais par le nom "Branch and Bound" (Land & Doig, 1960). Elle permet généralement de résoudre d'une manière exacte les problèmes à caractère combinatoire de petite taille. En principe, la méthode est basée sur l'évaluation, la séparation et la stratégie de parcours. Le principe de la méthode est le branchement qui consiste à la décomposition en sous-solutions, les évaluer et conserver la meilleure.

- **Branch and Cut**

La méthode "Branch and Cut" représente un algorithme exact permettant de résoudre efficacement les problèmes de programmation en nombre entiers avec une garantie d'optimalité. De même, bien que l'algorithme du "Branch and Bound", la méthode "Branch and Cut" utilise aussi le principe de séparation et d'évaluation. Elle combine entre deux méthodes "Branch and Bound" et celle des plans de coupes.

- **Simplexe**

L'algorithme du simplexe est proposé par George Dantzig en 1947 (Nash JC., 2000). En effet, l'algorithme représente une méthode de résolution générale des programmes linéaires. La solution optimale est approchée par étapes ou itérations successives. Chaque étape correspond au calcul de la valeur économique d'une solution. Étant donné qu'il existe un nombre infini de solutions admissibles, la méthode préconise de n'explorer qu'un nombre limité de solutions parmi lesquelles se trouve la meilleure solution.

- **Programmation dynamique**

La programmation dynamique est l'une des plus anciennes techniques pour produire des algorithmes exacts plus efficaces proposée par (Bellman R., 1957). Le principe de la méthode est de résoudre les plus petits sous-problèmes, ainsi que de conserver les valeurs de ces sous-problèmes dans une table de programmation dynamique. Ensuite, ces valeurs sont utilisées pour calculer la valeur de sous-problèmes de plus en plus grands, jusqu'à obtenir la solution de notre problème global.

### 1.9.2.2 Les méthodes approchées

Les méthodes approchées (figure 1.14) assurent la possibilité de fournir une solution réalisable dans un temps raisonnable mais sans aucune garantie d'optimalité. En effet, elles peuvent être utilisées pour toutes classes de problème (facile ou difficile, avec ou sans contraintes). L'objectif est de résoudre les problèmes d'optimisation combinatoire de grande taille, peuvent être généralement des problèmes NP difficiles. En effet, les heuristiques sont basées sur la programmation mathématique permettant d'obtenir rapidement une solution approchée. Lorsque le problème est considéré difficile, c'est-à-dire, qu'il nécessite un temps élevé ou une grande mémoire de stockage. Partant de ce fait, les métaheuristiques sont des algorithmes stochastiques utilisés pour résoudre ce type de problèmes. Ces méthodes sont inspirées par des phénomènes réels de la physique, biologique ou encore éthologie. Leur particularité réside dans le fait qu'elles sont adaptables à un grand nombre de problèmes sans changements majeurs dans leurs algorithmes. Leur inconvénient majeur tient du fait que l'optimalité de la solution retenue n'est pas garantie. Nous distinguons ainsi les méta-heuristiques qui fonctionnent avec une population de solutions et celles qui ne visent qu'une seule solution. Nous présentons dans ce qui suit, quelques méthodes approchées :

- **Algorithmes génétiques**

Les algorithmes génétiques (AGs) font partie des algorithmes évolutifs (Holland J., 1975). Ils sont adaptés à la recherche d'une solution dans un espace caractérisé par un grand nombre de dimensions. Le principe est fondé sur la simulation des mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Les étapes des algorithmes génétiques sont :

- Le codage des données ;
- Croisement ;
- Mutation.

- **Recherche taboue**

La recherche Tabou est une méthode d'optimisation mathématique de la famille des techniques de recherche locale originalement présentée par Fred Glover en 1998 (Glover F., 1998). La méthode est utilisée spécifiquement pour résoudre les problèmes d'optimisation combinatoire, en garantissant un compromis entre la qualité de la solution et le temps de calcul. Le principe est d'ajouter au processus de recherche une mémoire flexible permettant d'éviter le risque de retour à une configuration déjà visitée, en tenant à jour une liste des mouvements interdit appelée liste taboue.

- **Recuit simulé**

Le recuit simulé est inspiré du processus de recuit physique en métallurgie. Le processus consiste un à chauffer un solide dans un premier temps pour avoir de l'énergie, ensuite baisser lentement la température, en conduisant le système à la cristallisation. La méthode du recuit simulé a été

développée par Kirkpatrick (Kirkpatrick, Gelatt & Vecchi, 1983). La méthode est facile à implémenter ainsi qu'elle est applicable dans plusieurs domaines.

- **Optimisation par essaim de particules**

La méthode essaim particule est une technique de calcul évolutive introduite par Kennedy et Eberhart (Kennedy & Eberhart, 1995). La méthode est inspirée du comportement social du flocage des oiseaux. La méthode consiste à utiliser un nombre d'individus (particules) qui volent dans l'espace de recherche pour trouver la meilleure solution. Chaque particule est caractérisée par sa position et sa vitesse. Les particules se déplacent au cours du temps. Ils possèdent une mémoire permettant de stocker la meilleure position de leur vie (notée pbest) ainsi que la meilleure des particules (notée gbest).

- **Pattern Search**

La méthode " Pattern Search " est une méthode heuristique qui a été proposée par (Hooke & Jeeves, 1961). La méthode est connue aussi sous le nom recherche directe, recherche sans dérivation ou optimisation de la boîte noire. Elle appartient à la famille des méthodes d'optimisation numérique. Celle-ci nécessite que la capacité de retourner la valeur de  $f(x)$  pour un point d'entrée  $x$ . La méthode comporte deux catégories de mouvements. La première consiste à une recherche locale permettant de chercher une meilleure direction pour se déplacer (Exploratory search). Dans certains sens, il s'agit d'une recherche grossière de la direction du gradient. Le second mouvement (Pattern move) représente une recherche plus large dans la direction d'amélioration. L'optimisation tente de trouver la meilleure correspondance dans une analyse de capacité multidimensionnelle (Mathworks). Pour plus de détails, vous pouvez référer à (Crepinšek, Liu & Mernik, 2012) et (Zhu Weihang, & Curry James, 2009).

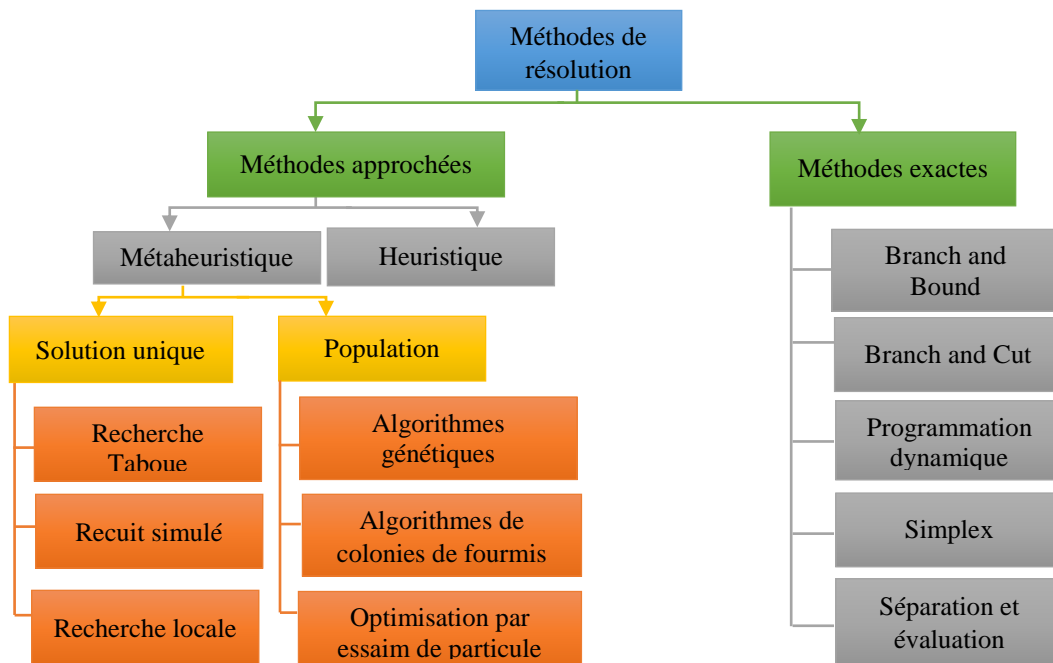


Figure 1.14 : Classification des méthodes de résolution

### 1.10 Analyse et discussion de la revue de littérature

Une recherche bibliographique efficace exige une méthodologie de recherche adéquate (figure 1.15). Notre but est de couvrir le sujet de la maintenance intégrée à la production faisant appel à la sous-traitance. En effet, nous avons opté pour une revue de la littérature basée sur une base de données contenant des articles, des communications de conférences et des thèses de doctorat. Pour se faire, nous avons adopté plusieurs bases de données : Taylor & Francis, Scopus, Thomson, Springer, Elsevier, Science Direct, IEEE Explore et Emerald Insight. Nous avons pris note que la recherche bibliographique a été initiée sur les descripteurs " Maintenance intégrée " et " Sous-traitance ". De plus, plusieurs combinaisons de ces descripteurs ont également été développées pour assurer des résultats corrects et pertinents.

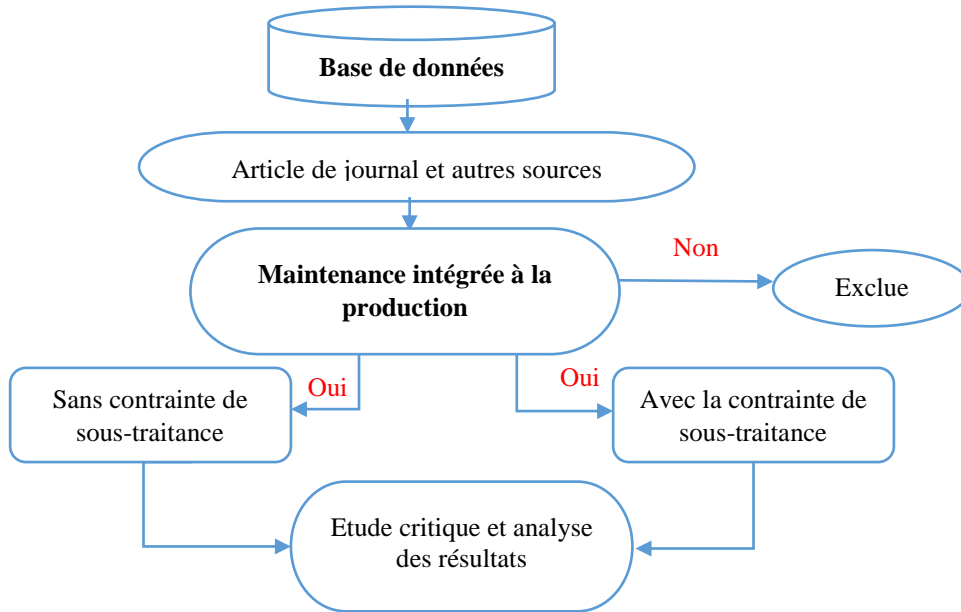


Figure 1.15 : Processus de recherche de documents

Le problème de la gestion conjointe des stratégies de production et de maintenance est récemment devenu un domaine fertile de recherche de plus en plus à mesure que le nombre de publications a augmenté ces dernières années. Nous avons trouvé dans la littérature 119 articles, traitant la gestion intégrée de la production et de la maintenance (figure 1.16).

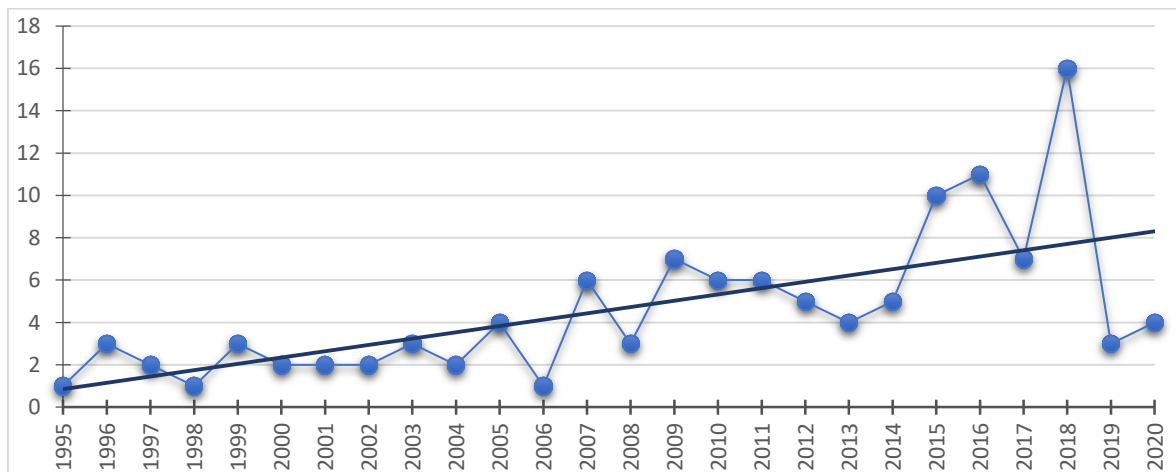
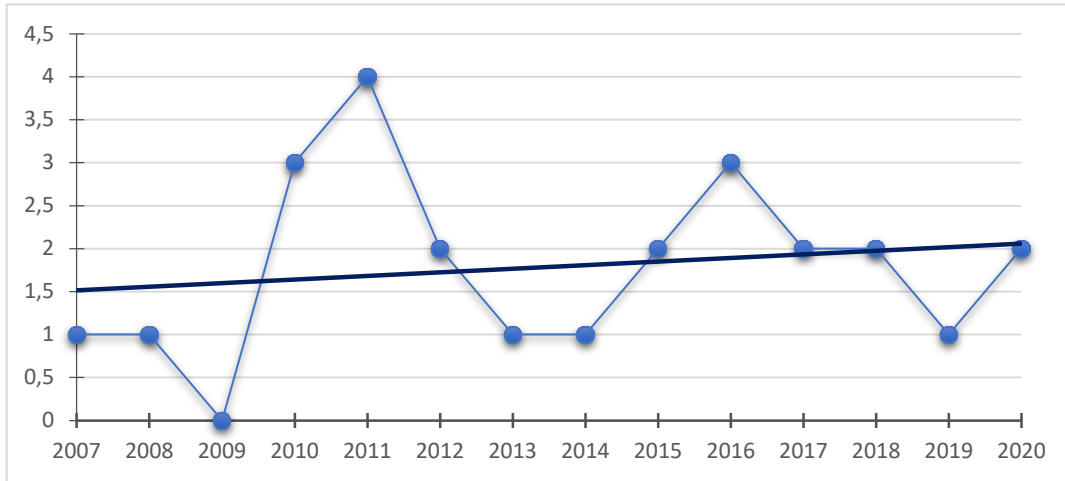


Figure 1.16 : Évolution des publications de la maintenance intégrée à la production

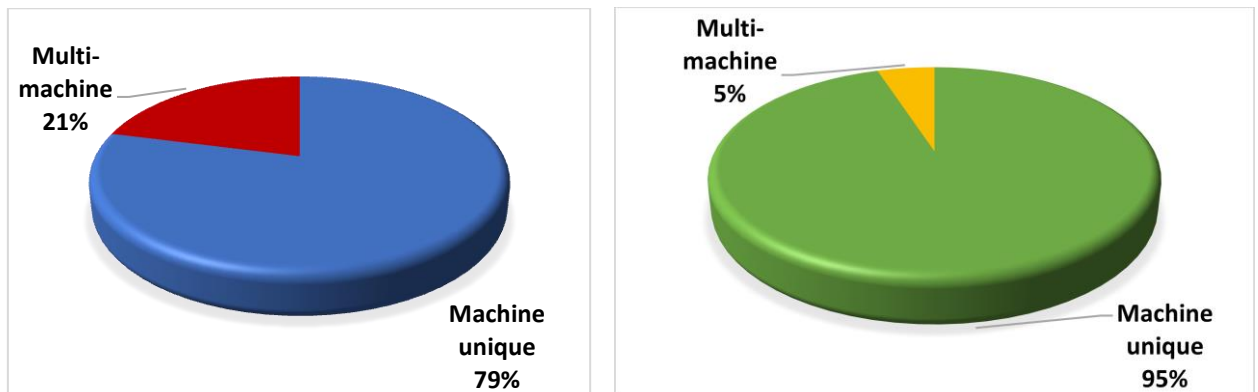


Au-delà, de la maintenance intégrée à la production, plusieurs études ont considéré la contrainte de sous-traitance de la production comme une solution favorable qui satisfait les exigences du client. Cette problématique est très récente dans la littérature, nous remarquons que le premier article est en 2007 de (Dellagi, Rezg & Xie, 2007). Ce problème a fait l'objet de 25 articles (figure 1.17).



**Figure 1.17** : Évolution des publications de la maintenance intégrée à la production sous contrainte de sous-traitance

Bien que la plupart des références ayant traité la gestion intégrée de la maintenance et de la production avec et sans contrainte de sous-traitance ont étudié le cas industriel simple (figure 1.18). C'est-à-dire un système de production composé d'une seule machine. En contrepartie, peu de références ont traité le cas complexe (multi-machine), vu que ce dernier impose plus de contraintes à considérer.



(a) Sans contrainte de sous-traitance      (b) Avec contrainte de sous-traitance

**Figure 1.18** : Types des systèmes de production avec et sans contrainte de sous-traitance

Rappelons que 20 références ont traité la gestion conjointe de la production et de la maintenance sous contrainte de sous-traitance. Le tableau 1.1 présente une synthèse des approches développées, en montrant la stratégie de production et celle de sous-traitance, le type de maintenance, la fonction objectif et finalement la méthode de résolution adoptée par chaque référence.

**Tableau 1.1** : Synthèse des travaux de la gestion conjointe de la production et de la maintenance sous contrainte de sous-traitance

<b>Auteurs</b>	<b>État de système</b>	<b>Stratégie de production</b>	<b>Stratégie de sous-traitance</b>	<b>Type de maintenance</b>	<b>Fonction objectif</b>	<b>Méthode de résolution</b>
(Dellagi, Rezg & Xie, 2007)	Une seule machine fabrique un seul produit	Juste à temps	Aider à satisfaire une demande constante	Politique type âge	Coût de maintenance et demande perdue	Analytique
(Dahane, Clementez & Rezg, 2008)	Une seule machine fabrique un seul produit	Fabriquer pour alimenter le stock	Satisfaire la demande client	MP type bloc kT	Coût de maintenance, de maintien de stock et de pénurie	Analytique
(Dellagi, Rezg & Gharbi, 2010)	Une seule machine fabrique un seul produit	Juste à temps	Plusieurs sous-traitants pour satisfaire la demande constante	Politique type âge	Coût de maintenance, production et demande perdue	Analytique
(Ayed, Dellagi & Rezg 2010)	Une seule machine fabrique un seul produit	Fabriquer sur stock	Répondre à une demande supérieure à la cadence maximale	MP type bloc kT	Production, maintenance, stockage et demande perdue	Analytique
(Dahane, Clementez & Rezg, 2010)	Une seule machine fabrique un seul produit	Fabriquer pour alimenter le stock	Aider à satisfaire le client	MP type bloc kT	Maintenance, stockage, pénurie	Analytique
(Ayed, Dellagi & Rezg, 2011)	Une seule machine fabrique un seul produit	Fabriquer pour construire le stock	Répondre à une demande supérieure	MP type bloc kT	Production, stockage, dégradation	Analytique
(Gharbi, Hajji & Dhouib, 2011)	Une seule machine fabrique un seul produit	Politique de point de couverture	Ajuster rapidement la capacité de production et ainsi répondre à la demande	–	Production, stockage, retard	Approche expérimentale
(Hajej, Dellagi & Rezg, 2011a et b)	Une seule machine fabrique un seul produit	Fabriquer pour construire le stock	Le sous-traitant recycle les produits non conformes	MP type bloc kT	Production, stockage, maintenance	Procédure numérique

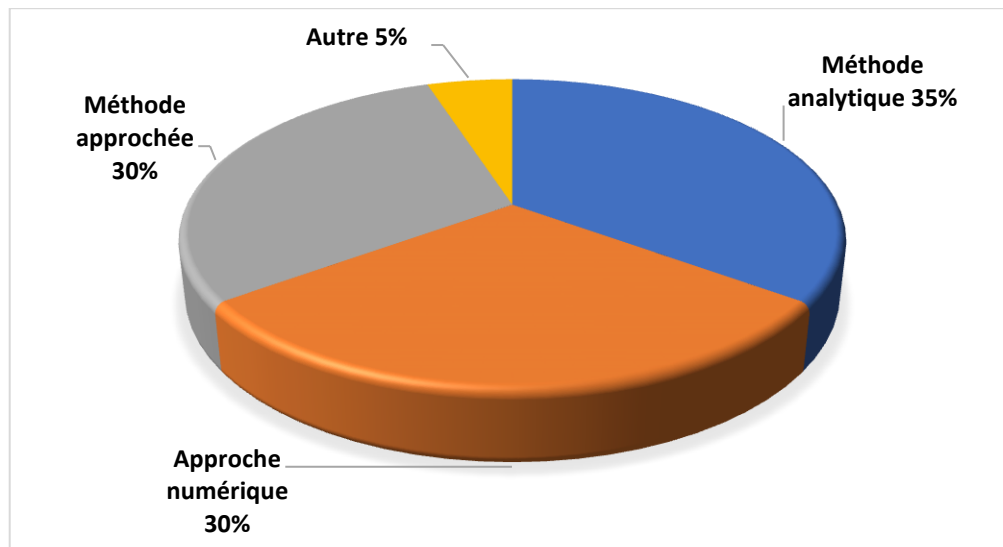
(Hajej, Dellagi & Rezg, 2012)	Une seule machine fabrique un seul produit	Produire sous un niveau de service	Le sous-traitant recycle les produits non conforme	MP type bloc kT	Production, sous-traitance, maintenance, holding	Analytique
(Ayed, Dellagi & Rezg 2012)	Une seule machine fabrique un seul produit	Produire sous un niveau de service	Compléter le manque de la demande	MP type bloc kT	Production, stock, dégradation	Procédure numérique
(Haoues, Dahane, Mouss & Rezg, 2013)	Une seule machine fabrique un seul produit	Taux de production variable durant des périodicités non homogènes	Compléter le manque de capacité de production	MP à la fin de chaque période de l'horizon	Maintenance, production, sous-traitance, pénurie, holding	Algorithme génétique
(Hajej, Rezg & Gharbi, 2014)	Une seule machine fabrique un seul produit	Production sur stock sous un niveau de service	Assurer le reste de la production	MP type bloc kT	Production, stockage	Méthode de Nelder Mead
(Assid, Gharbi & Dhoub, 2015)	Plusieurs installations fabriquent plusieurs produits	Produire sous un niveau de service	-Compenser la capacité de production & Commandes urgentes	-	Production, sous-traitance, stockage	Approche expérimentale
(Ayed, Turki & Hajej, 2015)	Une seule machine fabrique un seul produit	Satisfaire une demande aléatoire sous un niveau de service	Satisfaire la demande client	Tenir compte la dégradation	Production, sous-traitance, stockage, pénurie, dégradation	Analyse de Perturbation : PA

(Rivera, Gharbi & Kenné, 2016)	Une seule machine fabrique un seul produit	Fabriquer des produits conforme / non conformes à taux constant	En cas de retard la sous-traitance est utilisée pour compléter la capacité de production limitée	Politique type âge	Production, sous-traitance, stockage, réparation, retard, révision, défectueux	Approche numérique
(Ayed, Dellagi, Rezg, Turki, 2016)	Une seule machine fabrique un seul produit	Satisfaire une demande aléatoire sous un niveau de service	Satisfaire la demande client	MP type bloc kT	Stockage, production, dégradation	FPA et Nelder–Mead
(Haoues, Dahane, Mouss, 2016)	Une seule machine fabrique un seul produit	Satisfaire le demande avec taux de production variable	Capacité limitée et maximisation du profit total de l'entreprise	MP type bloc kT	Production, stockage, Sous-traitance, maintenance, pénurie	Algorithme génétique
(Hajej, Rezg, Gharbi, 2017)	Une seule machine fabrique un seul produit	Satisfaire une demande aléatoire sous un niveau de service	Minimiser le coût total	MP type bloc kT	Production, stockage, maintenance	Numerical algorithm for Constrained Global Optimization
(Rivera Gomez, Gharbi, Kenné, Montaña, Hernández 2018)	Une seule machine fabrique un seul produit	Satisfaire une demande constante des produits sans défauts	En cas d'un système de production de capacité limitée	Taux de MP	Production, sous-traitance, stockage, retard, maintenance	Numerical methods based on the Kushner approach

(Hafidi, El Barkany, Mahmoudi, 2018)	Une seule machine fabrique un seul produit	Satisfaire une demande constante	Capacité de production limitée	MP type bloc kT	Production, sous-traitance, maintenance, stockage, pénurie	Approche numérique : fmicon
(Hajej, Rezg & Bouslikhane, 2019)	Une seule machine	Demande stochastique sous niveau de service et contrainte d'émission de carbone	Aider l'unité de fabrication ou de réusinage afin de réduire la quantité totale de carbone émise	MP type bloc kT	Production, stockage, pénalité de carbone, maintenance	Procédure numérique
(Hafidi, El Barkany, El Mhamdi, Mahmoudi, 2020)	Machines parallèles fabriquent un seul produit	Satisfaire une demande aléatoire sous un niveau de service	La demande est supérieure à la capacité maximale de l'ensemble des machines	MP type bloc kT	Production, stockage, retard, sous-traitance, maintenance	Algorithmes génétiques, Pattern Search, fmincon
(Hafidi, El Barkany, El Mhamdi, Mahmoudi, 2020)	Une seule machine fabrique plusieurs produits	Problème de dimensionnement de lot : CPLS & satisfaire une demande variable au cours du temps via le stock	Capacité limitée & minimisation du coût total & Qualité des produits fabriqués	MP type bloc kT	Production, qualité, maintenance, sous-traitance.	Algorithmes génétiques

La figure 1.19 indique le pourcentage de publications par type de méthodes de résolution adopté. Nous remarquons que 35% des références ont utilisé des méthodes analytiques (exactes) pour résoudre leurs problèmes. Ainsi que 30% ont adopté des approches numériques et 30% ont utilisé des méthodes approchées. Les 5% de publications restantes représentaient des autres types de méthodes d'optimisation telle qu'une approche expérimentale.

En effet, parfois l'obtention d'une solution exacte pour un problème aussi difficile dans un délai raisonnable est difficilement réalisable. D'où la nécessité d'utiliser une approche heuristique ou méta-heuristique pour résoudre des modèles d'optimisation conjoints pour des problèmes de taille réelle. En général, les méthodes d'optimisation utilisées comprennent les méthodes analytiques, les approches numériques et les méthodes approchées.



**Figure 1.19** : Pourcentage de publications par types de méthodes de résolution adoptées

## 1.11 Objectif général et problématique de la thèse

### 1.11.1 Motivations de l'étude

Il existe plusieurs motivations qui nous font traiter le problème de gestion conjointe des stratégies de production et de maintenance en adoptant l'option de sous-traitance. Dans ce qui suit nous mentionnons les motivations les plus intéressantes :

Pendant des décennies, le souci majeur des producteurs de l'industrie manufacturier est l'amélioration des systèmes de production afin de rester compétitive. En effet, la fluctuation de la demande et l'exigence du marché incite l'entreprise à fabriquer à pleine cadence. Cependant, l'utilisation des équipements de production entraîne leur dégradation avec le temps et l'usage ce qui provoque l'augmentation de la fréquence des pannes. Par conséquence, on aura l'arrêt de la chaîne de production, d'où le retard de livraison ou bien la perte de la demande. A ce niveau, la coopération entre les différents services est extrêmement importante. Autrement dit, l'intégration entre les stratégies de production et de maintenance est nécessaire pour réaliser l'activité de production sans détruire les équipements de fabrication. La bonne gestion de la production est toujours accompagnée aux activités de maintenance, dont l'objectif est d'assurer la fiabilité et la disponibilité des équipements de fabrication, ainsi que d'augmenter la productivité.

En effet, dans l'environnement industriel l'entreprise est en face à des situations où il est nécessaire et obligatoire de faire appel à la sous- traitance à savoir le manque de capacité de l'entreprise DO, la réduction du coût et la qualité des produits. Dans de telles conditions, les gestionnaires n'ont pas d'autre choix que d'opter pour la sous-traitance pour satisfaire le besoin d'une clientèle souvent exigeante en termes de qualité, coût et délai.

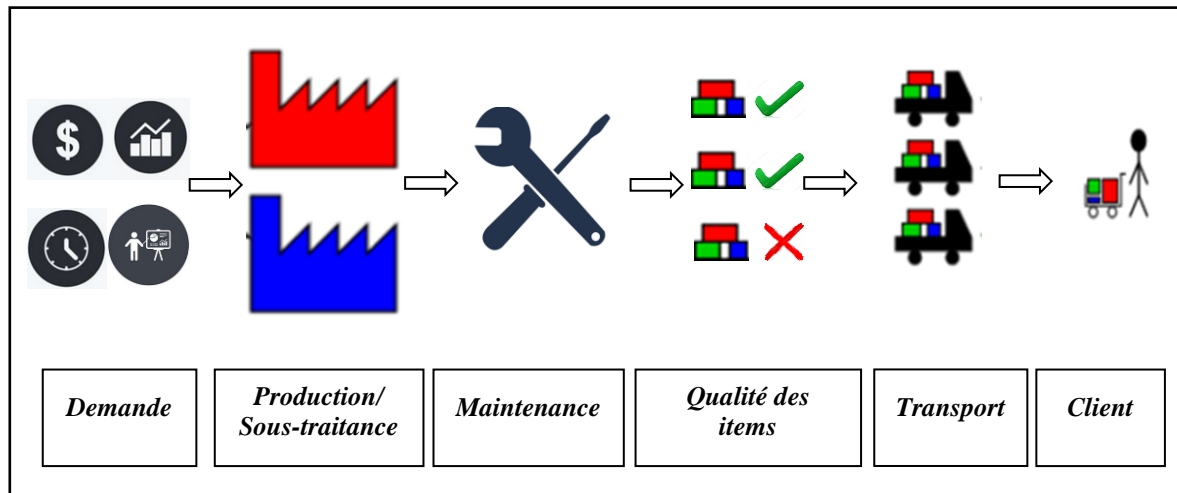
En réalité, les systèmes manufacturiers ne peuvent pas toujours fabriquer des produits de bonne qualité. En effet, parmi les problèmes des systèmes de production est le manque de la qualité des produits fabriqués. Cependant, la non-conformité des unités de production est due généralement à la dégradation des outils de production. Par conséquent, il est essentiel mettre en évidence l'amélioration de la qualité afin de maintenir et d'élargir le bénéfice de l'entreprise.

Sur la base de ces constatations, notre recherche nous mènera à trouver un compromis entre la gestion de la maintenance et la gestion de la production d'une part. D'autre part, faire un choix optimal de sous-traitance, en garantissant d'abord la stabilité interne de l'entreprise et l'évolution de ses profits. Ensuite, intégrer la notion de qualité des produits fabriqués à cause de la dégradation des équipements de fabrication, de manière à trouver un équilibre entre la production interne, la qualité, la maintenance et la sous-traitance.

### 1.11.2 Problématique

L'objectif majeur de l'entreprise manufacturière est d'augmenter la productivité, en vue de satisfaire les besoins du client. Pour acquérir de nouveaux marchés, l'entreprise utilise la sous-traitance, ce qui implique de confier une partie de sa production aux prestataires externes. Afin de garantir une situation gagnant-gagnant entre le donneur d'ordres et le sous-traitant, l'entreprise adopte des nouvelles stratégies pour gérer la production et la maintenance de façon conjointe. La problématique de la gestion conjointe de la maintenance et de la production en adoptant la sous-traitance se catonne sur plusieurs niveaux, tels que (figure 1.20) :

- La principale préoccupation de l'entreprise est le choix du sous-traitant le plus optimal. Ce choix est basé sur plusieurs conditions, à savoir le coût de sous-traitance, ainsi que la disponibilité des équipements du sous-traitant.
- Dans le cas où les deux entreprises ne sont pas généralement situées dans la même zone géographique, il s'agit de délocalisation. Par conséquent, la gestion de la maintenance des équipements de production du sous-traitant ainsi que son environnement de production restent ambigus.
- L'inefficacité et l'indisponibilité des équipements du sous-traitant entraîneront des coûts de non-conformité des produits fabriqués.
- La détermination du taux de production de l'entreprise DO ainsi que le taux de sous-traitance durant chaque instant afin de répondre au besoin client doivent être maîtrisés.
- En réalité, le système de production du DO fabrique des produits conformes et d'autres non conformes, d'où la nécessité de déployer une stratégie efficace de contrôle qualité.
- Afin de garder une bonne image, l'entreprise sous-traitante doit fabriquer des produits de qualité.
- La sous-traitance engendre des coûts de transport qui doivent être maîtriser afin de minimiser le coût de sous-traitance.



**Figure 1.20** : Les dimensions de la problématique de la thèse

En conséquence, les objectifs tracés dans le cadre de cette thèse sont :

- Déterminer d'une manière simultanée la planification optimale de la stratégie de maintenance et la stratégie de production du donneur d'ordres.
- Déterminer la stratégie de qualité appropriée pour un système de production imparfait.
- Traiter le cas complexe de l'industrie manufacturière : multi-produits et multi-machine.
- Faire un choix optimal entre plusieurs sous-traitants selon différents critères à savoir : la capacité maximale de production du sous-traitant, le coût unitaire du sous-traitant, la distance avec le sous-traitant.
- Trouver la solution la plus économique en utilisant différentes méthodes d'optimisation.

## 1.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit les principes de base de la production, de la maintenance et de la sous-traitance. Dans la première partie, nous avons présenté les systèmes de production, en mettant particulièrement l'accent sur leurs classifications ainsi que leurs modes de dégradation. Ensuite, nous avons mis en avant la fonction maintenance, ses types, ses stratégies et ses modèles. De plus, nous avons introduit le concept de la sous-traitance en présentant ses motivations, ses formes, ses stratégies, ses avantages et ses limites. La seconde partie de ce chapitre est consacrée aux approches de gestion de la production et de la maintenance. De ce fait, nous avons présenté l'approche traditionnelle, qui consiste à la gestion séparée de la production et de la maintenance. Ainsi, une revue détaillée sur la planification intégrée de la production et de la maintenance a été établie. Par ailleurs, nous avons mis l'accent sur la nécessité de gestion de la production et de la maintenance. Cependant, dans la réalité les systèmes de production ne fabriquent pas seulement des produits conformes. C'est pour cette raison que la troisième partie a été consacrée aux travaux existants dans la littérature qui intègre la notion de la qualité. De plus, nous avons brièvement présenté un aperçu sur la modélisation mathématique et les problèmes d'optimisation des systèmes de production, en exposant les méthodes de résolutions existantes dans la littérature (exactes et approchées).



Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons envisagé une analyse de la revue de littérature déjà élaborée, ainsi, nous avons discuté les résultats obtenus de cette analyse. Ensuite, nous avons tracé les objectifs de notre thèse, en montrant les motivations de notre étude ainsi que la problématique générale de notre travail.

Enfin, nous proposons dans le chapitre suivant une étude analytique de l'existant, visant à dégager des pistes pour la formulation des besoins dans le cadre d'une nouvelle approche. Nous proposerons une nouvelle formulation mathématique qui intègre la production et la maintenance sous la contrainte de sous-traitance. L'objectif principal est de proposer un plan de production économique et une stratégie de maintenance optimale tout en faisant un choix optimal de stratégie de sous-traitance.

---

# Chapitre 2

---

## **Modèle de la planification conjointe de la production et de la maintenance dans le cadre de la sous-traitance**

## Chapitre 2

# Modèle de la planification conjointe de la production et de la maintenance dans le cadre de la sous-traitance

---

### 2.1 Introduction

Dans un environnement changeant, une stratégie industrielle moderne devient une nécessité pour la croissance des entreprises. Cette stratégie consiste à donner plus d'intérêt au service de maintenance. Toutefois, la fonction de maintenance est généralement considérée par la direction comme une fonction qui génère des coûts supplémentaires pour l'entreprise. Cependant, une bonne gestion du service de maintenance assure un gain pour l'entreprise, en minimisant la durée et la fréquence d'apparition des pannes. Ce qui permet à l'entreprise d'améliorer sa compétitivité en assurant la livraison de produits de bonne qualité à moindre coût. Il faut souligner que les deux fonctions de production et de maintenance sont étroitement liées. De ce fait, la gestion intégrée de la maintenance et de la production est une solution nécessaire pour le bon fonctionnement des moyens de production.

Plusieurs études de recherche ont été menées sur l'intégration des stratégies de production et de maintenance. À cet égard, il existe des modèles qui ont pour objectif de déterminer simultanément deux paramètres essentiels, à savoir la taille des stocks et la période de maintenance préventive. Dans le même contexte, (Chelbi & Ait-Kadi, 2003) ont développé un modèle de quatre scénarios permettant de déterminer les niveaux de stock et d'action de maintenance préventive. Dans le même ordre d'idées, (Gharbi, Kenné & Beit, 2007) ont optimisé les paramètres de la gestion intégrée tels que le stock de sécurité  $S$  et l'âge de la maintenance préventive  $T$ , en minimisant le coût total. Ensuite, (Rezg, Xie & Mati, 2004) ont proposé un modèle intégré de maintenance préventive et de contrôle des stocks pour une ligne de production composée de  $n$  machines. Ils ont étudié le cas d'une seule machine, tout en adoptant trois stratégies de maintenance : la première utilise la politique de maintenance préventive uniquement, la deuxième stratégie traite la politique de contrôle des stocks et la troisième prend en compte l'optimisation conjointe de la maintenance et du contrôle des stocks. La dernière stratégie consiste de déterminer le niveau de stock et la période de maintenance préventive.

Récemment, certains chercheurs sont intéressés de plus en plus aux stratégies de sous-traitance dans le cadre de la maintenance intégrée à la production. (Hajej, Rezg & Gharbi, 2017) ont élaboré deux stratégies de maintenance notamment la stratégie de maintenance simple et la stratégie de maintenance améliorée pour augmenter la disponibilité de la machine principale et réduire le coût de la maintenance. Leur objectif est de déterminer les plans de production interne ainsi que les plans de sous-traitance d'une part. D'autre part, leur travail a permis de déterminer le moment des actions de maintenance préventive, sur la base de l'historique et le plan de production de la machine du contractant, ainsi que l'état de la machine sous-traitante. De plus, (Rivera-gómez, Gharbi, Kenné, Montaña-arango & Hernández-Gress, 2018) ont utilisé une approche basée sur la simulation incluant des techniques d'analyse statistique ainsi que l'optimisation pour résoudre le modèle du contrôle optimal stochastique. L'objectif de leur modèle est de déterminer les politiques

du contrôle en indiquant le taux de production et de maintenance préventive ainsi que le taux de sous-traitance et en minimisant le coût total.

Dans le chapitre précédent, nous avons élaboré une étude bibliographique détaillée et approfondie qui cerne l'ensemble des problèmes de la gestion conjointe de la production et de la maintenance. Ensuite, nous avons mis en valeur les différentes spécifications du concept de la sous-traitance industrielle. Nous avons également clarifié les causes expliquant la problématique soulevée dans notre sujet. En effet, l'étude bibliographique est le premier portail de la recherche scientifique. Cette étude représente un élément de base pour nos futurs travaux, en faveur d'élaboration des modèles originaux dans le cadre de notre recherche. Par conséquent, ce chapitre est structuré en deux volets intrinsèques, tels que :

- Le premier volet est consacré à l'analyse des modèles existants pour tirer les lignes directrices visant à formuler les besoins sous une nouvelle approche. L'objectif essentiel est de comprendre l'intérêt de l'approche de la gestion conjointe de la production et de la maintenance sous contrainte de sous-traitance. Ce qui permet d'explorer et d'améliorer les résultats par la suite dans la prochaine section.
- Dans le deuxième volet, l'analyse de l'existant nous amène à élaborer un modèle qui tient en compte les modifications nécessaires par rapport aux travaux antérieurs. Dans ce contexte, nous développerons une approche qui consiste à une stratégie de choix de sous-traitance dans le cadre de la maintenance intégrée à la production, prenant en compte les améliorations appropriées.

## **2.2 Capacité de production et besoin de la sous-traitance**

L'amélioration des indicateurs de performance contribue au développement des stratégies de gestion de l'industrie manufacturière. Parmi ces indicateurs, nous invoquons la capacité maximale de production ou bien le volume maximal de production. Ce qui correspond au nombre maximal de produits manufacturiers que peut générer une entité de production. Néanmoins, la capacité de production est souvent exigée par les grands contractants lors des appels d'offres pour évaluer la résilience de l'entreprise à répondre aux besoins en cas de hausse de la demande.

En effet, l'intensification de la concurrence incite les entreprises à satisfaire le client même dans le cas de croissance de la demande. Pour ce faire, il faut trouver l'ensemble des stratégies qui permettent à l'entreprise de satisfaire la clientèle. La sous-traitance est parmi ces stratégies, elle est généralement justifiée par la capacité limitée du contractant. A cet égard, l'externalisation permet de livrer au temps prévu en préservant ainsi la bonne image de l'entreprise mère et d'élargir le marché. En revanche, la décision du choix du sous-traitant le plus convenable repose sur plusieurs critères. Certaines études suggèrent que l'implication de la sous-traitance peut réduire le temps du développement, augmenter la qualité des nouveaux produits et diminuer les coûts de production (Suhong, Bhanu, Ragu-Nathan, Subba Rao, 2006), (Ferrie, Finn, Arjan & Geert, 2008), (Lau, Tang & Yam, 2010).

Toutefois, le sous-traitant diffère du fournisseur dans la mesure où le fournisseur est entièrement responsable des produits ou des services qu'il fournit à ses clients. Par exemple, si un produit est défectueux, c'est la responsabilité du fournisseur qui est engagée. En ayant recours à la sous-traitance, le donneur d'ordres est responsable de ses sous-traitants aux yeux de ces clients. En d'autres termes, le donneur d'ordres est le responsable du " premier rang". Ainsi, il doit contrôler que le sous-traitant répond aux besoins tracés par le contractant. Cependant, la décision du choix du

sous-traitant/fournisseur est une décision multicritère. Bien que ce soit une décision stratégique qui a un impact crucial sur la performance globale de toute l'entreprise. En effet, plusieurs critères sont en question, afin que le donneur d'ordres réalise un choix optimal du sous-traitant tels que (Vonderembse, Tracey, Tan, Bardí, 1995) :

- Coût ;
- Délai de livraison ;
- Niveau de qualité ;
- Disponibilité des équipements ;
- Localisation géographique du sous-traitant ;
- Performance du produit ;
- etc.

En outre, les critères les plus discutés dans la littérature sont : le coût, le délai de livraison et la qualité (Aguzzoul & Ladet, 2006).

### 2.3 Etude de l'analyse de l'existant

L'analyse de l'existant représente une phase essentielle dans la recherche scientifique, ce qui permet d'orienter les recherches ultérieures. Dans cet esprit, nous explorons l'approche développée par (Ayed, S., 2011). Cette approche consiste à mettre en œuvre deux stratégies de choix de sous-traitance dans le cadre de la gestion de la maintenance intégrée à la production en utilisant le solveur Matlab. L'auteur a modélisé les choix de sous-traitance dans le cadre de la maintenance intégrée à la production. Dans un premier temps, il a considéré un système de production composé d'une seule machine fabriquant un seul type de produit. La demande client est considérée constante et supérieure à la capacité maximale de production du contractant. D'où le recours à la sous-traitance pour satisfaire la demande du client. L'auteur a traité deux stratégies de choix de sous-traitance. La première consiste choisir un seul sous-traitant optimal parmi deux. La deuxième stratégie permet de commuter entre les sous-traitants en déterminant la date de commutation entre eux.

#### 2.3.1 Stratégie de choix du sous-traitant unique

Nous étudions la stratégie de choix d'un seul sous-traitant parmi deux. Notons que chaque sous-traitant est caractérisé par une capacité maximale de production, un coût unitaire de sous-traitance et une disponibilité stationnaire (figure 2.1).

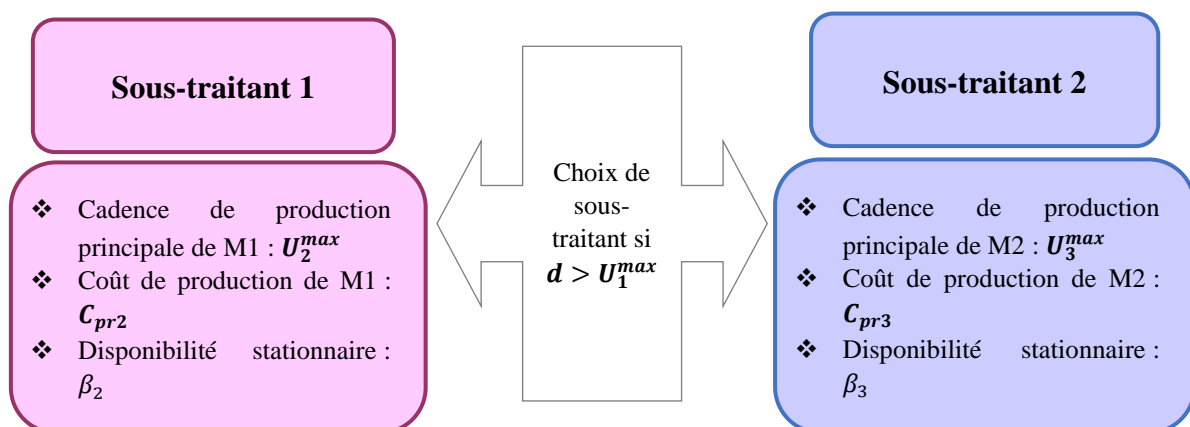


Figure 2.1 : Les caractéristiques des deux sous-traitants

Le modèle de (Ayed S., 2011) consiste à minimiser la somme des coûts de production, de sous-traitance et de maintenance présentés par l'équation (2.1).

$$C_{total} = C_{pr1}E(w)U1_{max} + C_{prs}E(w)\beta_s(d - U1_{max}) + C_{prs}E(D)\beta_sUs_{max} + Cl(E(D)(d - \beta_sUs_{max}) + E(w)(1 - \beta_s)(d - U1_{max}) + \frac{CmcF(m) + CmpR(m)}{\int R(m) + F(m)uc + R(m)up} \quad (2.1)$$

Avec :

- F : Fonction de défaillance de la machine du donneur d'ordres ;
- R : Fonction de fiabilité de la machine du donneur d'ordres ;
- m : Âge de la maintenance préventive pour la machine du donneur d'ordres ;
- $\mu p$  : Durée moyenne d'action de maintenance préventive pour la machine du donneur d'ordres ;
- $\mu c$  : Durée moyenne d'action de maintenance corrective pour la machine du donneur d'ordres ;
- E(W) : Durée moyenne de bon fonctionnement de la machine du donneur d'ordres ;
- E(D) : Durée moyenne des actions de maintenance de la machine du donneur d'ordres ;
- d : la demande par unité de temps ;
- $U1_{max}$  : Cadence de production maximale de la machine du donneur d'ordres ;
- $Us_{max}$  : Cadence de production maximale de la machine sous-traitante ;
- Cmc : Coût unitaire d'action de maintenance corrective pour la machine du donneur d'ordres ;
- Cmp : Coût unitaire d'action de maintenance préventive pour la machine du donneur d'ordres ;
- Cpr1 : Coût unitaire de production de la machine du donneur d'ordres ;
- Cprs : Coût unitaire de production de la machine sous-traitante ;
- Cl : Coût unitaire de demandes perdues.

La résolution du problème revient à définir le sous-traitant le plus économique. Nous avons vérifié les résultats analytiques, ce qui a consisté à comparer le coût total des deux sous-traitants, en vue de choisir le sous-traitant le plus économique. Pour ce faire, nous calculons la différence du coût du premier et du second sous-traitant. Le choix optimal d'un sous-traitant dépend du coût unitaire des demandes perdues. En effet, nous avons confirmé l'existence d'un coût unitaire de décision des demandes perdues  $Cl_{decision}$  qui égal à 47,8 unité monétaire (um), liant entre les paramètres caractérisant chaque sous-traitant.

$$Cl_{decision} = \frac{C_{pr3}\beta_3 - C_{pr2}\beta_2}{\beta_3 - \beta_2} \quad (2.2)$$

Pour affirmer le résultat obtenu précédemment, nous avons tracé les coûts totaux pour chaque sous-traitant (figure 2.2). Par conséquent, nous avons constaté que l'intersection de ces deux coûts est exactement le coût unitaire de décision des demandes perdues.

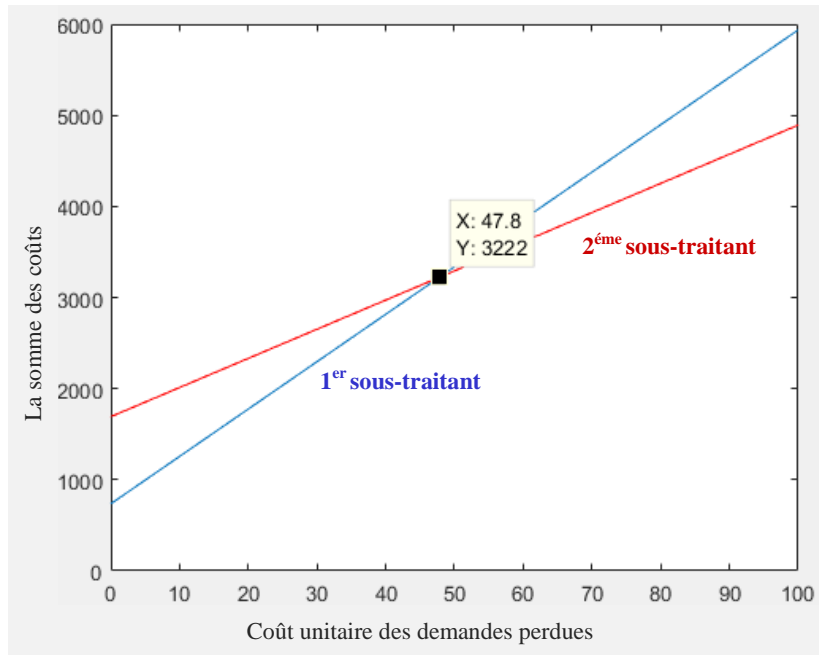


Figure 2.2 : Courbe du choix optimal du sous-traitant unique

L'interprétation des coûts totaux des deux sous-traitants revient à comparer seulement la somme du coût de production et des demandes perdues, puisque le coût de la maintenance ainsi que le cycle de production sont les mêmes. Il apparaît clairement dans le premier intervalle de temps que le coût qui engendre le deuxième sous-traitant est supérieur au premier, ce qui favorise le choix du premier sous-traitant et inversement dans le deuxième intervalle.

### 2.3.2 Stratégie de commutation entre les sous-traitants

L'objectif de la stratégie de commutation entre les sous-traitants est de bénéficier au mieux des caractéristiques des sous-traitants telles que : la disponibilité stationnaire, le coût unitaire de sous-traitance et la capacité de production du sous-traitant. Pour y parvenir, nous exploitons l'optimisation séquentielle qui consiste à déterminer la date optimale de commutation vers le deuxième sous-traitant  $x^*$  ainsi que la période de maintenance préventive  $T^*$ , comme illustré par la figure 2.3.

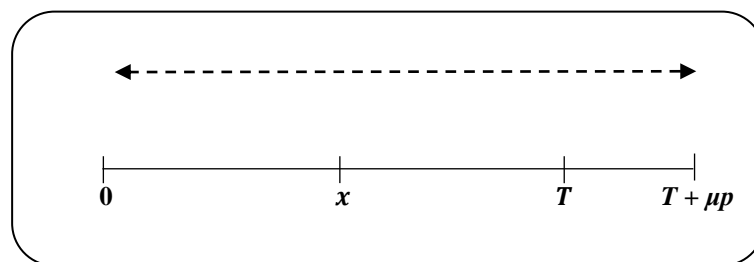


Figure 2.3 : Distribution de cycle de production

#### 2.3.2.1 Détermination de la période de maintenance préventive

Il faut cependant garder à l'esprit que la maintenance préventive est nécessaire pour le bon fonctionnement des systèmes de production. De ce fait, il est indispensable de déterminer la

période pour effectuer l'action de maintenance préventive. Cela peut se faire en dérivant le coût de maintenance par rapport à la période de maintenance préventive présenté comme suit :

$$\left. \frac{dCT_m}{dT} \right)_{T=T^*} = 0 \quad (2.3)$$

Signalons que le coût de maintenance de chaque cycle de production est la somme du coût de maintenance préventive et le coût de maintenance corrective divisé par la durée de cycle de production exprimé par la formule suivante :

$$CT_m = \frac{C_{mp} + N(T)C_{mc}}{T + u_p} \quad (2.4)$$

Par conséquent, la figure 2.4 indique la période de maintenance préventive obtenue ainsi que le coût de maintenance. Nous calculons l'écart entre les résultats que nous avons trouvé et ceux de (Ayed S., 2011) (tableau 2.1).

**Tableau 2.1 :** Coût de maintenance préventive optimal et la période de maintenance préventive

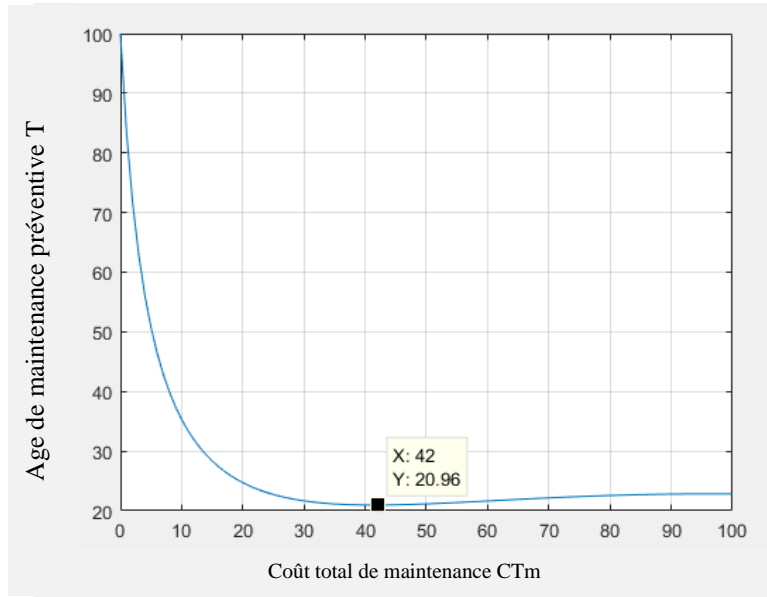
<b>Paramètres</b>	<b>Approches</b>	<b>(Hafidi et al., 2018)</b>	<b>(Ayed S., 2011)</b>	<b>Marge de différence</b>
<b>La période de MP <math>T^*</math></b>		42ut	42ut	0%
<b>Coût de maintenance optimal <math>CT_m</math></b>		20,96um	19,44um	7,8%

Cela, peut se faire à l'aide des formules suivantes :

$$Z_1 = \frac{CT_m(\text{Hafidi et al.}, 2018) - CT_m(\text{Ayed S.}, 2011)}{CT_m(\text{yed S.}, 2011)} \quad (2.5)$$

$$Z_2 = \frac{T^*(\text{Hafidi et al.}, 2018) - T^*(\text{Ayed S.}, 2011)}{T^*(\text{yed S.}, 2011)} \quad (2.6)$$





**Figure 2.4 :** Coût de maintenance en fonction de la période de maintenance préventive selon notre méthode de résolution

### 2.3.2.2 Détermination de la date de commutation entre les sous-traitants

La décision de contracter avec plusieurs sous-traitants nécessite la mise en avant de la date de commutation du premier sous-traitant vers le second. Nous signalons que le coût total représente la somme des coûts de production, de maintenance et des demandes perdues. Ainsi, pour définir la date optimale de commutation entre les sous-traitants  $x^*$ , il faut remplacer la période de maintenance préventive par sa valeur optimale, puis de dériver le coût total par rapport à la date de commutation  $x$  (équation 2.7).

$$\left. \frac{dCT}{dx} \right)_{x=x^*} = 0 \quad (2.7)$$

La figure 2.5 indique que le coût total en fonction de la date de commutation. La courbe admet un minimum représentant la date de commutation optimale  $x$  qui entraîne un coût total minimal CT.

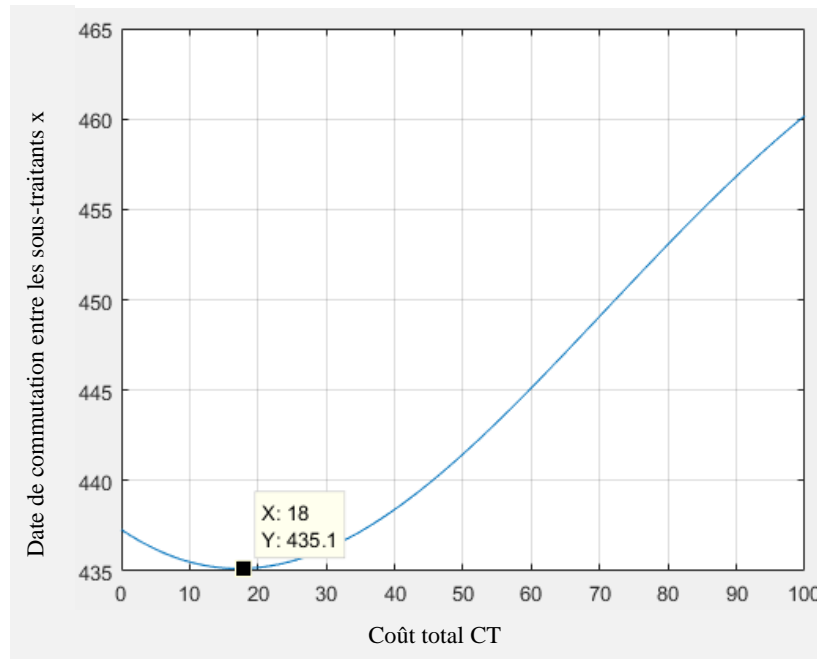
**Tableau 2.2 :** Coût total et date de commutation

Approches Paramètres	(Hafidi et al., 2018)	(Ayed S., 2011)	Marge de différence
Date de commutation $x^*$	18ut	21ut	14.28%
Coût total optimal CT	435.1um	427.8um	1.7%

Dans cette optique, nous calculons l'écart entre nos résultats et ceux de (Ayed S., 2011) en ce qui concerne le coût total et la date de commutation par les deux formules suivantes :

$$Z_3 = \frac{CT(Hafidi et al., 2018) - CT(Ayed S., 2011)}{CT(yed S., 2011)} \quad (2.8)$$

$$Z_2 = \frac{x^*(Hafidi et al., 2018) - x^*(Ayed S., 2011)}{x^*(yed S., 2011)} \quad (2.9)$$



**Figure 2.5 :** Coût total en fonction de la date de commutation entre les sous-traitants selon notre méthode de résolution

### 2.3.3 Synthèse de l'étude d'analyse de l'existant

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons évalué les résultats de deux stratégies de choix de sous-traitance étudié par (Ayed S., 2011). En ce qui concerne, la première stratégie qui consiste à choisir un seul sous-traitant, le choix du sous-traitant le plus convenable se fait durant chaque cycle de production, ce qui dépend du coût unitaire de décision des demandes perdues. Pour la deuxième stratégie, nous avons discuté la stratégie de commutation entre les sous-traitants afin de bénéficier au mieux de leurs caractéristiques.

En effet, l'inconvénient du modèle de (Ayed S., 2011) réside dans le cas où le donneur d'ordres fait un choix de sous-traitance indépendamment de la demande client ainsi que les caractéristiques de l'entreprise en interne. Cela peut fausser le choix convenable de sous-traitance, ce qui engendre des pertes pour l'entreprise.

Rappelons que, lors des appels d'offre, la capacité de production est indispensable aux grands contractants. Néanmoins, le coût de sous-traitance est aussi nécessaire pour évaluer le choix d'un sous-traitant. A cet égard, lors de notre prochain modèle dans la section suivante, nous prenons en compte les lacunes du modèle précédent. Cela peut se faire en considérant la capacité maximale de production du sous-traitant et le coût unitaire de sous-traitance des variables de décisions lors de l'optimisation. En effet, ces deux derniers paramètres sont essentiels pour faire un choix optimal de la sous-traitance. En vue d'offrir aux fabricants de nouvelles stratégies grâce auxquelles ils

pourraient traiter simultanément les paramètres de la production et ceux de la maintenance conformément aux exigences du client.

## 2.4 Nouveau modèle d'un plan intégré de la production et de la maintenance dans le cadre de la sous-traitance

### 2.4.1 Définition de la problématique industrielle

Le concept de la sous-traitance industrielle associe entre deux entreprises, le donneur d'ordres et le sous-traitant. Dans cette partie, nous allons étudier la problématique de la gestion intégrée de la maintenance et de la production dans le cadre de la sous-traitance permanente (mono-outsourcing). Dans un premier temps, nous considérons un donneur d'ordres représenté par une seule machine fabriquant un seul type de produit. Cette machine est caractérisée par une capacité maximale de production et un coût unitaire de production. En effet, le DO reçoit une demande constante au cours du temps qui dépasse sa capacité maximale de production. De ce fait, le recours à la sous-traitance est justifié pour répondre à la demande client. En revanche, le sous-traitant est modélisé par une seule machine caractérisée par une capacité maximale de production, ainsi qu'un coût unitaire de sous-traitance.

Dans cet esprit, notre objectif est de proposer un modèle mathématique qui met en évidence la gestion conjointe de la maintenance et de la production faisant appel à la sous-traitance. Notre modèle permettra d'optimiser simultanément les coûts de maintenance, de production, de stockage et des demandes perdues. Grâce à ce modèle, nous pouvons déterminer d'une part, la période de maintenance préventive et la dimension du stock.

D'autre part, nous pouvons déterminer les valeurs optimales des critères du choix de sous-traitance tels que : la capacité maximale de production du sous-traitant et le coût unitaire de sous-traitance. Il faut cependant savoir, si le contractant choisit un sous-traitant de capacité très petite, la demande ne sera pas satisfaite. Tandis que, si le DO choisit un sous-traitant de capacité très grande, on aura un surcoût de production. D'où, la nécessité de choisir un sous-traitant convenable selon la demande client (figure 2.6).

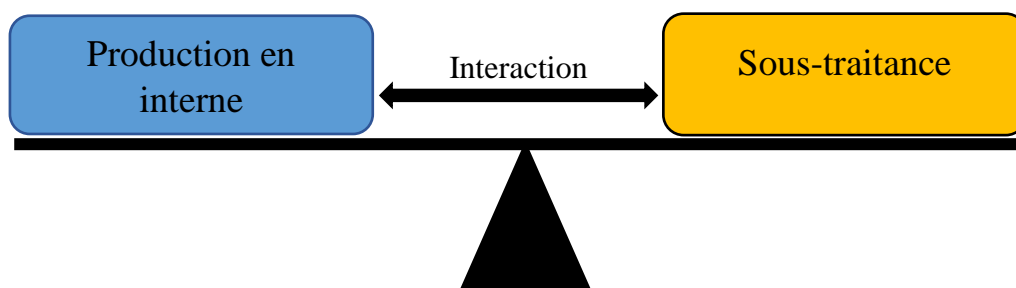


Figure 2.6 : Interaction entre la production et la sous-traitance

La particularité de notre modèle sera de déterminer simultanément des variables de décision décrivant l'interaction entre la production, la maintenance et la sous-traitance. Ainsi, il permettra de faire un choix optimal de sous-traitance en se basant sur la demande client et les caractéristiques internes de l'entreprise en particulier la capacité maximale et le coût de production.

En effet, la période de maintenance préventive et la dimension du stock permettent de garantir une stratégie de maintenance optimale en respectant le plan de production économique. Il faut souligner

que le donneur d'ordres doit s'assurer que le sous-traitant dispose des capacités nécessaires pour la réalisation des tâches externalisées, que ce soit sur le plan financier ou encore organisationnel. De plus, le donneur d'ordres doit vérifier que le sous-traitant choisi permet de maximiser ses profits ainsi qu'il dispose des technologies nécessaires pour la réalisation de tâches souhaitées. Ensuite, le contractant doit s'assurer que le sous-traitant est en mesure d'effectuer la production en respectant les délais prévus et les quantités demandées.

## 2.4.2 Modélisation du plan intégré de production et de la maintenance

Pendant chaque cycle de production de l'horizon de planification, le système de production doit répondre à une demande client constante et supérieure à la capacité maximale de production du DO ayant recours à la sous-traitance. Dans ce modèle, nous traitons les stratégies de choix de sous-traitance dans le cadre de la gestion intégrée de la maintenance et de la production.

### 2.4.2.1 Stratégie de production

Dans l'environnement industriel, la rupture de la demande se persiste si la commande est rejetée. Ce qui provoque la mauvaise réputation de l'image de l'entreprise et la perte des clients. Néanmoins, la perte de la demande peut être rentable pour l'entreprise si la somme du coût de production et le coût de stockage est supérieur au coût de demande perdue. Généralement, la demande est perdue lorsque la capacité de production est limitée. En effet, pour palier à ce problème, nous faisons appel à la sous-traitance. A cet égard, nous introduisons la politique "hedging point" qui consiste à construire le stock  $S$  afin d'assurer la continuité de la demande et d'éviter autant que possible la demande perdue.

Nous signalons que la construction du stock  $S$  se fait seulement par l'entreprise contractante. Ainsi, la production restante est assurée par la machine sous-traitante (figure 2.7).

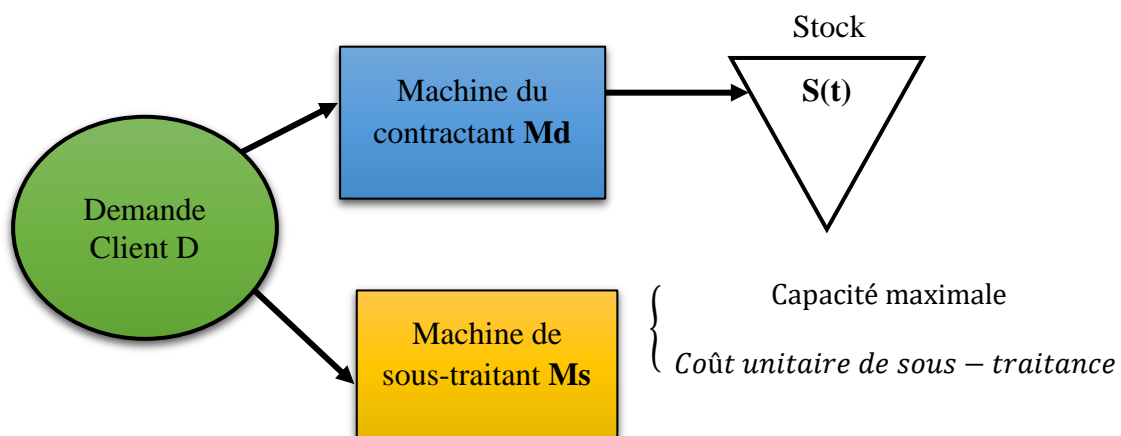


Figure 2.7 : Stratégie du système de production

### 2.4.2.2 Stratégie de maintenance

La gestion de la maintenance de l'entreprise sous-traitante est gérée par elle-même. Autrement dit, le donneur d'ordres ne contribue pas dans la gestion de maintenance de l'entreprise sous-traitante, vu que les deux entreprises ne se situent pas forcément sur le même endroit géographique.

De plus, le système de production principal se dégrade avec l'utilisation durant le temps. Cette dégradation diminue la fiabilité et la disponibilité de la machine de production et augmente la

probabilité de défaillance. Nous supposons que la loi de dégradation de la machine est de type Weibull. La machine du contractant subit des remplacements préventifs à la fin de chaque période  $KT$  avec ( $k= 1, 2, 3\dots$ ). En revanche, lorsqu'une panne apparue avant la période  $KT$ , une action de maintenance corrective est mise en œuvre (figure 2.8).

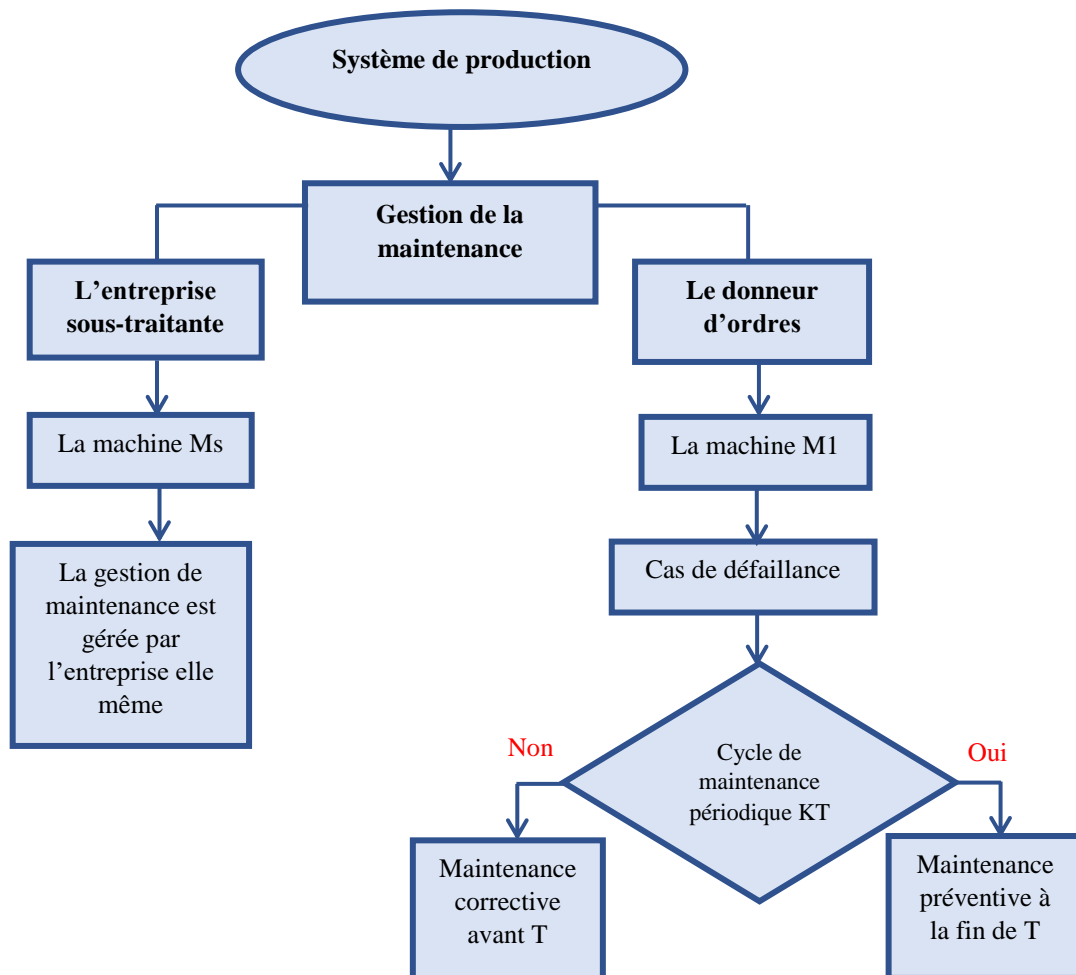


Figure 2.8 : La stratégie de maintenance adoptée pour les deux entreprises

## 2.4.3 Modélisation mathématique

### 2.4.3.1 Notations

#### 2.4.3.1.1 Variables de décision

- $T$  Âge optimal de la maintenance préventive de la machine  $Md$  ;
- $S$  Niveau optimal du seuil de stock ;
- $Us^{\max}$  Capacité de production maximale du sous-traitant ;
- $Cps$  Coût unitaire de sous-traitance.

#### 2.4.3.1.2 Paramètre du modèle

- $F$  Fonction de défaillance de la machine  $Md$  du donneur d'ordres ;

R	Fonction de fiabilité de la machine du donneur d'ordres ;
g	Fonction de densité de probabilité de la durée d'une action de maintenance préventive ;
D	Demande client connus et constante au cours de temps ;
$Ud^{\max}$	Capacité maximale de production de la machine du donneur d'ordres ;
Cmc	Coût unitaire de maintenance corrective de la machine du donneur d'ordres ;
Cmp	Coût de maintenance préventive de la machine du donneur d'ordres ;
Cpd	Coût de production ;
Cs	Coût unitaire de stockage par pièce par unité de temps ;
Cl	Coût unitaire de demande perdu ;
uc	Durée moyenne d'une action de maintenance corrective ;
up	Durée moyenne d'une action de maintenance préventive ;
PIA	Probabilité que le cycle de production soit sans perte ;
PIS	Probabilité que le cycle de production soit avec perte.

### 2.4.3.2 Hypothèses

Pour décrire le problème plus clairement, nous se basons sur les hypothèses suivantes :

- Le système de production interne est composé d'une seule machine fabriquant un seul type de produit.
- La gestion de maintenance de l'entreprise sous-traitante n'est pas assurée par le donneur d'ordres.
- La capacité maximale du sous-traitant est inférieure ou égale à la demande D.
- Le coût de sous-traitance est inférieur au coût de production de l'entreprise DO.
- Après la phase de maintenance préventive de la machine du contractant, le système de production est considéré "as good as new".
- La phase de construction de stock se fait directement après l'action de maintenance préventive.
- La machine du contractant ne tombe pas en panne dans la phase de construction de stock.
- La période de construction de stock est inférieure à la période de maintenance préventive.
- A la fin du cycle de production, le niveau du stock est remis à zéro.
- La durée d'épuisement du stock est considérée négligeable.

Notre modèle consiste à optimiser le coût total qui correspond à la somme des coûts de maintenance (*CM*), de production (*CP*), de stockage (*CS*) et des demandes perdues (*CDP*) divisé par la durée du cycle de production.

Le but est de déterminer une stratégie de maintenance optimale ainsi qu'un plan de production économique, en déterminant simultanément la période optimale de la maintenance préventive et la dimension du stock optimale. Ainsi, pour effectuer un choix optimal de sous-traitance, il faut notamment définir la capacité maximale du sous-traitant et le coût unitaire l'entreprise sous-traitante.

### 2.4.3.3 Coût de production

Le coût de production englobe le coût de fabrication en interne et le coût de sous-traitance. Lorsque la machine du contractant (*Md*) est opérationnelle, elle fabrique avec sa capacité maximale de

production  $Ud_{max}$ , ainsi que la machine sous-traitante assurera le reste de la demande  $(D-Ud_{max})$ . Tandis que, lorsque la machine Md est non opérationnelle, c'est-à-dire qu'elle est sous l'action de maintenance préventive ou de maintenance corrective. A ce stade, la machine Md ne fabrique aucun produit. Ainsi, la machine sous-traitante fabrique en pleine cadence  $US_{max}$ . En effet, le coût total de production CP (2.12) représente la somme du coût de fabrication en interne (2.10) et le coût de sous-traitance (2.11). Notons que  $\Phi(T)$  est le nombre moyen de panne pendant le cycle de production.

$$CP(Md) = C_{pd}Ud_{max}[T - u_c\Phi(T)] \quad (2.10)$$

$$CP(Ms) = C_{ps}[(D - Ud_{max})(T - u_c\Phi(T)) + US_{max}(u_c\Phi(T) + u_p)] \quad (2.11)$$

Par conséquent, le coût total de production est égal à :

$$CP = C_{pd}Ud_{max}[T - u_c\Phi(T)] + C_{ps}[(D - Ud_{max})(T - u_c\Phi(T)) + US_{max}(u_c\Phi(T) + u_p)] \quad (2.12)$$

### 2.4.3.4 Coût de stockage

Pour décrire l'évolution d stock, nous avons adopté le modèle de (Rezg, Xie & Mati, 2004) (figure 2.9). Rappelons que le niveau de stock dans une entreprise passe généralement par trois phases. La première phase représente la phase de construction de stock de sécurité. Notons que le taux de production pendant la première phase est égal à  $(US_{max} - (D - Ud_{max}))$ . Ainsi, la construction du stock se fait seulement par la machine du donneur d'ordres. Deuxièmement, la phase de saturation du stock  $s(t)$  est constante dans un niveau  $S$ . Finalement, la phase d'interruption dont le niveau de stock baisse. En effet, lorsque le système de production tombe en interruption de stock, la demande est perdue, d'où la rupture du stock.

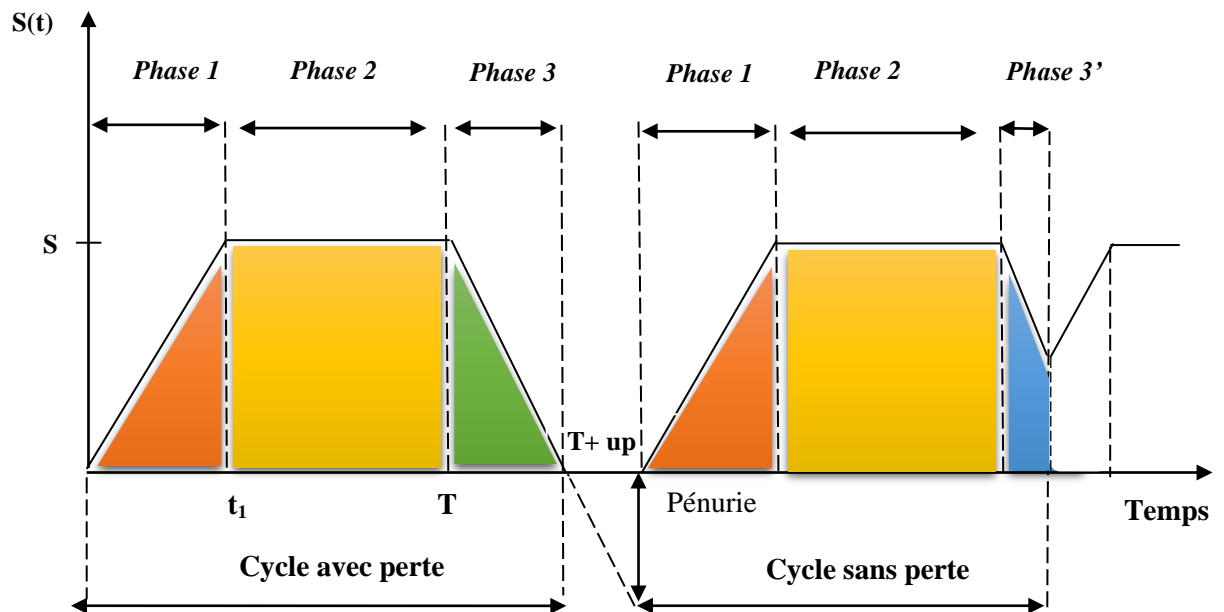


Figure 2.9 : Evolution du stock pendant le cycle de production avec et sans perte

Bien qu'il existe deux cas possibles de cycle de production  $(T + u_p)$ . Le premier cas est le cycle de production sans perte et le second représente le cycle de production avec perte. De ce fait, le coût de

stockage représente la somme des surfaces des trois phases multipliées par le coût unitaire de stockage  $C_s$ . Nous calculons par la suite le coût de stockage durant chaque phase :

- **Phase 1 :**

$$C_{sc} = \frac{S^2}{2(U1_{max} - (D - US_{max}))} \quad (2.13)$$

- **Phase2 :**

$$C_{ss} = S(T - t_1) = S \left( T - \frac{S}{U1_{max} - (D - US_{max})} \right) \quad (2.14)$$

- **Phase 3 et phase 3' :**

Dans la phase d'interruption, deux cas se présentent : cycle sans perte (phase 3') et cycle avec perte (phase 3). Par conséquent, le coût du stockage pendant la phase 3 est :

$$C_{SIA} = \frac{S^2}{2(D - US_{max})} \quad (2.15)$$

Ainsi que, le coût du stockage pendant la phase 3' est :

$$C_{SIS} = \frac{u_p}{2} (S - u_p(D - US_{max})) \quad (2.16)$$

Par la suite, le coût moyen du stockage  $CS$  est égal à la somme des surfaces multipliée par le coût unitaire de stockage (équation 2.17), sachant que la somme des probabilités avec pertes et sans perte est égale à 1 (équation 2.18).

$$CS = C_s(C_{sc} + C_{ss} + P_{IA}C_{SIA} + P_{IS}C_{SIS}) \quad (2.17)$$

$$P_{IA} + P_{IS} = 1 \quad (2.18)$$

En conséquence, le coût du stockage est égal à :

$$CS = \quad (2.19)$$

$$C_s \left( \frac{S^2}{2(Ud_{max} - (D - US_{max}))} + S \left( T - \frac{S}{(Ud_{max} - (D - US_{max}))} \right) + P_{IA} \frac{S^2}{2(D - US_{max})} + (1 - P_{IA}) \left( \frac{u_p}{2} (S - u_p(D - US_{max})) \right) \right)$$

#### 2.4.3.5 Coût des demandes perdus

La pénurie survient lorsque la demande client est perdue, c'est-à-dire lorsque le cycle de production est avec perte. En effet, le cycle de production avec perte se produit si la durée de l'action de maintenance préventive est supérieure à la période nécessaire pour la consommation du stock.



Ensuite, PIA représente la probabilité que le cycle soit avec perte donné par l'équation (2.20). Ainsi, PIS représente la probabilité que le cycle soit sans perte. En revanche, la somme des deux probabilités est égale à 1.

$$PIA = 1 - PIS = 1 - \int_0^{\frac{S}{D - U_{S_{max}}}} g(t) dt \quad (2.20)$$

Par conséquent, le coût des demandes perdues est égal à :

$$CDP = Cl PIA(u_p(D - U_{S_{max}}) - S) \quad (2.21)$$

### 2.4.3.6 Coût de maintenance

Le coût de maintenance représente seulement le coût de maintenance de la machine du contractant, puisque les actions de maintenance de l'entreprise sous-traitante sont gérées par elle-même. En effet, le coût de maintenance  $CM$  est la somme du coût de maintenance préventive et du coût de maintenance corrective pendant le cycle de production exprimé par l'équation (2.22). Notons que le nombre moyen des actions de maintenance corrective dans le cycle de production est représenté par  $\Phi(T)$ .

$$CM = C_{mc} \Phi(T) + C_{pm} \quad (2.22)$$

### 2.4.4 Formulation du modèle proposé

Rappelons que notre objectif est de faire un choix optimal de sous-traitance dans le cadre de la gestion de la maintenance intégrée à la production tout en minimisant le coût total par unité de temps. Nous signalons que la formulation de notre modèle proposé se fait selon les trois scénarios suivants.

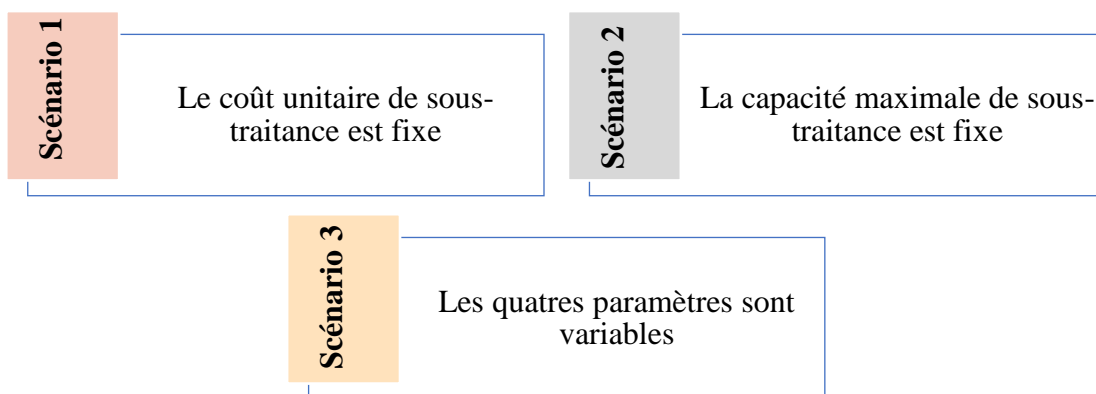


Figure 2.10 : Les scenarios de formulation mathématique

Dans un premier temps, nous étudions le cas lorsque le coût unitaire de sous-traitance est fixe. Ainsi, nous varions la période de maintenance préventive, la dimension de stock et la capacité maximale du sous-traitant. Dans un deuxième temps, nous fixons la capacité maximale du sous-traitant. Ainsi,

nous cherchons les valeurs optimales de la période de maintenance préventive, la dimension de stock et le coût unitaire de p sous-traitance. Finalement, nous varions les quatre variables de décision : la période de maintenance préventive, la dimension de stock, la capacité maximale de production du sous-traitant et le coût unitaire de production du sous-traitant. A cet effet, nous comparons les résultats des trois scénarios, de manière à trouver le coût total le plus optimal.

#### 2.4.4.1 Scénario 1 : cas où le coût unitaire de production de sous-traitance est fixe

Dans ce cas, nous fixons le coût unitaire de production de l'entreprise sous-traitante. Ainsi, nous considérons que le coût unitaire de production de l'entreprise sous-traitante est égal au coût unitaire de production du donneur d'ordres donné par l'équation (2.23) :

$$C_{pd} = C_{ps} \quad (2.23)$$

De ce fait, la fonction objectif possède trois variables de décisions (équation 2.24) à savoir : la période de maintenance préventive, la taille du stock optimal et la capacité maximale de production de l'entreprise sous-traitante. Pour cela, nous respectons les contraintes, soient :

$$Y = CT(T^* + S^* + Us_{max}^*) \quad (2.24)$$

$$Us_{max} > D - Ud_{max} \quad (2.25)$$

$$\frac{S}{Ud_{max} - (D - Us_{max})} \leq T \quad (2.26)$$

$$S > \Phi(T)u_c(D - Us_{max}) \quad (2.27)$$

#### 2.4.4.2 Scénario 2 : cas où la capacité maximale de production de sous-traitance est fixe

Concernant le deuxième scénario, nous fixons la capacité maximale de production de l'entreprise sous-traitante. Ainsi, nous considérons que la capacité maximale de production de l'entreprise sous-traitante est égale à la capacité maximale de production du donneur d'ordres. Elle est définie par l'équation (2.28) :

$$Ud_{max} = Us_{max} \quad (2.28)$$

Par conséquent, les variables de décision sont : la période de maintenance préventive, la taille du stock optimal et le coût unitaire de production de l'entreprise sous-traitante données par l'équation (2.29). En tenant compte les contraintes telles que :

$$Y = CT(T^* + S^* + Cps^*) \quad (2.29)$$

$$Cp < \frac{Cpr_1 U1_{max}(T - u_c \Phi(T))}{(D - U1_{max})(T - u_c \Phi(T)) + Us_{max}(u_c \Phi(T) + u_p)} \quad (2.30)$$

$$\frac{S}{Ud_{max} - (D - Us_{max})} \leq T \quad (2.31)$$

$$S > \Phi(T)u_c(D - US_{max}) \quad (2.32)$$

### 2.4.4.3 Scénario 3 : cas où le coût unitaire et la capacité maximale de production de sous-traitance sont variables

Dans le dernier scénario, nous considérons quatre variables de décisions indiquées par l'équation (2.31) ; la période de maintenance préventive, la dimension de stock, la capacité maximale de production du sous-traitant et le coût unitaire de production du sous-traitant.

$$CT(T^* + S^* + US_{max}^* + Cps^*) = \frac{CP + CM + CS + CDP}{T + u_p} \quad (2.33)$$

Par conséquent, nous obtenons un problème d'optimisation non-linéaire tel qu'est défini par l'équation (2.34).

Minimiser la fonction objectif :

$$\begin{aligned} & C_{pd}Ud_{max}(T - u_c\Phi(T)) + \\ & \quad \textbf{Production} \\ & C_{ps} \left( (D - Ud_{max})(T - u_c\Phi(T)) + US_{max}(u_c\Phi(T) + u_p) \right) \\ & \quad \textbf{Sous - traitance} \\ & C_s \left( \frac{S^2}{2(Ud_{max} - (D - US_{max}))} + S \left( T - \frac{S}{(Ud_{max} - (D - US_{max}))} \right) \right) \\ & + PIA \frac{S^2}{2(D - US_{max})} + (1 - PIA) \left( \frac{u_p}{2} (S - u_p(D - US_{max})) \right) \Bigg) + \\ & \quad \textbf{Stockage} \\ & Cl PIA(u_p(D - US_{max}) - S) + \\ & \quad \textbf{Demande perdues} \\ & \quad c_{mc}\Phi(T) + C_{mp} \\ & \quad \textbf{Maintenance} \\ & \hline & T + u_p \end{aligned} \quad (2.34)$$

Sous les contraintes :

$$US_{max} > D - Ud_{max} \quad (2.35)$$

$$\frac{S}{Ud_{max} - (D - US_{max})} \leq T \quad (2.36)$$

$$S > \Phi(T)u_c(D - US_{max}) \quad (2.37)$$

$$C_p < \frac{Cpr_1U1_{max}(T - u_c\Phi(T))}{(D - U1_{max})(T - u_c\Phi(T)) + US_{max}(u_c\Phi(T) + u_p)} \quad (2.38)$$

### 2.4.4.4 Signification des équations des contraintes

- L'équation (2.35) représente la cadence de construction de stock ( $US_{max} - (D - Ud_{max})$ ) qui doit être positive, afin d'éviter de tomber en rupture de stock.

- L'équation (2.36) garanti que la période de construction de stock  $t_1$  doit être inférieure ou égale à la période de maintenance préventive  $T$ , afin d'éviter de tomber en rupture de stock.
- L'équation (2.37) force que la quantité consommée pendant les périodes d'indisponibilité de la machine du contractant de l'entreprise  $DO$  est inférieure au stock optimal  $S$ , en vue d'éviter le risque de rupture du stock pendant la phase de saturation.
- L'équation (2.38) montre que le coût de production de sous-traitance doit être inférieur au coût de la production en interne du donneur d'ordres.

## 2.4.5 Procédure de résolution

### 2.4.5.1 Type de problème étudié

Étant donné que la cible principale de notre approche est de déterminer durant chaque cycle de production, un plan de production économique et une stratégie de maintenance efficace, en faisant un choix optimal de sous-traitance. Ce travail permet de définir simultanément la période de maintenance préventive, le niveau de stock optimal, ainsi que la capacité maximale et le coût unitaire du sous-traitant. De ce fait, notre critère d'optimisation est la minimisation du coût total pendant l'horizon de la planification, en tenant compte à la fois les différentes contraintes.

Certes, le sujet d'optimisation représente une thématique très vaste. Cette dernière a fait l'objet de nombreuses recherches ces dernières décennies. En effet, notre modèle correspond à un problème non-linéaire avec contraintes. Etant donné que la programmation non-linéaire (PNL) représente une généralisation de la programmation linéaire. Elle est caractérisée par une optimisation dont au moins la fonction objectif ou l'une des contraintes sont non-linéaires. Afin de résoudre notre problème non-linéaire avec des contraintes, nous allons utiliser la fonction « *fmincon* » du solveur Matlab, en vue de minimiser notre fonction objectif, en déterminant simultanément l'optimum des variables de décisions.

### 2.4.5.2 Description de la fonction *fmincon* (optimization toolbox)

Plusieurs fonctions spécifiques existent dans MATLAB pour résoudre des problèmes d'optimisation. La fonction *fmincon* code plusieurs méthodes y compris la programmation quadratique séquentielle pour optimiser des problèmes non-linéaires multidimensionnels avec contraintes. La formulation du problème est la suivante :

$$f(x) \text{ sujet à :}$$

$$\min \begin{cases} C(x) \leq 0 \\ Ceq(x) = 0 \\ A \cdot x \leq b \\ Aeq \cdot x = beq \\ lb \leq x \leq ub \end{cases} \quad (2.39)$$

La syntaxe générale est la suivante :

$$[x, fval, exitflag, output, lambda, grad, hessian] = fmincon \left( \begin{array}{l} @x \text{ objfunction}(x), \\ x_0, A, B, \\ Aeq, Bex, lb, ub \\ ', \text{nonlcon}', \text{'options'} \end{array} \right)$$

La fonction `fmincon` possède des arguments d'entrée qui sont présentés de la manière suivante (Mathworks) :

- **obj\_function** : représente la fonction objectif qu'on cherche à minimiser. Dans l'entête de la fonction `obj_function` : `function f = obj_function(x)`.
- **x<sub>0</sub>** : désigne le vecteur des valeurs initiales. Ainsi, la dimension de `x0` est égale au nombre de variables de décision du problème.
- **A et B** : représentent respectivement une matrice et un vecteur permettant d'exprimer les contraintes linéaires de type inégalité.
- **Aeq et Beq** : indiquent respectivement une matrice et un vecteur qui permettent d'exprimer les contraintes linéaires de type égalité.
- **lb et ub** : représentent les bornes inférieure et supérieure des éléments de `x`. Notons que `lb` et `ub` ont la même dimension que `x`.
- **nonlcon** : est le nom de la fonction externe MATLAB dans laquelle sont définies les éventuelles contraintes non-linéaires égalité et inégalité. L'entête de `nonlcon.m` est : `function [c,ceq] = nonlcon(x)`.
  - **c** : est un vecteur qui contient les résidus des contraintes inégalité.
  - **ceq** : est un vecteur qui contient les résidus des contraintes égalité.

Ainsi, les arguments de sortie sont ainsi représentés respectivement comme suit :

- **x** : indique la valeur finale des variables de décision. Autrement dit les solutions si la méthode a convergé.
- **Fval** : la valeur finale de la fonction objectif à minimiser.
- **Output** : représente le nombre d'itérations et d'évaluations de fonction réalisés.

Pour ce faire, nous avons construit 3 fichiers, le premier fichier est dédié à la définition de la fonction objectif : `f(x)` (Algorithme 2.1). Le deuxième fichier est consacré aux contraintes non-linéaires : `c(x)` et `ceq(x)` (Algorithme 2.2). Finalement, le dernier représente le fichier principal où nous pouvons définir les contraintes linéaires (`A`, `b`, `Aeq` et `beq`) ainsi que les bornes limites (supérieurs et inférieurs) des variables de décisions (Algorithme 2.3).

**Algorithme 2.1** : Le Pseudo code de la déclaration de la fonction objectif

**Fichier 1 :**

**Début**

**Définir** la fonction objectif : `f(x)`.

**Définir** les constantes du problème : (`cmc`, `cmp`, `cpd`, `uc`, `Udmax`, `up`, `D`, `cl`, `cs`)

**Fin**

**Algorithme 2.2 :** Le Pseudo code de la déclaration des contraintes non-linéaire

**Fichier 2 :**

**Début**

**Définir** la fonction contrainte : Fonction  $[c1, c2, c3, ceq] = nlcon(x)$

**Définir** les constantes du problème :  $(cpd, uc, Ud^{max}, up, D)$

**Déclarer** la contrainte d'égalité non-linéaire :

$Ceq = []$  ;

**Déclarer** les trois contraintes d'inégalité non-linéaire :

$C1 = \dots$  ;

$C2 = \dots$  ;

$C3 = \dots$  ;

**Fin**

**Algorithme 2.3 :** Le Pseudo code du fichier principal

**Fichier 3 :**

**Début**

**Définir** les constantes de problème :  $(uc, Ud^{max}, D)$

**Déclarer** le vecteur de la valeur supérieure des 4 variables de décision :

$ub = [ub1, ub2, ub3, ub4]$ ;

**Déclarer** le vecteur de la valeur inférieure des 4 variables de décision :

$lb = [lb1, lb2, lb3, lb4]$ ;

**Définir** le point initial d'itération (Estimation Initiale)

$x_0 = [\dots, \dots, \dots]$  ;

**Déclarer** la contrainte d'égalité non-linéaire :

$Aeq = []$  ;

$beq = []$  ;

**Déclarer** la contrainte d'inégalité non-linéaire :

$A = [\dots \dots \dots]$ ;

$b = [\dots]$  ;

**Définir** le programme principal

Objective = @obj\_function ;

Nonlincon = @nlcon ;

**Appeler** la fonction fmincon

$[x, fval, output, lambda] = fmincon(objective, x_0, A, b, Aeq, beq, lb, ub, nonlincon)$ ;

**Afficher** l'objectif final

**Afficher** la solution

**Fin.**

**2.4.6 Résultats numériques et discussion**

Pour illustrer notre approche, nous considérons une situation avec les données d'entrées qui ont été choisies par rapport au modèle de (Ayed S., 2011) présenté dans le tableau 2.3 afin de comparer les résultats. Notons que l'unité monétaire est représentée par um et l'unité de temps est représentée par ut. La dégradation de la machine de l'entreprise principale est considérée de type *Weibull* :

$$R(T) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.40)$$

Tels que :

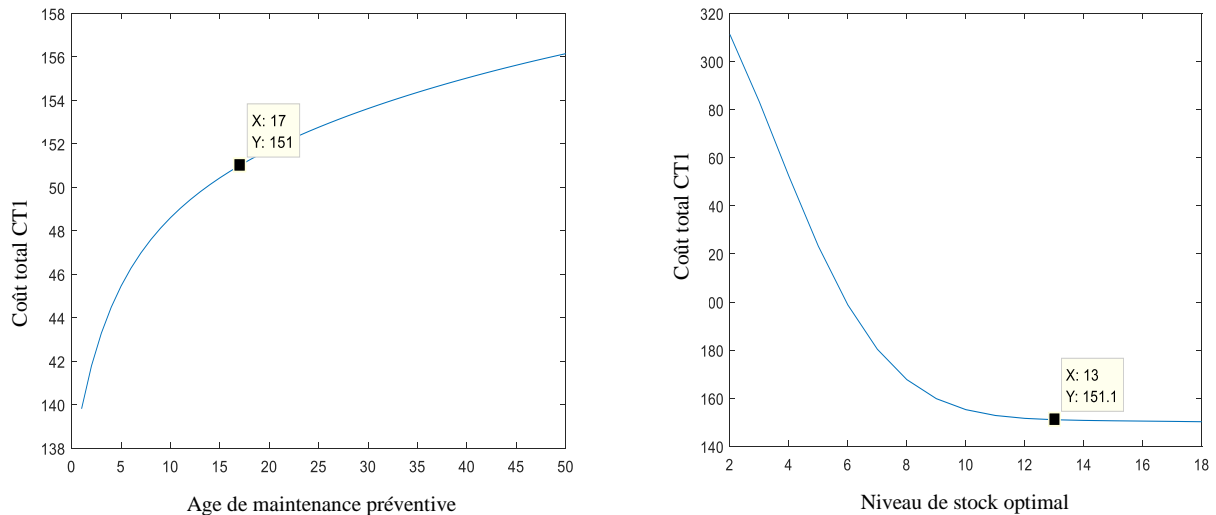
- $\beta$  = Paramètre de forme ( $\beta = 2$ ) ;
- $\Pi$  = Paramètre d'échelle ( $\Pi = 100$ ) ;
- $\gamma$  = Paramètre de position ( $\gamma = 0$ ).

Tableau 2.3 : Les données numériques du problème

Paramètres	Valeurs
Demande D	30 unités
Capacité maximale de production $Ud^{\max}$	20 unités
Coût unitaire de production $C_{pd}$	5um
Coût unitaire de maintenance corrective $C_{mc}$	3000um
Coût unitaire de maintenance préventive $C_{mp}$	500um
Durée moyenne d'une action de maintenance corrective $u_c$	20ut
Durée moyenne d'une action de maintenance préventive $u_p$	5ut
Coût unitaire de demande perdu $Cl$	43um
Coût unitaire de stockage par pièce par unité de temps $C_s$	0.25um

#### 2.4.6.1 Résolution du premier scénario

Les résultats de la procédure numérique du premier scénario ont montré l'existence d'un coût total minimal égal à 150.98 um. Etant donné que la période de maintenance préventive est égale à  $T=17.01ut$  (figure 2.11 a), le niveau de stock optimal reçoit  $S=13.15$  unités (figure 2.11 b). Ainsi, la figure 2.12 indique la valeur de la capacité maximale de production de l'entreprise sous-traitante,  $U_s^{\max}=10.77$  unités.



(a) En fonction de la période de la maintenance (b) En fonction de la dimension du stock

Figure 2.11 : Evolution du coût total  $CT_1$

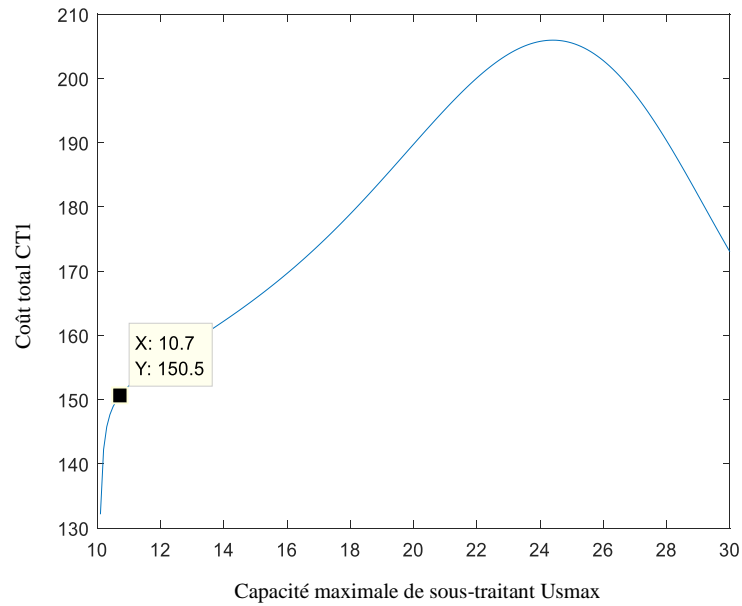
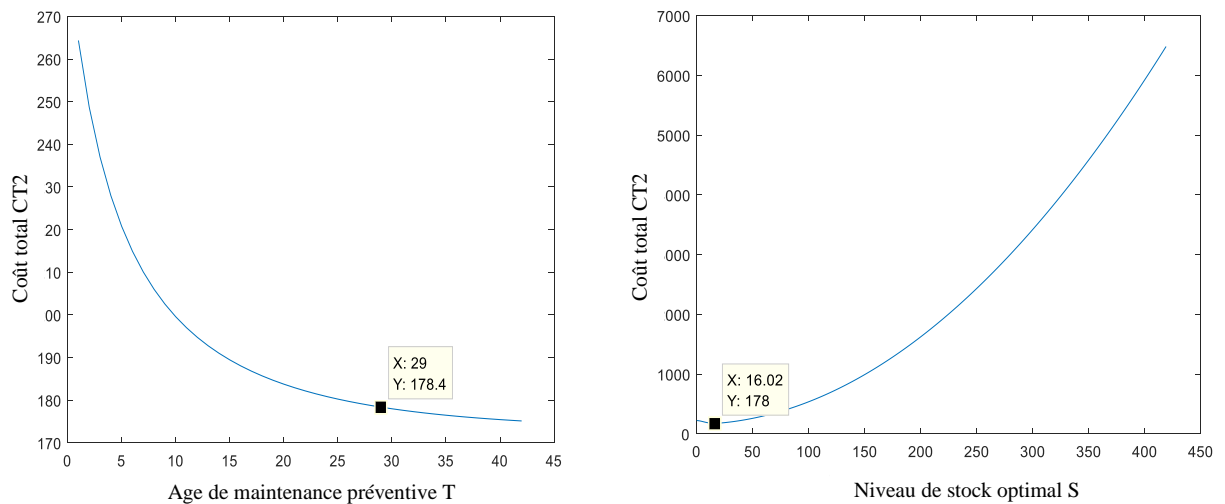


Figure 2.12 : Evolution du coût total  $CT_1$  en fonction de la capacité maximale du sous-traitant

#### 2.4.6.2 Résolution du deuxième scénario

En ce qui concerne le deuxième scénario, nous avons obtenu un coût minimal 178.14um, atteint pour une période de maintenance préventive  $T=29.55ut$  (figure 2.13 a), un niveau de stock optimal  $S=16.72$  unités (figure 2.13 b). Finalement, le coût unitaire de production du sous-traitant,  $Cps=5um$  (figure 2.14).



(a) En fonction de la période de maintenance préventive stock (b) En fonction de la dimension du stock

Figure 2.13 : Evolution du coût total  $CT_2$



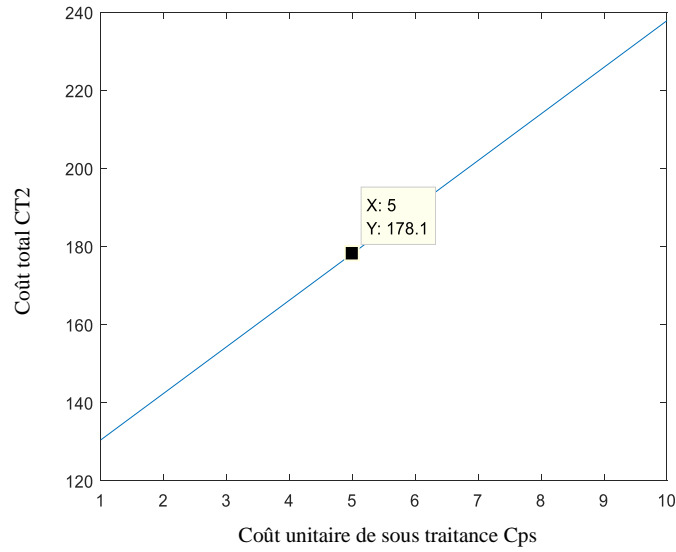
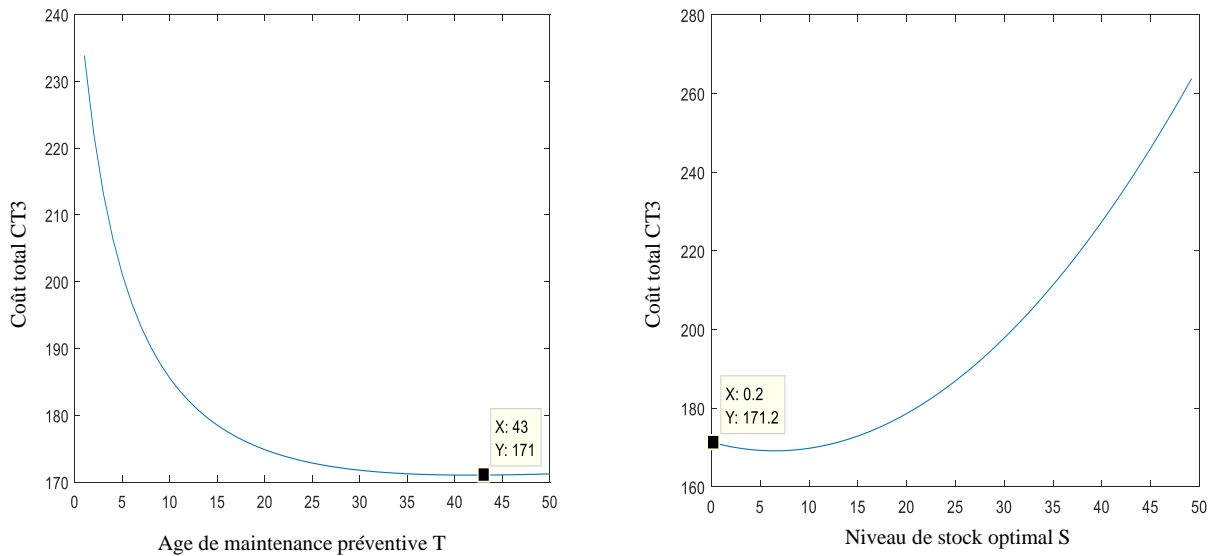


Figure 2.14 : Evolution du coût total  $CT_2$  en fonction du coût unitaire de sous-traitance

### 2.4.6.3 Résolution du troisième scénario

Par ailleurs, la résolution du troisième scénario nous a permis d'obtenir un coût total minimal qui égal à 171.04um. Par conséquent, la période de maintenance préventive est égale à  $T=43.08ut$  (figure 2.15 a), le niveau du stock optimal reçoit  $S=0.2$  unités (figure 2.15 b), la capacité maximale de production de l'entreprise sous-traitante  $Us^{max}=29,94$  unités (figure 2.16 b) et finalement le coût unitaire sous-traitance,  $cps=5um$  (figure 2.16 a).



(a) En fonction de la période de maintenance préventive stock (b) En fonction de la dimension du stock

Figure 2.15 : Evolution du coût total  $CT_3$

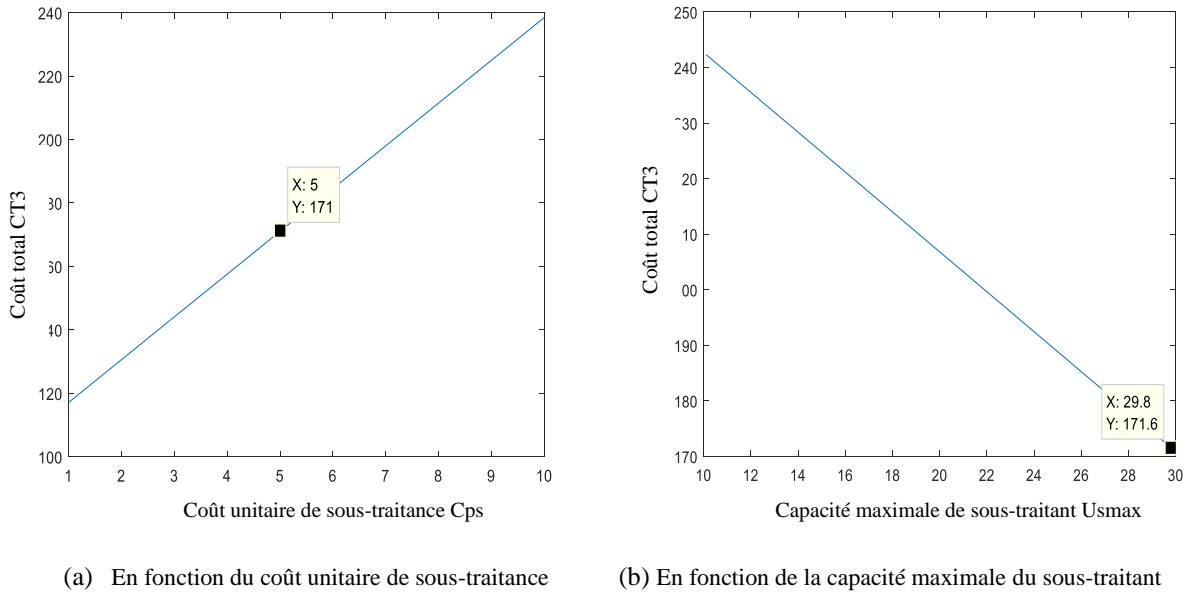


Figure 2.16 : Evolution du coût total  $CT_3$

A ce stade de notre travail, les trois scénarios du contrôle sont utilisés pour déterminer les paramètres optimaux, permettant de minimiser le coût total tout en respectant la contrainte de satisfaction du client. En comparant les résultats numériques des trois scénarios, nous avons constaté que la valeur du coût total optimal la plus minimale entre les trois scénarios est celle du premier (figure 2.17). Rappelons que le premier scénario représente le cas où le coût unitaire de sous-traitance est égal au coût unitaire de production de DO dont la valeur du coût total est égale à 150,98um.

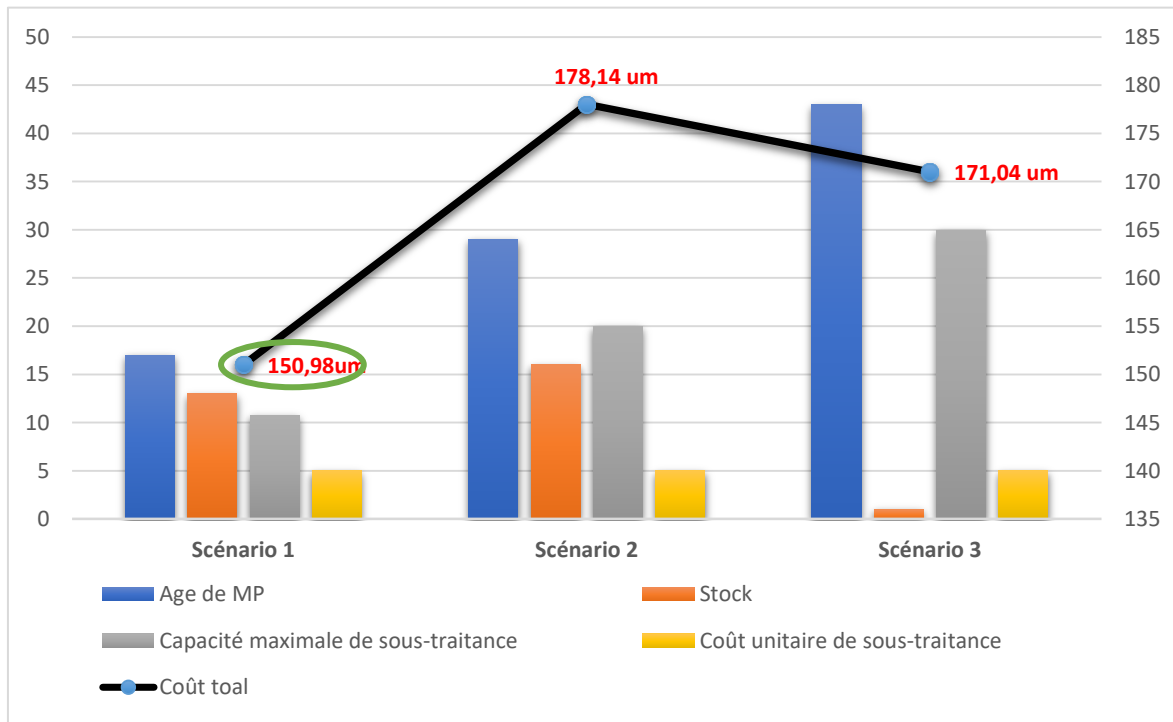


Figure 2.17 : Comparaison des résultats numériques des trois scénarios

### 2.4.7 Analyse de sensibilité

Dans le même ordre d'idée, pour obtenir un coût total aussi optimal que possible, il faut tenir compte de certaines conditions particulières, telles que :

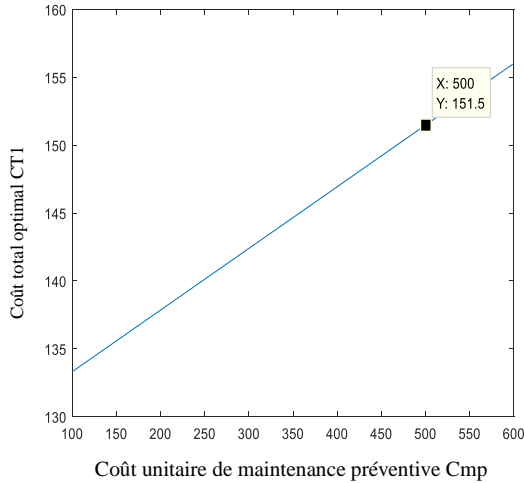
- La capacité maximale de production du sous-traitant ne doit pas dépasser largement la capacité maximale du donneur d'ordres. Autrement dit, lorsque la demande est supérieure à la capacité maximale de l'entreprise, le donneur d'ordres fait appel à une entreprise sous-traitante qui possède la capacité de production nécessaire pour compléter la demande manquante. Par conséquent, l'entreprise sous-traitante dont la capacité est très importante et dépasse largement la demande ne procure donc à priori pas de réel bénéfice.
- La sous-traitance est rentable lorsque le coût unitaire de la sous-traitance n'est pas considérablement plus élevé que le coût de production unitaire du contractant.
- Le stock adopté dans la stratégie de production contribue dans la minimisation du coût de la demande perdue.
- La stratégie de maintenance est indispensable pour l'entreprise pour le bon fonctionnement des équipements de production. En effet, une mauvaise stratégie de maintenance stratégique de maintenance préventive facture des coûts supplémentaires pour l'entreprise.

Sur le plan industriel, il est indispensable de parvenir à une relation gagnant-gagnant entre le contractant et le sous-traitant, tout en garantissant le profit aux deux entreprises. En effet, nous avons utilisé deux paramètres essentiels (la capacité maximale et le coût unitaire de sous-traitance) menant à faire un choix optimal du sous-traitant.

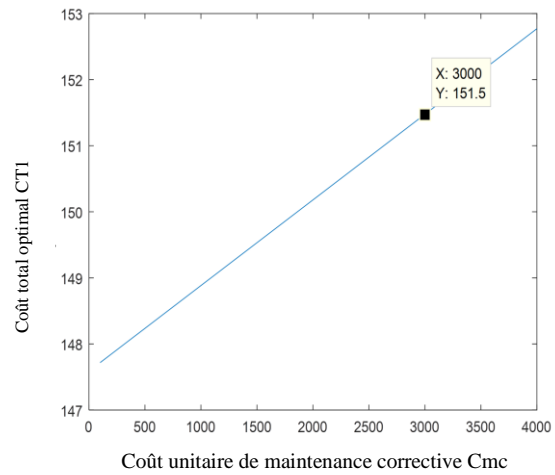
De plus, afin d'étudier l'influence du coût unitaire de la maintenance préventive, de la maintenance corrective, du stockage et de la demande perdue sur le coût total de la politique commune du contrôle de la production et de la maintenance, une étude de sensibilité est mise en place, permettant de mettre en lumière l'impact des coûts unitaires sur le coût total.

- **Variation des coûts de maintenance**

La figure 2.18 montre que l'augmentation du coût unitaire de l'action de maintenance préventive et le coût unitaire de la maintenance corrective augmentent le coût total, d'où la nécessité de faire un choix optimal de la période de la maintenance préventive. Si la période de la maintenance préventive est élevée, il y aura plus de pannes, ce qui signifie plus d'interventions correctives. Ceci augmente le coût de la maintenance, du fait que le coût unitaire des actions de maintenance corrective est souvent supérieur au coût unitaire des actions de maintenance préventive. De même, si la période de la maintenance préventive est réduite.



(a) En fonction de coût unitaire de maintenance préventive



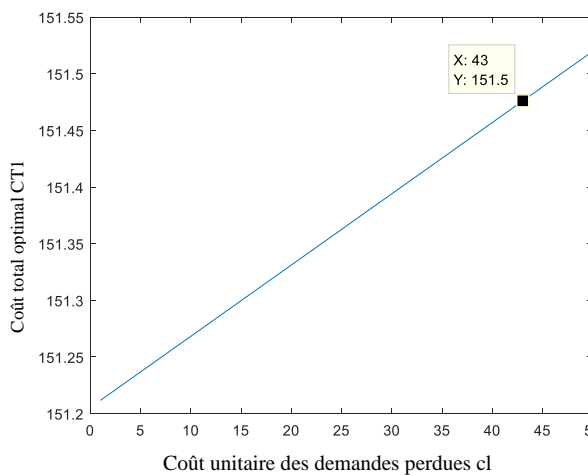
(b) En fonction de coût unitaire de maintenance corrective

Figure 2.18 : Evolution du coût total  $CTI$

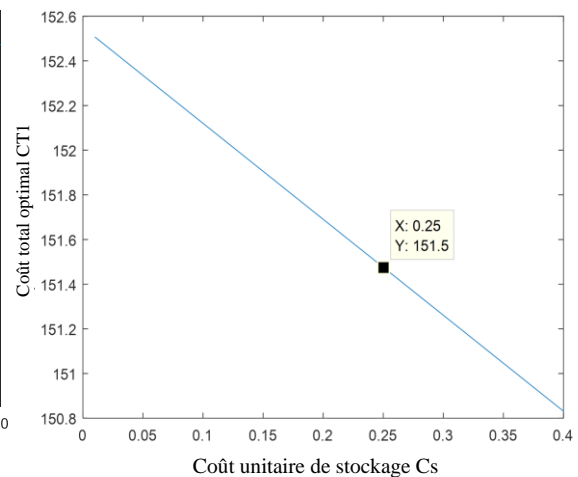
- **Variation du coût de stockage et des demandes perdues**

Dans ce cas, le coût unitaire de la pénurie n'a pas un grand effet sur le coût total, avec une variation de l'ordre de 0,1um. En d'autres termes, le coût engendré par la demande perdue est relativement peu significatif (figure 2.19 a). Dans le même contexte, la figure 2.19 (b) montre que l'augmentation du coût unitaire du stockage diminue lentement le coût total.

Par conséquent, la production en stock peut être économique par rapport à la sous-traitance dans le cas où la demande est prévue. Il est donc essentiel d'étudier précisément les composantes de ces coûts unitaires afin d'établir une meilleure politique commune de contrôle.



(a) En fonction de coût unitaire de demande perdue



(b) En fonction de coût unitaire de stockage

Figure 2.19 : Evolution du coût total  $CTI$  - Coût de stockage et des demandes perdues

### 2.4.8 Etude comparative

Lors de cette section, notre objectif est de comparer nos résultats avec la littérature essentiellement avec (Ayed S., 2011). Bien entendu, l'objectif du contrat de sous-traitance est de livrer le produit au bon moment avec la quantité souhaitée, mais moins cher en cas de demandes urgentes ou en cas de réajustement de la capacité de l'entreprise commanditaire. En effet, les sous-traitants cherchent souvent à maximiser leurs profits sur des commandes occasionnelles.

En contrepartie, les donneurs d'ordres cherchent à réduire la charge de production. En conséquence, le défi majeur est de parvenir à un équilibre gagnant entre les deux types d'entreprises. En outre, l'externalisation peut être très utile pour réduire les effets négatifs des retards ou de l'annulation de la commande, pour assurer un contrôle et une gestion efficaces des produits et des services.

Pour toutes ces raisons, nous avons souligné la nécessité d'établir un modèle de qualité qui contribue à fournir une meilleure politique de contrôle conjoint de la production et de la maintenance dans le cadre de sous-traitance. Nous avons obtenu des résultats qui confirment l'efficacité au niveau de la minimisation du coût total. Par conséquent, le coût total obtenu à travers notre modèle est égal à 150,98um. Ainsi, le coût total obtenu par (Ayed S., 2011) est égal à 379,15um, ce qui affirme une réduction de coût total de valeur de 57,4%, ce qui constitue à une amélioration remarquable.

$$R_{\%} = \frac{CT(Hafidi et al., 2018) - CT(Ayed S., 2011)}{CT(yed S., 2011)} \times 100 = 57,4\% \quad (2.41)$$

Ces résultats sont obtenus en considérant la variation de la capacité de production de sous-traitance, ainsi que le coût unitaire de sous-traitance. Néanmoins, le choix de ces paramètres se fait selon la demande client, ainsi que des caractéristiques de l'entreprise DO telles que la capacité maximale de production et le coût unitaire de production. D'où la pertinence de prendre en considération ces critères dans la définition du plan optimal. Il faut souligner également qu'il n'y a pas un sous-traitant optimal tout le temps et dans n'importe quelle condition. Néanmoins, le choix de sous-traitance dépend de l'ensemble des critères caractérisant l'entreprise DO, l'entreprise sous-traitante et le besoin du marché.

## 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons privilégié une étude de l'analyse d'existant afin de comprendre notre problème en vue d'évaluer les résultats de la littérature, ce qui constitue une base solide pour nos futurs travaux. Pour ce faire, nous avons étudié deux stratégies de choix de sous-traitance. En faveur de la première stratégie, le DO est capable de faire un choix optimal d'un seul sous-traitant, en se reposant sur le coût unitaire de décision des demandes perdues. Ensuite, la stratégie de commutation entre les sous-traitants fait en sorte que le donneur d'ordres puisse bénéficier des caractéristiques respectives des sous-traitants.

Dans ce contexte et afin d'améliorer les modèles existants, nous avons proposé une approche qui décrit une situation réelle dans l'environnement industrielle. Dans cet esprit, nous avons étudié un système de production composé d'une machine fabriquant un seul produit, afin de satisfaire une demande de la clientèle supérieure à sa capacité de production maximale. Pour répondre à cette demande, nous utilisons l'option de sous-traitance. La politique de contrôle proposée a pour objectif de déterminer, premièrement un plan optimal de production et de maintenance. Ensuite, la

nécessité de mettre au point la stratégie de choix du sous-traitant le plus approprié est mise en œuvre. L'optimisation conjointe proposée minimise simultanément les coûts de production, de sous-traitance, du stockage, des demandes perdues et de maintenance. En conséquence, nous avons développé trois scénarios, chacun est caractérisé par des variables de décision, une fonction objectif et des contraintes. Une méthode numérique sous Matlab a été adoptée pour résoudre notre problème non-linéaire avec contraintes. En effet, nous avons remarqué que le premier scénario permet de procurer de bons résultats. Afin d'illustrer notre approche, nous avons adopté un exemple numérique, ainsi qu'une analyse de sensibilité pour valider l'optimisation conjointe. Finalement, nous avons comparé nos résultats avec la littérature, en montrant l'efficacité de notre modèle dans la minimisation du coût total.

Le chapitre suivant portera sur l'élaboration d'une nouvelle approche d'intégration de la production et de la maintenance pour un système de fabrication. Ce système doit répondre à une demande aléatoire, dont le système est sujet à la dégradation en fonction du taux de production. Pour ce faire, nous développons une nouvelle approche traitant le cas de l'industrie manufacturière en mode réel, en prenant en considération différentes contraintes et en déterminant les variables de décision. Nous tenons en compte l'aspect complexe de l'industrie manufacturière composée de multi-machine. Enfin, une étude comparative sera présentée pour établir une solution optimale efficace et réalisable.

---

# **Chapitre 3**

---

**Planification de la production et de la maintenance pour un système de production multi-machine soumis à des contraintes de dégradation et de sous-traitance**

## Chapitre 3

# Planification de la production et de la maintenance pour un système de production multi-machine soumis à des contraintes de dégradation et de sous-traitance

---

### 3.1 Introduction

L'industrie manufacturière est caractérisée par la coordination et la coopération, d'où la nécessité de la sous-traitance. A cet égard, la sous-traitance est devenue une obligation plus qu'un choix. Cependant, dans le souci de répondre aux besoins des clients en termes de qualité, de coût et de délai, une gestion conjointe de la production et de la maintenance est également indispensable. Nous signalons que la maintenance intégrée à la production est devenue un domaine de recherche fertile.

L'appel au concept de sous-traitance dans le cadre de la gestion intégrée de la maintenance et de la production a fait son apparition en 2007 par (Dellagi, Rezg & Xie, 2007). Les auteurs ont traité le cas d'une machine unique fabriquant un seul type de produit, afin de répondre à une demande constante. Dans des conditions données, ils ont présenté une politique de maintenance améliorée qui pouvait être obtenue en offrant le meilleur âge de maintenance préventive en se basant sur l'historique de la machine principale et l'état de la machine sous-traitante. Dans le même contexte, le modèle HMMS (Holt, Modigliani, Muth et Simom) a été adopté pour étudier le problème d'optimisation conjointe de la production et de la maintenance pour une seule machine, en tenant compte de la sous-traitance et du retour des produits par (Hajej, Dellagi & Rezg, 2014). Par ailleurs, les auteurs ont obtenu un plan de production optimal et un programme de maintenance préventive, également les produits non conformes retournés par les clients ont été transmis à un sous-traitant pour être recyclés. Nous signalons que le modèle HMMS présente une simplicité du résultat ; son inconvénient est que le problème devient complexe lorsque le modèle traite le cas d'un système multi-produits et multi-machine.

De plus, sans tenir compte de la contrainte de sous-traitance, (Hajej, Dellagi et Rezg, 2011) ont développé un modèle sous forme quadratique. Ils ont étudié le cas de production et de maintenance pour une seule machine. Leur objectif est d'établir un plan de production / maintenance économique répondant à une demande aléatoire. En effet, le problème peut être étendu à  $n$  machines ( $n > 1$ ) (Rezg, Xie & Mati, 2004). Tout d'abord, les auteurs ont proposé une méthode d'optimisation intégrée de la maintenance préventive et le contrôle des stocks pour une seule machine. Ensuite, ils ont étendu le problème à un système de production composé de  $n$  machines sans stock intermédiaire, en utilisant un logiciel de simulation pour modéliser et simuler le comportement de la chaîne de production de  $n$  machines. (Ayed, Dellagi & Rezg, 2011) ont considéré le cas d'une seule machine. Les auteurs ont étudié l'impact du taux de production sur le taux de défaillance, la maintenance et la quantité sous-traitée. D'autre part, (Hnaïen, Yalaoui, Mhadhbi & Nourelfath, 2016), ont traité la planification de la production et de la maintenance préventive en tenant compte du problème de dimensionnement de lot capacitif (CLSP) dans le cas d'une seule machine produisant des produits multiples. Récemment, l'aspect environnemental est traité par (Hajej, Rezg & Bouslikhane, 2019), les auteurs ont étudié l'impact du taux carbone sur l'optimisation de la production et de la maintenance basée sur l'externalisation.



Dans cette optique, nous constatons que la plupart des études qui se concentrent sur l'optimisation intégrée de la production et de la maintenance préventive considèrent généralement le cas d'un système de production simple constitué d'une seule machine. Cependant, en mode réel, l'entreprise manufacturière est constituée de plusieurs machines. Il apparaît donc clairement qu'il est nécessaire de traiter le problème de planification conjointe de la production et de la maintenance sous la contrainte de sous-traitance dans le cas de plusieurs machines. Dans la section suivante de ce chapitre nous présentons la contribution de notre travail ainsi que l'ensemble des objectifs de recherche de ce chapitre.

### **3.2 Contribution et objectifs de recherche**

Ce chapitre représente une extension du chapitre précédent, dont lequel nous traitons la gestion conjointe de la production et de la maintenance pour un système de production complexe constitué de plusieurs machines fabriquant un seul type de produit, alors qu'une grande partie des travaux existants est consacrée aux problèmes d'une seule machine. Dans la littérature, la gestion intégrée de la maintenance et de la production sous la contrainte de sous-traitance pour un système multi-ressources est peu étudiée. Notons que notre modèle s'inspire du modèle présenté par (Hajej, Dellagi & Rezg, 2011), traitant la dégradation d'un équipement en fonction de la cadence de production. Le coût total obtenu par leur modèle comprend les coûts de production, de stockage et de maintenance, dans le cas d'un système de fabrication composé d'une seule machine.

Dans cette optique, la gestion conjointe sous la contrainte d'externalisation dans le cas du système multi-machine est plus compliquée au niveau de la modélisation et de la résolution du problème. De plus, la tâche la plus importante dans le milieu productif est l'affectation des travaux aux machines (Sobrino, Cazañas, Ružarovský & Holubek, 2018). Notre but consiste à attribuer la quantité à produire pour chaque machine durant chaque période de l'horizon de planification. Dans le modèle de (Medhioub, Hajej & Rezg, 2014), les auteurs ont mentionné le concept de machines parallèles dans le contexte de la location de machines. Cependant, nous allons développer un modèle intégré dans le mode incertain pour identifier les activités de production et de sous-traitance dans le cadre de la maintenance intégrée à la production pour plusieurs machines. De plus, la deuxième particularité de notre travail réside dans le coût unitaire de la sous-traitance qui est variable, cela signifie que le coût unitaire de la sous-traitance dépend de la quantité sous-traitée. Cette contrainte a montré une optimisation remarquable au coût total dans nos travaux précédents (Hafidi, El Barkany & Mahmoudi, 2018), en la comparant avec la littérature. En conséquence, la variation du coût unitaire et de la quantité de sous-traitance, permet de garantir un choix optimal entre plusieurs sous-traitants. Ainsi, l'étude de l'impact de la dégradation des systèmes de production sur les plans de production, de maintenance et de sous-traitance est prise en compte.

A cet effet, nous soulignons brièvement l'intérêt de l'étude de la dégradation des systèmes de production sur l'amélioration des performances de l'entreprise. Puis, nous présentons les caractéristiques de la ligne de production. Nous proposons également notre propre formulation mathématique traitant l'intégration de la production et de la maintenance lorsque la demande est variable dans le temps et sous un niveau de service requis. L'objectif de la politique de maintenance préventive est de réduire le risque de défaillance ainsi que de minimiser les réparations en cas de panne. Cependant, la raison principale de notre approche est de déterminer simultanément pour chaque période, tout d'abord, le taux de production de la ligne qui dépend du temps de travail des machines, ensuite, la quantité sous-traitée durant chaque période sachant que chaque quantité sous-traitée correspond à un coût unitaire de sous-traitance, enfin, le taux de maintenance préventive de chaque machine, puisque les machines ne produisent pas nécessairement les mêmes quantités de

produits. Pour ce faire, nous optimisons le coût total incluant le coût de production, de stockage, de retard, de sous-traitance et de maintenance.

Le tableau 3.1 présente une comparaison entre les caractéristiques de notre modèle et les modèles qui nous inspirent, dans le but de montrer notre contribution et l'originalité de notre travail.

**Tableau 3.1 : Comparaison des références existantes et originalité**

<b>Approche</b>	<b>Demande</b>	<b>Système de production</b>	<b>Maintenance</b>	<b>Coût total</b>	<b>Stratégie de sous-traitance</b>
<i>(Hafidi, EL Barkany, EL Mhamedi &amp; Mahmoudi, 2020)</i>	Stochastique	Multi-machine	La détérioration en fonction de son taux de production	Production, sous-traitance, stockage, maintenance	Variation du coût unitaire de la sous-traitance en fonction de la quantité sous-traitée
<i>(Medhioub, Hajej &amp; Rezg, 2014)</i>	Stochastique	Multi-machine	La stratégie de maintenance est absente	Production, stockage, machines de location	Sans contrainte de sous-traitance
<i>(Hajej, Dellagi &amp; Rezg, 2011)</i>	Stochastique	Machine unique	La détérioration en fonction de son taux de production	Production, stockage, maintenance	Sans contrainte de sous-traitance
<i>(Dellagi, Rezg &amp; Xie, 2007)</i>	Connue et constante	Machine unique	Défaillances aléatoires	Maintenance	Avec contrainte de sous-traitance

Pour cela, nous allons développer un modèle de planification intégrée de la production et de la maintenance en tenant compte d'une stratégie de choix de sous-traitance. Des approches d'optimisation seront appliquées afin de déterminer la politique de contrôle la plus optimale. Cette dernière permettra de comprendre l'influence de la dégradation des systèmes de production sur les plans de production, de maintenance et de sous-traitance. Du point de vue fiabilité, une attention particulière sera accordée à la dégradation. En revanche, il est indispensable de savoir et comprendre l'intérêt de l'étude de la notion de la dégradation des systèmes de production et ses causes seront présentées dans la suite.

### **3.3 La dégradation des systèmes de production**

En pratique, l'étude de la dégradation doit être prise en compte lors de l'élaboration des politiques de contrôle au niveau de l'entreprise. Il existe une forte dépendance entre la production, la maintenance et la dégradation des systèmes de production. On constate que l'évolution de la dégradation contribue à la baisse des performances de production. De même, la production contribue à la dégradation des systèmes de production, d'où la nécessité d'une stratégie de maintenance en vue de minimiser la dégradation de l'unité de production (Ouyang We., 2020).

A ce sujet, il semble beaucoup que la stratégie de maintenance est importante au niveau d'amélioration des performances de l'entreprise. Notons que le système de production tombe en panne lorsque le niveau de dégradation dépasse un seuil de défaillance (Phuc, Voisint, Levratj, Lung, 2013). A cet effet, le niveau de dégradation du système après les actions de maintenance est plus faible qu'avant (Zhang, Xu, Chen & Li, 2018). En effet, la stratégie de maintenance traditionnelle est moins coûteuse et elle est basée généralement sur un seuil d'alarme statique (Chouikhi, Dellagi & Rezg, 2012). Bien que dans le contexte technique et économique, la maintenance est essentiellement fondée sur le suivi dynamique de l'état de dégradation visant à définir la meilleure politique de maintenance.

De nos jours, il est primordial de prendre en compte la dégradation des systèmes de production lors de la planification de la production et de la maintenance, en dépit du fait que le suivi de cette dégradation génère des coûts supplémentaires pour l'entreprise (Hajej, Dellagi & Rezg, 2009). La dégradation des systèmes de production provoque la pire chose qui puisse arriver, à savoir l'arrêt de la chaîne de production en raison de pannes. (Hajej, Bistorin & Rezg, 2012) ont examiné l'influence du taux de production sur le taux de dégradation ainsi que sur la disponibilité des équipements. Les auteurs ont affirmé que la prise en compte de la dégradation des systèmes de production en fonction de la cadence de production est peu étudiée dans la littérature. Ensuite, (Hajej, dellagi & Rezg, 2009) ont évalué l'influence du taux de production sur la dégradation des systèmes de production ce qui justifie l'utilisation du plan de production dans la définition du coût de maintenance. Dans cette optique, (Zhang, Xu, Chen & Li, 2018) ont présenté deux types de dégradation. Le premier type est appelé dégradation continue et elle est due à l'utilisation continue des systèmes de production. Le deuxième type est la dégradation instantanée qui est causée par des chocs aléatoires. En effet, les auteurs ont cité des exemples de dégradation à l'usage tels que :

- L'usure des roulements ;
- Le desserrement des assemblages boulonnés ;
- L'instabilité de fonctionnement des assemblages.

L'exploitation des systèmes de production engendre l'augmentation du niveau de dégradation, d'où la nécessité de prendre en compte le vieillissement et la dégradation lors des décisions de maintenance (Liu, Wu, Xie & Kuo, 2017). Par conséquent, les décideurs doivent prendre en compte le processus de dégradation lors de l'élaboration des plans de maintenance et de production. La cible principale de la politique de contrôle est le maintien du processus à l'état opérationnel, en introduisant les actions de maintenance préventive et corrective. De plus, (Colledani & Tolio, 2012) ont confirmé que l'augmentation des actions de suivis de la dégradation améliore considérablement la qualité des pièces fabriquées. La dégradation des machines représente un indicateur pour le département qualité. Autrement dit, la dégradation progressive affecte la qualité des produits en augmentant le taux des pièces non conformes par lot (Gouiaa-Mtibaa, Dellagi, Achour & Erray, 2016).

### **3.4 Les caractéristiques des lignes de production**

Une chaîne de production est définie comme un ensemble de machines reliées entre elles et travaillant en commun pour accomplir une tâche, telle que la production d'un produit donné (Belmansour A.T., 2007). Elle est évaluée en fonction des indicateurs de performance, notamment le taux de production et le stock tampon (Ouazene Y., 2013). Le taux de production désigne le nombre de pièces par unité du temps (Dallery & Gershwin, 1992). Ensuite, le second indicateur est le stock tampon qui correspond à la somme des niveaux moyens des stocks intermédiaires. Jusqu'à présent, seules les lignes de production en série ont été largement discutées. En fait, il s'agit de la configuration la plus étudiée dans la littérature. Plusieurs autres configurations existent. On peut noter la configuration parallèle est utilisée lorsque plusieurs machines effectuent la même opération à un moment précis du processus, afin d'augmenter le taux de production.

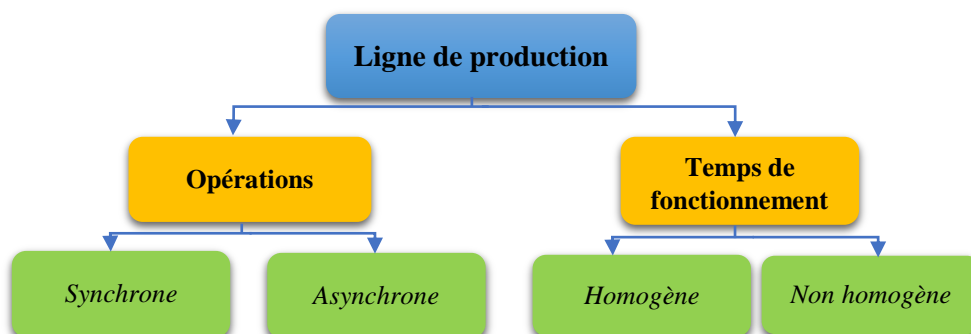
Nous présentons, par la suite, les travaux qui ont traité un système de production composé de machines parallèles. Dans (Kenné, Boukas & Gharbi, 2003), les auteurs ont étudié un système de fabrication soumis à une défaillance composé de machines identiques et chaque machine fabrique un seul type de produit. Le but étant d'optimiser le taux de production et le taux de réparation des machines. Dans le cas de machines parallèles, l'intégration de la maintenance préventive et de la

planification tactique de la production pour un système de production composé d'un ensemble de composants parallèles est l'objectif du travail de (Nourelfath & châtelet, 2012). Ils ont montré que la maintenance de plusieurs composants coûte conjointement moins de temps et d'argent que pour chaque composant séparément. Leur objectif est de minimiser les coûts de maintenance préventive et corrective, de configuration, de stockage, de réapprovisionnement et de production, tout en satisfaisant la demande pendant l'horizon de planification, en déterminant une stratégie intégrée de dimensionnement des lots et de maintenance préventive. De plus, (Kim & Glock, 2018) ont mené une étude sur le cas de plusieurs systèmes parallèles fabriquant un seul type de produit. La capacité des machines parallèles est supérieure à la demande. Ainsi, le taux de production varie en fonction de la demande afin d'exploiter les différentes structures de coûts des machines disponibles. Ils ont adopté un modèle mathématique déterministe traitant la planification de la production, en vue de choisir les machines ainsi que la manière de les faire fonctionner.

Dans le contexte de la location de machines (leasing machines), (Tarek, Hajej & Rezg, 2016) et (Medhioub, Hajej & Rezg, 2014) ont examiné un plan de maintenance intégré pour un système de fabrication constitué de plusieurs machines parallèles. Ces machines doivent répondre à une demande aléatoire, en minimisant le coût total de production et en assurant une maintenance optimale. Leur objectif est de définir le plan de production des machines, en tenant compte du niveau de service requis pour la dégradation de chaque machine. De plus, l'optimisation multi-objectif a été au centre des travaux de (Wang & Liu, 2015). Dans leur article, ils ont étudié le problème de la planification multi-objectif de machines parallèles avec deux types de ressources (machines et moules) et des activités de maintenance préventive flexibles sur les ressources. L'objectif était de minimiser simultanément le temps nécessaire à l'aspect production et l'indisponibilité du système. Pour résoudre leur problème, ils ont adopté une méthode d'optimisation intégrée multi-objectif avec adaptation de la NSGA-II.

En toute généralité, une machine isolée se caractérise par le temps de fonctionnement, le temps de travail de la machine, etc. A cet effet, le temps de fonctionnement représente le temps nécessaire pour une opération sur une machine isolée. Il peut être déterministe s'il est connu en avance et stochastique s'il est variable et aléatoire. En outre, le temps de travail des machines de la ligne peut servir comme élément de classification des systèmes de production présenté dans la figure 3.1, où l'on distingue (Ouazene Y., 2013) :

- **Un système de production synchrone** : toutes les machines commencent leurs opérations en même temps et les terminent en même temps (le système asynchrone est l'inverse) (Ambani S.M., 2011) ;
- **Un système de production homogène** : si les temps de fonctionnement des machines de la ligne sont identiques (système non-homogène est le contraire) (Belmansour A.T., 2011).



**Figure 3.1** : Classification du système de la ligne de production

### 3.5 Description du problème : notations et hypothèses

Dans l'environnement industriel, les politiques de production sont généralement influencées par des incertitudes notamment la demande aléatoire et la variation de la disponibilité. A ce stade, il est nécessaire d'améliorer les relations entre les entreprises dans le sens d'une collaboration pour réduire ces incertitudes.

Pour mettre en évidence la complexité du système étudié, la situation d'industrialisation considérée se compose de deux entreprises, le contractant et l'entreprise sous-traitante. En effet, le donneur d'ordres dispose d'un système de production de  $m$  machines montées en parallèle fabriquant un seul type de produit. Etant donné que le donneur d'ordres reçoit des demandes aléatoires au cours du temps  $d_k$  caractérisées par une distribution normale avec premier et deuxième moment statistique. En fait, la demande  $d_k$  dépasse la capacité de production maximale combinée de l'ensemble des machines  $U_{\max}$ . Pour répondre à cette demande, le DO recourt à l'externalisation pour compenser la demande manquante. A cet égard, nous étudions le problème de la gestion intégrée de la maintenance et de la production dans le cas d'un système de production complexe composé de multi-machine. Notons que les machines parallèles sont dégradables en fonction du temps et de la cadence de production. Par conséquent, nous considérons l'influence du taux de production sur la dégradation du système de fabrication. Etant donné la cible principale est de déterminer pour chaque machine et durant chaque période le taux de production, le taux de maintenance préventive et finalement la quantité à sous-traiter. Notre modèle sera distingué par la multiplicité des machines, la dégradation de la ligne de production, la demande aléatoire, le niveau de service, la variation de la cadence de production, la variation du taux de maintenance préventive et la variation du taux de sous-traitance.

#### 3.5.1 Description du problème industriel

Nous étudions d'abord le problème d'optimisation de la stratégie de production et de maintenance pour un système de production constitué de multi-machine synchrone et homogène. Notre système de production proposé fabrique un seul type de produit manufacturier pendant un horizon de production fini défini par  $H$ . En outre, le taux de production combiné pour chaque période  $k$  est désigné par  $U_k$ . Ensuite, chaque machine est caractérisée par une quantité de produits  $u_{ik}$  déterminée en fonction de la quantité de production identique  $u$  et de temps de travail de chacune durant chaque période  $t_{ik}$ . Nous soulignons que la quantité de production de chaque machine est considérée identique pour toutes les machines. Cependant, le système de production dispose d'un magasin  $S$  où sont stockés les produits fabriqués par le donneur d'ordres et par le sous-traitant. Les demandes aléatoires sont satisfaites à partir du stock  $S$  pendant l'horizon de production. Nous précisons qu'il n'y a pas de stock intermédiaire entre les machines parallèles.

Il faut garder à l'esprit que les défaillances aléatoires, la demande aléatoire, la disponibilité et la fiabilité des équipements font partie des incertitudes qui influencent les politiques de production et de maintenance des systèmes de fabrication. Face à ces incertitudes, les entreprises choisissent une politique de collaboration avec les entreprises sous-traitantes. Ainsi, la nécessité d'améliorer la situation de l'industrie exige certainement de bonnes décisions et une gestion efficace. Ces décisions peuvent être prises pour améliorer la qualité des produits, réduire les coûts et optimiser le niveau de service à la clientèle. La figure 3.2 montre la structure envisagée du système de fabrication de notre approche développée.

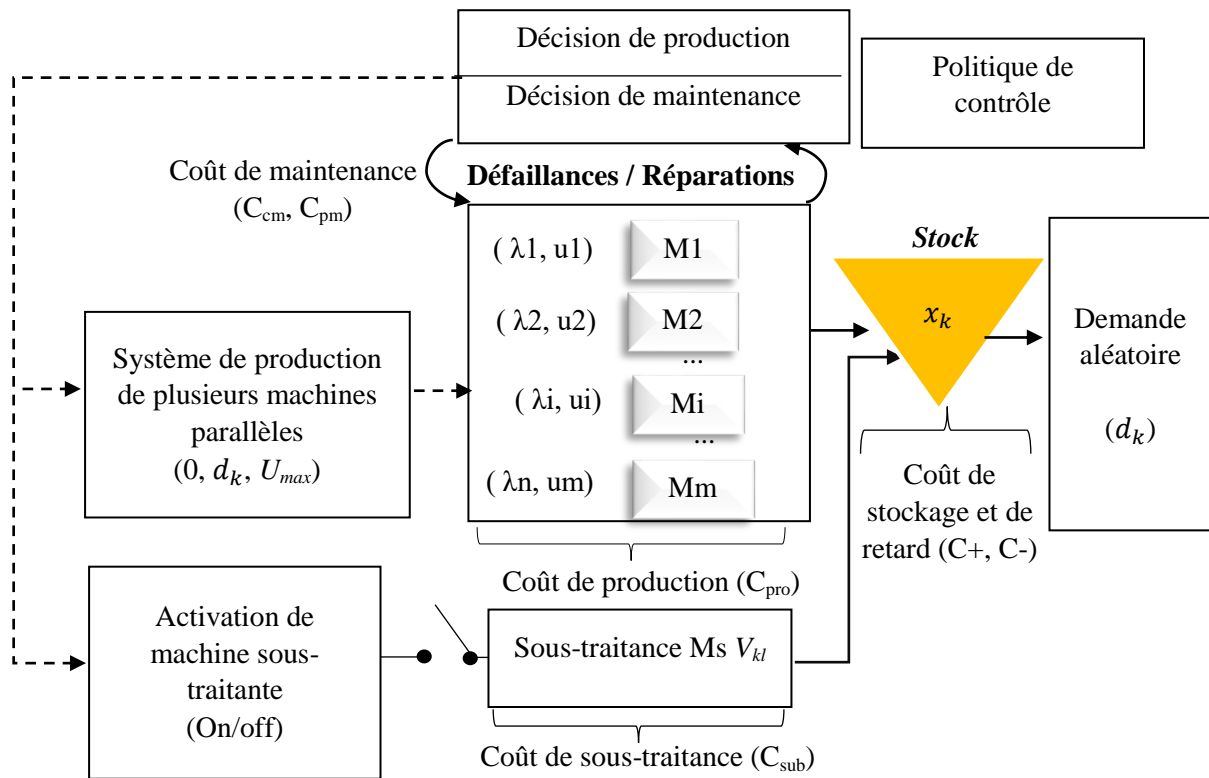


Figure 3.2 : Structure considérée du système de fabrication

### 3.5.2 Hypothèses et notations

Avant d'établir notre modèle analytique, il est nécessaire de présenter l'ensemble des notations et des hypothèses relatives à notre problématique.

#### 3.5.2.1 Indices

- k Indices de production de la période,
- i Indice des machines,
- l Indice du rang du coût unitaire de sous-traitance.

#### 3.5.2.2 Variables de décisions

- $U_{ki}$  Taux de production de l'entreprise manufacturier de la machine  $i$  ( $i=1, \dots, m$ ) pendant la période  $k$  ( $k=1, \dots, N$ ),
- $V_{kl}$  Taux de production des sous-traitants à la période  $k$  ( $k = 1, \dots, N$ ) correspondant au coût unitaire de la classification de la sous-traitance ( $l = 1, \dots, L$ ),
- $\theta_{ik}$  Taux de maintenance préventive de la machine  $i$  ( $i=1, \dots, m$ ) pendant la période  $k$  ( $k=1, \dots, N$ ),
- $t_{ik}$  Temps de travail de la machine  $i$  ( $i=1, \dots, m$ ) durant la période  $k$  ( $k=1, \dots, N$ ),
- $T_i$  Intervalle de temps entre deux actions de maintenance préventive successives de la machine  $i$  ( $i=1, \dots, m$ ).

Notons que le taux de production de la machine  $i$  pendant la période  $k$  et le taux de maintenance préventive de la machine  $i$  à la période  $k$  ( $U_{ki}, \theta_{ik}$ ) sont équivalents à ( $t_{ik}, Ti$ ) qui sont le temps de travail de la machine  $i$  à la période  $k$  et l'intervalle entre deux actions de maintenance préventive successives de la machine  $i$ .

### 3.5.2.3 Paramètres du modèle

H	Horizon de planification,
$d_k$	Demande aléatoire durant chaque période $k$ ( $k=1, \dots, N$ ),
N	Nombre de période de cycle de production dans l'horizon de planification,
$\Delta t$	Durée de la période de production,
$M_i$	Les machines parallèles du système de production ( $i=1, \dots, m$ ),
$U_{\max}$	Borne supérieure du taux de production de la ligne,
$U_{\min}$	Borne inférieure du taux de production de la ligne,
a	Niveau de service,
$t_{\max}$	Le temps de travail maximal de la machine,
$t_{\min}$	Le temps de travail minimal de la machine,
$\lambda_i$	Taux de défaillance de la machine $M_i$ ( $i=1, \dots, m$ ),
$x_k$	Niveau de stock durant la période $k$ ( $k=1, \dots, N$ ),
$C_{\text{pro}}$	Coût unitaire de production en interne,
$C_{\text{cm}}$	Coût unitaire de maintenance corrective,
$C_{\text{pm}}$	Coût unitaire de maintenance préventive,
$\theta_{\max}$	Taux maximal de maintenance préventive,
$\theta_{\min}$	Taux minimal de maintenance préventive,
$C_{\text{sub},l}$	Coût unitaire de la sous-traitance correspondant à la classification du barème ( $l=1, \dots, L$ ),
$V_{\max}$	Taux de production maximal de sous-traitance,
$C_+$	Coût unitaire de stockage,
$C_-$	Coût unitaire de retard.

### 3.5.2.4 Hypothèses simplificatrices

Dans notre approche proposée, les calculs sont basés sur les hypothèses suivantes :

- Nous étudions le cas d'un système de production synchrone et homogène.
- Le système de production est soumis à un processus de dégradation avec un taux de croissance.
- Nous considérons une dépendance entre le taux de production et le taux de défaillance.
- La dégradation est influencée par le taux de production.
- Toutes les machines sont sélectionnées pour la production et aucune machine n'est inactive pendant la production.
- Les machines parallèles de la chaîne de production sont identiques : exemple le temps de traitement du produit par unité de temps.
- Le taux de sous-traitance est considéré comme variable et dépend de la capacité de production ainsi que de la demande des clients.
- Les défaillances de toutes les machines de la chaîne de production sont détectées instantanément.
- Le temps de travail des machines de la chaîne de production est variable.

- Le coût d'installation par rapport à la variation du taux de production est négligeable.
- Nous supposons que les temps de réparation et de remplacement sont négligeables.
- Le stock  $S$  contient les produits fabriqués par l'entrepreneur et le sous-traitant, qui sont livrés directement au client.
- Le coût de la livraison des produits fabriqués est négligeable.
- Les coûts de stockage, de production et de maintenance ;  $C+$ ,  $C-$ ,  $C_{pro}$ ,  $C_{cm}$  et  $C_{pm}$  sont connus et constants.
- Le coût unitaire de la sous-traitance  $C_{sub}$  est variable en fonction de la quantité sous-traitée.
- La demande est aléatoire est caractérisée par son écart-type  $\sigma_{dk}^2$  et la demande moyenne  $\hat{d}_k$  pour chaque période  $k$  sont connus et constants.

### 3.6 Formulation du modèle mathématique

#### 3.6.1 Politique de production

Tout d'abord, la politique de contrôle envisagé implique le contractant et le sous-traitant. Cependant, le coût total prévu du modèle mathématique que nous proposons, comprend les coûts de production, de maintenance, de sous-traitance, de stockage et de retard. Bien que l'horizon de planification  $H$  est constitué de  $N$  périodes homogènes de durée  $\Delta t$ . Néanmoins, avant d'entamer le calcul des coûts de notre approche, nous déterminons dans un premier lieu la quantité totale de production de la ligne parallèle ainsi que le niveau de stock durant chaque période de l'horizon de planification, ce qui va nous servir par la suite dans la formulation mathématique de notre approche développée.

##### 3.6.1.1 Quantité totale de production de la ligne parallèle

Pour toute ligne de production, il est nécessaire de déterminer la quantité totale de production, suivant l'équation (3.1). A cet égard, nous considérons que toutes les machines de la chaîne de production sont identiques, mais le taux de production varie d'une machine à une autre. En effet, la quantité totale de production de la ligne parallèle est la somme des taux normaux de travail de l'ensemble des machines parallèles pendant la période  $k$  multipliée par la cadence de production identique de toutes les machines  $u$ . Elle est donnée par l'équation (3.2).

$$U_k(u, t_{ik}) = (u = (u_1, u_2, \dots, u_i, u_m) \geq 0, t_{ik} \geq 0) \quad (3.1)$$

$$U_k = u \sum_{i=1}^m t_{ik} \text{ pour } i \in (i = 1, \dots, m) \text{ et } k \in (k = 1, \dots, N) \quad (3.2)$$

Avec :

- $m$  : Nombre de machines montées en parallèle avec  $m > 1$ ,
- $U_k$  : Taux de production de ligne parallèle au cours de chaque période  $k$ ,
- $t_{ik}$  : Temps de travail normal des machines à ligne parallèle pendant chaque période  $k$ ,
- $u$  : Taux de production (identique pour toutes les machines).

##### 3.6.1.2 Niveau de stock durant chaque période

Nous signalons que le niveau de stock  $x_k$  pendant la période  $k$ , est égal au niveau des stocks à la période précédente  $k-1$  plus la somme du taux de production combiné des machines et du taux de



sous-traitance pendant la période  $k$ , moins la demande  $d_k$  pendant la même période  $k$ , comme indiqué dans l'équation (3.3) suivante :

$$x_k = x_{k-1} + \Delta t (U_k + V_{kl}) - d_k \text{ pour } k \in (k = 1, \dots, N) \text{ et } l \in (l = 1, \dots, L) \quad (3.3)$$

### 3.6.1.3 Coût de production

Le coût de production  $CP$  correspond au coût de production en interne de l'entreprise de fabrication principale. En effet, le coût de production est obtenu en multipliant le coût unitaire de production  $C_{pro}$  par la somme de la quantité totale de production de la ligne parallèle  $U_k$  au cours de chaque période  $k$  et de la durée de la période de production  $\Delta t$  au cours de la même période  $k$  le long de l'horizon  $H$ .  $\Delta t$ , comme indiqué dans l'équation (3.4) :

$$CP(U_k) = C_{pro} \Delta t \sum_{k=1}^N U_k \text{ pour } i \in (i = 1, \dots, m) \text{ et } k \in (k = 1, \dots, N) \quad (3.4)$$

### 3.6.1.4 Coût de sous-traitance

Nous considérons la dépendance entre le taux de sous-traitance et le coût unitaire de la sous-traitance présentés par (Haoues, Dahane, Mouss & Rezg, 2013) et (Hafidi, El Barkany & Mahmoudi, 2018). Il est évident que le contractant ne peut pas sous-traiter des quantités différentes avec le même coût unitaire de sous-traitance. Ainsi, le DO est toujours à la recherche d'un sous-traitant avec un coût minimal pour maximiser ses gains. En contrepartie, l'entreprise sous-traitante vise également à augmenter son profit. Afin de garantir une relation gagnant-gagnant entre le contractant et le sous-traitant, ce dernier propose au donneur d'ordres un barème de prix de sous-traitance en fonction de la quantité sous-traitée (Haoues, Dahane, Mouss & Rezg, 2013). Il est exprimé par l'équation (3.5).

$$C_{sub} = \begin{cases} C_{sub_1} & \text{si } 0 < V_{kl} \leq V_{k1} \\ \dots & \dots \\ C_{sub_l} & \text{si } V_{kl-1} < V_{kl} \leq V_{kl} \\ \dots & \dots \\ C_{sub_L} & \text{si } V_{kL-1} < V_{kl} \leq V_{max} \end{cases} \quad (3.5)$$

Nous supposons que :

$$C_{sub_1} < \dots < C_{sub_l} < \dots < C_{sub_L}$$

En effet, l'indice  $l$  représente le classement des coûts unitaire de sous-traitance en fonction de la quantité sous-traitée  $l \in (l = 1, \dots, L)$ .

Par conséquent, le coût total de la sous-traitance  $OS$  peut être exprimé comme suit :

$$OS = C_{sub_l} \Delta t \sum_{k=1}^N V_{kl} \text{ pour } k \in (k = 1, \dots, N) \text{ et } l \in (l = 1, \dots, L) \quad (3.6)$$

### 3.6.1.5 Coût de stockage

Le coût de stockage concerne chaque unité de stock positif restant à la fin d'une période, tel qu'est définis par l'équation (3.7). En effet, ce coût comprend le coût de stockage durant chaque période

de temps de l'horizon de planification. Il est égal au coût unitaire de stockage multiplié par le stock positif durant la période  $k$ . L'expression du stock positif est donnée par l'équation (3.8).

$$IC = C^+ x^+ \quad (3.7)$$

Avec :

$$x^+ = \max(0, x) = \sum_{k=1}^N x_k \text{ pour } k \in (k = 1, \dots, N) \quad (3.8)$$

### 3.6.1.6 Coût de retard

Le coût de retard, appelé en anglais backlogging, est donné par l'équation (3.10). Ce coût est engendré par les commandes produites en retard ou bien non-exécutées, en raison d'accumulation du service ou bien d'accumulation d'une commande produite. Il est impossible de respecter le délai, d'où le retard de la livraison des commandes clients. En effet, nous supposons dans notre modèle un retard plutôt que des pertes de ventes, ou cas où la demande à une période donnée ne peut pas être satisfaite. Pour calculer le coût de retard, nous supposons que  $x_k$  peut prendre des valeurs positives et négatives selon les conditions de chaque période, comme indiqué par l'équation (3.10). De plus, un coût de pénalité unitaire  $C^-$  est facturé pour chaque unité en retard durant chaque période de temps de l'horizon de planification (équation 3.9).

$$BC = C^- \cdot (-x)^+ \quad (3.9)$$

Avec :

$$(-x)^+ = \sum_{k=1}^N \max(-x_k, 0) \text{ pour } k \in (k = 1, \dots, N) \quad (3.10)$$

### 3.6.2 Stratégie de maintenance

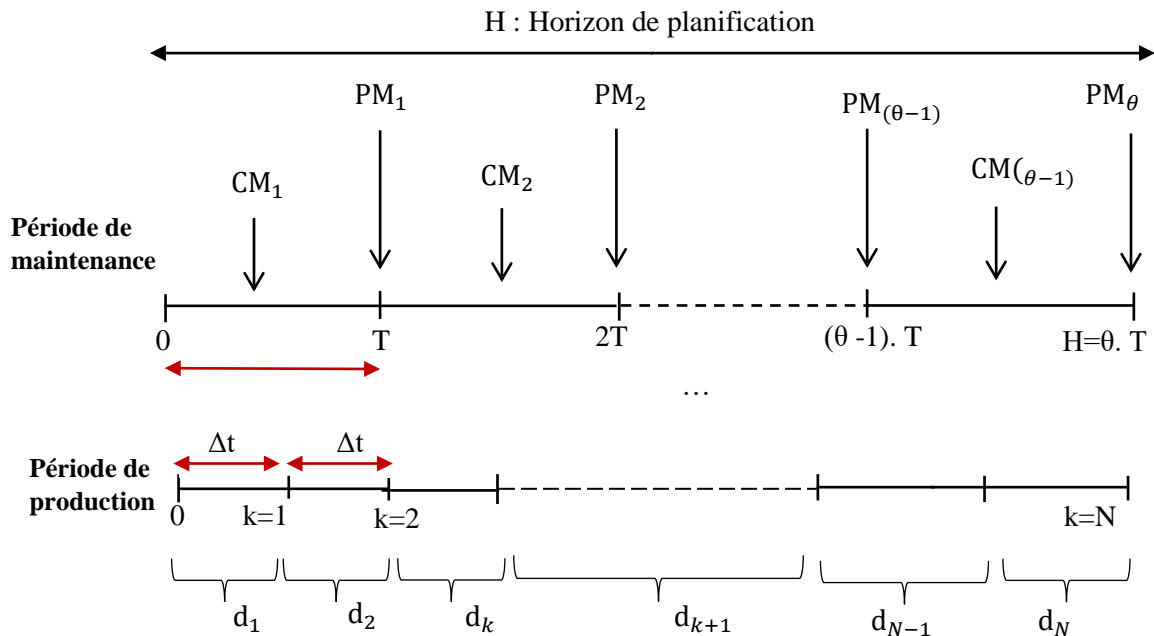
Une chaîne de production doit être maintenue en bon état de fonctionnement pour faire face à la variation de la demande et à la détérioration des systèmes de production (Xia, Fang, Gebraeel, Xi & Pan, 2019). Par conséquent, il est indispensable de prendre en compte les politiques de maintenance lors d'élaboration des plans de production. En effet, notre stratégie de maintenance adoptée ne concerne que les machines parallèles de l'entreprise contractante, car l'entreprise sous-traitante gère elle-même la maintenance de ses équipements. Pour cela, nous établissons les hypothèses suivantes :

- La stratégie de maintenance pour toutes les machines parallèles de l'entreprise de manufacturière est une maintenance préventive avec réparation minimale sur l'horizon fini  $H$ .
- Les actions de maintenance préventive MP sont supposées être parfaites ; les machines parallèles sont alors considérées comme neuves "as good as new" après chaque action de maintenance préventive.
- Lorsqu'une machine tombe en panne entre deux révisions successives (MP), une réparation minimale est effectuée (MC).
- Nous considérons que le taux de défaillance  $\lambda$  est continu et cumulatif.
- Une réparation minimale permet de remettre l'équipement dans un état neuf (As good as new).

- La variation du taux de production a un impact sur la dégradation de la machine.
- Les durées des actions de maintenance corrective et préventive sont négligeables.
- L'optimisation de la maintenance consiste à déterminer les fractions de l'horizon  $H$  pendant lesquelles les actions de maintenance préventive doivent être effectuées.
- L'intervalle de temps  $[0, H]$  est divisé en  $\theta$  parties de durée  $T$ .
- Une action de maintenance préventive est effectuée  $n.Ti$  ( $n = 1, 2, \dots, \theta$ ) et ( $i = 1, \dots, M$ ), avec :  $T_i > \Delta t$ .
- Nous considérons que  $\theta i$  est le nombre d'actions de maintenance préventive pendant l'horizon  $H$ .
- Nous notons que  $In$  indique la partie entière. Par conséquent, nous considérons donc que la relation entre  $\theta_i^*$  et  $T_i^*$  est donnée par l'équation (3.11).

$$T_i^* = In\left(\frac{H}{\theta_i^*}\right) \times \Delta t \quad (3.11)$$

La figure 3.3 présente la stratégie de maintenance adoptée pour notre système de production.



**Figure 3.3 :** Stratégie de maintenance envisagée du système de production

L'optimisation de la stratégie de maintenance se caractérise notamment par le nombre optimal d'actions de maintenance préventive  $\theta_i^*$  à effectuer pour chaque machine  $i$  sur l'horizon fini  $H$ , ainsi que la durée entre deux actions successives de maintenance préventive  $T_i$ . Cependant, pour calculer le coût de la maintenance, nous supposons que les coûts  $C_{pm}$  et  $C_{cm}$  induits par les actions de maintenance préventive et corrective sont respectivement connus et constants, avec  $C_{cm} \gg C_{pm}$ . L'expression du coût de maintenance  $MC$  est donnée par l'équation (3.12) en se basant sur le modèle proposé par (Hajej, Turki & Rezg, 2015).

$$MC(U_i, \theta_i) = C_{pm}(\theta_i - 1) + C_{cm} A_i(U_i, \theta_i) \text{ pour } i \in (i = 1, \dots, m) \quad (3.12)$$

Où :

- $MC(U_i, \theta_i)$  : Le coût de la stratégie de maintenance de la machine  $i$ .

- $A_i(U_i, \theta_i)$  : Le nombre moyen de pannes pour la machine  $i$  au cours de l'horizon de planification  $H$  selon le plan de production de chaque machine.
- $\theta_i$  : Le nombre d'actions de maintenance préventive pour la machine  $i$  pendant l'horizon  $H$ .

En effet, la loi de probabilité de dégradation d'une machine est décrite par la fonction de densité de probabilité  $f(t)$  et sa fonction de répartition  $F(t)$  appelée aussi la fonction de défaillance, suivant l'équation (3.13). De ce fait, le taux de défaillance  $\lambda(t)$  augmente avec le temps et le taux de production  $u(t)$ . C'est pourquoi, une action de maintenance préventive est programmée en fonction de la cadence de production afin de réduire la dégradation de la machine.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (3.13)$$

De plus, nous considérons que le taux de défaillance  $\lambda$  est continu et cumulatif. Ainsi, le taux de défaillance final est la somme des taux de défaillance pour chaque période. Cela, exprime l'influence du taux de production sur la dégradation du système de fabrication (Hajej, Dellagi & Rezg, 2009). En outre, la fonction du taux de défaillance  $\lambda_{ik}(t)$  est linéaire. Elle est donnée par l'équation (3.14). Ensuite, le taux de défaillance nominal  $\lambda_{in}(t)$  correspondant à une cadence de production maximale.

$$\lambda_{ik}(t) = \lambda_{i(k-1)}(\Delta t) + \frac{U_{ik}}{U_{max}} \lambda_{in}(t) \quad \forall t \in [0, \Delta t] \quad (3.14)$$

Ensuite, l'équation (3.14) peut être également exprimée aussi comme suit :

$$\lambda_{ik}(t) = \lambda_0(t_0) + \sum_{p=1}^{k-1} \frac{U_{ip}}{U_{max}} \lambda_{in}(\Delta t) + \frac{U_{ik}}{U_{max}} \lambda_{in}(t) \quad \forall t \in [0, \Delta t] \quad (3.15)$$

Du point de vue fiabilité, le système de production est décrit par la loi de défaillance caractérisant les conditions nominales. Elle est représentée suivant la loi de Weibull définie sur la base des paramètres tels que le paramètre d'échelle  $\beta$ , le paramètre de forme  $\alpha$  et le paramètre de position  $\gamma$ . Ainsi, le taux de défaillance initial est représenté suivant l'équation (3.16).

$$\lambda_{in}(t) = \frac{\alpha}{\beta} \times \left( \frac{t - \gamma}{\beta} \right)^{\alpha-1} \quad (3.16)$$

Le nombre moyen de pannes pour chaque machine  $i$  est calculé selon le plan de production de chaque machine  $i$ , comme il est indiqué par l'équation (3.17).

$$A_j = \sum_{i=1}^j \int_0^{\Delta t} \lambda_{ik}(t) dt \quad (3.17)$$

Par ailleurs, le nombre moyen de défaillances pour la machine  $i$  au cours de l'horizon de planification  $H$  peut-être aussi exprimé par l'équation (3.18).

$$A_i(U_i, \theta_i) = \sum_{j=0}^{(\theta-1)} \left( \sum_{i=\ln(j \frac{T}{\Delta t})+1}^{(j+1) \frac{T}{\Delta t}} \sum_{i=1}^m \int_0^{\Delta t} \lambda_{ik}(t) dt \right) + \sum_{k=0}^H \sum_{i=1}^m \int_0^{\Delta t} \lambda_{ik}(t) dt \quad (3.18)$$

### 3.7 Formulation mathématique du modèle proposé

La détermination du plan de production, la politique de maintenance et la stratégie de sous-traitance revient à développer et à minimiser le coût total relatif des deux systèmes de production. Ce problème peut être formulé comme un problème de contrôle optimal linéaire et stochastique sous contrainte du niveau du service fourni. Notre cible principale est de minimiser la fonction objectif, en tenant en compte à la fois des différentes contraintes. En fait, le coût total par unité de temps pour notre plan intégré de production et de maintenance comprend :

- Le coût de production : CP ;
- Le coût de stockage : IC ;
- Le coût de retard : BC ;
- Le coût de la sous-traitance : OS ;
- Le coût de maintenance : MC.

Le coût total linéaire stochastique de notre système peut être formulé par l'expression suivante :

Minimiser la fonction objectif :

$$C1 = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^m [C_{pro} \Delta \tau_k U_k + C_{sub} \Delta t V_{k,l} + C^+ \cdot x^+ + C^- \cdot (-x)^+ + C_{cm} C_i(U_i, \theta_i) + C_{pm}(\theta_i - 1)] \quad (3.19)$$

Sous les contraintes :

$$x_k = x_{k-1} + \Delta t (U_k + V_{kl}) - d_k \quad \forall (k = 1, \dots, N) \quad \forall (\ell = 1, \dots, L) \quad (3.20)$$

$$U_{min} \leq U_k \leq U_{max} \quad \forall (k = 1, \dots, N) \quad (3.21)$$

$$0 \leq V_{kl} \leq V_{max} \quad \forall (k = 1, \dots, N) \quad \forall (\ell = 1, \dots, L), \quad (3.22)$$

$$\theta_{min} \leq \theta_i \leq \theta_{max} \quad \forall (i = 1, \dots, m) \quad (3.23)$$

$$t_{min} \leq t_{ik} \leq t_{max} \quad \forall (k = 1, \dots, N) \quad \forall (i = 1, \dots, m) \quad (3.24)$$

$$Prob(x_k > 0) \geq a \quad \forall (k = 1, \dots, N) \quad (3.25)$$

$$U_k, \theta_i, t_{ik}, V_{kl} \geq 0 \quad \forall (k = 1, \dots, N) \quad \forall (\ell = 1, \dots, L) \quad \forall (i = 1, \dots, m) \quad (3.26)$$

Avec :

- L'équation (3.20) indique l'équation d'équilibre de stock ;
- L'équation (3.21) montre les bornes supérieure et inférieure du taux de production de l'ensemble des machines durant chaque période de temps  $k$  ;
- L'équation (3.22) indique les bornes supérieure et inférieure du taux de sous-traitance durant chaque période de temps  $k$  ;
- L'équation (3.23) représente les bornes supérieure et inférieure du taux de maintenance préventive de chaque machine  $i$  ;
- L'équation (3.24) montre les bornes supérieure et inférieure du temps de travail de chaque machine  $i$  durant la période  $k$  ;

- L'équation (3.25) modélise la contrainte du niveau de service qui représente le degré de degré de satisfaction de la demande client ;
- L'équation (3.26) exprime les contraintes logiques qui indiquent la non-négativité des variables de décision  $U_k, \theta_i, t_{ik}$  et  $V_{kl}$ .

### 3.8 Résolution du problème de contrôle

#### 3.8.1 Les étapes d'approche d'optimisation

Pour résoudre notre problème, nous avons préconisé trois méthodes d'optimisation exactes et approchées telles que fmincon et Pattern Search ainsi que les algorithmes génétiques. Ensuite, nous comparons les résultats de ces méthodes d'optimisation afin de choisir la meilleure solution optimale. Dans la littérature, nous avons constaté que PS, fmincon et les algorithmes génétiques ont prouvé une grande capacité de résolutions efficaces, traitant tous les types de problèmes concernant la fonction objectif ainsi que les contraintes.

La figure 3.4 synthétise les étapes de travail dans ce chapitre allant de la modélisation mathématique jusqu'à l'obtention de la politique de contrôle. Cependant, avant d'utiliser l'une des méthodes d'optimisation citée antérieurement, il est nécessaire de transformer le problème stochastique en un problème déterministe équivalent afin de faciliter sa résolution par la suite.

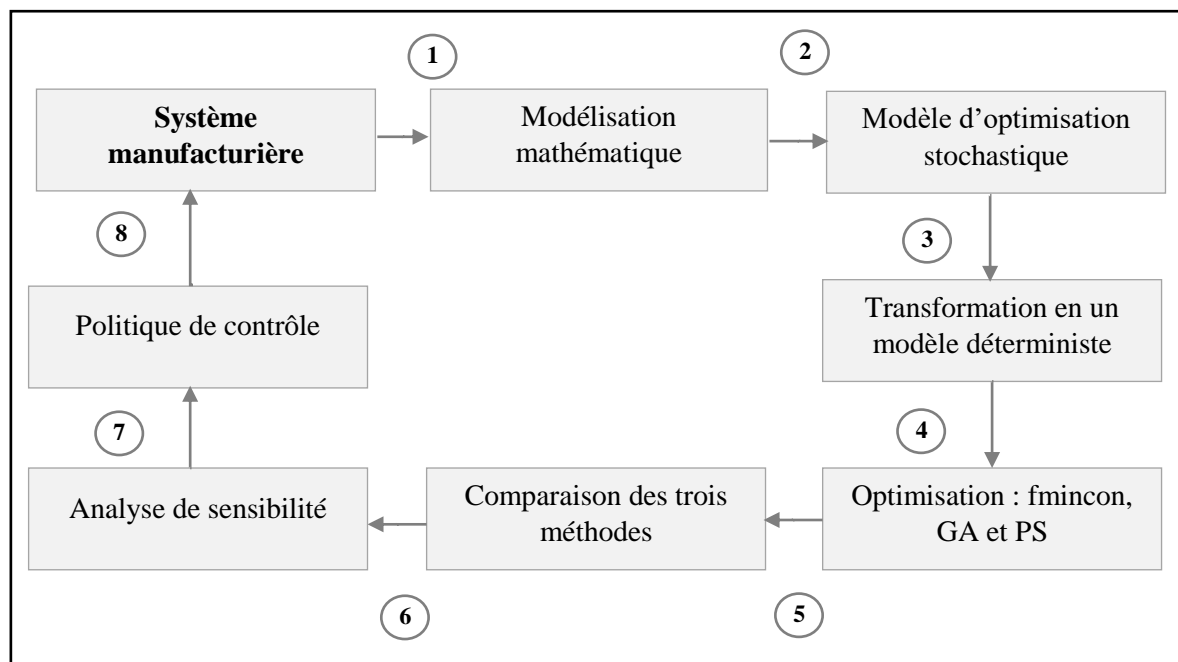


Figure 3.4 : Les étapes d'approche d'optimisation de notre modèle proposé

#### 3.8.2 Transformation du problème stochastique en un problème déterministe

Dans cette section, une optimisation conjointe de la production et de la maintenance est présentée en développant une étude analytique des politiques et en établissant un problème équivalent déterministe pour faciliter sa résolution. En général, il est difficile de résoudre notre problème stochastique avec ses hypothèses. A cet effet, la transformation d'un problème stochastique en un problème déterministe équivalent est nécessaire pour faciliter sa résolution. Parmi les caractéristiques du problème déterministe équivalent, on souligne l'importance de préserver les

principales propriétés du problème initial. Néanmoins, avant de continuer l'étape de transformation du problème, nous introduisons la notation indiquée dans la suite de ce paragraphe.

La demande est une variable aléatoire à son premier et deuxième moments statistiques connus pour chaque période  $k$ , telle que :  $E\{d_k\} = \hat{d}_k$  et  $V_{d_k} = \sigma_k^2 \quad \forall (k=1, \dots, N)$ .

L'écart-type de la demande est constant pour toutes les périodes, soit :

$$\sigma(d_k) = \sigma(d_{k+1}) = \sigma(d) \quad \forall (k=1, \dots, N)$$

Ensuite, nous signalons que les taux de production du contractant et ceux du sous-traitant sont constants pendant chaque intervalle du plan de production. Ceci explique que leurs écarts soient nuls, comme indiqué par l'équation suivante :

$$E\{U_k\} = U_k ; E\{V_{k,l}\} = V_{k,l} \text{ et } V_{U_k} = 0 ; V_{V_{k,l}} = 0 \quad \forall (k=1, \dots, N)$$

La variable de stockage  $x_k$  est décrite statistiquement par sa moyenne :  $E\{x_k\} = \hat{x}_k$  et sa variance  $V_{x_k}$ , telle que :  $E\{(x_k - \hat{x}_k)^2\} = V_{x_k} \quad \forall (k=1, \dots, N)$ .

Ensuite, l'équation d'équilibre du niveau de stockage peut être convertie à l'équation suivante :

$$E\{x_k\} = E\{x_{k-1} + \Delta t(U_k + V_k) - d_k\} \quad \forall (k=1, \dots, N)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + \Delta t (U_k + V_k) - \hat{d}_k \quad \forall (k=1, \dots, N) \quad (3.27)$$

Par conséquent, la différence entre les deux équations (3.3) et (3.27) est :

$$\begin{aligned} x_k - \hat{x}_k &= (x_{k-1} - \hat{x}_{k-1}) - (d_k - \hat{d}_k) \\ \implies (x_k - \hat{x}_k)^2 &= ((x_{k-1} - \hat{x}_{k-1}) - (d_k - \hat{d}_k))^2 \\ \implies E\{(x_k - \hat{x}_k)^2\} &= E\{((x_{k-1} - \hat{x}_{k-1}) - (d_k - \hat{d}_k))^2\} \\ \implies E\{(x_k - \hat{x}_k)^2\} &= E\{(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1})^2 - 2(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1})(d_k - \hat{d}_k) + (d_k - \hat{d}_k)^2\} \\ \implies E\{(x_k - \hat{x}_k)^2\} &= E\{(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1})^2\} + E\{(d_k - \hat{d}_k)^2\} - 2E\{(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1})(d_k - \hat{d}_k)\} \end{aligned}$$

Nous rappelons que  $x_k$  et  $d_k$  sont des variables indépendantes et nous pouvons déduire que :

$$E\{(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1})(d_k - \hat{d}_k)\} = E\{(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1})\} E\{(d_k - \hat{d}_k)\}$$

Nous obtenons aussi :

$$E\{(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1})\} = E\{x_{k-1}\} - E\{\hat{x}_{k-1}\} = 0$$

$$E\{(d_k - \hat{d}_k)\} = E\{d_k\} - E\{\hat{d}_k\} = 0$$

Par conséquent, nous obtenons :

$$E\{(x_k - \hat{x}_k)^2\} = E\{(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1})^2\} + E\{(d_k - \hat{d}_k)^2\}$$

$$V_{x_k} = V_{x_{k-1}} + V_{d_k} = V_{x_{k-1}} + \sigma_{d_k}^2$$

En effet, si nous supposons que  $V_{x_{k-1}} (k=1) = V_{x_0} = 0$  et  $\sigma_{dk} = \sigma_d$  sont constants pendant l'horizon de planification, nous aurons :

$$V_{x_k} = V_{x_{k-1}} + \sigma_d^2 \quad \forall (k=1, \dots, N)$$

$$\implies k=1: \quad V_{x_1} = V_{x_0} + \sigma_d^2 = \sigma_d^2$$

$$\implies k=2: \quad V_{x_2} = V_{x_1} + \sigma_d^2 = 2\sigma_d^2$$

$$\implies k=3: \quad V_{x_3} = V_{x_2} + \sigma_d^2 = 3\sigma_d^2$$

$$\implies \forall k: \quad V_{x_k} = V_{x_{k-1}} + \sigma_{dk}^2 = k \sigma_d^2 \quad \forall (k=1, \dots, N)$$

Or :  $V_{x_k} = k \sigma_d^2$  et  $V_{x_k} = E\{(x_k - \hat{x}_k)^2\}$

Donc :  $E\{(x_k - \hat{x}_k)^2\} = k \sigma_d^2$

$$\implies E\{(x_k)^2\} - \hat{x}_k^2 = k \sigma_d^2$$

$$\implies E\{(x_k)^2\} = k \sigma_d^2 + \hat{x}_k^2$$

Les autres paramètres sont des paramètres déterministes :

$$E\{t_{i,k}\} = t_{i,k} ; E\{\theta_{i,k}\} = \theta_{i,k} ; E\{t_{i,k}\} = t_{i,k} ; E\{C_{sub_l}\} = C_{sub_l} \quad \forall (k=1, \dots, N)$$

Ainsi, les variances des autres variables sont :

$$V_{x_k} = E\{(x_k - \hat{x}_k)^2\}; V_{t_{i,k}} = 0 ; V_{\theta_{i,k}} = 0 ; V_{T_{i,k}} = 0 ; V_{C_{sub_l}} = 0 \quad \forall (k=1, \dots, N)$$

En effet, nous utilisons les notations présentées antérieurement pour décrire les contraintes caractérisant la quantité totale de notre ligne de production ainsi que le niveau des stocks. Les deux contraintes peuvent être écrites sous une forme déterministe comme suit :

La quantité totale de la ligne de production est décrite selon l'équation suivante :

$$U_k = u \sum_{i=1}^m t_{ik} \quad \forall (k=1, \dots, N)$$

En effet, la contrainte du niveau de service est représentée par :

$$\text{Prob}(x_k \geq 0) \geq a \implies (W_k \geq U_a(x_k, a)) \text{ for } k \in (k=1, \dots, N)$$

$$W_k = \Delta\tau_k (U_k + V_k) \quad \forall (k=1, \dots, N)$$

Avec :

- $U_a()$  : Quantité minimale de production cumulée.
- $U_a(x_k, a) = V_{d,k} \cdot \varphi_{d,k}^{-1}(a) - x_{k-1} + d_k$  pour  $k \in (k=1, \dots, N)$ .
- $V_{d,k}$  : Variance de la demande  $d$  pendant la période  $k$ .
- $\varphi_{d,k}$  : Fonction de distribution gaussienne de la moyenne  $\hat{d}_k$  et variance  $V_{dk}$ .
- $\varphi_{d,k}^{-1}$  : Inverse de la fonction de distribution.

Ensuite, nous déterminons l'équivalent déterministe de la contrainte de niveau de service :



$$x_k = x_{k-1} + (U_k + V_k) \Delta t - d_k \quad \forall (k=1, \dots, N)$$

$$\text{Prob}(x_k \geq 0) \geq a \quad \forall (k=1, \dots, N)$$

$$\implies \text{Prob}(x_{k-1} + (U_k + V_k)\Delta t - d_k \geq 0) \geq a$$

$$\implies \text{Prob}(x_{k-1} + (U_k + V_k)\Delta t \geq d_k) \geq a$$

$$\implies \text{Prob}(x_{k-1} + (U_k + V_k)\Delta t - \hat{d}_k \geq d_k - \hat{d}_k) \geq a$$

$$\implies \text{Prob}\left(\frac{x_{k-1} + (U_k + V_k)\Delta t - \hat{d}_k}{V_{dk}} \geq \frac{d_k - \hat{d}_k}{V_{dk}}\right) \geq a$$

L'expression de  $\frac{d_k - \hat{d}_k}{V_{dk}}$  représente une variable aléatoire gaussienne de la demande  $d_k$ .

Nous supposons que  $\varphi_{d,k}$  est la fonction de distribution gaussienne de la demande, telle que :

$$\varphi_{d,k}\left(\frac{x_{k-1} + (U_k + V_k)\Delta t - \hat{d}_k}{V_{dk}}\right) \geq a$$

Avec  $\lim_{d_k \rightarrow -\infty} \varphi_{d,k} = 0$  et  $\lim_{d_k \rightarrow +\infty} \varphi_{d,k} = 1$ , nous constatons que  $\varphi_{d,k}$  est une fonction strictement croissante et différentiable, par conséquent  $\varphi_{d,k}$  est inversible.

$$\varphi_{d,k}\left(\frac{x_{k-1} + \Delta t(U_k + V_k) - \hat{d}_k}{V_{dk}}\right) \geq a \quad \Rightarrow \quad \frac{x_{k-1} + \Delta t(U_k + V_k) - \hat{d}_k}{V_{dk}} \geq \varphi_{d,k}^{-1}(a)$$

$$\implies x_{k-1} + \Delta t(U_k + V_k) - \hat{d}_k \geq \varphi_{d,k}^{-1}(a) V_{dk}$$

$$\implies \Delta \tau_k (U_k + V_k) \geq \varphi_{d,k}^{-1}(a) V_{dk} - x_{k-1} + \hat{d}_k$$

$$\implies W_k \geq \varphi_{d,k}^{-1}(a) V_{dk} - x_{k-1} + \hat{d}_k$$

Nous pouvons alors conclure que :

$$U_a(x_k, a) = V_{d,k} \cdot \varphi_{d,k}^{-1}(a) - x_{k-1} + d_k \quad \forall (k=1, \dots, N)$$

Ainsi, notre modèle déterministe équivalent du problème stochastique est le suivant :

Minimiser de la fonction objectif :

$$C2 : \tag{3.28}$$

$$\sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^m [C_{pro} \Delta \tau_k U_k + C_{sub} \Delta t V_{k,l} + C^+ \cdot x^+ + C^- \cdot (-x)^+ + C_{cm} C_i(U_i, \theta_i) + C_{pm}(\theta_i - 1)]$$

Sous les contraintes :

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + \Delta t (U_k + V_{kl}) - \hat{d}_k \quad \forall (k = 1, \dots, N) \quad \forall (\ell = 1, \dots, L) \tag{3.29}$$

$$U_{min} \leq U_k \leq U_{max} \quad \forall (k = 1, \dots, N) \tag{3.30}$$

$$0 \leq V_{kl} \leq V_{max} \quad \forall (k = 1, \dots, N) \quad \forall (\ell = 1, \dots, L) \quad (3.31)$$

$$\theta_{min} \leq \theta_i \leq \theta_{max} \quad \forall (i = 1, \dots, m) \quad (3.32)$$

$$t_{min} \leq t_{ik} \leq t_{max} \quad \forall (k = 1, \dots, N) \quad \forall (i = 1, \dots, m) \quad (3.33)$$

$$Prob(\hat{x}_k > 0) \geq a \quad \forall (k = 1, \dots, N) \quad (3.34)$$

$$U_k, \theta_i, t_{ik}, V_{kl} \geq 0 \quad \forall (k = 1, \dots, N) \quad \forall (\ell = 1, \dots, L) \quad \forall (i = 1, \dots, m) \quad (3.35)$$

### 3.9 Résultats numériques

Pour évaluer les performances de notre modèle mathématique, nous passons à des simulations numériques. A titre d'application, nous supposons qu'une entreprise manufacturière est constituée de trois machines montées en parallèle. Ces machines fabriquent un seul type de produit, dont la demande est variable pour chaque période. Ensuite, l'horizon de planification du plan de production dans notre modèle est égal à 10 mois ( $H = 10$ ). Les principales données du problème sont présentées dans les deux tableaux suivants :

**Tableau 3.2 : Les paramètres numérique du problème**

<b>s</b>	<b>U<sub>max</sub></b>	<b>U<sub>min</sub></b>	<b>V<sub>max</sub></b>	<b>t<sub>max</sub></b>	<b>t<sub>min</sub></b>	<b>C<sub>pro</sub></b>	<b>u</b>
<b>3</b>	18	6	15	1	3	7	2
<b>C<sub>cm</sub></b>	<b>C<sub>pm</sub></b>	<b>C+</b>	<b>C-</b>	<b>β</b>	<b>α</b>	<b>γ</b>	<b>Δt</b>
3000	500	0.25	43	100	2	0	1

**Tableau 3.3 : Demande moyenne**

<b>Périodes</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Demandes</b>	22	22	20	21	19	18	20	19	19	20

Pour résoudre notre problème, nous utilisons des méthodes de résolution exacte et approchée afin de parvenir au meilleur résultat. Ensuite, les résultats obtenus sont présentés dans les sections suivantes.

#### 3.9.1 Résolution exacte

Pour résoudre notre problème, nous avons utilisé la méthode d'optimisation `fmincon` de Matlab. Dans cette logique, nous avons répété le test 10 fois. Par conséquence, nous avons constaté que les 10 tests indiquent la même la valeur optimale du coût total qui correspond à 6761,3 um (tableau 3.4).

**Tableau 3.4 : Le coût total résultant par la méthode de fmincon**

<b>Test</b>	<b>Coût total (um)</b>	<b>Itération</b>	<b>Func-count</b>	<b>Faisabilité</b>	<b>Longueur de pas</b>	<b>Norme de pas</b>	<b>Optimalité de premier ordre</b>
<b>Test 1</b>	6761.3	0	7	1.640e+01	1.000e+00	0.000e+00	0.000e+00
<b>Test 2</b>	6761.3						
<b>Test 3</b>	6761.3						
<b>Test 4</b>	6761.3	1	14	0.000e+00	1.000e+00	1.160e+01	8.200e+00
<b>Test 5</b>	6761.3						
<b>Test 6</b>	6761.3						
<b>Test 7</b>	6761.3	2	21	0.000e+00	1.000e+00	1.198e-21	0.000e+00
<b>Test 8</b>	6761.3						
<b>Test 9</b>	6761.3						
<b>Test 10</b>	6761.3						

De ce fait, les résultats obtenus correspondent aux coûts optimaux de production, de maintenance, de sous-traitance, de stockage et de retard. Ainsi, les valeurs des paramètres de décision durant chaque intervalle de temps sont présentées dans le tableau 3.5. Ensuite, le tableau 3.6 indique le temps de travail des trois machines et le taux de maintenance préventive de chacune d'entre elles.

Tableau 3.5 : Les résultats optimaux des deux méthodes fmincon et Pattern search

Périodes	Demande moyenne	Variables de décision				Les coûts des machines en parallèle				
		Taux de production	Taux de sous-traitance	Niveau de stockage	Taux PM	Production	Sous-traitance	Stockage	Retard	Maintenance
Période 1	22	14	13	0						
Période 2	22	12	14	4						
Période 3	20	16	2	2						
Période 4	21	12	14	7						
Période 5	19	18	10	16						
Période 6	18	16	1	15	(3,2,4)	<b>910</b>	<b>2822</b>	<b>24.5</b>	<b>0</b>	<b>3004.8</b>
Période 7	20	12	4	11						
Période 8	19	6	8	6						
Période 9	19	14	15	16						
Période 10	20	10	15	21						
<b>Coût total</b>					6761.3um					

Tableau 3.6: Le temps de travail des machines et leurs taux de maintenance préventive des deux méthodes fmincon et Pattern search

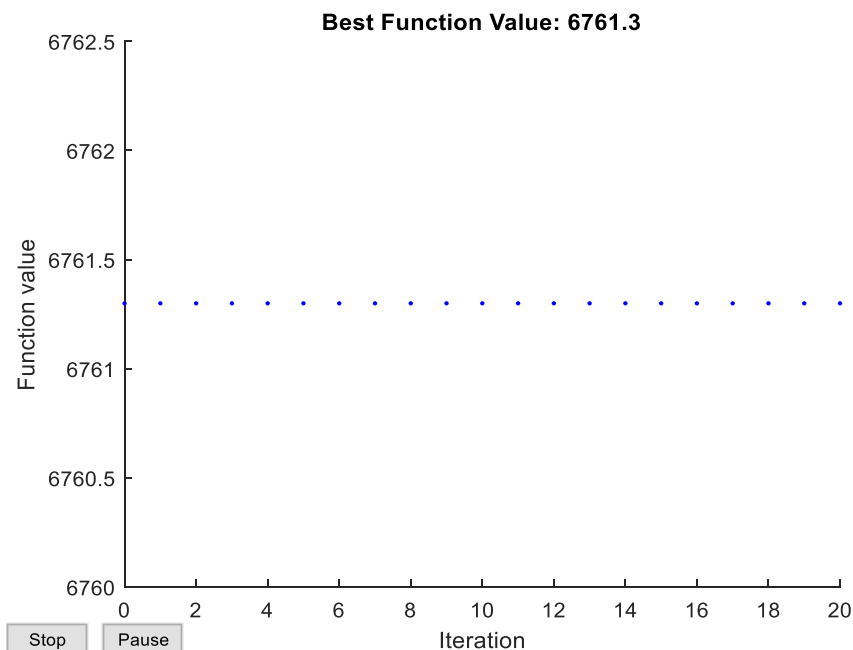
Temps de travail et taux de MP	Taux de MP	Période 1	Période 2	Période 3	Période 4	Période 5	Période 6	Période 7	Période 8	Période 9	Période 10
Machine 1	3	1	2	2	3	3	3	2	1	1	1
Machine 2	2	3	3	3	2	3	3	1	1	3	3
Machine 3	4	3	1	3	1	3	2	3	1	3	1

### 3.9.2 Résolution approchée : méthode heuristique

Il existe un éventail d'approches possibles pour résoudre notre problème. Entre temps, nous avons utilisé une méthode heuristique à savoir la méthode Pattern Search. De la même manière, nous avons répété le test 10 fois. Ensuite, nous avons relevé que la valeur optimale du coût total est de 6761,3 um dans les 10 tests (tableau 3.7). La figure 3.5 montre la valeur de la fonction optimale de coût en fonction du nombre d'itérations.

**Tableau 3.7** : Le coût total obtenu par la méthode de résolution PS (Pattern Search)

Test	N°1	N°2	N°3	N°4	N°5	N°6	N°7	N°8	N°9	N°10
Coût total (um)	<b>6761.3</b>									
Fonction	@ (taux_sous_traitance, taux_prod, taux_MP, temps_travail) total_cost									
Type de problème	'linearconstraints'									
Pollmethod	'gpspositivebasis2n'									
Itérations	20									
Funccount	241									
Meshsize	9.5367e-07									
Rngstate	[1×1 struct]									
Message	'Optimization terminated: mesh size less than options. MeshTolerance.'									



**Figure 3.5** : La valeur du coût total optimal en fonction du nombre d'itérations

Signalons que nous avons obtenu les mêmes résultats des variables de décision et la valeur optimale du coût total de la première méthode en utilisant la méthode d'optimisation Pattern Search (tableau 3.5 et tableau 3.6).

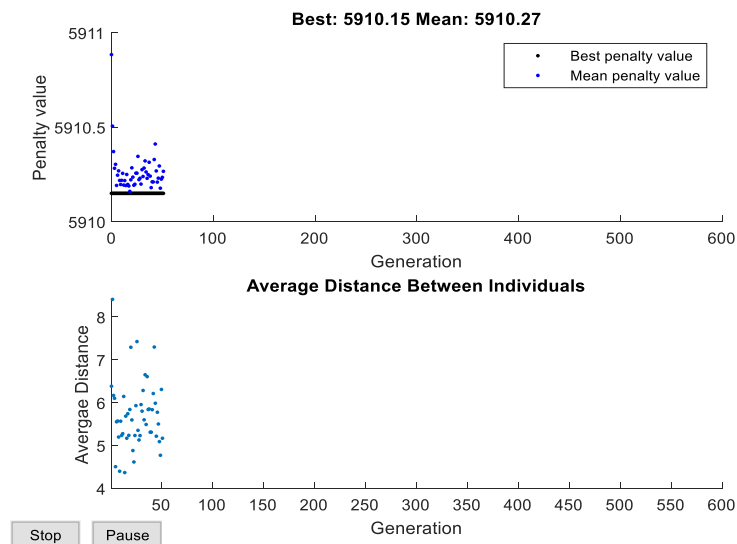
### 3.9.3 Résolution approchée : méthode métaheuristique

En vue de résoudre notre problématique précédente, nous avons utilisé une méthode métaheuristique. Nous avons opté pour notre formulation à la méthode des algorithmes génétiques. En effet, nous avons également répété le test 10 fois et nous avons constaté que la valeur optimale du coût total varie entre 6757,0 et 5910,1 um (tableau 3.8). En ce qui concerne le paramétrage des algorithmes génétiques sur Matlab, la fraction de mutation est égale à 0,15, la fraction de croisement est égale à 0,8, le nombre d'itérations est égal à 20 et enfin la taille de la population est égale à 100 \* nombre des variables.

**Tableau 3.8** : Le coût total par la méthode de résolution GA

Test	Valeur optimale de coût (um)
Test 1	6757.0
Test 2	6705.9
Test 3	5910.1
Test 4	6757.0
Test 5	6757.0
Test 6	5910.1
Test 7	6705.9
Test 8	5910.1
Test 9	6705.9
Test 10	5910.1

La figure 3.6 présente les résultats optimaux obtenus par la méthode d'optimisation des algorithmes génétiques parmi les tests effectués dans le tableau 3.8.



**Figure 3.6** : Les résultats obtenus par l'application des algorithmes génétiques

Le tableau 3.9 présente les valeurs optimales du coût total, du coût optimal de production, de maintenance, de sous-traitance, des stocks, de retard et les valeurs des paramètres de décision. De même, le temps de travail des trois machines ainsi que leurs taux de maintenance préventive sont indiqués dans le tableau 3.10.

**Tableau 3.9** : Les résultats optimaux obtenus par la méthode des algorithmes génétiques

Périodes	Demande moyenne	Variables de décision				Coût des trois machines parallèles				
		Taux de Production	Taux de sous-traitance	Niveau de stockage	Taux de PM	Production	Taux de sous-traitance	Stockage	Retard	Maintenance
Période 1	22	12	9	0						
Période 2	22	14	13	5						
Période 3	20	12	3	0						
Période 4	21	16	11	6						
Période 5	19	16	13	16						
Période 6	18	12	13	23						
Période 7	20	8	15	26						
Période 8	19	16	12	35	(3,2,1)	<b>882</b>	<b>3478</b>	<b>45.75</b>	<b>0</b>	<b>1504.4</b>
Période 9	19	10	8	34						
Période 10	20	10	14	38						
<b>Coût total</b>					<b>5910.1 um</b>					

**Tableau 3.10** : Le temps de travail des machines et leurs taux de maintenance préventive en utilisant la méthode des algorithmes génétiques

Machines	Taux de MP	Temps de travail et taux de MP									
		Période 1	Période 2	Période 3	Période 4	Période 5	Période 6	Période 7	Période 8	Période 9	Période 10
Machine 1	3	1	2	3	3	3	1	1	2	1	1
Machine 2	2	3	2	2	2	3	2	1	3	1	1
Machine 3	1	2	3	1	3	2	3	2	3	3	3

### 3.10 Analyse et discussions des résultats

Nous avons comparé les résultats des trois méthodes de résolution utilisés afin de déterminer le coût total le plus optimal. Par conséquent, nous avons constaté d'une part que la valeur du coût total est constante pour les deux méthodes : fmincon et Pattern Search (coût total optimal= 6761,3 um). D'autre part, l'utilisation des algorithmes génétiques, nous a permis d'obtenir une solution qui varie entre 6757,0 et 5910,1um. Nous concluons que la valeur la plus optimal du coût total des trois méthodes est celle obtenue par la méthode d'optimisation des algorithmes génétiques. Rappelons que la valeur du coût total optimal obtenue par la méthode des algorithmes génétiques est de 5910,1um (figure 3.7).

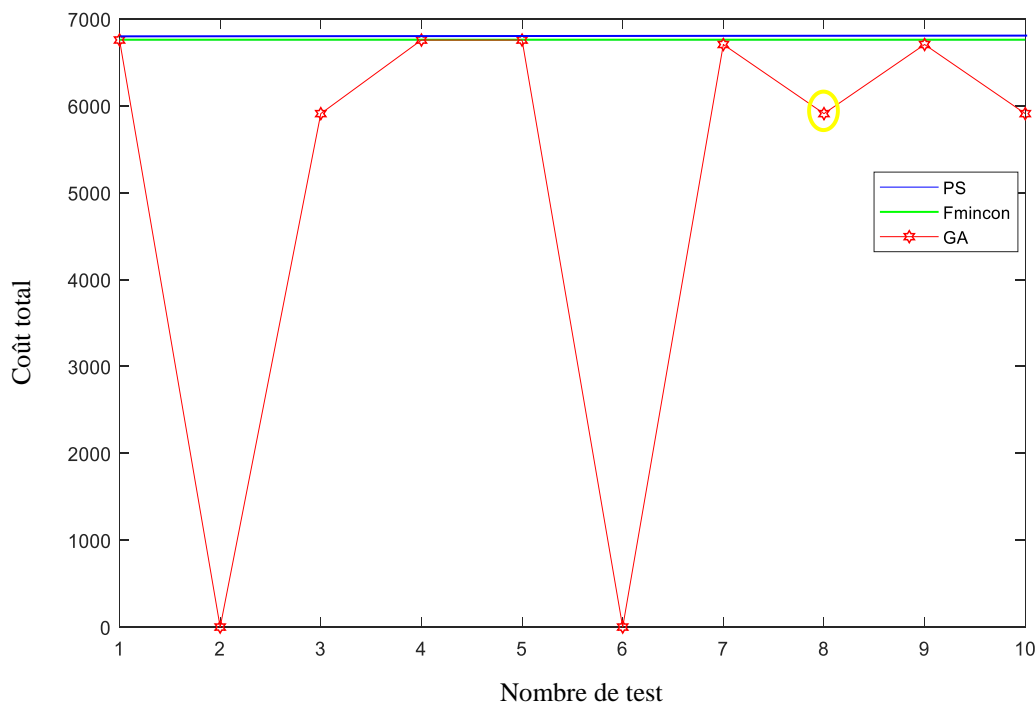
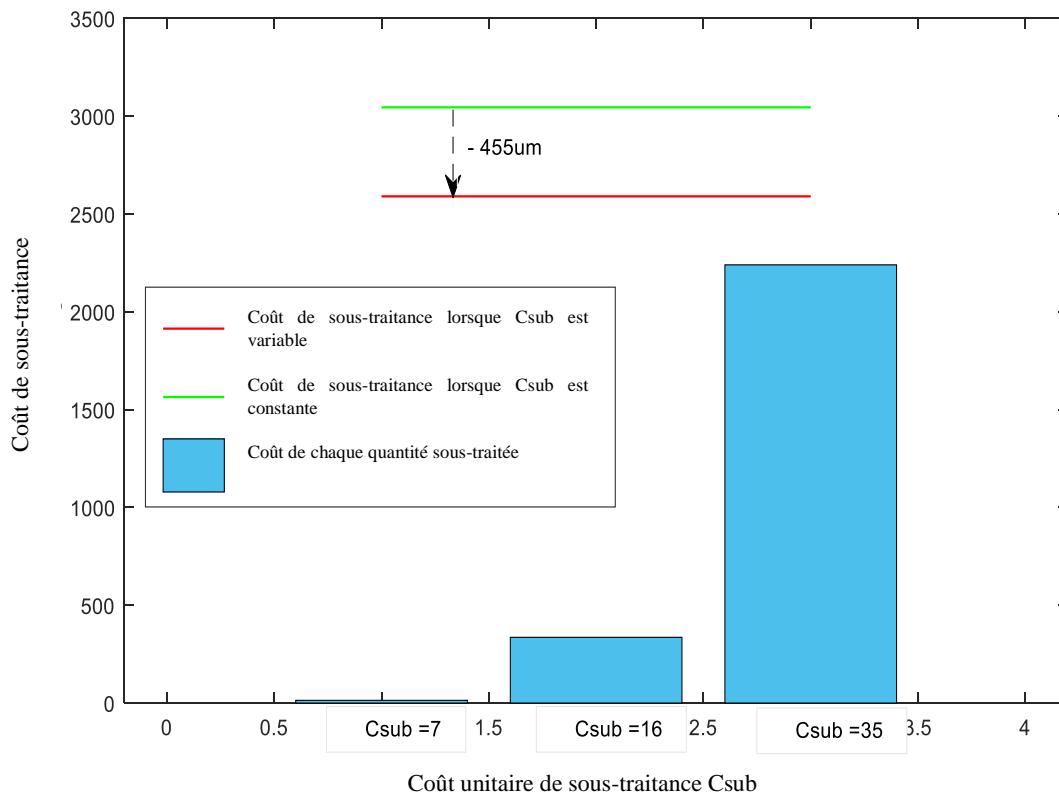


Figure 3.7 : Comparaison des résultats des trois méthodes d'optimisation

Les résultats des trois méthodes d'optimisation montrent que le coût total de sous-traitance est supérieur au coût total de la production en interne, même si la quantité de production en interne est supérieure à la quantité sous-traitée. On constate que le coût unitaire de la sous-traitance est supérieur au coût unitaire de la production en interne, cela montre que cette situation est la plus répandue dans la majorité des industries. Néanmoins, la figure 3.8 montre que le coût total de sous-traitance lorsque le coût unitaire de la sous-traitance est variable, est inférieur au coût total de sous-traitance lorsque le coût unitaire de la sous-traitance est fixe.

Par conséquent, pour réaliser des bénéfices pour le donneur d'ordres (DO), il est important d'externaliser avec un coût de sous-traitance variable, lorsque la quantité sous-traitée est aussi variable. A cet effet, il est nécessaire de discuter la quantité sous-traitée ainsi que le coût unitaire de la sous-traitance lors du choix des sous-traitants. L'avantage de notre modèle est que le coût unitaire de la sous-traitance varie en fonction de la quantité externalisée, ce qui a réduit le coût de sous-traitance.





**Figure 3.8** : Comparaison du coût de sous-traitance lorsque le coût unitaire constant/ variable

En général, deux cas se présentent pour étudier le taux de production du donneur d'ordres. Dans le premier cas, le donneur d'ordres fabrique avec un taux de production maximal pour satisfaire la demande du client. Ensuite, le reste de la demande est confié au sous-traitant. Le second cas, lorsque la cadence de production du donneur d'ordres est variable. Par conséquent, la variation du taux de production dépend à d'autres paramètres tels que la demande, le taux de sous-traitance, le taux de maintenance préventive, le coût unitaire de la sous-traitance, etc. En pratique, la production est effectuée en considérant des variations internes et externes de l'entreprise. Ces variations permettent l'aide à la décision afin de garantir des bénéfices pour l'entreprise et d'éviter le surcoût de production.

En effet, le premier cas présente l'avantage de minimiser le coût de la sous-traitance, du fait qu'une seule quantité limitée sera externalisée au sous-traitant, étant donné que dans la plupart des cas, le coût unitaire de la sous-traitance est supérieur au coût de la production en interne. En contrepartie, l'inconvénient d'une production à cadence maximale se présente au niveau de la dégradation des systèmes de production. Ce qui augmente par la suite le coût de la maintenance des systèmes de production spécialement le coût de maintenance corrective, dans la mesure où les machines tombent souvent en panne.

En ce qui concerne le deuxième cas, celui que nous avons adopté dans notre approche. Lorsque la cadence de production est variable, le donneur d'ordres choisit de fabriquer soit à une cadence maximale, ou bien à une cadence inférieure à la capacité maximale en fonction des conditions internes et externes de l'entreprise, afin de minimiser la dégradation de la machine et de bénéficier des avantages de la sous-traitance.

Quant à la stratégie de maintenance, le taux de maintenance préventive augmente au fur et à mesure que la cadence de production augmente. En effet, nous avons calculé le coût de maintenance lorsque l'entreprise a choisi de fabriquer avec une cadence maximale. Ainsi, nous avons trouvé que le coût de maintenance est égal à 3007.2 um. Ce dernier est supérieur au coût de maintenance lorsque le taux de production est variable qui est égal à 1504.4 um. Ce constat vient de confirmer ce qui était mentionné auparavant, c'est-à-dire que la production à cadence maximale augmente la fréquence des actions de maintenance, d'où la hausse du coût de maintenance. Parallèlement à la croissance du taux de production, la dégradation des systèmes de production augmente.

Les résultats obtenus montrent donc des liens étroits entre la production, la sous-traitance, la maintenance et la dégradation, ce qui justifie le développement de notre modèle de la planification intégrée. Par conséquent, une gestion et une prise de décision efficaces sont impératives pour améliorer les performances des industries et de maximiser leurs profits.

Dans ce chapitre, nous avons justifié l'utilisation de la sous-traitance par le manque de capacité de l'entreprise contractante. Néanmoins, la demande peut parfois être inférieure à la capacité du contractant. Dans cette situation l'entreprise est confrontée à deux cas possibles. Le premier, si l'entreprise choisit de produire la totalité de la demande par ses propres machines. Deuxièmement, lorsque l'entreprise dispose des machines détériorées qui produisent parfois des produits défectueux, dans ce cadre, l'entreprise est obligée d'externaliser une partie de la demande. En résumé, la sous-traitance n'est pas toujours justifiée par le manque de capacité mais aussi par la qualité des produits fabriqués. Comme l'entreprise est responsable de la qualité de ses produits devant ses clients, elle est donc obligée de garantir la quantité et la qualité des produits à tout prix dans les délais prédéterminés. A cet effet, la sous-traitance est donc une bonne stratégie pour assurer ce point.

Notre contribution est très utile pour une entreprise qui reçoit des demandes supérieures à la capacité de production maximale. Ainsi, l'entreprise peut gérer conjointement les deux départements qui sont encore en conflit (production / maintenance). Notre approche permet de déterminer les quantités à produire durant chaque période de l'horizon de planification. Ensuite, elle permet l'affectation du travail aux machines d'une part. D'autre part, nous pouvons déterminer le taux optimal de maintenance préventive et la durée entre deux actions de maintenance préventive successive, en vue de retarder la détérioration des machines. De plus, notre approche permet au contractant de répondre ensuite à la question : quel est le sous-traitant le plus optimal parmi plusieurs sous-traitants en fonction de deux paramètres essentiels : le coût unitaire de la sous-traitance et la quantité sous-traitée ? Notre travail peut être appliqué dans plusieurs domaines tels que la fabrication mécanique, l'industrie automobile, l'aéronautique, l'agro-alimentaire, la pharmacie et le textile.

Pour évaluer la robustesse de notre approche, nous procédons dans la section suivante à une analyse de sensibilité. Pour cela, nous pouvons faire varier les coûts unitaires de production, de maintenance, de sous-traitance, de stockage et de retard, dans l'intention d'estimer l'effet de chacun de ces coûts sur les variables de décisions et sur le coût optimal. Cela permet ensuite de tirer des conclusions significatives qui ont un impact sur la politique de contrôle envisagée.

### 3.11 Etude et analyse de sensibilité

Dans cette section, nous réalisons une série d'expériences en utilisant des exemples numériques. L'analyse de sensibilité fournit une politique de contrôle des coûts de production, de stockage, de retard, de sous-traitance, de maintenance corrective et préventive respectivement  $C_{pro}$ ,  $C_+$ ,  $C_-$ ,  $C_{sub}$ ,  $C_{cm}$  et  $C_{pm}$ . Les résultats présentés dans le tableau 3.11 illustrent les différentes situations présentes et comparées à l'état de base dans l'analyse des systèmes de fabrication décrite ci-dessous.

Tableau 3.11 : Les paramètres de l'analyse de sensibilité et de la politique de contrôle

Variations des coûts unitaires						Variations des variables de décision				Coût total	Remarques
$C_{pro}$	$C_{sub}$	$C_+$	$C_-$	$C_{cm}$	$C_{pm}$	$\Sigma U^*$	$\Sigma V^*$	$\Sigma N^*$	$\Sigma t_{ik}^*$		
7	(7,16,35)	0.25	43	3000	500	126	111	6	63	5910.1	<i>Cas de base</i>
<b>2</b>	(7,16,35)	0.25	43	3000	500	128	106	7	64	5792.2	$\Sigma U^* \uparrow \Sigma V^* \downarrow \Sigma N^* \uparrow \Sigma t_{ik}^* \uparrow$
<b>11</b>	(7,16,35)	0.25	43	3000	500	124	112	5	62	5484.8	$\Sigma U^* \downarrow \Sigma V^* \uparrow \Sigma N^* \downarrow \Sigma t_{ik}^* \downarrow$
7	<b>(5,14,33)</b>	0.25	43	3000	500	124	112	5	62	5660.7	$\Sigma U^* \downarrow \Sigma V^* \uparrow \Sigma N^* \downarrow \Sigma t_{ik}^* \downarrow$
7	<b>(9,18,37)</b>	0.25	43	3000	500	130	95	11	65	8025.7	$\Sigma U^* \uparrow \Sigma V^* \downarrow \Sigma N^* \uparrow \Sigma t_{ik}^* \uparrow$
7	(7,16,35)	<b>0.1</b>	43	3000	500	126	74	9	60	6703.8	$\Sigma U^* \uparrow \Sigma V^* \downarrow \Sigma N^* \uparrow \Sigma t_{ik}^* \uparrow$
7	(7,16,35)	<b>2</b>	43	3000	500	122	112	13	61	8177.4	$\Sigma U^* \downarrow \Sigma V^* \uparrow \Sigma N^* \downarrow \Sigma t_{ik}^* \downarrow$
7	(7,16,35)	0.25	<b>38</b>	3000	500	130	95	11	65	7852.9	$\Sigma U^* \uparrow \Sigma V^* \downarrow \Sigma N^* \downarrow \Sigma t_{ik}^* \uparrow$
7	(7,16,35)	0.25	<b>50</b>	3000	500	124	112	5	62	5114.8	$\Sigma U^* \downarrow \Sigma V^* \uparrow \Sigma N^* \uparrow \Sigma t_{ik}^* \downarrow$
7	(7,16,35)	0.25	43	<b>2000</b>	500	128	106	4	64	5430.5	$\Sigma U^* \uparrow \Sigma V^* \downarrow \Sigma N^* \downarrow \Sigma t_{ik}^* \uparrow$
7	(7,16,35)	0.25	43	<b>3500</b>	500	122	113	13	61	8978.1	$\Sigma U^* \downarrow \Sigma V^* \uparrow \Sigma N^* \uparrow \Sigma t_{ik}^* \downarrow$
7	(7,16,35)	0.25	43	3000	<b>400</b>	130	96	9	63	6105.9	$\Sigma U^* \uparrow \Sigma V^* \downarrow \Sigma N^* \uparrow \Sigma t_{ik}^* \uparrow$
7	(7,16,35)	0.25	43	3000	<b>600</b>	124	107	5	64	5527.3	$\Sigma U^* \downarrow \Sigma V^* \downarrow \Sigma N^* \downarrow \Sigma t_{ik}^* \downarrow$

Nous remarquons que la variation des coûts unitaires a un impact sur les variables de décision de notre approche. Nous présentons par la suite l'impact de chacun sur la politique de contrôle.

**- Variation du coût de la production**

Nous constatons que lorsque le coût unitaire de production en interne est élevé  $C_{pro}$ , nous avons automatiquement recours à l'externalisation, ce qui implique la réduction de la quantité totale de production en interne et l'augmentation du taux de sous-traitance. Par conséquent, les machines du donneur d'ordres passent moins de temps à travailler en production, ce qui réduit le taux de maintenance préventive des machines. Cela augmente le coût global de l'approche proposée. Inversement, lorsque le coût unitaire de la production en interne diminue.

**- Variation du coût de sous-traitance**

L'augmentation du coût unitaire de la sous-traitance  $C_{sub}$  diminue le taux de sous-traitance et augmente le taux de production en interne. Ainsi, le groupe des machines est plus utilisé, ce qui augmente le temps de travail des machines et la maintenance préventive devient nécessaire afin de diminuer sa détérioration. Cela augmente le coût global de l'approche proposée. Nous concluons que la diminution du coût de la sous-traitance favorise la détérioration des machines du contractant. Inversement, lorsque le coût unitaire de la sous-traitance diminue.

**- Variation du coût unitaire de stockage**

Nous constatons que le coût stockage augmente  $C_+$  et le taux de production interne de l'entreprise DO diminue, car si le coût de stockage augmente, c'est une perte pour l'entreprise. Par conséquent, les actions de maintenance préventive augmentent, puisque les machines passent des mois à travailler pour éviter les pannes, ainsi que la dégradation des machines. En outre, le taux de sous-traitance augmente.

**- Variation du coût unitaire de retard**

Nous constatons que lorsque nous augmentons le coût unitaire de retard  $C_-$ , le système de production de l'entreprise DO fabrique davantage, d'où l'augmentation du taux de production car l'entreprise sera plus pénalisée en cas de rupture de stock, ainsi que la contribution de l'externalisation est également importante. Les actions de maintenance préventive sont retardées afin que le groupe de machines soit le plus opérationnel possible.

**- Variation du coût de la maintenance corrective**

On montre que plus le coût unitaire de la maintenance corrective augmente, plus le taux de maintenance préventive augmente, de sorte que les machines ne tombent pas fréquemment en panne. De plus, le taux de production diminue afin que les machines ne passent pas beaucoup de temps en production pour diminuer sa dégradation. En outre, pour répondre à la demande, l'externalisation est favorisée, d'où l'augmentation du taux de sous-traitance.

**- Variation du coût de la maintenance préventive**

En augmentant le coût unitaire de la maintenance préventive  $C_{pm}$ , le taux de maintenance préventive diminue. En conséquence, le taux de production diminue pour éviter la dégradation de l'ensemble des machines, c'est-à-dire que les machines passent moins de temps à travailler. En parallèle, le taux de sous-traitance augmente pour répondre à la demande des clients.

L'analyse de sensibilité réalisée, nous a permis d'évaluer la robustesse de l'approche proposée et montre que les résultats de la politique de contrôle proposée sont utiles.

### 3.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé un modèle d'optimisation stochastique du problème de contrôle conjoint de la production et de la maintenance d'un système de fabrication constitué de trois machines identiques montées en parallèle. Ainsi, notre approche tient en compte la contrainte de sous-traitance. Dans notre approche, nous avons pris en compte des variables de décision telles que le taux de production, le taux de sous-traitance, le taux de maintenance préventive de chaque machine et le temps de travail de chaque machine. La cible principale est de minimiser d'une manière simultanée les coûts de production, de stockage, de retard, de sous-traitance et de maintenance.

Dans cette optique, pour une demande variable et un niveau de service requis, nous avons d'abord formulé un problème stochastique linéaire assurant une politique de contrôle optimale. Pour ce faire, nous avons transformé le problème d'optimisation stochastique en un problème d'optimisation déterministe pour faciliter la résolution. Afin de résoudre notre problème, nous avons utilisé deux types de méthodes d'optimisation exacte et approchée, à savoir les algorithmes génétiques, fmincon et PS. Par la suite, nous avons comparé les résultats obtenus par les trois méthodes afin de dévoiler la meilleure solution optimale. Enfin, nous avons illustré et vérifié l'approche proposée à l'aide d'un exemple numérique et d'une analyse de sensibilité.

Sur la base des résultats trouvés, il existe une relation étroite entre la dégradation des systèmes de production ainsi que les plans de production, de maintenance et de sous-traitance. Ceci contribue notamment à une compréhension plus approfondie de l'impact de la dégradation des systèmes de production dans le mode stochastique. En principe, notre approche développe une politique de contrôle stochastique optimale à la gestion conjointe, en apportant des nouvelles connaissances sur les relations entre les politiques de la production, de la maintenance et de la sous-traitance dans le contexte de dégradation.

En mode réel, les systèmes de production fabriquent des produits conformes et d'autres non conformes. Cette non-conformité est due à plusieurs raisons, telle que la dégradation des systèmes de production. Par conséquent, la gestion de la qualité des produits fabriqués doit être une préoccupation partagée non seulement du service qualité mais aussi pour les deux départements de production et de maintenance. A cet effet, le chapitre suivant portera sur la gestion de production, de maintenance pour un système de production imparfait. Dans ce cadre, la sous-traitance n'est pas seulement justifiée par le manque de capacité mais aussi par la bonne qualité des produits fabriqués. De ce fait, nous considérerons cette fois si un système de production fabriquant plusieurs types de produits.

---

# Chapitre 4

---

**Développement d'une nouvelle stratégie d'intégration de la maintenance, la production et la qualité pour un système multiproduit sous contrainte de la sous-traitance**

## **Chapitre 4**

# **Développement d'une nouvelle stratégie d'intégration de la maintenance, la production et la qualité pour un système multiproduit sous contrainte de la sous-traitance**

---

### **4.1 Introduction**

L'intérêt principal de chaque entreprise est l'amélioration de la productivité, ainsi que l'évolution de sa compétitivité. Il est clair qu'une prise de décision efficace des modes de fonctionnement et d'organisation est essentielle pour améliorer les performances de l'industrie manufacturière. En fait, trois départements sont les piliers dans la plupart des entreprises à savoir la production, la maintenance et la qualité. Dans la littérature, les trois fonctions sont généralement traitées séparément ainsi que l'approche traditionnelle dissociée les unes des autres, vu la complexité de traitement du modèle intégré.

Tout d'abord, la recherche a montré l'interaction entre la production et la maintenance. Nous rappelons que la dégradation d'un système de fabrication augmente en fonction du temps écoulé et en fonction de la cadence de production ; d'où la dépendance entre les taux de production et la fiabilité des équipements de production (Hajej, Dellagi & Rezg, 2009). (Radhoui, Rezg & Chelbi, 2010) ont montré que la qualité des produits fabriqués et la maintenance des équipements sont attachées. En effet, l'augmentation du taux de détérioration influence la qualité des produits fabriqués. Par conséquent, le choix d'une stratégie de maintenance appropriée réduit le risque de défaillance, ce qui se traduit par la réduction d'apparition des pièces non conformes (Lu & Zhou, 2019). On montre aussi que la qualité des produits fabriqués est l'un des critères d'évaluation des performances du département de production. Par conséquent, l'inspection des processus de fabrication et le contrôle de la qualité des pièces fabriqués permettent de surveiller les variations des processus et d'évaluer la conformité des articles fabriqués. Ainsi, la planification conjointe des tâches de production, de maintenance et de qualité est devenue indispensable vu leurs fortes dépendances. A cet effet, le fonctionnement efficace de chaque entreprise exige une gestion adéquate de ces trois fonctions d'une manière simultanée.

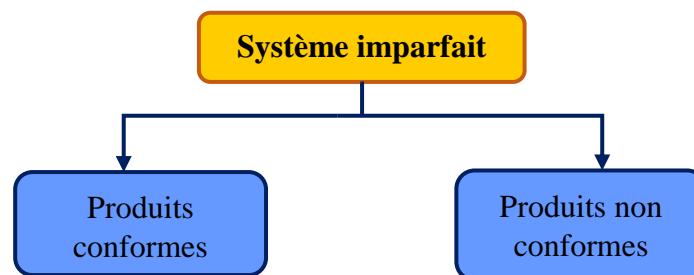
En pratique, la qualité des produits fabriqués est une exigence pour la satisfaction de la clientèle. A cet égard, l'entreprise doit rechercher tous les moyens permettant d'assurer un niveau de qualité acceptable, ce qui contribue à maintenir l'image de l'entreprise au niveau du marché mondial. Suite à ce constat, la sous-traitance peut être une solution parmi ces moyens. Autrement dit, le recours à la sous-traitance se justifie non seulement par le manque de capacité du donneur d'ordres et la réduction des coûts, mais aussi par la haute qualité des produits fabriqués. En d'autres termes, les entreprises qui s'intéressent à la qualité des produits manufacturés adoptent une stratégie plus axée sur la sous-traitance. Pour des raisons stratégiques, la sous-traitance est devenue un moyen important pour réduire les coûts et d'améliorer la qualité au sein de l'entreprise. Certains considèrent que le manque de capacité de production, les problèmes de coûts et la forte spécialisation justifient la nécessité de recourir à la sous-traitance. Dans le même contexte, (Haoues, Dahane & Mouss, 2016) ont étudié le problème intégré de la production et de la maintenance associé aux stratégies de sous-traitance. L'objectif de leur recherche est de déterminer les plans de production interne, de sous-traitance et de maintenance. (Rivera-gómez, Gharbi, Kenné, Montaña-arango & Hernández-Gress, 2018) ont développé un modèle de contrôle

stochastique optimal basé sur la détérioration du système de fabrication. Leur modèle consiste à intégrer les stratégies de sous-traitance dans la politique de production et de maintenance. Leur but est de minimiser le coût global, y compris le coût de production, de sous-traitance, de stockage, de rupture, de maintenance préventive, des produits défectueux et les coûts de réparation.

En effet, les travaux présentés dans ce chapitre contribuent au petit nombre d'ouvrages sur l'intégration des stratégies de sous-traitance dans le cadre de la gestion conjointe de la production, de la maintenance et de la qualité dans un contexte de dimensionnement de lots capacitif pour le cas de multi-produits. Notre objectif est de déterminer simultanément un plan production, une politique de maintenance et une stratégie de contrôle qualité en faisant appel à un choix optimal de sous-traitance. Dans ce chapitre, nous proposons une analyse de l'état de l'art sur l'intégration des plans de production, de maintenance et de qualité. Ensuite, nous présentons notre contribution pour mettre en évidence son originalité. Puis, nous décrivons notre système de production et nous définissons le problème industriel étudié. Nous proposons par la suite notre propre formulation mathématique pour le cas d'un système de production constitué d'une seule machine fabriquant des multi-produits conformes et non conformes, en faisant appel à la sous-traitance. Pour résoudre notre problème, nous allons utiliser une approche de résolution approchée basée sur les algorithmes génétiques. Nous comparons les résultats obtenus avec ceux de la littérature pour valider notre modèle proposé. Enfin, nous procédons à une analyse de sensibilité pour évaluer la robustesse de l'approche proposée.

## **4.2 Analyse de l'état de l'art pour l'intégration des plans de production, de maintenance et de qualité**

Dans la plupart des organisations de production industriel, la qualité des articles, en réalité, est souvent imparfaite (Al-Salamah, M., 2019) et (Lopes R., 2018). En effet, le système imparfait représente le système de production existant dans la réalité des industries. Ce système ne fabrique pas toujours des produits de bonne qualité. Autrement dit, la qualité des produits fabriqués n'est pas forcément garantie (figure 4.1). (Cheng, Zhou & Li, 2018) ont défini le système de production imparfait (IPS : Imperfect production system) comme étant un système de production qui se détériore d'une manière progressive avec l'usage ainsi que la qualité des produits fabriqués dépend du niveau de dégradation des équipements de production. Cependant, nombreuses sont les causes responsables de la défectuosité des produits fabriqués telles que, les pannes machines, les erreurs humaines et les spécifications incorrectes (Al-Salamah, M., 2019). Ainsi, le contrôle insuffisant des processus, la mauvaise planification de la maintenance et les instructions de travaux inappropriées peuvent également entraîner l'apparition des articles défectueux (Rad, Khoshalhan & Glock, 2014). Néanmoins, les pièces défectueuses fabriquées par le IPS peuvent être retravaillées ou bien rejetées (Liu & Yang, 1996). Dans ces circonstances, le client peut retourner les commandes pour échange ou demander le remboursement en cas de livraison des produits non-conformes (Lopes R., 2018).



**Figure 4.1** : Système de production imparfait



L'approche traditionnelle de la qualité se présente généralement au cours des dernières étapes de la phase de production (Liao, Chen & Sheu, 2009). En revanche, plusieurs produits peuvent être fabriqués avant d'effectuer l'inspection des produits (Salameh & Jaber, 2000), ce qui engendre des pertes significatives pour l'entreprise. Du point de vue qualité, la machine possède deux états, le premier est 'sous contrôle' et le second représente l'état 'hors contrôle'. Ainsi, le passage à l'état 'hors contrôle' entraîne l'apparition des produits non conformes. Cependant, la probabilité de passage à l'état 'hors contrôle' à une valeur donnée pour chaque article produit (Porteus E.L., 1986). A cet effet, des réparations et des retouches sont nécessaires pour satisfaire les exigences de la clientèle au niveau qualité (Liao, Chen & Sheu, 2009). Par conséquent, il est plus fiable de considérer que la production est parfois imparfaite.

Nous signalons que les problèmes de taille de lot sont généralement traités dans un cadre relativement stable. Autrement dit, les modèles d'EPQ traditionnelles sont basés sur le principe qu'un processus de production mène à des pièces de qualité toujours parfaite. Plusieurs recherches ont s'intéresser aux problèmes de dimensionnement de lots au niveau du traitement de la planification de la production. (Aghezzaf, Jamali & Ait-kadi, 2007) ont abordé le problème de dimensionnement de lots capacitif dans le cas de multi-produits (MCLSP). Les auteurs ont proposé un modèle intégré d'optimisation de la production et de la maintenance, qui vise à déterminer le plan intégré optimal de production et de maintenance. (Hnaien, Yalaoui, Mhadhbi & Nourelfath, 2016) ont également étudié le problème de MCLSP, en intégrant la planification de la production et la stratégie de maintenance préventive pour une seule machine. Leur objectif est de minimiser la somme des coûts production, de stockage, de setup, de rupture, de maintenance préventive (MP) et de réparation minimale (RM). Nous signalons que l'extension des modèles dynamiques de dimensionnement des lots à des produits multiples est le fait de considérer le coût de variation du temps de setup de production. (Zhou, Zhou, Zuo, Xiao & Cheng, 2018) ont considéré l'environnement de production est variable dans le temps. Leur modèle prend en compte les coûts de setup, de stockage et la capacité de production. Ils ont prouvé que leur modèle leur permettait de rechercher efficacement des solutions de haute qualité. Par la suite, (Wang & Liu, 2013) ont abordé la question de la quantité de production économique (EPQ) dans le cadre d'une gestion conjointe de la production et de la maintenance. La finalité principale est de déterminer simultanément le nombre optimal d'inspections, l'intervalle d'inspection, le niveau d'EPQ et le niveau de MP. Plus récemment, (Liao G-L., 2016) s'est penché sur un modèle d'EPQ pour une question d'intégration de la production et de la maintenance. Selon (Liao G-L., 2016), le système de production produit à la fois des articles conformes et non conformes. Une stratégie de maintenance préventive est programmée pour réduire la détérioration du système. La détermination simultanément de la taille du lot de production et le calendrier de la MP était son principal souci.

Nous remarquons que le problème du dimensionnement par lots est très répandu dans la littérature. La capacité de production est supposée, en principe, constante au niveau de l'horizon de planification. Dans cet esprit, l'interaction entre les plans de production, de maintenance ainsi que le contrôle qualité nécessite une planification conjointe afin d'améliorer l'efficacité global de l'entreprise (figure 4.2). Dans les dernières décennies, la planification intégrée de la production, de la maintenance et de la qualité a fait son apparition dans la littérature. En effet, la disponibilité des équipements de production et la qualité des produits fabriqués affecte la planification de la production. Toutefois, la grande majorité des modèles de la gestion conjointe existants ne tiennent pas compte que de deux des trois fonctions précédentes.



**Figure 4.2 :** Planification conjointe de la production, de la maintenance et de la qualité

Dans cet ordre d'idées, la plupart des recherches qui ont abordé conjointement les trois fonctions dans un seul modèle traitent généralement le cas d'un système de production simple constitué d'une seule machine fabriquant un seul type de produit. Récemment, (Hajej, Rezg & Gharbi, 2018) ont étudié le cas d'une machine de production détériorée, qui produit à la fois des produits conformes et non conformes. Ils ont supposé que la détérioration du système de production a un impact sur la qualité des produits fabriqués. Des actions de MP sont mises en œuvre pour réduire la détérioration du système. Leur but est d'optimiser la somme des coûts de production, de stockage, de maintenance et de défektivité. (Gouiaa-Mtibaa, Dellagi, Achour & Erray, 2017) ont considéré qu'un système de production soumis à un taux de défaillance aléatoire, fabriquant trois types de produits tels que :

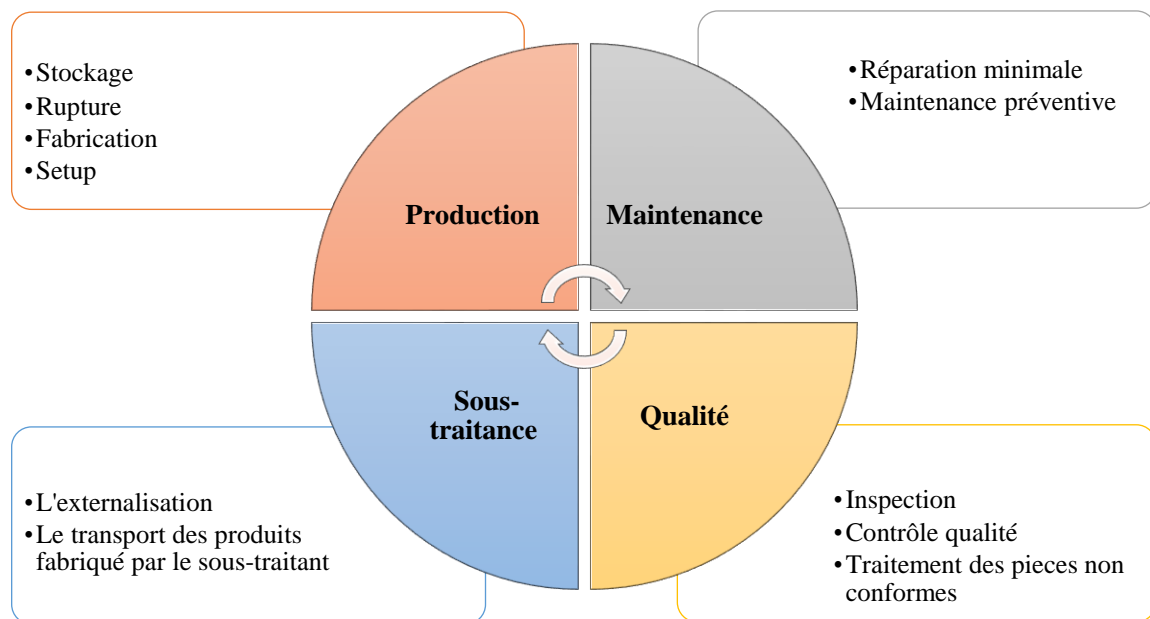
- Produits conformes de haute qualité ;
- Produits de moindre qualité ;
- Produits non conformes.

Afin d'améliorer la qualité des produits de second ordre et des produits non conformes, une activité de retouche est effectuée. Leur but est de déterminer simultanément le nombre de lots produits et le nombre d'actions de maintenance préventive. D'autres références ont été étendues du cas d'une seule machine à plusieurs machines. (Azadeh, Sheikhalishahi, Mortazavi & Ahmadi Joog, 2017) ont abordé conjointement la production, la maintenance et la qualité pour un système de fabrication constitué d'une ligne de production. Les auteurs ont utilisé la simulation pour modéliser leur système. Leur but est de déterminer simultanément les seuils de non-conformité et le taux maximum d'unités non conformes ainsi que la taille du stock. En outre, (Fakher, Nourelfath & Gendreau, 2016) ont traité un système de production composé des machines parallèles fabriquant des multi-produits. Les auteurs ont étudié le problème de CLSP, dans le but de déterminer le niveau de MP, le nombre d'inspections, le taux de production, le taux de rupture de stock et le taux de stock. Pour résoudre le problème, les auteurs ont utilisé des algorithmes génétiques et la recherche taboue. Dans le même contexte, l'approche de (Nourelfath, Nahas & Ben-Daya, 2016) consiste à intégrer la production, la maintenance et la qualité pour un problème de taille de lot dans le cas de multi-produits et multi-période. L'objectif est de sélectionner conjointement les valeurs optimales pour le plan de production et la politique de maintenance, en tenant compte des coûts de la qualité. Les travaux de recherche de (Bousslah, Gharbi & Pellerin, 2018) ont permis également d'optimiser conjointement la production, le contrôle qualité et la maintenance d'une ligne de production. Leur étude consiste à proposer une combinaison d'un modèle mathématique et d'une simulation numérique pour déterminer simultanément les valeurs optimales de trois variables de décision à savoir l'âge de MP, le niveau de contrôle de la qualité et le niveau des stocks. De la même manière, (Tam, Aghezzaf & Khatab, 2018) ont étudié le problème de la planification intégrée de la

maintenance en production, l'objectif étant de déterminer un plan optimal de production et de MP, tout en minimisant simultanément les coûts de production et de maintenance préventive.

En résumé, nous avons noté l'importance du couplage entre les trois fonctions d'une entreprise à savoir : la production, la maintenance et la qualité. Nous constatons que la gestion intégrée d'au moins deux fonctions conduit à une bonne gestion en maximisant le profit de l'entreprise. Alors que la gestion séparée de la production, de la maintenance et de la qualité ne permet pas d'atteindre les objectifs globaux tracés par l'entreprise.

Il est vrai que la sous-traitance a fait l'objet d'une attention accrue dans la littérature. Les raisons de la sous-traitance sont notamment la minimisation des coûts de production ainsi que la capacité de production. En effet, la sous-traitance a un impact sur la qualité des produits fabriqués. Plusieurs fabricants qui s'intéressent à la haute qualité des articles produits sous-traitent les processus en ayant accès à l'expertise et au savoir-faire en matière d'innovation. En conséquence, les chercheurs ont constaté que les entreprises de qualité supérieure adoptent davantage la sous-traitance que les entreprises de faible coût. En outre, une stratégie de production axée sur la qualité est positivement associée à la sous-traitance de la production. La figure 4.3 montre les différents éléments des trois fonctions intégrées sous contrainte de la sous-traitance. Ces éléments seront pris en compte lors de l'élaboration de notre prochain modèle intégré qui sera détaillé dans les sections suivantes.



**Figure 4.3** : Gestion conjointe de la production, de la maintenance et de la qualité avec la contrainte de la sous-traitance

Nous présentons dans le tableau 1.4 une classification des études portant sur le contrôle conjoint des trois fonctions à savoir : la production, la maintenance et la qualité. Nous remarquons que leur intégration dans le même modèle marque une véritable évolution récente dans la littérature. Les approches considèrent un système de fabrication composé d'une seule machine ou d'une ligne de production fabriquant un ou plusieurs types de produits. En général, la modélisation conjointe vise à déterminer la cadence de production, la fréquence des actions de maintenance préventive et le taux d'inspection. À notre connaissance, il n'existe pratiquement aucun modèle qui traite la gestion conjointe des trois fonctions en tenant compte de la contrainte de sous-traitance.

**Tableau 4.1** : Synthèse des modèles d'intégration du triplets production, qualité et maintenance

Référence	Etat de système	Stratégie de production	Contrôle qualité	Type de maintenance	Variable de décision	Coût total	Méthode d'optimisation
Hajej, Rezg & Gharbi. 2018	Une seule machine Un seul type de produit	Modèle HMMS	Taux de défautuosité, fabrication de produit conforme et non conforme.	La détérioration dépend de la production. Taux de PM influence la détérioration. Taux de détérioration augmente le taux de défaut.	Quantité de production, plan de production, nombre d'action de MP, intervalle entre deux actions de MP.	Production inventory, maintenance, defectives	Résolution analytique séquentielle
Azadeh, Sheikhalishahi, Mortazavi & Ahmadi Joog, 2017	Une ligne de production	Production par lot. Stock tampon juste après la machine	Taux d'unité conforme et non conforme.	Les actions de MP et corrective dépend du taux de non-conformité.	Niveau seuil du taux d'unités non conformes, taux maximal d'unités non conformes, taille du stock	Maintenance, inventory, quality	Simulation, Taguchi, ANOVA.
Fakher, Nourelfath & Gendreau, 2016	Multi machines parallèle. Multi-produits.	Problème capacitif de dimensionnements de lots CPLS	Inspection, Contrôle qualité, ajustement, retouche	Maintenance parfaite type âge. Etat sous contrôle Etat hors contrôle	Niveau de MP, nombre d'inspection, niveau de production, niveau de rupture, niveau de stock	Production, maintenance, quality	Recherche Taboue Algorithme génétique
Bouslah, Gharbi & Pellerin, 2018	Une ligne de production à flux continue	Stock tampon intermédiaire.	Contrôle qualité optimal dans chaque période	Dégradation dépend de fonctionnement. Défaillance liée de la qualité.	Age de MP, niveau de contrôle qualité et niveau de stock.	Stockage, pénurie, maintenance Qualité	simulation, statistical and optimization techniques
Gouiaa-Mtibaa, Dellagi, Achour & Erray, 2017	Une seule machine Seule type de produit	Effet de variation de cadence de production sur défaillance et dégradation de la qualité	Trois types de produit : conforme, second choix et non conforme	Dépendance entre la dégradation et qualité produit fini	Nombre de lots produits avant d'effectuer la MP imparfaite et nombre d'actions de MP imparfaites	Maintenance, stockage, qualité	Méthode analytique

### 4.3 Contribution du chapitre

Dans le chapitre précédent, nous avons proposé un modèle d'optimisation de la sous-traitance dans le cadre d'une politique intégrée de production et de maintenance (Hafidi, EL Barkany, EL Mhamedi & Mahmoudi, 2020). En effet, nous avons considéré le cas complexe, c'est-à-dire un système de production composé de plusieurs machines produisant un seul produit de bonne qualité. Ce chapitre traite le cas d'une seule machine fabriquant plusieurs produits conforme et non conforme. Ceci est justifié par le fait que la dégradation affecte la qualité des articles fabriqués par le donneur d'ordres. A ce niveau, notre prochain modèle proposé se concentre sur l'optimisation conjointe des trois fonctions précédentes associées à la stratégie de sous-traitance.

Dans cette optique, notre modèle aborde le problème de dimensionnement des lots capacitifs multi-produits (MCLSP) avec le temps de setup. Plus clairement, notre approche intégrée vise à améliorer la qualité et la fiabilité du système de production tout en minimisant le coût total. Nous prenons en compte la dépendance entre la qualité des produits fabriqués et la fiabilité des équipements de production. Cependant, la stratégie de contrôle de la qualité adoptée consiste à inspecter les produits fabriqués, à ajuster le processus de production et à contrôler les produits en cas de non-conformité. Le but du présent travail est donc de trouver un équilibre entre la production en interne, la qualité des produits fabriqués, la maintenance de l'équipement de production et la stratégie de sous-traitance. Du point de vue fiabilité, nous considérons que notre système de production est soumis à un processus de dégradation progressive, dont le taux de défaillance dépend du temps et de la cadence de production. Par conséquent, l'augmentation de la dégradation entraîne une augmentation du taux de défaillance et du taux des pièces défectueuses. La politique de maintenance tient en compte les effets de la détérioration, d'où la nécessité des actions de MP pour restaurer la machine, ainsi pour réduire l'impact des processus de détérioration. Ensuite, des réparations minimales sont effectuées en cas de défaillance de la machine. D'autre part, la stratégie de sous-traitance consiste à choisir le sous-traitant le plus optimal parmi plusieurs. En effet, le choix de la sous-traitance dépend de la capacité de production du sous-traitant, du coût unitaire de la sous-traitance et de la contrainte logistique, qui représente la distance entre le sous-traitant et le stock. Nous signalons que la dernière contrainte est généralement négligée par les chercheurs dans les approches de choix de sous-traitance, pour ne pas compliquer leurs études. Néanmoins, certaines études ne prennent pas suffisamment en compte les motivations de la sous-traitance. L'approche présentée dans ce chapitre se distingue par les caractéristiques suivantes, telles que :

1. Le système de fabrication est constitué d'une seule machine qui fabrique des produits multiples.
2. Le temps de préparation n'est pas négligeable.
3. Le système de production est considéré comme imparfait ; il produit à la fois des articles conformes et non conformes.
4. Nous intégrons les trois fonctions telles que la production, la maintenance et la qualité dans un seul modèle.
5. Le manque de capacité du contractant et la non-conformité des produits fabriqués justifient le recours à la sous-traitance.
6. Nous prenons en compte la contrainte logistique au niveau de choix de la sous-traitance.

De plus, nous déterminons simultanément à travers notre approche le plan de production interne, la stratégie de sous-traitance, la politique de contrôle de la qualité et la stratégie de maintenance. La cible principale du développement de notre modèle est de maximiser le profit du donneur d'ordres et de faire un choix optimal de sous-traitance. Il s'agit donc de minimiser la somme des coûts de

maintenance préventive et de réparation, les coûts de production, les coûts de qualité et les coûts de sous-traitance. Nous nous inspirons notre approche proposée donc des modèles présentés par (Fakher, Nourelfath & Gendreau, 2016), (Aghezzaf, Jamali & Ait-kadi, 2007) et (Hnaïen, Yaloui, Mhadbhi & Nourelfath, 2016). Notre modèle se distingue par la nature du système de production. Il est constitué d'une machine principale fabriquant plusieurs types de produits ainsi qu'un sous-traitant qui complète le manque de demande dans des conditions spécifiques. La différence entre notre approche et celle de (Fakher, Nourelfath & Gendreau, 2016) est de considérer le temps de setup ainsi que la dégradation de la machine. En effet, les auteurs (Fakher, Nourelfath & Gendreau, 2016) considèrent que la dégradation dépend de l'âge de la machine. D'autre part, la dégradation dans notre modèle dépend du taux de défaillance, qui dépend du temps et du taux de production. Au niveau de la stratégie de choix de la sous-traitance, nous avons pris en compte non seulement la capacité de sous-traitance et le coût unitaire de la sous-traitance, mais aussi la contrainte logistique, c'est-à-dire la distance entre le sous-traitant et le stock. La politique de contrôle proposée indique le taux de production de chaque produit du DO, le taux de sous-traitance, le taux de stockage, le taux rupture, le taux de maintenance préventive, ainsi que le nombre d'inspections au cours de chaque période de l'horizon. Ensuite, nous allons comparer les résultats obtenus par notre approche avec les résultats obtenus par (Fakher B. H., 2016), dans l'intention de valider nos résultats ainsi que de montrer l'avantage de la sous-traitance dans la minimisation des coûts.

#### 4.4 Description du système et définition du problème

Dans cette section, nous présentons l'ensemble des notations utilisées dans la formulation mathématique. Nous différencions entre les indices du modèle, les variables de décision ainsi que les autres paramètres. Ensuite, nous introduisons les hypothèses permettant de décrire notre modèle au niveau des stratégies de production, de maintenance et de contrôle qualité.

##### 4.4.1 Hypothèses et notations

###### 4.4.1.1 Indices de modèle

$p, P$	Indices et nombre d'articles,
$k, N$	Indices et nombre de période,
$i, M$	Indices et nombre du sous-traitant s,
$j$	Indices de l'intervalle dans la période $k$ .

###### 4.4.1.2 Variables de décision

$T$	Cycle de maintenance préventive,
$\theta$	Taux de maintenance préventive,
$x_{pk}$	Quantité produite par le DO pour chaque produit $p$ durant la période $k$ ,
$I_{pk}$	Niveau de stock du produit $p$ durant la période $k$ ,
$\beta_{pk}$	Taux de rupture du produit $p$ durant la période $k$ ,
$v_{ipk}$	Taux de production du sous-traitant $i$ du produit $p$ durant la période $k$ ,
$U_i$	Variable binaire de sous-traitance (Si le sous-traitant $i$ est activé, la variable binaire est égale à 1 sinon zéro),
$S_{pk}$	Variable binaire de setup du produit $p$ pendant la période $k$ ,
$NI_k$	Nombre d'inspections au cours de la période $k$ .

#### 4.4.1.3 Paramètres de modèle

$\pi_p$	Coût unitaire de production de l'entreprise DO,
$s_p$	Coût unitaire de setup du produit p,
$h_p$	Coût unitaire de stockage du produit p,
$b_p$	Coût unitaire de rupture du produit p,
$W_k$	Temps disponible pour la production au cours de la période k,
$\tau_{pk}$	Temps de Setup du produit p dans la période k,
$Z$	Temps fixe de toutes les périodes,
$C_{sub_i}$	Coût unitaire du sous-traitant i,
$D_i$	La distance entre le sous-traitant i et le stock,
$Q_d$	Coût unitaire de transport pour chaque km,
$V_{ip}^{max}$	Taux de production maximum pour le sous-traitant i du produit p,
$PS_k$	La probabilité d'un changement d'état au cours de la période k,
$G_p$	Capacité maximale de production de la machine pour le produit p,
$u$	Coût unitaire de l'inspection de la qualité de la machine,
$q$	Coût unitaire d'ajustement de la machine,
$\alpha_p$	Coût unitaire du contrôle de qualité pour chaque produit p,
$\lambda_{limite}$	Seuil limite pour le taux de défaillance des machines,
$CP$	Coût unitaire de la maintenance préventive,
$F(t)$	Fonction de défaillance de la machine,
$CM$	Coût unitaire de la maintenance corrective,
$R(t)$	Fonction de fiabilité de la machine,
$ENF_k$	Nombre de défaillances prévues au cours de la période k,
$TMR$	Temps de réparation minimal,
$\lambda_k$	Taux de défaillance de la machine de l'entreprise DO,
$\lambda_0$	Taux de défaillance initial à k=0,
$PC$	Coût total de la stratégie de production,
$SC$	Coût total de la stratégie de sous-traitance,
$QC$	Coût total de la politique de qualité,
$MC$	Coût total de la politique de maintenance.

Avant d'établir notre modèle analytique, il est nécessaire de présenter les hypothèses simplificatrices suivantes :

- La demande est variable au cours du temps.
- La demande du client peut être supérieure ou inférieure à la capacité de production maximale de la commande.
- Le système de fabrication est constitué d'une seule machine fabriquant plusieurs types de produits.
- Le système de production doit satisfaire le problème de dimensionnement de lots capacitif CLSP.
- Le processus de fabrication est considéré comme imparfait, la machine peut fabriquer des produits conformes et non conformes.
- Stock S contenant les produits fabriqués par le contractant et par le sous-traitant.
- La demande du client est satisfaite à partir du stock à la fin de chaque période de l'horizon de planification.

- Le système de production du donneur d'ordres fabrique des produits non conformes lorsque le taux de défaillance dépasse une limite :  $\lambda_{limite}$ .
- L'inspection est lancée dès que le taux de défaillance  $\lambda(t)$  atteint un niveau limite  $\lambda_{limite}$ .
- Si une non-conformité est détectée, le processus doit être ajusté.

#### 4.4.2 Description du modèle

Nous considérons un système de production imparfait qui fabrique des articles conformes ainsi que d'autres non-conforme à partir d'un certain niveau de dégradation. Le contractant doit satisfaire la demande des clients avec des taux de production variables. Notre système de production est composé d'une seule machine fabriquant plusieurs types de produits. En effet, la production doit satisfaire la contrainte de CLSP avec le temps de setup. Cependant, le DO reçoit des demandes  $d_{pk}$  durant l'horizon de planification qui dépassent parfois sa capacité de production maximale, d'où le recours à la sous-traitance. De plus, chaque sous-traitant est caractérisé par sa capacité de production maximale, son coût unitaire de sous-traitance ainsi que sa position géographique par rapport au stock du contractant. Le DO doit faire un choix optimal d'un seul sous-traitant permanent parmi plusieurs selon les caractéristiques présentées antérieurement.

Dans le secteur industriel, la machine exige qu'une stratégie de contrôle qualité doit être établie pour traiter les non-conformités des produits fabriqués. En effet, la stratégie de qualité comprend l'inspection des processus, l'ajustement des machines et le contrôle de la qualité. On considère que le système est soumis à un processus de dégradation avec un taux de défaillance croissant. En effet, la détérioration des équipements affecte la qualité des produits et la fiabilité de la machine, d'où la nécessité de mettre en place une stratégie de maintenance préventive afin de réduire l'impact des processus de détérioration et de minimiser les non-conformités des produits fabriqués. L'intégration des décisions en matière de maintenance, de production et de qualité peut réduire la non-conformité des produits fabriqués et les temps d'arrêt. Notre modèle se caractérise notamment en termes de multi-produits, dégradation du système, demande variable, stratégie de sous-traitance, dimension logistique et contrôle qualité.

Dans ce chapitre, nous étudierons le problème de la planification intégrée de la maintenance, de la production et de la qualité dans le cas d'un système de production imparfait fabriquant plusieurs types de produits dans le cadre de la sous-traitance, comme indiqué dans la figure 4.4.

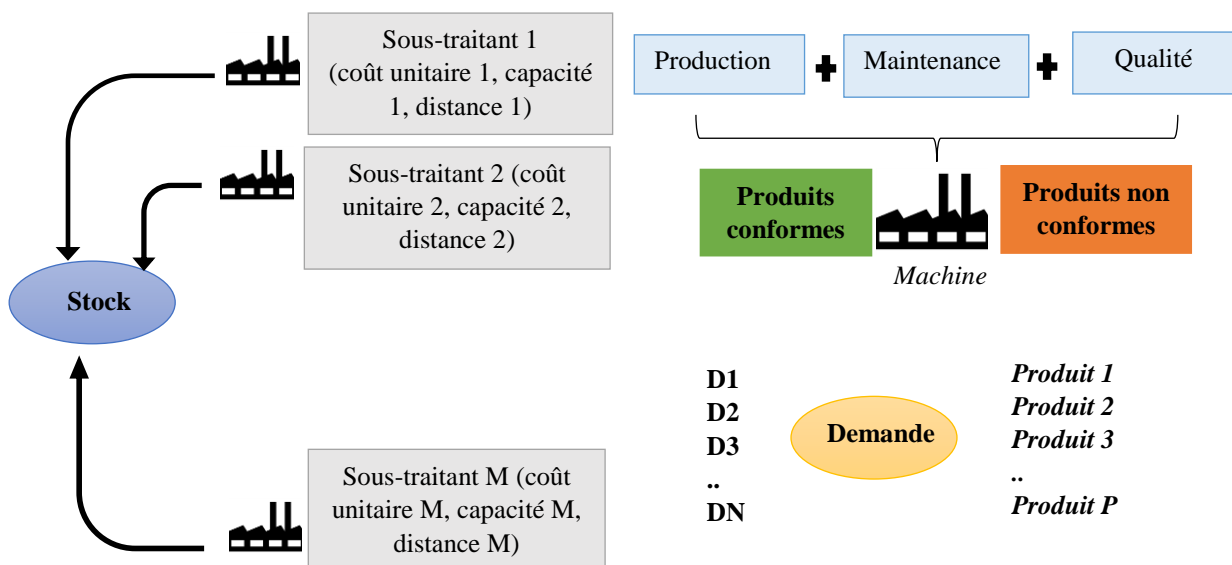


Figure 4.4 : Le système de production étudié



## 4.5 Modélisation de la dégradation du système

La modélisation de la détérioration d'un système a un effet considérable sur la qualité des produits fabriqués et la fiabilité des équipements de production. En effet, nous considérons la dépendance entre le taux de défaillance et la conformité des produits fabriqués. Nous indiquons que la défaillance ou le manque de fiabilité  $F(t)$  signifie la probabilité qu'une machine tombe en panne avant le temps  $t$ . En d'autres termes, il s'agit de la probabilité du changement d'état 'sous contrôle' vers l'état 'hors contrôle' avant le temps  $t$ . En conséquence, l'augmentation du taux de défaillance entraîne l'apparition de produits défectueux. La figure 4.5 montre la dépendance entre le taux de défaillance et l'inspection du processus.

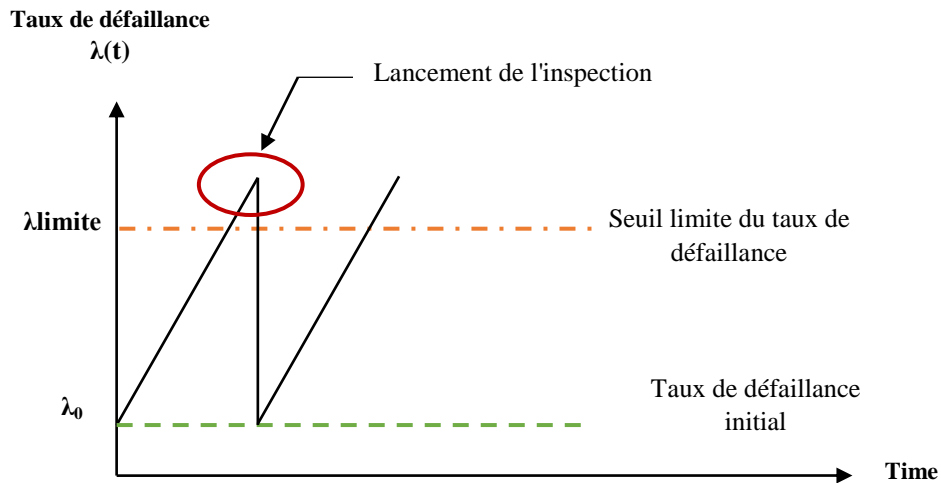


Figure 4.5 : Dépendance entre le taux de défaillance et le processus d'inspection

Nous considérons que les défauts de fabrication résultent de la dégradation des équipements de production. Par conséquent, la probabilité de passage à un état incontrôlable au temps  $k$  est représentée par  $PS_k$ .

$$PS_k = 1 - R(t) = 1 - \exp\left(\left(\frac{k - \gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}\right) = 1 - \frac{\eta^2}{\beta(k - \gamma)} \lambda_k \quad (4.1)$$

## 4.6 Formulation du modèle proposé

### 4.6.1 Stratégie de production

Tout d'abord, nous soulignons que le contractant prend en charge la production d'une partie de la demande. Par conséquent, le coût de production total ( $PC$ ) de l'entreprise DO représente la somme des coûts de fabrication, des coûts de setup, des coûts de stockage et des coûts de rupture exprimé par l'équation (4.2) (Hnaien, Yaloui, Mhadbhi & Nourelfath, 2016)

$$PC = \left( \sum_{k \in N} \sum_{p \in P} (x_{pk} \pi_p + S_{pk} s_p + I_{pk} h_p + B_{pk} b_p) \right) \quad (4.2)$$

Fabrication + Setup + Stockage + Rupture

En ce qui concerne les contraintes de la stratégie de production, nous indiquons la contrainte de setup, la contrainte de conservation de flux et finalement la contrainte de capacité.

- **Contrainte de setup**

La contrainte de setup permet de forcer le niveau de production  $x_{pk}$  soit égal à zéro si la variable binaire de setup est nulle  $S_{pk}=0$ , ainsi que le niveau de production est supérieur à zéro  $x_{pk} \geq 0$  si  $S_{pk}=1$  (Absi & Kedad-Sidhoum, 2008).

$$x_{pk} \leq S_{pk} G_p \quad (4.3)$$

- **Contrainte de conservation de flux**

La contrainte de conservation de flux est appelée aussi la contrainte d'équilibre des stocks indiquée par l'équation (4.4). Elle représente la somme du stock du produit  $p$  à la fin de la période  $k$ . Elle est égale au stock de la période précédente plus la production totale du DO et du sous-traitant au cours de la même période, moins la demande du client au cours de la même période. En effet, nous tenons de plus la quantité de sous-traitance par rapport au modèle de (Hnaïen, Yaloui, Mhaddbi & Nourelfath, 2016).

$$I_{pk} - B_{pk} = I_{pk-1} - B_{pk-1} + V_{pk} + x_{pk} - d_{pk} \quad (4.4)$$

- **Contrainte de capacité**

La dernière contrainte de la stratégie de production est la contrainte de capacité caractérise essentiellement le problème dimensionnement du lot capacitif. Elle garantit que le temps de production totale doit être inférieure ou égal au temps de production disponible durant chaque période  $k$ . Notons que le temps de production pendant chaque période est la somme du temps de fabrication plus le temps de setup présenté par l'équation (4.5).

$$\sum_{p=1}^P x_{pk} S_{pk} + \sum_{p=1}^P \tau_{pk} S_{pk} \leq W_k \quad (4.5)$$

L'équation (4.6) exprime le temps de production disponible qui représente le temps fixe de toutes les périodes, moins le temps de réparation de la même période moins le temps de setup par produit  $p$  dans la période  $t$  (Fakher, Nourelfath & Gendreau, 2016).

$$W_k = Z - ENF_k TMR - \sum_{p=1}^P \tau_{pk} S_{pk} \quad (4.6)$$

Par conséquent, le nombre de défaillances prévues durant chaque période  $k$  est représenté par l'équation (4.7).

$$ENF_k = \sum_{i=1}^k \int_0^{\Delta t} \lambda_i dt \quad (4.7)$$

#### 4.6.2 Stratégie de sous-traitance

La stratégie de sous-traitance consiste à sélectionner le sous-traitant optimal parmi plusieurs. En effet, chaque sous-traitant  $i$  est caractérisé par un coût unitaire de sous-traitance  $C_{sub_i}$ , une capacité de production maximale du sous-traitant  $V_{ip}^{max}$  et la distance entre le sous-traitant  $i$  et le stock  $D_i$ . En outre, nous introduisons une variable binaire  $U_i$  caractérisant le choix du sous-traitant  $i$  pendant la période  $t$ , telle qu'est exprimé par l'équation (4.8).

$$U_i = \begin{cases} 1 & \text{si le sous - traitant } i \text{ est activé} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases} \quad (4.8)$$

Ensuite, nous considérons qu'il n'y a pas de relation de proportionnalité entre le trio  $C_{sub_i}, V_{ip}^{max}$  et  $D_i$ . En d'autres termes, chaque sous-traitant propose ses propres paramètres ( $C_{sub_i}, V_{ip}^{max}, D_i$ ). En retour le donneur d'ordres choisit le sous-traitant le plus optimal en fonction de ces paramètres afin de répondre au besoin de sa clientèle et de minimiser le coût total. En effet, le coût de la sous-traitance représente la somme du coût de la quantité sous-traitée ou bien le coût d'externalisation plus le coût de transport, comme indiqué par l'équation (4.9).

$$SC = \left( \begin{array}{cc} \sum_{k=1}^N \sum_{p=1}^P (v_{ipk} C_{sub_i} U_i) & + \quad U_i D_i Qd \\ \text{Externalisation} & + \quad \text{Transport} \end{array} \right) \quad (4.9)$$

Certes, la stratégie de sous-traitance adoptée comporte trois contraintes essentielles. La première indique la contrainte d'utilité de la sous-traitance. Ensuite, la deuxième contrainte représente les limites supérieure et inférieure du taux de sous-traitance pour chaque sous-traitant  $i$  et finalement la contrainte logistique.

- **Contrainte d'utilité de la sous-traitance**

En pratique, la stratégie de sous-traitance n'est pas toujours utile pour l'entreprise. A cet effet, l'option de sous-traitance est adoptée si la demande cumulée est supérieure à la taille des lots (Shinne-Der Lee & Shu- Chuan Lan, 2013), exprimé par l'équation (4.10).

$$\sum_{k=1}^N d_{pk} > \sum_{k=1}^N x_{pk} \quad (4.10)$$

- **Limite supérieure et inférieure du taux de sous-traitance**

Chaque sous-traitant  $i$  est caractérisé par les limites de production supérieure et inférieure, ce qui donne une idée sur la taille de production de chaque sous-traitant (équation 2.11). Cette contrainte est utile dans le cas de la hausse de la demande client.

$$0 < V_{ipk} \leq V_{ip}^{max} \quad (4.11)$$

- **Contraintes logistiques**

La contrainte logistique permet de choisir géographiquement le sous-traitant le plus proche. Par conséquent, notre stratégie nous permet de choisir un seul sous-traitant pendant les périodes de l'horizon de planification. A cet effet, il est primordial d'ajouter la contrainte de l'équation (4.12) qui permet de forcer le choix d'un seul sous-traitant.

$$\sum_{i=1}^M U_i = 1 \quad (4.12)$$

### 4.6.3 Politique de contrôle qualité

La figure 4.6 indique brièvement l'ensemble des étapes de la stratégie de contrôle la qualité adoptée dans notre approche intégrée.

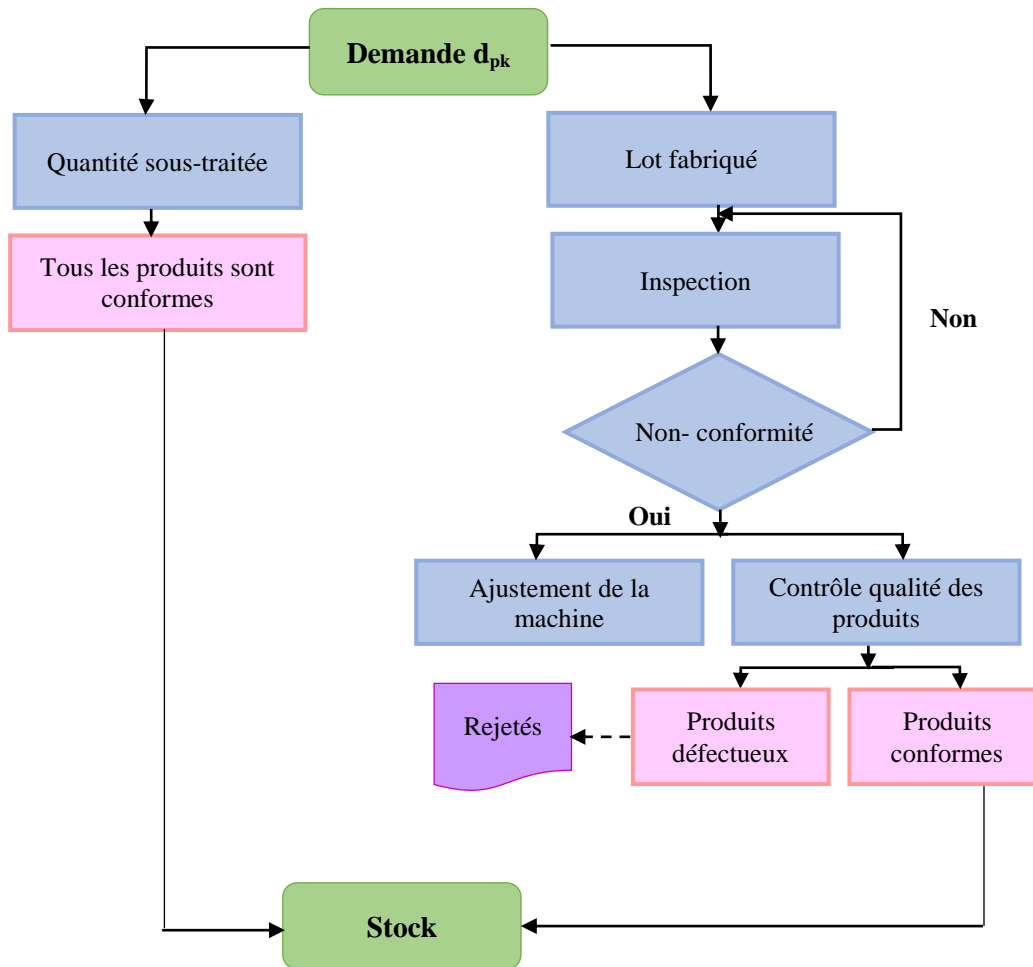


Figure 4.6 : Stratégie de contrôle qualité implémentée

Nous partons du principe que notre système de production est imparfait. Cela signifie que le système produit des articles non conformes à partir d'un certain niveau de dégradation. Pour détecter les dangers du processus de production, nous effectuons des inspections successives. L'inspection du processus de fabrication dépend du taux de défaillance limite  $\lambda_{limite}$  fournis par l'historique de la machine. Par la suite, lors de l'inspection, si nous détectons l'apparition d'éléments non conformes, le processus doit être ajusté. Par conséquent, toutes les pièces du sous-lot doivent être soumises à un processus de contrôle de qualité afin d'isoler les pièces non conformes. En outre, tous les articles non conformes sont rejetés. En bref, la stratégie de contrôle de qualité consiste à inspecter les machines, à contrôler la qualité des pièces et finalement à ajuster les machines dans des conditions données. La figure 4.7 présente la stratégie d'inspection au cours des périodes de l'horizon de planification. En effet, le processus durant chaque période de production  $t$  est soumis à des inspections successives au moment  $j$ . Le nombre d'inspections du processus au cours de chaque période  $t$  dépend du taux de défaillance limite  $\lambda_{limite}$ .

Le coût total de la stratégie de contrôle de la qualité adoptée (QC) est la somme des coûts d'inspection, d'ajustement et de contrôle de qualité, comme indiqué dans l'équation (4.12).

$$QC = \left( \sum_{k \in N} \sum_{p \in P} ( NI_k q + NI_k u PS_k + \alpha_p PS_k x_{pk} ) \right) \quad (4.13)$$

Inspection + Ajustement + Contrôle qualité

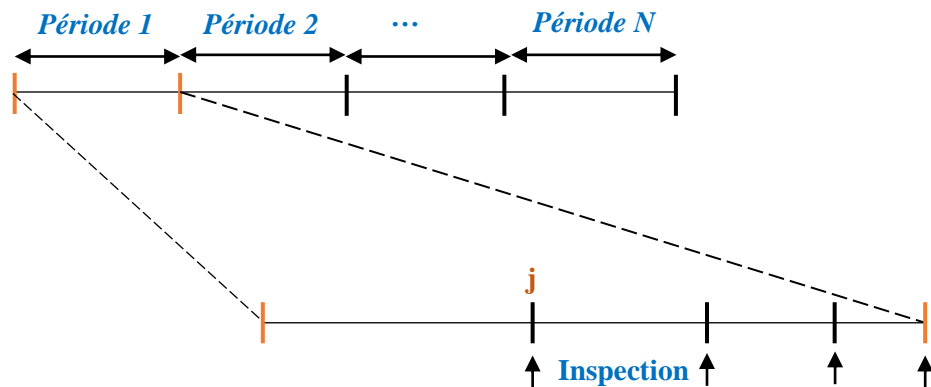


Figure 4.7 : Processus d'inspection

Rappelons qu'il existe une forte dépendance entre la dégradation des équipements et nombre d'inspection. Nous précisons que le nombre d'inspections est calculé selon l'organigramme de la figure 4.8.

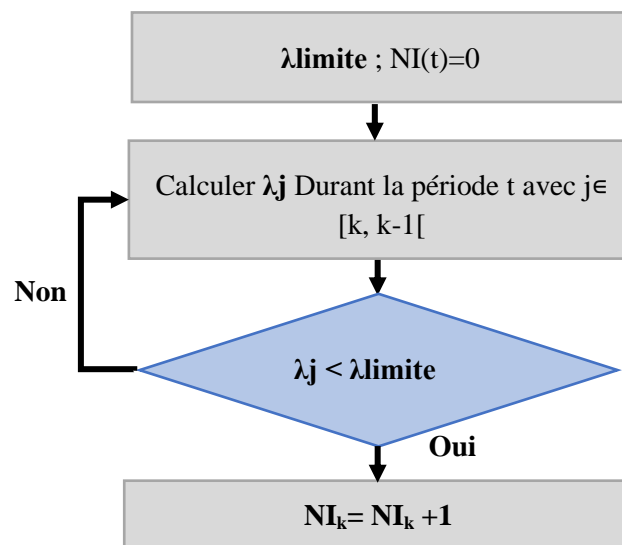


Figure 4.8 : Procédure de calcul du nombre d'inspection

#### 4.6.4 Politique de maintenance

La politique de maintenance proposée consiste à effectuer les actions de maintenance préventive à des instants prédéterminés  $n. T$  avec  $n = (1, \dots, \theta)$ . En effet, nous considérons que les actions de maintenance de maintenance préventive sont considérées parfait (as good as new). En outre, une réparation minimale est effectuée si une panne imprévue survient entre deux actions de maintenance préventive successives. Nous considérons que le temps d'action de maintenance préventive est négligeable par rapport au temps de réparation minimale. La figure 4.9 représente

l'évolution du taux de défaillance en fonction du temps lorsque la réparation est minimale et la réparation est parfaite.

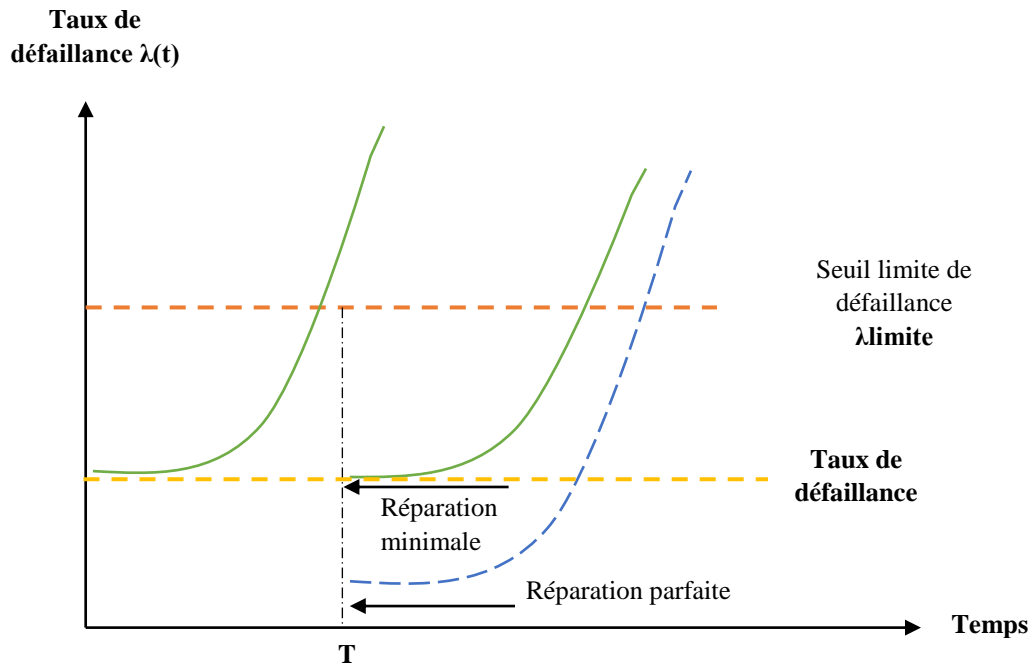


Figure 4.9 : Evolution du taux de défaillance en fonction du temps

En effet, l'optimisation de la stratégie de maintenance consiste à déterminer le taux optimal de maintenance préventive  $\theta^*$ , ainsi que la durée entre deux actions successives de maintenance préventive  $T^*$ . L'équation (4.14) présente la relation entre les deux paramètres.

$$T^* = \ln\left(\frac{H}{\theta^*}\right) \times \Delta t \quad (4.14)$$

Nous considérons que la dégradation de la machine dépend du temps et de la cadence de production. Par la suite, le taux de défaillance est exprimé par l'équation (4.15) (Hajej, Dellagi & Rezg, 2009).

$$\lambda_k(t) = \lambda_{(k-1)}(\Delta t) + \frac{U_k}{U_{max}} \lambda_n(t) \quad (4.15)$$

Dans cet ordre d'idées, nous avons supposé que notre système de production fabrique des produits multiples  $p$  avec ( $p=1, \dots, P$ ). Par conséquent, le taux de défaillance peut être exprimé comme suit :

$$\text{Pour } p=1 : \lambda_{1,k}(t) = \lambda_{(1,k-1)}(\Delta t) + \frac{U_{1,k}}{U_1^{max}} \lambda_n(t)$$

$$\text{Pour } p=2 : \lambda_{2,k}(t) = \lambda_{(2,k-1)}(\Delta t) + \frac{U_{2,k}}{U_2^{max}} \lambda_n(t)$$

.....

$$\text{Pour } p=P : \lambda_{P,k}(t) = \lambda_{(P,k-1)}(\Delta t) + \frac{U_{P,k}}{U_P^{max}} \lambda_n(t)$$

Nous additionnons toutes les équations, ainsi nous obtenons :

$$\lambda_{1k}(t) + \lambda_{2k}(t) + \dots + \lambda_{pk}(t) = \lambda_{(1k-1)}(\Delta t) + \lambda_{(2k-1)}(\Delta t) + \dots + \lambda_{(pk-1)}(\Delta t) + \left(\frac{U_{1k}}{U_1^{max}} + \frac{U_{1k}}{U_2^{max}} + \dots + \frac{U_{1k}}{U_p^{max}}\right) \lambda_n(t)$$

En d'autres termes, la sommation des taux de défaillance est exprimée par l'équation (4.16).

$$\sum_{p=1}^P \lambda_{pk}(t) = \sum_{p=1}^P \lambda_{(pk-1)}(\Delta t) + \lambda_n(t) \sum_{p=1}^P \frac{U_{pk}}{U_p^{max}} \quad (4.16)$$

Par conséquent, le taux de défaillance peut être exprimé par l'équation (4.17).

$$\lambda_k(t) = \lambda_0(t_0) + \sum_{p=1}^P \sum_{l=1}^{k-1} \frac{U_{pl}}{U_p^{max}} \lambda_0(\Delta t) + \sum_{p=1}^P \frac{U_{pk}}{U_p^{max}} \lambda_n(t) \quad t \in [0, \Delta t] \quad (4.17)$$

Ensuite, nous soulignons que le nombre de panne est représenté suivant l'équation (4.18).

$$ENF_k = \sum_{i=1}^k \int_0^{\Delta t} \lambda_i dt \quad (4.18)$$

Ainsi, le nombre moyen de défaillances ENF dépend du taux de production durant chaque période  $k$  et du taux de maintenance préventive  $\theta$  (équation 4.19).

$$ENF = \sum_{j=0}^{(\theta-1)} \left( \sum_{i=(j\frac{T}{\Delta t}+1)}^{(j+1)\frac{T}{\Delta t}} \int_0^{\Delta t} \lambda_k(t) dt \right) + \sum_{k=\theta\frac{T}{\Delta t}}^H \int_0^{\Delta t} \lambda_k(t) dt \quad (4.19)$$

Par conséquent, le coût de la stratégie de maintenance est la somme du coût de la maintenance préventive et du coût de la maintenance corrective donnée par l'expression suivante (équation 4.20) :

$$MC = \left( \frac{CP \cdot (\theta - 1) + CM \cdot ENF}{\text{Preventive} + \text{Corrective}} \right) \quad (4.20)$$

L'équation (4.21) exprime le coût total de l'approche intégrée, qui est la somme des coûts de production, de qualité, de maintenance et de sous-traitance.

$$(TC) = \text{Min} \left( \begin{array}{cccc} \text{PC} & + & \text{SC} & + & \text{QC} & + & \text{MC} \\ \text{Production} & + & \text{sous-traitance} & + & \text{Qualité} & + & \text{Maintenance} \end{array} \right) \quad (4.21)$$

La fonction objectif à minimiser est :

$$\sum_{k=1}^N \sum_{p=1}^P (x_{pk} \pi_p + S_{pk} s_p + I_{pk} h_p + B_{pk} b_p) + \sum_{k=1}^N \sum_{p=1}^P (V_{ipk} C_{sub_i} U_i) + U_i D_i Qd$$

$$+ \sum_{k=1}^N \sum_{p=1}^P (NI_k q + NI_k uPS_k + \alpha_p PS_k x_{pk}) + CP(\theta - 1) + CM.ENF$$

Sous les contraintes suivantes :

$$x_{pk} \leq S_{pk} G_p \quad (4.22)$$

$$I_{pk} - B_{pk} = I_{pk-1} - B_{pk-1} + V_{pk} + x_{pk} - d_{pk} \quad (4.23)$$

$$\sum_{p=1}^P x_{pk} S_{pk} + \sum_{p=1}^P \tau_{pk} S_{pk} \leq W_k \quad (4.24)$$

$$W_k = Z - ENF_k TMR - \sum_{p=1}^P \tau_{pk} S_{pk} \quad (4.25)$$

$$\sum_{k=1}^N d_{pk} > \sum_{k=1}^N x_{pk} \quad (4.26)$$

$$0 < V_{ipk} \leq V_{ip}^{max} \quad (4.27)$$

$$\sum_{i=1}^M U_i = 1 \quad (4.28)$$

$$V_{ipk}, x_{pk}, I_{pk}, B_{pk}, \lambda_{limite}, NI_k \geq 0 \quad U_i, S_{pk} \in \{0, 1\} \quad (4.29)$$

## 4.7 Procédure d'optimisation

### 4.7.1 Description de la procédure d'optimisation

Pour résoudre notre problème, nous utilisons une méthode approchée AG du solveur Matlab, car il est difficile de résoudre notre modèle avec une méthode exacte. Nous avons appliqué les algorithmes génétiques (GA) pour résoudre notre modèle mathématique proposé puisqu'ils sont plus efficaces. Afin de choisir les paramètres de notre algorithme d'optimisation, les plans d'expérience sont mis en œuvre. La section suivante présente la méthode de Taguchi pour simplifier le plan d'expérience afin de mettre en évidence les influences de divers facteurs sur la réponse. On note que la méthode du Taguchi se caractérise par une réduction considérable du nombre de tests, tout en conservant une précision raisonnable.

### 4.7.2 Méthode de Taguchi

Taguchi et Yokoyama (1993) ont développé des méthodes statistiques connues sous le nom de méthodes Taguchi pour améliorer la qualité des produits et des processus. Ces méthodes consistent en un certain nombre d'approches de conception expérimentale. La méthode vise à fournir autant d'informations que possible avec un minimum de tests, en exploitant les facteurs qui influencent les



performances du processus. La méthode de Taguchi est facilement applicable, en utilisant un indicateur de variation du rapport signal/bruit (S/N) représenté par l'équation (4.30).

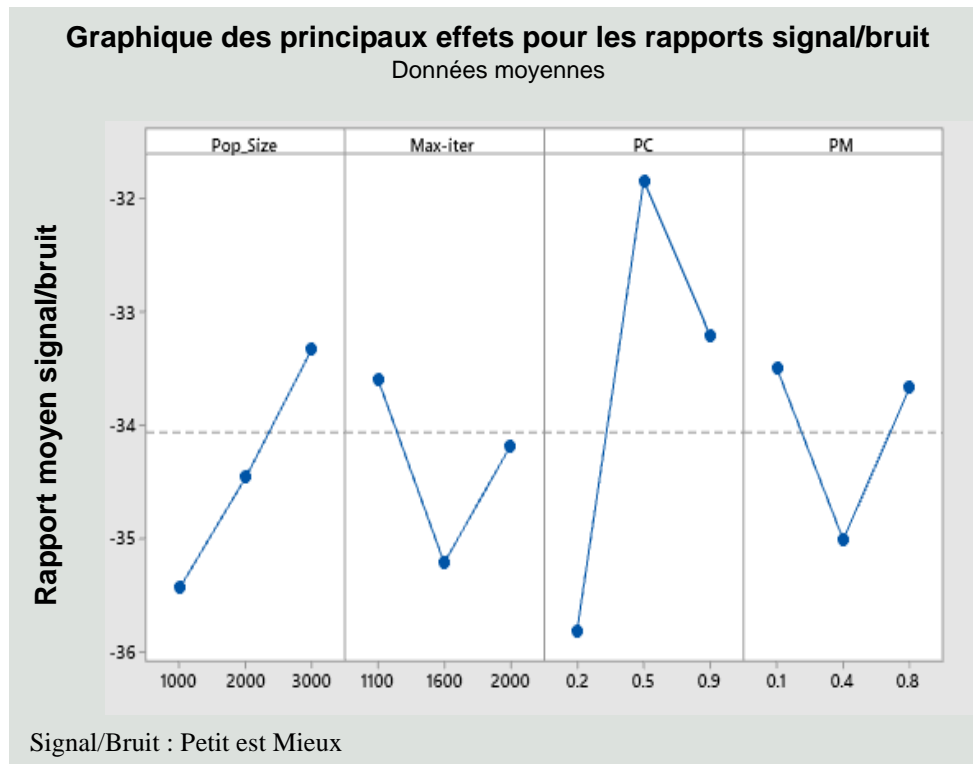
$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4.30)$$

En outre, la taille de la population, le nombre maximal d'itérations, la probabilité de croisement et la probabilité de mutation sont tous des facteurs critiques qui influencent l'approche d'optimisation. En effet, nous utilisons Minitab pour obtenir un tableau orthogonal où chaque colonne correspond au niveau des effets que nous voulons analyser. Nous supposons 27 séries d'expériences à partir de la distribution du tableau orthogonal, et trois niveaux ont été attribués à chaque facteur, comme le montre le tableau 4.2.

**Tableau 4.2 :** Les niveaux des paramètres des algorithmes génétiques

Facteurs	Taille de la population	Nombre maximum d'itérations	Probabilité de croisement	Probabilité de mutation
Niveau 1	1000	1100	20%	10%
Niveau 2	2000	1600	50%	40%
Niveau 3	3000	2000	90%	80%

La figure 4.10 montre les principaux effets générés par Minitab. Les quatre facteurs considérés doivent être ajustés de manière à ce que : la taille de la population = 3000, le nombre d'itérations = 1100, la probabilité de mutation = 0,1 et la probabilité de croisement = 0,5. Le tableau 4.3 indique le niveau de chaque facteur sélectionné dans la méthode d'optimisation adoptée pour la résolution du système.



**Figure 4.10 :** Représentation graphique des principaux effets du ratio (S/B)

**Tableau 4.3** : Les paramètres optimaux des algorithmes génétiques

Taille de la population	Nombre maximum d'itérations	Probabilité de croisement	Probabilité de mutation
3000	1100	50%	10%

#### 4.8 Résultats numériques

Dans cette section, nous présentons un exemple numérique pour illustrer notre approche. A cet effet, les données d'entrée sont sélectionnées par rapport à la référence de (Fakher B. H., 2016). Nous considérons une machine fabriquant deux produits  $P=2$  pendant 6 mois ( $H = 6$ ). Les coûts unitaires utilisés dans notre approche sont les coûts moyens de (Fakher B. H., 2016), puisque ce dernier a considéré trois machines fabriquant deux types de produits. Ensuite, nous supposons que le taux de défaillance est représenté par la loi de *Weibull* de paramètres  $\beta$ ,  $\alpha$  et  $\gamma$  qui sont respectivement le paramètre d'échelle, le paramètre de forme et le paramètre de position. Les principales données du problème sont présentées dans les tableaux suivants.

**Tableau 4.4** : La demande des produits

Période $t$	La demande du produit 1	La demande du produit 2
1	3500	2500
2	4000	2000
3	1500	1500
4	2500	1500
5	1500	3500
6	5000	3500

**Tableau 4.5** : Les paramètres de production

Produit $p$	Coût de fabrication $\pi_p$	Coût de Setup $s_p$	Coût de stockage $h_p$	Coût de rupture $b_p$	Capacité maximale $G_p$
1	7	35	2	32	2500
2	9	22	2	32	3000

**Tableau 4.6** : Les paramètres de qualité

Coût d'inspection qualité $u$	Coût d'ajustement $q$	Coût de contrôle qualité $\alpha_p$	$\lambda_{limite}$
40	30	2	0.000125

**Tableau 4.7** : Les paramètres de maintenance

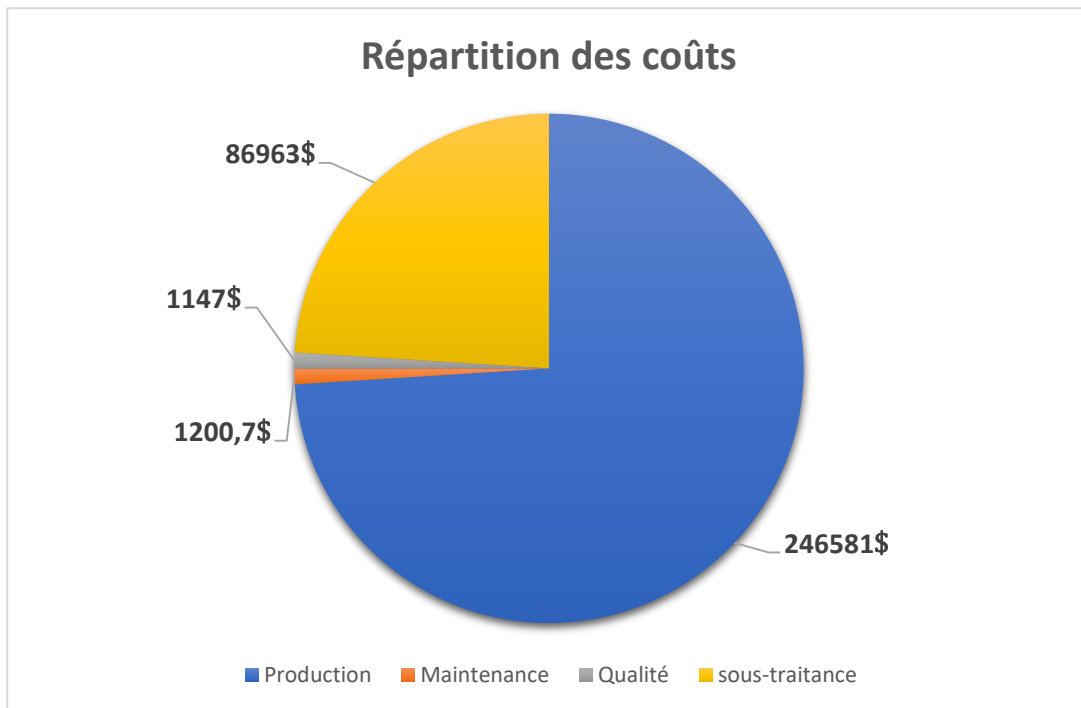
CM	CP	TMR	$\lambda_0$	$\beta$	$\gamma$	$\eta$
1000	400	0.03	0	2	0	100

**Tableau 4.8** : Les paramètres de sous-traitance

	<i>Produit 1</i>		<i>Produit 2</i>
	<b>Sous-traitant 1</b>	$V_{1p}^{max}$	1500
Csub <sub>1</sub>		10	13
D <sub>1</sub>		30	
<b>Sous-traitant 2</b>	$V_{2p}^{max}$	2000	1400
	Csub <sub>2</sub>	8	11
	D <sub>2</sub>	50	
<b>Sous-traitant 3</b>	$V_{3p}^{max}$	1000	700
	Csub <sub>3</sub>	13	16
	D <sub>3</sub>	15	
Q <sub>d</sub>	2		

#### 4.9 Analyse et discussions

La meilleure solution trouvée à l'aide notre algorithme génétique est présentée dans le tableau 4.9. Ensuite, la figue 4.11 montre la répartition des coûts tels que la valeur optimale du coût total est égale à 353.892\$, dont le coût de production est égal à 264.581\$, le coût de qualité est égal à 1147\$, le coût de maintenance est égal à 1200,7\$ et enfin le coût de sous-traitance est égal à 86.963\$. En ce qui concerne la stratégie de maintenance adoptée, le taux de maintenance préventive est égal à 4.



**Figure 4.11** : Répartition des coûts de l'approche proposée

**Tableau 4.9** : Les résultats obtenus par la méthode des algorithmes génétiques

Période	Production $x_{pk}$		Stockage $I_{pk}$		Rupture $B_{pk}$		Setup $S_{pk}$		Sous-traitance $v_{ipk}$		Nombre d'inspection $NI_k$
	Produit 1	Produit 2	Produit 1	Produit 2	Produit 1	Produit t2	Produit t1	Produit 2	Produit 1	Produit 2	
1	1615	758	0	0	0	0	1	1	382	879	0
2	796	2842	0	1166	0	0	1	1	1903	324	0
3	2358	350	76	633	1301	0	1	1	519	617	1
4	1817	421	1094	678	0	0	1	1	1701	1124	4
5	1705	2523	2480	18	0	0	1	1	681	317	11
6	2309	1625	843	0	0	1805	1	1	1054	52	11

La modélisation intégrée n'est pas facile, car elle est généralement multicritère et multi-objectif. A travers notre modèle, nous avons montré une interaction marquée entre les trois fonctions : production, maintenance et qualité, en tenant compte de la contrainte d'externalisation. Tout d'abord, nous constatons que le nombre d'inspections augmente au fil du temps. En effet, pendant les deux périodes  $t=1$  et  $t=2$ , le nombre d'inspections est nul, puisque le taux de défaillance ne dépasse pas la valeur du taux de défaillance limite. Ensuite, dans la troisième période, le nombre d'inspections augmente de 1 à 4, puis de 4 à 11, dans la mesure où le taux de défaillance est considéré comme cumulatif. Bien que le coût de la qualité CQ soit considérablement remarquable, la stratégie de contrôle de la qualité permet en retour à l'entreprise d'éviter la livraison de pièces non conformes à ses clients, afin de maintenir la bonne image de l'entreprise.

Nous présentons ci-dessus la variation du coût de la qualité en fonction du temps (figure 4.12, a), ainsi que la variation du nombre d'inspection durant chaque période pour trois valeurs de taux de défaillance limite tel que :  $\lambda_{limite2} < \lambda_{limite1} < \lambda_{limite3}$  (figure 4.12, b). Par la suite, nous soulignons que plus la  $\lambda_{limite}$  est petite, plus le nombre d'inspections est faible et plus le coût de la qualité est bas et vice versa. A cet effet, la détérioration de la machine augmente le taux de défaillance, ce qui entraîne une augmentation du nombre d'inspections, comme indiqué sur la figure (4.12, b). Par conséquent, il est nécessaire de réduire la dégradation des machines en procédant à des actions de maintenance préventive visant à empêcher l'augmentation du coût de la qualité. Il est également important de déterminer le taux de défaillance limite  $\lambda_{limite}$ . Ce paramètre permet de détecter les défauts au bon moment et donc de ne pas gaspiller le surcoût de la qualité.

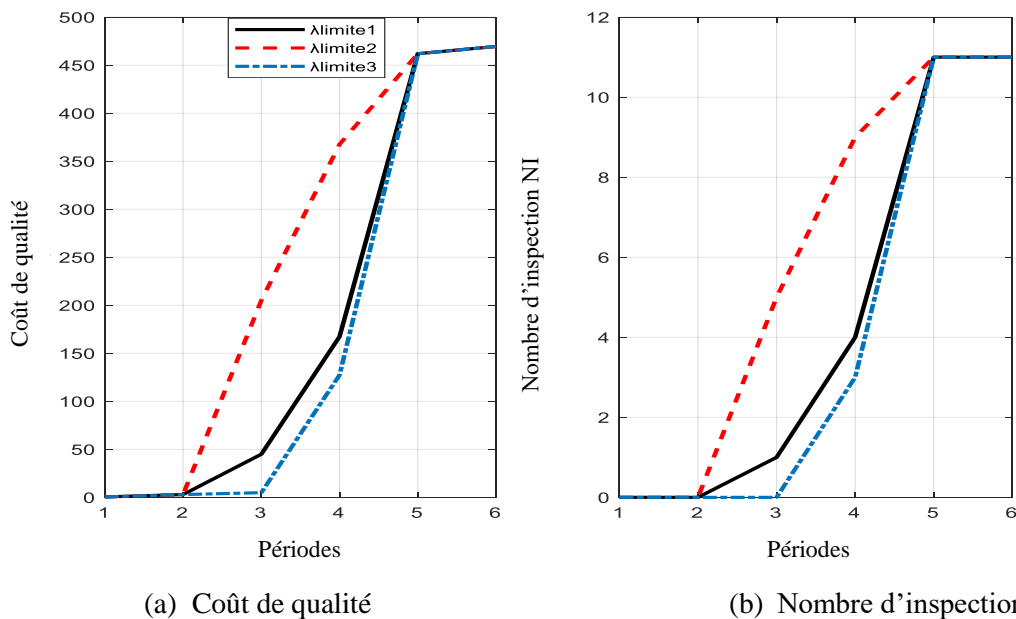
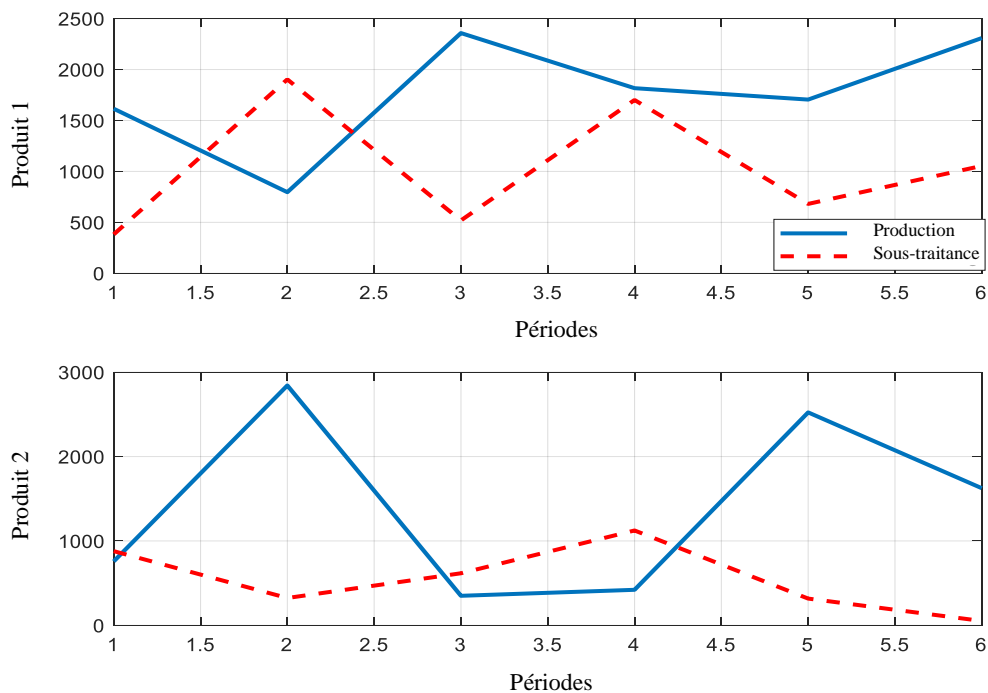


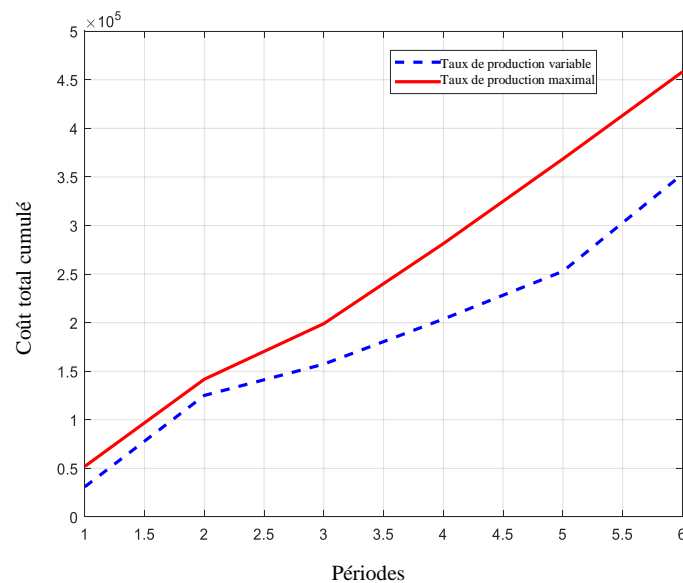
Figure 4.12 : Influence de la limite du taux de défaillance sur le coût de la qualité et le nombre d'inspection

En ce qui concerne la stratégie de production, nous indiquons que le taux de production est variable sur les 6 périodes de production en fonction de la demande des clients, comme le montre la figure 4.13. Autrement dit, le taux de production des deux produits n'a pas atteint le taux de production maximum ou minimum.



**Figure 4.13 :** Variation du taux de production et du taux de sous-traitance

La figure 4.14 montre que le coût total cumulé est minimal lorsque le taux de production est variable. Cela favorise la fabrication à taux variable. En effet, le DO peut fabriquer à capacité maximale et la sous-traitance est utilisée si la production régulière est à pleine capacité. Cependant, l'utilisation cumulative des machines de fabrication du DO peut précipiter la dégradation des machines et donc augmenter le risque de défaillances, de défauts, de retards, etc. En conséquence, les coûts de maintenance, le risque d'arrêt de la chaîne de production et le nombre de produits défectueux augmentent.



**Figure 4.14 :** Comparaison du coût total de production cumulé entre le taux de production variable et maximal

La sous-traitance a permis de combler le fossé entre la production interne et la demande des clients. En outre, la contrainte de la sous-traitance permet de fournir des produits sans défauts. Cependant, la sous-traitance ne se justifie pas toujours par l'incapacité de production, mais aussi par la nécessité de prendre en compte la question de la minimisation des coûts. Cela se justifie dans une période où la demande est inférieure à la capacité de production maximale (période 3), la demande est satisfaite par la production interne ainsi que par la sous-traitance (tableau 4.9). En dépit des coûts élevés généralement proposés par les sous-traitants, la production en interne génère également des coûts de production, de qualité et de maintenance. En d'autres termes, le critère du coût de sous-traitance indique la valeur du coût de vente unitaire minimal qui doit être fixé pour qu'il soit rentable pour l'entreprise contractante.

Par la suite, le deuxième sous-traitant est le plus optimal des trois sous-traitants. En effet, bien que le deuxième sous-traitant facture un coût de transport élevé, le coût unitaire de la sous-traitance est minime. Par conséquent, le DO doit élargir la zone géographique de sélection des sous-traitants, étant donné qu'il existe des entreprises sous-traitantes qui sont géographiquement éloignées de l'entreprise principale, mais qui peuvent offrir des tarifs minimums. De plus, notre approche est certainement basée sur le principe que la dégradation influence plusieurs indicateurs de performance des machines ; elle est principalement axée sur la qualité des articles produits et la fiabilité de la machine. Les actions de maintenance peuvent réduire la détérioration des machines et améliorer la qualité des produits et la fiabilité des machines.

Pour valider notre approche, nous comparons nos résultats avec ceux de (Fakher B. H., 2016). En effet, nous avons utilisé des valeurs moyennes du coût unitaire. Notre système de production est composé d'une seule machine produisant deux types de produits, en ayant recours à la sous-traitance. Par contre, le système de production de (Fakher B. H., 2016) est composé de trois machines fabriquant deux types de produits. Donc, pour comparer les deux résultats, nous prenons en compte la limitation budgétaire des actions de maintenance préventive ainsi que le coût de la maintenance préventive réalisée par notre approche.

**Tableau 4.10** : Les résultats de comparaison

<b>Approches</b>	<b>Coût total (\$) (Fakher B. H., 2016)</b>	<b>Coût total (\$) Notre approche</b>
<b>Coût de MP</b>		
<b>1250 \$</b>	<b>462.680 \$</b>	
<b>1200 \$</b>		<b>353.892 \$</b>

Nous constatons que le coût total optimal trouvé en utilisant notre approche est minimal, en le comparant au coût total optimal de (Fakher B. H., 2016). Cela montre que la sous-traitance est une bonne solution pour l'industrie manufacturière afin de répondre à la demande manquante et de minimiser le coût total.

#### **4.10 Analyse de sensibilité**

Dans cette section, nous menons une succession d'expériences à l'aide d'exemples numériques. En effet, l'analyse de sensibilité proposée indique une politique de contrôle des coûts de production, de maintenance de la qualité et de sous-traitance. Les résultats présentés dans le tableau 4.11 montrent les diverses configurations présentes et comparées à l'état de référence. Dans la suite, nous présentons l'impact de chaque coût unitaire sur les variables de décision et sur le coût total.



- **Variation des paramètres de production**

Nous constatons que l'augmentation du coût unitaire de fabrication entraîne une diminution des taux de production, ce qui favorise le recours à la sous-traitance. Le taux de MP et le coût de la qualité sont en baisse, ce qui justifie que les coûts de la qualité soient fortement liés aux coûts de production et de maintenance. Inversement, lorsque le coût unitaire de la production interne diminue, le taux de MP et le coût de la qualité diminuent, ce qui justifie que les coûts de la qualité soient fortement liés aux coûts de production et de maintenance.

De plus, la variation du coût unitaire de setup n'influence pas les variables de décision, puisque le donneur d'ordres est obligé de produire pour satisfaire la demande du client à la fin de chaque période de l'horizon de planification. En ce qui concerne l'augmentation du coût unitaire des stocks. Le donneur d'ordres réduit la fabrication en interne, ce qui réduit le nombre d'inspections et le taux de MP. En effet, la diminution du taux de production interne retarde la dégradation de la machine. Ensuite, nous constatons que l'augmentation du coût unitaire de rupture, le contractant fabrique plus pour éviter les coûts de rupture, ainsi que pour garder la bonne image de l'entreprise. La contribution de la sous-traitance est également importante. D'autre part, le taux de maintenance et le nombre d'inspections diminuent, de sorte que la machine est plus opérationnelle.

- **Variation des paramètres de qualité**

Nous constatons que lorsque nous augmentons les coûts unitaires de la qualité (inspection, ajustement et contrôle de la qualité), le nombre d'inspections est réduit, d'où la diminution du taux de production car l'entreprise peut atteindre des coûts élevés en cas de fabrication avec un taux de production interne maximum. En effet, la contribution de l'externalisation est également importante, puisque le sous-traitant fabrique des produits de qualité conforme. Les actions de maintenance préventive sont retardées afin de rendre les machines le plus opérationnel possible. Le taux de maintenance préventive augmente, de sorte que la machine est maintenue dans un état contrôlé.

- **Variation des paramètres de sous-traitance**

Nous constatons que l'augmentation du coût unitaire d'externalisation ainsi que du coût unitaire du transport réduit le taux de sous-traitance et augmente le taux de production interne. En effet, la machine est plus utilisée, ce qui augmente le taux de MP pour réduire la détérioration de la machine. Ensuite, l'augmentation du taux de production entraîne une augmentation du nombre d'inspections afin d'éviter de livrer des produits non conformes au client. Inversement, lorsque le coût unitaire de l'externalisation et du transport diminue.

- **Variation des paramètres de Maintenance**

Nous notons que l'augmentation du coût unitaire de la maintenance préventive réduit le taux de maintenance préventive. Afin d'éviter la dégradation des machines, le taux de production diminue, ce qui entraîne une diminution du nombre d'inspections. Pour satisfaire la demande des clients, le taux de sous-traitance augmente. Ensuite, l'augmentation du coût unitaire de la maintenance corrective entraîne une augmentation du taux de maintenance préventive, afin d'éviter les pannes fréquentes des machines.

De plus, le taux de production diminue pour éviter la dégradation des machines, ce qui entraîne une diminution du nombre d'inspections de qualité. Afin de satisfaire la demande des clients, la sous-traitance est favorisée, d'où l'augmentation du taux de sous-traitance.

Tableau 4.11 : Etude de sensibilité et paramètres du politique de contrôle

Coût optimal Coût unitaire	Coût de production		Coût de qualité		Coût de maintenance		Coût de sous-traitance		Coût total optimal		Remarques	
	+	-	+	-	+	-	+	-				
Cas initial	264581		1147		1200,7		86963		353892			
Fabrication	371997	196613	1065.5	1189	400.8	1600.8	92166	81749	466.029	342651	$\Sigma U \downarrow \Sigma V \uparrow$ $\Sigma NI \uparrow \theta \downarrow$	$\Sigma U \Sigma V \downarrow$ $\Sigma NI \uparrow \theta \uparrow$
Setup	264779	264419	1147	1147	1200,7	1200.7	86963	86963	354090	353730	-	-
Stockage	266773	251.210	1065.5	1188	800.8	2000,9	92166	84345	360805	338740	$\Sigma U \downarrow \Sigma V \uparrow$ $\Sigma NI \downarrow \theta \downarrow$	$\Sigma U \uparrow \Sigma V \downarrow$ $\Sigma NI \uparrow \theta \uparrow$
Rupture	217157	226308	1065.5	1146.1	800.8	800.9	89581	92069	308604	320.324	$\Sigma U \uparrow \Sigma V \uparrow$ $\Sigma NI \downarrow \theta \downarrow$	$\Sigma U \downarrow \Sigma V \uparrow$ $\Sigma NI \downarrow \theta \downarrow$
Inspection	254601	276485	1565.5	647.8	2000.9	1600.8	92069	84345	350.236	363079	$\Sigma U \downarrow \Sigma V \uparrow$ $\Sigma NI \downarrow \theta \uparrow$	$\Sigma U \uparrow \Sigma V \downarrow$ $\Sigma NI \uparrow \theta \uparrow$
Ajustement	255536	281691	1065.5	1226.7	1600.8	1600.8	90879	83058	349081	367576	$\Sigma U \downarrow \Sigma V \uparrow$ $\Sigma NI \downarrow \theta \uparrow$	$\Sigma U \uparrow \Sigma V \downarrow$ $\Sigma NI \uparrow \theta \uparrow$
Contrôle de la qualité	260316	267311	1252.7	1058.2	2000.9	1600.8	88261	85654	351831	355624	$\Sigma U \downarrow \Sigma V \uparrow$ $\Sigma NI \downarrow \theta \uparrow$	$\Sigma U \uparrow \Sigma V \downarrow$ $\Sigma NI \uparrow \theta \uparrow$
Externalisation	264704	257657	1188	1065.5	1600.8	800.8	146385	43315	413.878	302838	$\Sigma U \uparrow \Sigma V \downarrow$ $\Sigma NI \uparrow \theta \uparrow$	$\Sigma U \downarrow \Sigma V \uparrow$ $\Sigma NI \downarrow \theta \downarrow$
Transportation	268773	257657	1187.6	1065.5	1600.8	800.8	85545	89131	357106	348654	$\Sigma U \uparrow \Sigma V \downarrow$ $\Sigma NI \uparrow \theta \uparrow$	$\Sigma U \downarrow \Sigma V \uparrow$ $\Sigma NI \downarrow \theta \downarrow$
Préventive	257657	266096	1065.5	1188.2	1200.9	800.7	89581	83058	349.504	351.143	$\Sigma U \downarrow \Sigma V \uparrow$ $\Sigma NI \downarrow \theta \downarrow$	$\Sigma U \uparrow \Sigma V \downarrow$ $\Sigma NI \uparrow \theta \uparrow$
Corrective	258424	262378	1146.1	1188.5	1601.5	800.4	94654	84345	355826	348.712	$\Sigma U \downarrow \Sigma V \uparrow$ $\Sigma NI \downarrow \theta \uparrow$	$\Sigma U \uparrow \Sigma V \downarrow$ $\Sigma NI \uparrow \theta \uparrow$

## 4.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la problématique de la gestion conjointe des stratégies de production et de maintenance dans le cadre d'un système de production imparfait, pouvant entraîner des non-conformes. Cependant, notre approche tient en compte le concept de sous-traitance comme étant une solution permettant de combler le fossé entre la production interne et la demande des clients. Du point de vue fiabilité, nous avons abordé la dégradation des systèmes de production.

Au départ, nous avons élaboré une analyse de l'état de l'art sur l'intégration des plans de production, de maintenance et de qualité. A cet effet, nous avons montré les caractéristiques du système de production imparfait. Ensuite, nous avons classifié et analysé les travaux existants dans le contexte d'intégration. Nous avons par la suite, mis en valeur l'impact de la sous-traitance sur la qualité des produits fabriqués. Par conséquent, la politique de contrôle proposée consiste à optimiser la stratégie de sous-traitance dans le cadre d'une approche intégrée de la maintenance, de la production et du contrôle de la qualité. A travers notre approche, nous avons déterminé pour chaque produit et durant chaque période, le taux de production, le taux de sous-traitance, le taux de maintenance préventive, la durée entre deux actions de maintenance préventive, le nombre d'inspections, le niveau de stockage et le niveau de rupture. En parallèle, nous avons proposé une stratégie de choix optimal d'un sous-traitant permanent. Ce choix est basé sur multicritère paramètres à savoir : le coût unitaire de la sous-traitance, la capacité maximale du sous-traitant et la distance entre le sous-traitant et le stock. Ensuite, nous avons proposé également une stratégie de contrôle de la qualité qui nous permet d'inspecter, d'ajuster et de contrôler le processus, sur la base du taux de défaillance limite  $\lambda_{\text{limite}}$  fourni par l'historique de la machine. Pour résoudre notre problème, une approche d'optimisation évolutive est proposée, à savoir l'algorithme génétique (AG). Ensuite, pour ajuster les paramètres de l'AG, nous avons utilisé la méthode de Taguchi. Une analyse de sensibilité est également effectuée pour évaluer la robustesse de la politique de contrôle proposée. Au final, nous comparons nos résultats avec la littérature pour valider notre approche.

Dans cette optique, les résultats obtenus affirment l'influence de la variation du taux de production sur la dégradation des équipements de production. En effet, la fabrication avec une cadence maximale précipite la dégradation des équipements de production. A cet effet, le taux de défaillance dépend du temps et du taux de production. D'une autre part, nous avons examiné l'impact de la dégradation sur la qualité des produits fabriqués. Ainsi, plus l'équipement est en état dégradé plus les produits fabriqués sont non conformes. Certes, la stratégie de maintenance est essentielle pour minimiser la dégradation des équipements ainsi que la probabilité d'apparition des produits défectueux. Toutefois, la sous-traitance est une solution pour l'entreprise contractante. Elle est une pratique courante pour le DO, permettant de livrer des produits conformes. Ainsi, la sous-traitance permet de faire face aux fluctuations de la demande client tout en minimisant le coût total, ce qui assure la bonne image de l'entreprise mère. Tout le monde en profite : le contractant et le sous-traitant qui peut aussi réaliser des gains en garantissant une relation gagnant-gagnant pour les deux parties. Enfin, nous avons montré la forte interaction entre le plan de production, la stratégie de maintenance, le contrôle qualité sous la contrainte de sous-traitance, ce qui justifie les résultats de notre approche développée.

# Conclusion générale et perspectives

Face à la concurrence intense, les entreprises doivent s'inscrire dans une démarche d'amélioration globale des performances industrielle. Ainsi, les demandes clients sont généralement croissantes et immédiates. Pour cela, dans cette thèse, nous nous sommes intéressés principalement aux développements de nouvelles approches de prise de décision tenant en compte d'une manière simultanée la planification de la production de la maintenance et celle de la qualité dans le cadre des stratégies de sous-traitance.

Dans un premier lieu, nous avons présenté les différents aspects du problème d'intégration des opérations de production et de maintenance ainsi que les stratégies de sous-traitance. De cette optique, l'analyse de l'état de l'art nous a permis de positionner notre problématique et de montrer les motivations de notre travail.

Pour la deuxième partie de notre travail, l'analyse de l'existant nous a conduits dans un premier temps de présenter une nouvelle stratégie intégrée de la production et de la maintenance faisant appel à la sous-traitance. A cet effet, nous avons proposé une politique de contrôle qui vise à déterminer un plan optimal de production et une stratégie de maintenance efficace. Et, du point de vue sous-traitance, nous avons proposé une stratégie permettant de faire un choix optimal d'un seul sous-traitant parmi plusieurs. En effet, la décision de choix de sous-traitance est une décision multicritère. Ce qui permet de considérer simultanément la capacité maximale et le coût unitaire du sous-traitant. Pour se faire, nous avons développé trois scénarios, dont le premier procure de bons résultats. Les résultats obtenus ont montré leur efficacité dans la minimisation du coût total de la fonction objectif en se comparant avec la littérature.

Par la suite, nous avons présenté l'intérêt d'étude de la dégradation des systèmes de production. A cet effet, nous avons considéré l'influence de la dégradation des systèmes de production sur les plans de production interne et externe ainsi que sur la stratégie de maintenance adoptée. Pour y parvenir, nous avons développé un modèle d'optimisation stochastique qui consiste à déterminer simultanément le taux de production, le taux de sous-traitance, le taux de maintenance préventive de chaque machine et le temps de travail de chaque machine, en minimisant simultanément la somme des coûts de production, de stockage, de retard, de sous-traitance et de maintenance. A cet égard, nous avons considéré un système de production constitué de multi-machine montées en parallèle avec l'intervention de sous-traitance. Étant donnée la complexité du modèle, nous avons transformé le modèle stochastique en un modèle déterministe. Pour résoudre notre problème, nous avons utilisé des méthodes exactes et approchées. Après avoir comparé les résultats obtenus des méthodes d'optimisation utilisées, nous avons trouvé que la valeur du coût total la plus optimale est celle trouvée par les algorithmes génétiques. D'après les résultats numériques, nous avons montré que la fabrication avec une cadence maximale précipite la dégradation des équipements de production, d'où la nécessité d'une stratégie de maintenance efficace afin de minimiser la fréquence des pannes des machines. De plus, l'intervention de la sous-traitance est justifiée par le manque de la capacité du donneur d'ordres. Dans le même contexte, la sous-traitance minimise la dégradation des équipements de production du contractant, vu que les équipements du contractant passent moins de temps à travailler en pleine cadence.

La quatrième partie concerne l'extension du problème précédent, nous avons traité cette fois si le cas d'un système de production composé d'une seule machine fabriquant plusieurs types de produits. Compte tenu de la dégradation des équipements de production, nous avons considéré un système de production imparfait pouvant entraîner des produits non-conformes. Face à ces

incertitudes, une stratégie de contrôle de la qualité est mise en place qui consiste à inspecter les produits fabriqués, à ajuster la machine et à contrôler la qualité selon un organigramme, en se basant sur le taux de défaillance limite ( $\lambda_{\text{limite}}$ ). En effet, le système doit répondre à une demande constante et variable durant chaque période de l'horizon de planification et qui dépasse la capacité maximale du contractant. Pour compléter le manque de la demande client, nous avons proposé une stratégie de sous-traitance. Cette stratégie consiste à choisir un seul sous-traitant sur la base de trois critères à savoir : le coût unitaire et la capacité maximale de sous-traitance ainsi que la distance entre le sous-traitant et le stock du contractant. La cible principale de cette partie est de déterminer durant chaque période la durée entre deux actions de maintenance préventive, le nombre d'inspections, le niveau de stockage et le niveau de rupture, en minimisant la somme des coûts de production, de maintenance, de qualité et de sous-traitance. Cependant, pour résoudre notre problème, nous avons utilisé une méta-heuristique basée sur les algorithmes génétiques. Toutefois, pour ajuster les paramètres de l'AG, nous avons utilisé la méthode de Taguchi. En effet, la robustesse de notre approche est évaluée à l'aide d'une analyse de sensibilité qui consiste à une succession des exemples numériques. Par ailleurs, nous avons comparé les résultats obtenus avec ceux de la littérature pour valider notre approche. Les résultats obtenus ont montré, en particulier, la dépendance étroite entre la production, la maintenance, la qualité et la sous-traitance. Ensuite, la variation du taux de production influence sur la dégradation des équipements de production. Ainsi, la dégradation des équipements favorise la fabrication des produits défectueux. En vue de diminuer la dégradation des équipements ainsi que la probabilité d'apparition des produits défectueux une stratégie de maintenance adéquate est indispensable. Ensuite, la contribution de la sous-traitance est remarquable, en termes de livraison des produits conformes ainsi que pour faire face à la fluctuation de la demande client tout en minimisant le coût total, en vue d'acquiescer des nouveaux marchés.

En perspective, des futures pistes de recherche peuvent être intéressantes :

- Comme première perspective, il serait intéressant de mener une étude en cas de plusieurs sous-traitants. Ensuite, nous comparons avec la stratégie d'un seul sous-traitant afin de déterminer celle la plus adéquate, prenant en compte les avantages et les inconvénients de chacune.
- D'autres part, nous jugeons intéressant d'intégrer la stratégie de retouche pour les produits défectueux au lieu de les rejetés afin de minimiser le gaspillage.
- Dans une autre perspective de recherche, nous jugeons utile de considérer la durée de vie résiduelle au niveau de la stratégie de maintenance. Ce qui consiste à déterminer la durée de disponibilité restante avant de tomber en panne lorsque l'équipement travail jusqu'à le temps  $t$ . Cela permet à l'entreprise de réduire les actions de maintenance préventive inutiles, en effectuant les actions de MP aux bons moments.
- Dans le secteur industriel, les entreprises disposent généralement de multi-machine fabriquant plusieurs types de produits. A cet effet, toutes les extensions citées précédemment peuvent être investies dans le cas d'un système industriel plus complexe de multiproduit et multi-machine.
- Afin de pouvoir étendre notre étude aux cas ou le système multiproduit et multi-machine ainsi lorsque la demande est aléatoire (mode stochastique), il est intéressant d'exploiter et de développer des algorithmes d'optimisation adéquate.

# Production scientifique

## Publications indexées SCOPUS :

- 1) **N. Hafidi, A. El Barkany and M. Mahmoudi**, Integration of maintenance and production strategies under subcontracting constraint: Classification and opportunity, *Journal of Mechanical Engineering and Sciences. UMP PUBLISHER*, Volume 11, Issue 3, pp. 2856-2882, September 2017. DOI: <https://doi.org/10.15282/jmes.11.3.2017.8.0259>
- 2) **Nouhayla Hafidi, Abdellah El Barkany and Morad Mahmoudi**, "Modelling and Optimization of Integrated Planning of Production and Maintenance with Subcontract Constraint", *International Journal of Engineering Research in Africa*, Vol. 40, pp. 184-203, 18 December 2018. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.40.184>
- 3) **Nouhayla HAFIDI, Abdellah EL BARKANY and Morad MAHMOUDI**, « Optimizing subcontracting choice in the context of integrated maintenance into production », *2018 International Colloquium on Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA 2018)*, 26-27 April 2018, Tangier, Morocco, Date Added to IEEE Xplore: 09 August 2018, Electronic ISSN: 2166-7373, IEEE, DOI: [10.1109/LOGISTIQUA.2018.8428293](https://doi.org/10.1109/LOGISTIQUA.2018.8428293)
- 4) **Nouhayla HAFIDI, Abdellah EL BARKANY, Abderrahman EL MHAMEDI and Morad MAHMOUDI**. Joint optimization of production and maintenance for multi parallel machine subject to degradation and subcontracting constraint. *Journal of Quality in Maintenance Engineering: Emerald PUBLISHING*, Volume 25, Issue 3, 14 Mai 2020. DOI: <https://doi.org/10.1108/JQME-01-2019-0012>
- 5) **Nouhayla HAFIDI, Abdellah EL BARKANY, Abderrahman EL MHAMEDI and Morad MAHMOUDI**. Integrated planning of production and maintenance for imperfect system with subcontracting strategies. *International Journal of Engineering Business Management*, Volume 12, pp.1-14, Juin 2020. DOI: <https://doi.org/10.1177/1847979020929783>

## Communications orales :

- 1) **Nouhayla Hafidi, Abdellah El Barkany and Ahmed El Khalfi**, Revue de la littérature sur les modèles de gestion intégrée de la maintenance et de la production sous contrainte de sous-traitance, *10<sup>ème</sup> Edition du Colloque International de la Logistique et de Supply Chain (LOGISTIQUA 2017)*, 27-28 Avril 2017, Rabat, Maroc.
- 2) **Nouhayla HAFIDI, Abdellah EL BARKANY et Morad MAHMOUDI**, Les modèles de gestion intégrée de la maintenance et de la production faisant appel à la sous-traitance : Etat de L'art, *Journée de Recherche Inter-Laboratoire (JRIL2017)*, 13 mai 2017, Fès, Maroc.
- 3) **Nouhayla HAFIDI, Abdellah EL BARKANY, Ahmed EL KHALFI et Morad MAHMOUDI**, Etude comparative des méthodes de gestion de la maintenance et de la production sous contrainte de sous-traitance, *3ème Congrès International du Génie Industriel et du Management des Systèmes (CIGIMS'2017)*, 17-18 mai 2017, Meknès, Maroc.

- 4) **N. HAFIDI, A. EL BARKANY et M. MAHMOUDI**, Optimisation du choix de sous-traitance dans le contexte de la gestion de la maintenance intégrée à la production, *1<sup>ère</sup> édition du Congrès International de Modélisation et Optimisation des Systèmes Mécaniques (CIMOSM'2017)*, 05-06 décembre 2017, Fès, Maroc.
- 5) Nouhayla HAFIDI, Abdellah EL BARKANY, Ahmed EL KHALFI et Morad MAHMOUDI, Integrated Optimization of Production and Maintenance Strategy Under Outsourcing Constraint, *International Conference on Technology, Engineering and Mathematics (TEM2018)*, Kenitra, Morocco, March 26-27, 2018.
- 6) Nouhayla HAFIDI, Abdellah EL BARKANY and Morad MAHMOUDI, « *Optimizing subcontracting choice in the context of integrated maintenance into production* », *2018 International Colloquium on Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA 2018)*, 26-27 April 2018, Tangier, Morocco, Date Added to *IEEE Xplore*: 09 August 2018, Electronic ISSN: 2166-7373, *IEEE*, DOI: [10.1109/LOGISTIQUA.2018.8428293](https://doi.org/10.1109/LOGISTIQUA.2018.8428293)
- 7) Hafidi Nouhayla, El Barkany Abdellah and Mahmoudi Morad, Stochastic Production and Maintenance Planning Optimisation for Multi Parallel Machine, *International Congress of Applied Modeling, Optimization and Planning (ICAMOP2019)*, 18-19 April 2019, Kenitra, MOROCCO.
- 8) Hafidi, N., EL Barkany A., EL Mhamedi, A., & Mahmoudi, M. Optimizing the integrated production, maintenance and quality planning with subcontracting constraint: a review. **11<sup>ème</sup> The International Conference on Integrated design and production**, (CPI'2019), Morocco, Fez, 14-16 October, 2019.

---

# Bibliographie

- Aarts, EH., & Lenstra, JK. (1997). Local search in combinatorial optimization: Princeton University Press.
- Abraham, K.G., & Taylor, S.K. (1996). Firms' use of outside contractors: theory and evidence. *Journal of Labour Economics, Vol.14, No.3, pp.394-424.*
- Absi, N., & Kedad-Sidhoum, S. (2009). Multi-Item capacitated lot-Sizing problem with set-up times and shortage costs: Polyhedral results.
- Adelheid Holl. (2008). Production subcontracting and location. *Regional Science and Urban Economics, Vol.38, pp.299-309.*
- Aghezzaf, EH., Jamali, MA. & Ait-Kadi, D. (2007). An integrated production and preventive maintenance planning model. *European Journal of Operational Research, Vol.181, pp.679-685.*
- Aguezzoul, A., & Ladet, P. (2006). Selection et evaluation des fournisseurs : Criteres et methodes. *Revue Francaise de gestion Industrielle. Vol.2, pp.5-27.*
- Alahmad, K. (2008). *Systèmes de contrôle de la qualité de production : méthodologie de modélisation, de pilotage et d'optimisation des systèmes de production.* Université Paul Verlaine-METZ : Thèse doctorat.
- Alaoui-Selsouli, M., Mohafid, A., & Najid, NM., (2012). Lagrangian relaxation-based heuristic for an integrated production and maintenance planning problem. *International Journal of Production Research, Vol.50, pp.3630-3642.*
- Al-Salamah, M., (2019). Economic production quantity in an imperfect manufacturing process with synchronous and asynchronous flexible rework rates. *Operations Research Perspectives, Vol.6.*
- Ambani, S.M. (2011). *Analytical estimation of throughput distribution for serial manufacturing systems with multi-state machines and its application.* Université de Michigan USA : Thèse doctorat.
- Amesse F., Dragoste L., Nollet J., & Ponce, S. (2001). Issues on partnering: evidences from subcontracting in aeronautics. *Technovation, Vol.21, pp.559-569.*
- Andersen, PH., & Christensen, PR. (2000). Inter-partner learning in global supply chains: lessons from NOVO Nordisk. *European Journal of Purchasing & Supply Management, Vol.6, pp.105-116.*
- Andersen, PH. (1999). Organizing international technological collaboration in subcontractor relationships: an investigation of the knowledge-stickiness problem. *Research Policy, Vol.28, pp.625-642.*
- Aouam, T., & Kumar, K. (2019). On the effect of overtime and subcontracting on supply chain safety stocks. *Omega, Vol.89, pp.1-2*
- Assid, M., Gharbi, A., & Dhouib, K. (2015). Joint production and subcontracting planning of



- unreliable multi-facility multi-product production systems. *Omega*, Vol.50, pp.54-69.
- Ayed, S. (2011). *Contribution au développement des stratégies de gestion de maintenance intégrée faisant appel à la sous-traitance*. Université Paul Verlaine de Metz : thèse doctorat.
- Ayed, S., Dellagi, S., & Rezg N. (2012), Joint optimisation of maintenance and production policies considering random demand and variable production rate. *International Journal of Production Research*, Vol.50, pp. 6870-6885.
- Ayed, S., Dellagi, S., & Rezg, N. (2010). Optimisation d'une politique de maintenance intégrée sous une contrainte de sous-traitance avec contribution de stock, *MOSIM'10-10 au 12 mai, Hammamet, Tunisie*.
- Ayed, S., Dellagi, S., & Rezg, N. (2011). Optimal integrated maintenance production strategy with variable production rate for random demand and subcontracting constraint. *IFAC Word Congress (IFAC'11), Milano, Italy*, pp.5207–5212.
- Ayed, S., Hajej, Z., Turki, S., & Rezg, N. (2016). FPA method for optimal production planning under availability/degradation machine and subcontracting constraint. *International Journal of Production Research*, Vol.55, pp.2135-2148
- Ayed, S., Turki, S., & Hajej, Z. (2015). Perturbation analysis for optimal production planning of a manufacturing system with subcontracting and machine degradation. *IFAC-PapersOnLine*, Vol.48, pp.2145-2152.
- Azadeh, A., Sheikhalishahi M., Mortazavi S. & Ahmadi Joog E. (2017). Joint quality control and preventive maintenance strategy: a unique taguchi approach, *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, Vol.8, pp.123-134.
- Bandyopadhyay, S., & Pathak, P. (2007). Knowledge sharing and cooperation in outsourcing projects — A game theoretic analysis. *Decision Support Systems*. Vol.43, pp.349-358.
- Barlow, R. E. & Proschan, F. (1965). *Mathematical Theory of Reliability*. New York: Wiley.
- Barlow, R.E. & Hunter L. (1960). Optimal preventive maintenance policies. *Operations Research*, Vol. 8, pp.90-100.
- Barlow, R.E. & Proschan, F. (1962). *Planned Replacement, Studies in Applied Probability & Management Science*, Arrow, Karlin and Svarf Edition, Stanford University Press, CA.
- Barthélemy J. (2007). *Stratégies d'externalisation : Préparer, décider et mettre en œuvre l'externalisation d'activités stratégiques* : Dunod.
- Belavendram N. (2010). Application of Genetic Algorithms for Robust Parameter Optimization. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, Vol.2, pp.211-220.
- Bellman, R. (1957). *Dynamic Programming*. 1st ed. Princeton University Press, New Jersey.
- Belmansour A.T. (2011). *Evaluation de l'efficacité de lignes de production avec machines multiétats et stocks intermédiaires*. Faculté Des Sciences et de Génie, Université Laval : Thèse de doctorat.
- Belmansour A.T. (2007). *Évaluation du taux de production d'une ligne avec stocks*

- 
- intermédiaires et machines à deux modes de défaillances par la technique d'agrégation.* L'université du Québec à Chicoutimi : Mémoire de la maîtrise en ingénierie.
- Belvaux, G., & Wolsey L. A. (2000). Lot-Sizing Problems: Modeling Issues and a Specialized Brand-and-Cut System BC-PROD, *Management Science*, Vol.46, pp.724-738.
- Benbouzid Sitayeb F. (2005). *Contribution à l'étude de la performance et de la robustesse des ordonnancements conjoints production/maintenance – cas du flowshop.* Université de Franche-Comté : Thèse doctorat.
- Ben-Daya. M. (2002). The economic production lot-sizing problem with imperfect production processes and imperfect maintenance. *International Journal of Production Economics*, vol.76, pp.257-264.
- Bennour, M., Bloch, C., & Zerhouni, N. (2001). Modélisation intégrée des activités de maintenance et de production. 3e Conférence Francophone de Modélisation et de SIMulation MOSIM'01, pp. 805-810.
- Ben-Salem, A., Gharbi, A., & Hajji, A. (2015). Environmental issue in an alternative production–maintenance control for unreliable manufacturing system subject to degradation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.77, pp.383-398.
- Bergeron, D., Jamali, MA., & Ait-Kadi D. (2009). Coupling Simulation and Optimization for an Integrated Production and Maintenance Planning in Manufacturing Systems. *IFAC Proceedings*, Vol.42, pp.1091-1095.
- Berry, A., (1997). SME competitiveness: the power of networking and subcontracting. Inter-American Development Bank.
- Bertrand, JWM., & Sridharan V. (2001). A study of simple rules for subcontracting in maketo-order manufacturing. *European Journal of Operational Research*.Vol.128, pp.509-531.
- Bouslah, B. (2015). *Conception conjointe des politiques de contrôle de production, de qualité et de maintenance des systèmes manufacturiers en dégradation.* Université de Montréal : Thèse doctorat.
- Bouslah, B., Gharbi, A., & Pellerin, R. (2018). Joint production, quality and maintenance control of a two-machine line subject to operation-dependent and quality-dependent failures. *International Journal of Production Economics*, Vol.195, pp.210-226.
- Bouslah, B., Gharbi, A., Pellerin, R., (2013). Joint optimal lot sizing and production control policy in an unreliable and imperfect manufacturing system. *International Journal of Production Economics*, Vol.144, pp.143-156.
- Bravard, J-L., & Morgan, R. (2006). Smarter outsourcing: An executive guide to understanding, planning and exploiting successful outsourcing relationships: Pearson Education.
- Buzacott, JA., Shanthikumar, JG. (1993). Stochastic models of manufacturing systems. Englewood Cliffs, N.J: Prentice Hall.
- Cagliano, R., & Spina, G. (2002). A comparison of practice-models between small manufacturers and subcontractors. *International Journal of Operations & Production*
-

---

*Management, Vol.22, pp.1367-1388*

- Cassady, C. R., & Kutanoglu, E. (2005). Integrating preventive maintenance planning and production scheduling for a single machine. *IEEE Transaction on Reliability, Vol.54, pp.304-310*.
- Chaabane, K., Khatab, A., Aghezzaf, EH., Diallo, C., & Venkatadri, U. (2018). Outsourcing selective maintenance problem in failure prone multi-component systems. *IFAC-PapersOnLine, Vol.51, Issue 11, pp.525-530*.
- Chaillou B. (1977). Définition et typologie de la sous-traitance. *Revue économique, pp.262-85*.
- Chakraborty, T., Giri, B.C., & Chaudhuri, K.S. (2009). Production lot sizing with process deterioration and machine breakdown under inspection schedule. *Omega, Vol.37, pp. 257-271*.
- Charlot, E., Kenné, JP., & Nadeau, S., (2007). Optimal production, maintenance and lockout/tagout control policies in manufacturing systems. *International Journal of Production Economics, Vol.107, pp.435-450*.
- Chelbi, A., & Aït-Kadi, D. (2003). Joint Optimal Buffer Inventory and Preventive Maintenance Strategy for a Randomly Failing Production Unit. *Journal of Decision Systems, Vol.12, pp.21-30*.
- Chelbi, A., & Rezg, N. (2006). Analysis of a production/inventory system with randomly failing production unit subjected to a minimum required availability level. *International Journal of Production Economics, Vol.99, pp131-143*.
- Cheng, GQ., Zhou, BH., & Li, L. (2016). Joint optimisation of production rate and preventive maintenance in machining systems. *International Journal of Production Research, Vol.54, pp.6378-6394*.
- Cheng, GQ., Zhou, BH., & Li, L. (2018). Integrated production, quality control and condition-based maintenance for imperfect production systems. *Reliability Engineering and System Safety, Vol.175, pp. 251-264*.
- Chouikhi, H., Dellagi, S., & Rezg, N. (2012). Development and optimisation of a maintenance policy under environmental constraints. *International Journal of Production Research, Vol.50, pp.3612-6320*.
- Cléroux, R., & Ait-Kadi, D. (1988). A Summary of Periodic Replacement Policies with Minimal Repair. *Incestigacion Operativa, Vol. 1, No.1, pp.43-54*.
- Colledani, M., & Tolio, T. (2012). Integrated quality, production logistics and maintenance analysis of multi-stage asynchronous manufacturing systems with degrading machines. *CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 61, pp.455-458*.
- Colledani, M., Tolio, T., & Yemane, A. (2018). Production quality improvement during manufacturing systems ramp-up. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol.23, pp.1755-5817*.
- Cortinhal, M.J., Lopes, M.J., & Melo, M.T. (2019). A multi-stage supply chain network design problem with in-house production and partial product outsourcing. *Applied*

- 
- Mathematical Modelling*, Vol.70, pp.572-594.
- Crepinšek, M., Liu, S-H., & Mernik, L. (2012). A note on teaching-learning-based optimization algorithm. *Information Sciences*, Vol.212, pp.79–93.
- Cruz, AM., & Rincon, AMR. (2012). Medical device maintenance outsourcing: Have operation management research and management theories forgotten the medical engineering community? A mapping review. *European Journal of Operational Research*, Vol.221, Issue 1, pp.186-197.
- Dahane, M., Clementz, C., & Rezg N. (2008). Analysis of joint maintenance and production under a subcontracting environment: Analytical and Experimental design approaches. *International Journal of Production Research*, Vol. 46, pp. 5393-5416.
- Dahane, M., Clementz, C., & Rezg N., (2010). Effects of extension of subcontracting on a production system in a joint maintenance and production context. *Computers and Industrial Engineering*, Vol.58, pp.88–96.
- Dallery, Y., & Gershwin, SB., (1992). Manufacturing flow line systems: a review of models and analytical results. *Queueing Systems: theory and applications*, Vol.12, pp.3-94
- Dellagi., S., Rezg, N., & Gharbi, A. (2010). Optimal maintenance/production policy for a manufacturing system subjected to random failure and calling upon several subcontractors. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, Vol.5, pp. 261-267.
- Dellagi., S., Rezg, N., & Xie, X. (2007). Preventive maintenance of manufacturing systems under environmental constraints. *International Journal of Production Research*, Vol.45, No.5, pp.1233–1254.
- Doniol-Shaw, G. (1993). Sous-traitance et maintenance des centrales nucléaires. *Travail*. Vol.28, pp.53-64.
- Fakher, H. B., Nourelfath, M., & Gendreau, M. (2016). A Cost Minimisation Model for Joint Production and Maintenance Planning under Quality Constraints. *International Journal of Production Research*, Vol.55, pp.2163-2176.
- Fakher, H.B., (2016). *Integration of production, maintenance and quality: modelling and solution approaches*, Chapitre trois, thèse doctorat, Laval University, Quebec, Canada.
- Ferrie, E. A., Echtelt, van., Wynstra Finn., Arjan J. van Weele, & Geert Duysters. (2008). Managing Supplier Involvement in New Product Development: A Multiple-Case Study. *Journal of Product Innovation Management*, Vol.25, pp.180–201.
- Fitouhi, M-C., & Nourelfath M. (2014). Integrating noncyclical preventive maintenance scheduling and production planning for multi-state systems. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol.121, pp.175-186.
- Fnaiech, N., Fitouri, C., Varnier, C., Fnaiech, Zerhouni N. (2015). A New Heuristic Method for Solving Joint Job Shop Scheduling of Production and Maintenance. *IFAC-PapersOnLine*, Vol.48, pp.1802-1808.
- Géhan M. (2014). *Contribution à l'intégration des processus de planification de la production et*
-

- de la maintenance en contexte incertain*. Université de Nantes Angers Le Mans : Thèse doctorat.
- Genthon V. (2000). La sous-traitance industrielle : un phénomène en croissance. Les 4 pages des Statistiques Industrielles.
- Gertsbakh, I. B. (1977). Models of preventive maintenance. Studies in mathematical and managerial economics, North-Holland Publishing Co.
- Gharbi, A., & Kenné, J-P. (2005). Maintenance scheduling and production control of multiple machine manufacturing systems. *Computers & Industrial Engineering*, Vol.48, pp.693-707.
- Gharbi, A., & Kenné, JP., (2000). Production and preventive maintenance rates control for a manufacturing system: An experimental design approach. *International Journal of Production Economics*, Vol.65, pp.275-287.
- Gharbi, A., Hajji, A., & Dhoub, K., (2011). Production rate control of an unreliable manufacturing cell with adjustable capacity. *International Journal of Production Research*. Vol.49, pp. 6539-6557.
- Gharbi, A., Kenné, J-P., & Beit, M. (2007). Optimal safety stocks and preventive maintenance periods in unreliable manufacturing systems. *International Journal of Production Economics*, Vol.107, pp. 422-434.
- Glover, F. (1998). A template for scatter search and path relinking. Artificial evolution. Berlin Heidelberg: Springer, Vol.1363, pp. 1-51.
- Gomes-Casseres B. (1994). Group versus group: How alliance networks compete. *Harvard business review*, Vol.72, pp.62-66.
- Gorgeu, A., & Mathieu, R., (1993). Dix ans de relations de sous-traitance dans l'industrie française. *Travail*, Vol.28, pp.23-44.
- Gouiaa-Mtibaa, A., Dellagi, S., Achour, Z. & Erray, W. (2016). Integrated Maintenance-Quality strategies with reworking activities. *IFAC-PapersOnLine*, Biarritz, France, Vol.49. pp.61-60.
- Gouiaa-Mtibaa, A., Dellagi, S., Achour, Z. & Erray, W. (2017). Integrated Maintenance Quality policy with rework process under improved imperfect preventive maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, Vol.173, pp.1-11.
- Graves, S.C. (1999). Manufacturing Planning and Control. Massachusetts Institute of Technology, November.
- Grusenmeyer C. Sous-traitance et accidents. Exploitation de la base de données EPICEA. INRS; 2007.
- Hafidi, N., EL Barkany A., & Mahmoudi, M. (2017). Integration of maintenance and production strategies under subcontracting constraint: Classification and opportunity. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, Vol.11, pp. 2856-2882.
- Hafidi, N., EL Barkany A., & Mahmoudi, M. (2018), Modelling and optimization of integrated planning of production and maintenance with subcontract constraint. *International*

- 
- Journal of Engineering Research in Africa, Vol. 40, pp.184-203.*
- Hafidi, N., EL Barkany A., EL Mhamedi A & Mahmoudi M. (2020). Integrated planning of production and maintenance for imperfect system with subcontracting strategies. *International Journal of Engineering Business Management, Vol.x, pp.xx. xx.*
- Hafidi, N., EL Barkany A., EL Mhamedi A & Mahmoudi M. (2020). Quality in Maintenance Engineering Joint optimization of production and maintenance for multimachine subject to degradation and subcontracting constraints. *Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol.x, pp.xx. xx.*
- Hafidi, N., EL Barkany A., EL Mhamedi, A., & Mahmoudi, M. (2019). Optimizing the integrated production, maintenance and quality planning with subcontracting constraint: a review. *11ème The International Conference on Integrated design and production, CPI'2019, Maroc.*
- Hajej Z., Dellagi, S., & Rezg, N. (2014). Joint optimization of maintenance and production policies with subcontracting and product returns. *Journal of Intelligent Manufacturing, Vol.25, pp.589-602.*
- Hajej, Z., Bistorin, O., & Rezg, N. (2012). Maintenance/Production plan optimization taking into account the availability and degradation of manufacturing system. *IFAC Proceedings, Vol.45, issue 6, 23-24 May, pp.963-967.*
- Hajej, Z., Dellagi, S. & Rezg, N. (2011a). Production/maintenance policies optimization with operational age concept in a subcontracting constraint. *18th IFAC world congress, Milano, Italy.*
- Hajej, Z., Dellagi, S., & Rezg, N. (2009). An optimal production/maintenance planning under stochastic random demand, service level and failure rate. *5th Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering Bangalore, India, August 22-25, pp. 292-297.*
- Hajej, Z., Dellagi, S., & Rezg, N., (2011b). Optimal integrated maintenance/production policy for randomly failing systems with variable failure rate. *International Journal of Production Research. Vol.49, pp.5695-5712.*
- Hajej, Z., Dellagi, S., Rezg, N. (2012). Joint optimisation of maintenance and production policies with subcontracting and product returns. *Journal of Intelligent Manufacturing, Vol.25, pp. 589–602.*
- Hajej, Z., Rezg, N. & Gharbi, A. (2018). Quality Issue in Forecasting Problem of Production and Maintenance Policy for Production Unit. *International Journal of Production Research, Vol.56, pp.6147-6163*
- Hajej, Z., Rezg, N., & Bouslikhane, S. (2019). A Joint Production and Maintenance Optimization of Closed-Loop Production System under Carbon Emission with a Switching Subcontractor Consideration. *Applied science, vol.9, 1105.*
- Hajej, Z., Rezg, N., & Gharbi, A. (2014). Forecasting and maintenance problem under subcontracting constraint with transportation delay. *International Journal of production Research, Vol.52, pp.6695-6716.*
- Hajej, Z., Rezg, N., & Gharbi, A. (2017). Improved preventive maintenance in the framework of
-

- forecasting problem under subcontractor constraint. *International Journal of Production Research*, Vol.55, pp.4557-4600.
- Hajej, Z., Turki, S., & Rezg, N. (2015). Modelling and analysis for sequentially optimising production, maintenance and delivery activities taking into account product returns. *International Journal of Production Research*, Vol.53, pp.4697-4719.
- Hakkı Bağana, & Ender Geredeb, (2019). Use of a nominal group technique in the exploration of safety hazards arising from the outsourcing of aircraft maintenance. *Safety Science*, Vol.118, pp.795-804.
- Hao, J-K., Galinier, P., & Habib, M. (1999). Métaheuristiques pour l'optimisation combinatoire et l'affectation sous contraintes. *Revue d'intelligence artificielle*, Vol.13, pp.283-324.
- Haoues, M., Dahane, M., Mouss, N.K., & Rezg, N. (2013). Integrated optimisation of In-House production and outsourcing strategy: genetic algorithm based approach. *11th IFAC, Sao Paulo, Brazil*.
- Haoues, M., Dahane, M., & Mouss, N.K. (2016). Outsourcing Optimization in Two-echelon Supply Chain Network under Integrated Production-maintenance Constraints. *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol.30, pp.701-725.
- He, Y., Liu, F., Cui, J., Han, X., Zhao, Y., Chen, Z., Zhou, D., & Zhang, A. (2019). Reliability oriented design of integrated model of preventive maintenance and quality control policy with time-between-events control chart. *Computers & Industrial Engineering*, Vol.129, pp.228-238.
- Hery, M., (2002). Besoins de recherches en santé sécurité du travail pour les salariés de la sous-traitance interne. *Pistes*, pp, 4-11.
- Hilgers, A., & Boersma, B.J. (2001). Optimization of turbulent jet mixing. *Fluid Dynamics Research*, Vol.29, pp.345-368.
- Hnaïen, F., Yalaoui, F., Mhadhbi, A., & Nourelfath, M. (2016). A mixed-integer programming model for integrated production and maintenance. *IFAC-PapersOnLine*, Vol.49, pp.556-561.
- Holland, J.H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan.
- Hooke, R., & Jeeves, T.A. (1961). Direct search solution of numerical and statistical problems. *Journal of the ACM*, Vol. 8, pp.212-229
- Jalali, H., Carmen, R., Van Nieuwenhuysse, I., & Boute, R. (2018). Quality and Pricing Decisions in Production/Inventory Systems. *European Journal of Operational Research*, Vol.272, pp.195-206.
- Kamal, M., & Rahman, MM. (2015). Fatigue life estimation based on continuum mechanics theory with application of genetic algorithm. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, Vol.11, pp.2686-2698.
- Karmarkar, N. (1984). A new polynomial-time algorithm for linear programming. *COMBINATORICA*, December, Vol.4, Issue 4, pp 373-395.

- 
- Kebing Chen & Tiaojun Xiao. (2015). Outsourcing strategy and production disruption of supply chain with demand and capacity allocation uncertainties. *International Journal of Production Economics*, Vol. 170, pp.243-257.
- Kenné, J. P., Gharbi, A., & Beit, M. (2007). Age-dependent production planning and maintenance strategies in unreliable manufacturing systems with lost sale. *European Journal of Operational Research*, Vol.178, pp.408-420.
- Kenné, J.P., & Boukas, E. (2003). Hierarchical control of production and maintenance rates in manufacturing systems. *Journal of quality in maintenance engineering*, Vol.9, pp.66-82.
- Kenné, J.P., & Gharbi, A. (2004). Stochastic optimal production control problem with corrective maintenance. *Computers & industrial engineering*, Vol.46, pp.865-875.
- Kenné, JP., & Nkeungoue, LJ. (2008). Simultaneous control of production, preventive and corrective maintenance rates of a failure-prone manufacturing system. *Applied Numerical Mathematics*, Vol.58, pp.180-194.
- Kenné, JP., Boukas, EK., & Gharbi, A. (2003). Control of production and corrective maintenance rates in a multiple-machine, multiple-product manufacturing system. *Mathematical and Computer Modelling*, Vol.38, pp.351-365.
- Kenné, J-P., Gharbi, A., & Beit, M. (2007). Age-dependent production planning and maintenance strategies in unreliable manufacturing systems with lost sale. *European Journal of Operational Research*, Vol.178, pp.408-420.
- Kennedy, J., & Eberhart. R. (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of IEEE international conference on neural networks*, pp.1942–1948.
- Kenyon, G.N., Meixell, M.J., & Westfall P.H. (2016). Production Outsourcing and Operational Performance: An Empirical Study using Secondary Data. *International Journal of Production Economics*, Vol.171, pp.336-349.
- Khanh, T.P., Nguyen, Phuc Do, Khac Tuan Huynh, Christophe B´erenguer, & Antoine Grall. (2019). Joint optimization of monitoring quality and replacement decisions in condition-based maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, Vol.189, pp.177-195.
- Khatab, A., & Aghezzaf, E.H. (2016). Selective maintenance optimization when quality of imperfect maintenance actions are stochastic. *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 150, pp.182-189.
- Kim, T., Glock, C.H., (2018). Production planning for a two-stage production system with multiple parallel machines and variable production rates. *International Journal of Production Economics*, Vol.196, pp.284-292.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C., & Vecchi, P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, Vol. 220, No. 4598, pp. 671-680.
- Kuhn, H. W., & Tucker, A. W. (1951). Nonlinear Programming. Proceedings of the Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, University of California Press, Berkeley, Calif, pp.481-492.
- Land, A., & Doig, A. (1960). An Automatic Method of Solving Discrete Programming
-



- 
- Problems. *Econometrica*, Vol. 28, No. 3, pp. 497-520.
- Lau, AKW., Tang, E., & Yam, RCM. (2010). Effects of Supplier and Customer Integration on Product Innovation and Performance: Empirical Evidence in Hong Kong Manufacturer. *Journal of Product Innovation Management*, Vol.27, pp.761–777.
- Lebbar, G. (2019). *Contribution à l'étude des problèmes d'ordonnement des systèmes de production de type flow-shop : Modélisation, optimisation et expérimentation*. Faculté des sciences et techniques de Fès : Thèse doctorat.
- Liao, G-L. (2016). Production and Maintenance Policies for an EPQ Model With Perfect Repair, Rework, Free-Repair Warranty, and Preventive Maintenance. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, Vol.46 , Issue: 8 , August.
- Liao, G-L., Chen, Y., & Sheu, S. (2009). Optimal economic production quantity policy for imperfect process with imperfect repair and maintenance. *European Journal Operational Research*, Vol.195, No.2, pp.348–357
- Liu, B., Wu, S., Xie, M., & Kuo, W. (2017). A condition-based maintenance policy for degrading systems with age- and state-dependent operating cost. *European Journal of Operational Research*, Vol.263, pp.879-887.
- Liu, J., & Yang, P. (1996). Optimal lot-sizing in an imperfect production system with homogeneous reworkable jobs. *European Journal of Operational Research*, Vol.91, pp. 517-527.
- Lopes, R. (2018). Integrated model of quality inspection, preventive maintenance and buffer stock in an imperfect production system. *Computers & Industrial Engineering*, Vol.126, pp.650-656.
- Lu Zhen (2012). Analytical study on multi-product production planning with outsourcing. *Computers & Operations Research*, Vol.39, Issue 9, pp.2100-2110.
- Lu, B. & Zhou, X. (2019). Quality and reliability-oriented maintenance for multi stage manufacturing systems subject to condition monitoring. *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.52, pp.76-85.
- Lu, Z., Cui, W., & Han, X. (2015). Integrated production and preventive maintenance scheduling for single machine with failure uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, Vol.80, pp.236-244.
- Lu, Z., Cui, W., & Han, X. (2018). A proactive approach to solve integrated production scheduling and maintenance planning problem in flow shops. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 115, pp.342-353.
- Medhioub, F., Hajej, Z., & Rezg, N., (2014). A stochastic production planning optimization for multi parallel machine under leasing Contract. *Probabilistic Safety Assessment & Management conference*. Hawaii, USA, June 22-27.
- Mejía, G., & Francisco Yuraszcek, F. (2020). A self-tuning variable neighborhood search algorithm and an effective decoding scheme for open shop scheduling problems with travel/setup times. *European Journal of Operational Research*.
-

- 
- Meller, RD., Kim, DS. (1996). The impact of preventive maintenance on system cost and buffer size. *European Journal of Operational Research*, Vol.95, pp.577-591.
- Mohamed, NMZN., Khan, MK. (2012). Decomposition of Manufacturing Processes: A Review. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, Vol.5, pp.545-560.
- Morrison Paul, C.J., Yasar, M. (2004). Outsourcing, productivity, and input composition at the plant level. *Working paper, University of California, Davis*.
- Murthy, D.N.P., Karim, M.R., Ahmadi, A. (2015). Data management in maintenance outsourcing, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol.142, pp. 100-110.
- Najid, NM., Alaoui-Selsouli, M., & Mohafid, A. (2011). An integrated production and maintenance planning model with time windows and shortage cost. *International Journal of Production Research*, Vol.49, pp.2265-2283.
- Nakagawa, T. (1976). On a replacement problem of a cumulative damage model. *Journal Operational Research Society*, Vol.27, pp. 895-900.
- Nash, J.C. (2000). The (Dantzig) simplex method for linear programming. *Computing in Sciences & Engineering*. Vol.2, Issue.1, pp.29–31.
- Nourelfath, M., & Châtelet, E., (2012), Integrating production, inventory and maintenance planning for a parallel system with dependent components. *Reliability Engineering and System Safety*, Vol.101, pp.59–66.
- Nourelfath, M., & Daoud Ait-Kadi, D., (2007). Optimization of series–parallel multi-state systems under maintenance policies. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol.92, pp.1620-1626.
- Nourelfath, M., Nahas, N. & Ben-Daya, M. (2016). Integrated Preventive Maintenance and Production Decisions for Imperfect Processes. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol.148, pp.21–31.
- Ono, Y. (2003). Outsourcing business services and the role of central administrative offices. *Journal of Urban Economics*, Vol.53, pp.377–395.
- Ouali, M-S, Rezg, N., & Xiaolan, X. (2002). Maintenance préventive et optimisation des flux d'un système de production. *Journal européen des systèmes automatisés*, Vol.36, pp.97-116.
- Ouazene Y., (2013). Maîtrise des systèmes industriels : optimisation de la conception des lignes de production. Université de Technologie Troyes : Thèse de doctorat.
- Ouertani A. (2010). *Effets des stratégies de maintenance sur la performance d'une ligne de production avec zones de stockage à capacité finie*. Université de Québec à Trois-Rivières : Thèse doctorat.
- Ouyang Wu, Giancarlo Dalle Ave, Iiro Harjunoski, Ala Bouaswaig, Stefan Marco Schneider, Matthias Roth, Lars Imsland (2020). Optimal Production and Maintenance Scheduling for a Multiproduct Batch Plant Considering Degradation. *Computers and Chemical Engineering*, Vol.135.
- Phuc, D V., Voisint, A., Levratj, E., & Lung, B. (2013). Remaining Useful Life Based
-

- Maintenance Decision Making for Deteriorating Systems with Both Perfect and Imperfect Maintenance Actions. *IEEE International Conference on Prognostics and Health Management*, pp.1-9.
- Porteus, E.L. (1986). Optimal Lot Sizing, Process Quality Improvement and Setup Cost Reduction. *Operation Researches*, Vol.96, pp.425-438.
- Puchinger, J., & Raidl, G.R., (2005). Combining metaheuristics and exact algorithms in combinatorial optimization: a survey and classification. *Proceedings of the First International Work-Conference on the Interplay Between Natural and Artificial Computation*, LNCS, Springer, Berlin, 3562, pp. 41–53.
- Quinlan, M., Hampson, I., Gregson, S. (2013). Outsourcing and offshoring aircraft maintenance in the US: Implications for safety. *Safety Science*, Vol.57, August, pp.283-292.
- Rad, M. A., Khoshalhan, F., Glock, C H. (2014). Optimizing inventory and sales decisions in a two-stages supply chain with imperfect production and backorders. *Computers and Industrial Engineering*, Vol.74, pp.219-227.
- Radhoui, M. (2008). *Analyse des performances de systèmes de production sujets à des défaillances aléatoires et pouvant engendrer des produits non conformes dans un environnement incertain*. Université Paul Verlaine- Metz : Thèse doctorat.
- Radhoui, M., Rezg, N., & Chelbi, A.(2010). Integrated maintenance and control policy based on quality control. *Computers & Industrial Engineering*, Vol.58, pp.443-451.
- Reeves, CR. (1993). *Modern heuristic techniques for combinatorial problems*: John Wiley & Sons.
- Rezg, N., Xie, X., Mati, Y. (2004). Joint optimization of preventive maintenance and inventory control in a production line using simulation. *International journal of production Research*, Vol.42, pp.2029-2046.
- Rivera-gómez, H., Gharbi A., Kenné J.P., Montaña-arango O., Hernández-Gress E.S. (2018). Subcontracting strategies with production and maintenance policies for a manufacturing system subject to progressive deterioration. *International Journal of Production Economics*, Vol. 200, pp.103-118.
- Rivera-Gómez, H., Gharbi, A., Kenné, J.P., Montaña-Arango, O., & HernandezGress, E.S. (2016). Production control problem integrating overhaul and subcontracting strategies for a quality deteriorating manufacturing system. *International Journal of Production Economics*, Vol.171, pp.134-150.
- Roux, O., Duvivier, D., Quesnel, G., & Ramat, E. (2013). Optimization of preventive maintenance through a combined maintenance-production simulation model. *International Journal of Production Economics*. Vol.143, pp.3-12.
- Salameh, M.K., & Jaber, M.Y. (2000). Economic production quantity model for items with imperfect quality. *International Journal of Production Economics*, Vol. 64, pp.59.64.
- Seillan, H., & Morvan, J. (2005). *Risques de la sous-traitance* : Édition : Préventique.
- Sergio J. (2015). *Rey*, in *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*

- (Second Edition).
- Shahin, A., (2008). The relationship between quality and productivity: a new perspective. *International Journal of Productivity and Quality Management*, Vol.3, pp.206-222.
- Shijin Wang & Ming Liu (2015). Multi-objective optimization of parallel machine scheduling integrated with multi-resources preventive maintenance planning. *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.37, Part 1, October 2015, pp.182-192.
- Shinne-Der Lee & Shu- Chuan Lan (2013). Production lot sizing with a secondary outsourcing facility. *International Journal of Production Economics*, Vol.141, pp.414-424.
- Siener, M., & Aurich J.C. (2011). Quality oriented maintenance scheduling, Quality oriented maintenance scheduling. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol.4, pp.15-23.
- Slater, M., (1950). Lagrange Multipliers Revisited: A Contribution to Nonlinear Programming, Cowles Commission Discussion Paper. *Mathematics*, Vol. 403.
- Sobrinho, D., Cazañas, R., Ružarovský, R., & Holubek, R. (2018). Integrative programming of production and preventive maintenance tasks in an environment of identical parallel machines: proposal of a construction heuristic. *Research papers faculty of materials science and technology in trnava slovak university of technology in Bratislava*, Vol.26, No.42.
- Suhong, L., Bhanu RN., Ragu-Nathan, T.S., Subba Rao, S. (2006). The impact of supply chain management practices on competitive advantage and organizational performance. *Omega*, Vol.34, pp.107-124.
- Taguchi, G. (1993). Taguchi on Robust technology development methods, ASME Press, New York, pp.1-40.
- Tam, P. L., Aghezzaf, E. H., & Khatab, A. (2018). Solving the Integrated Production and Imperfect Preventive Maintenance Planning Problem. *Operations Research and Enterprise Systems*, Vol.884, pp.63–83
- Tarek A., Hajej Z., & Rezg N. (2016). Production and Maintenance Optimization for Multi-Machines under Degradation Constraint. *IFAC-PapersOnLine*, Vol.49, Issue.31, pp.149–154.
- Tazi D. (2010). Externalisation de la maintenance et sécurité : une analyse bibliographique. Rapport technique, Institut pour une Culture de Sécurité Industrielle.
- Thébaud-Mony A. (2007). Travailler peut nuire gravement à la santé. Paris, La Découverte.
- Valdez-Flores, C., & Feldman, R. (1989). A survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single-unit systems. *International Journal of Naval Research Logistics*, Vol. 36, pp.419-446.
- Van der Duyn Schouten, FA., & Vanneste SG. (1995). Maintenance optimization of a production system with buffer capacity. *European Journal of Operational Research*, Vol.82, pp.323-38.
- Vonderembse, M., Tracey, M., Tan, C.L., & Bardi, E.J., (1995). Current purchasing practices

- 
- and JIT: some of effects on inbound logistics. *International Journal of Physical Distribution and logistics Management*, Vol.25, pp.33-48.
- Wang, L., Lu, Z., Ren, Y. (2020). Joint production control and maintenance policy for a serial system with quality deterioration and stochastic demand. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol.199.
- Wang, S., & Liu, M., (2013). A branch and bound algorithm for single-machine production scheduling integrated with preventive maintenance planning. *International Journal of Production Research*, Vol.51, pp.847-68.
- Xia, T., Fang, X., Gebraeel, N., Xi, L., & Pan, E. (2019). Online Analytics Framework of Sensor-Driven Prognosis and Opportunistic Maintenance for Mass Customization. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol.141, Issue 5.
- Xiang, Y., Cassady, CR., Jin, T., & Zhang, CW. (2014). Joint production and maintenance planning with machine deterioration and random yield. *International Journal of Production Research*, Vol.52, pp.1644-1657.
- Xie, X. (1993). Performance analysis of a transfer line with unreliable machines and finite buffers. *IIE Transactions*, Vol.25, pp.99-108.
- Yalaoui, A., Chaabi, K., & Yalaoui, F. (2014). Integrated production planning and preventive maintenance in deteriorating production systems. *Information Sciences*, Vol.278, pp.841-861.
- Zhang, B., Xu, L., Chen, Y., & Li, A. (2018). Remaining Useful Life Based Maintenance Policy for Deteriorating Systems Subject to Continuous Degradation and Shock. *51st CIRP Conference on Manufacturing Systems, Procedia CIRP*, Vol.72, pp.1311-1315.
- Zhou, S., Zhou, Y., Zuo, X., Xiao, Y., & Cheng, Y. (2018). Modeling and solving the constrained multi-items lot-sizing problem with time-varying setup cost. *Chaos, Solitons and Fractals*, Vol.116, pp.202–207.
- Zhou, W.-H & Zhu, G.-L (2008). Economic design of integrated model of control chart and maintenance management. *Mathematical and Computer Modelling*, vol.47, pp. 1389-1395.
- Zhu Weihang, & Curry James. (2009). Multi-walk parallel pattern search approach on a GPU computing platform. Computational science–ICCS 2009. *Berlin Heidelberg: Springer*, pp.984-993.
- Ouriemchi M. (2005). *Résolution de problèmes non-linéaires par les méthodes de points intérieurs : Théorie et algorithmes*. Université du Havre : Thèse de doctorat.
-

# Annexes

## Annexe 1 : Les captures des résultats du chapitre 3

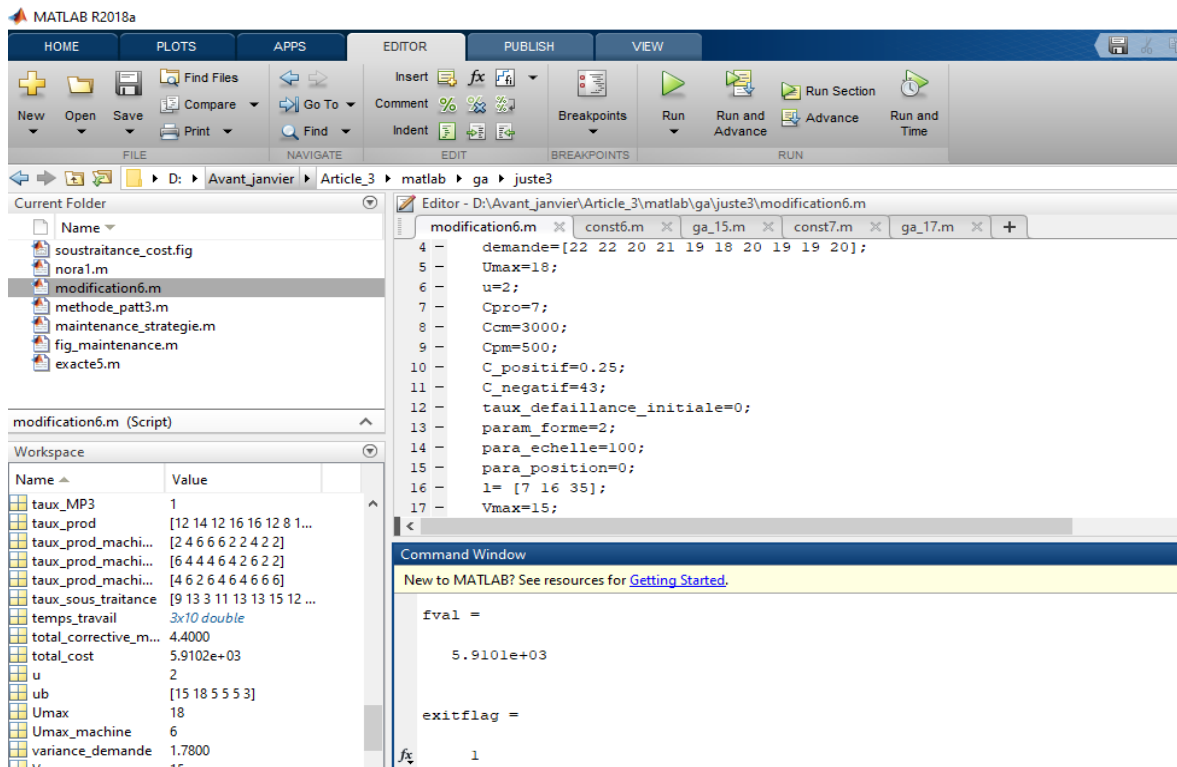


Figure A.1 : La valeur la plus optimal du coût total obtenus par la méthode des GA

temps_travail											
3x10 double											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	2	3	3	3	1	1	2	1	1	
3		2	2	2	3	2	1	3	1	1	
2		3	1	3	2	3	2	3	3	3	

Figure A.2 : Le temps de travail des trois machines obtenues par la méthode GA

taux_sous_traitance										
1x10 double										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	12	14	12	16	16	12	8	16	10	10
2										

Figure A.3 : Taux de production de l'ensemble des trois machines : GA

taux_sous_traitance										
1x10 double										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	9	13	3	11	13	13	15	12	8	14
2										

Figure A.4 : Taux de sous-traitance durant chaque période :GA

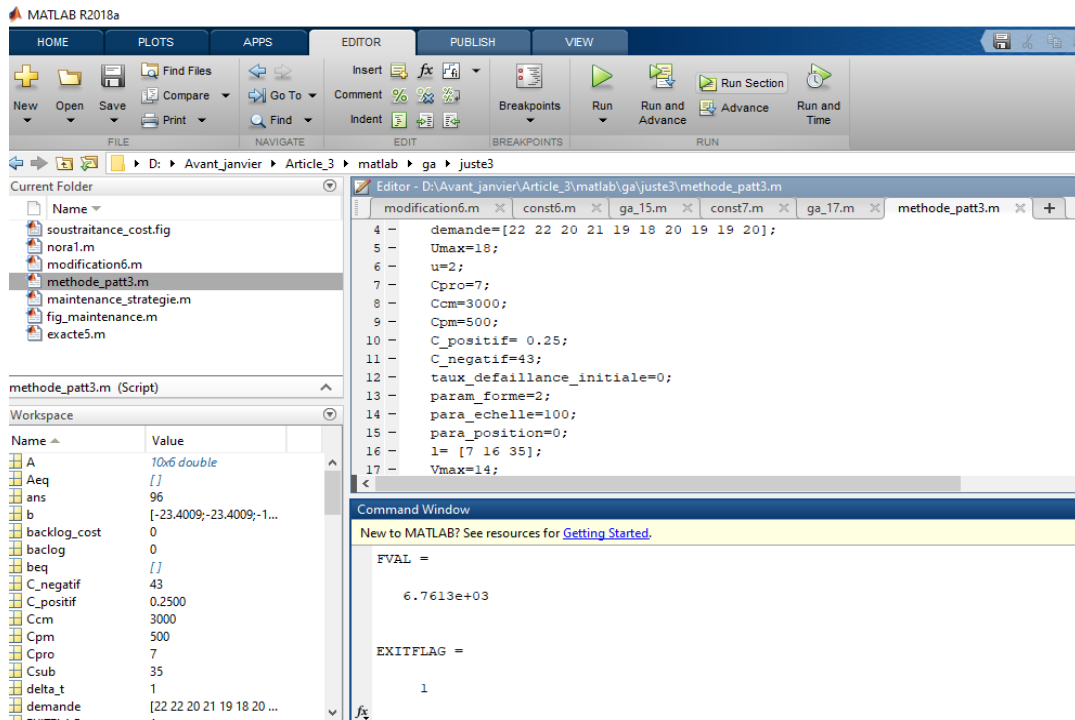


Figure A.5 : La valeur la plus optimal du coût total obtenu par la méthode PS

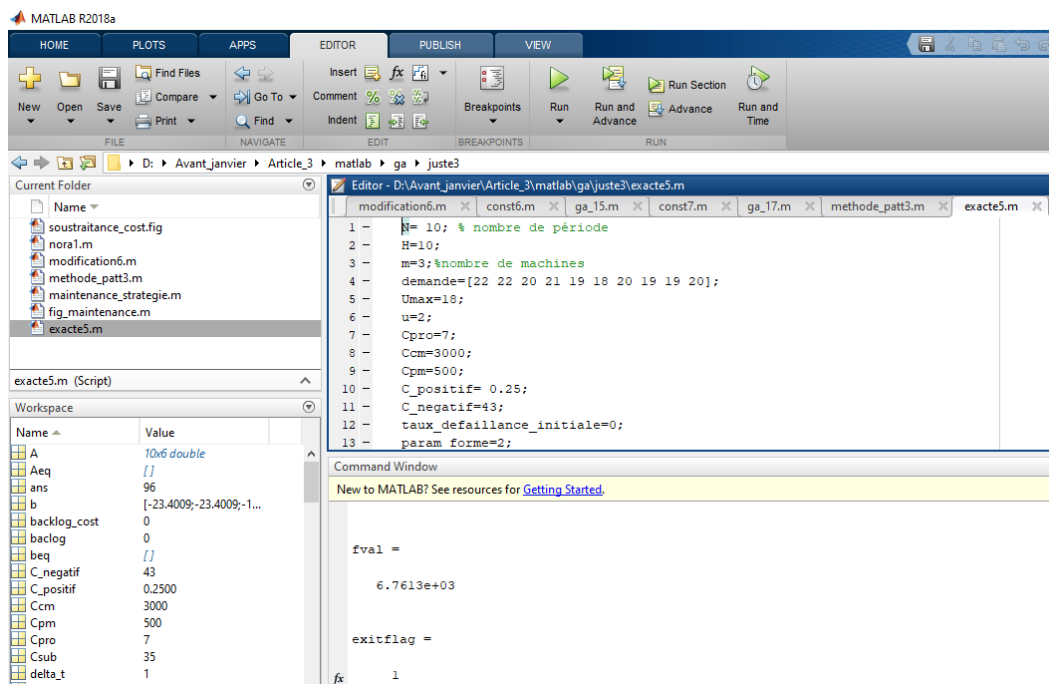


Figure A.6 : La valeur la plus optimal du coût total obtenu par la méthode fmincon



temps_travail											
3x10 double											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	2	2	3	3	3	2	1	1	1	
2	3	3	3	2	3	3	1	1	3	3	
3	3	1	3	1	3	2	3	1	3	1	
4											

**Figure A.7 :** Le temps de travail obtenus par les deux méthodes PS et fmincon

temps_travail										
stock										
taux_prod										
taux_sous_traitance										
1x10 double										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	14	12	16	12	18	16	12	6	14	10
2										

**Figure A.8 :** Taux de production de l'ensemble des trois machines : PS et fmincon

temps_travail										
stock										
taux_prod										
taux_sous_traitance										
1x10 double										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	13	14	2	14	10	1	4	8	15	15
2										

**Figure A.9 :** Taux de sous-traitance durant chaque période : PS et fmincon

### Annexe 2 : Les captures des résultats du chapitre 4

	1	2	3	4	5	6	7
1	0	1301	0	0	0	0	
2	0	0	0	0	0	1805	

Figure A.10 : Les valeurs de niveau de rupture  $B_{kp}$  pour deux produits pendant les six périodes

	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	76	1094	2480	843	
2	0	1166	633	678	18	0	

Figure A.11 : Les de niveau de stockage  $I_{kp}$  pour deux produits pendant les six périodes

	1	2	3	4	5	6	7
1	1615	796	2358	1817	1705	2309	
2	758	2842	350	421	2523	1625	

Figure A.12 : Le taux de production  $x_{kp}$  pour deux produits pendant les six périodes

	1	2	3	4	5	6	7
1	382	1903	519	1701	681	1054	
2	879	324	617	1124	317	52	

Figure A.13 : Le taux de sous-traitance  $v_{kp}$  pour deux produits pendant les six périodes