



THÈSE



Présentée au Laboratoire d'Automatique et Productique

Pour obtenir le titre de Doctorat en sciences à l'Université Batna 2

En Génie Industriel

Par

Mohammed HAOUES

Magister en Génie Industriel

Thème

Contribution à l'évaluation des performances de la sous-traitance sous contraintes de la maintenance et de la sûreté de fonctionnement des systèmes de production complexes

Soutenue le 23/10/2017

Devant la commission d'examen formée de :

Leila Hayet Mouss	Professeur à l'Univesrsité Batna 2, Algérie, Présidente
Daoud Aït-Kadi	Professeur à l'Université Laval Canada, Examineur
Farouk Yalaoui	Professeur à l'Université de Technologie de Troyes, France, Examineur
Abdelkamel Tari	Professeur à l'Université de Béjaia, Algérie, Examineur
Kinza Nadia Mouss	Professeur à l'Univesrsité Batna 2, Algérie, Rapporteur
Mohammed Dahane	Maître de Conférences à l'Université de Lorraine, France, Co-Rapporteur

Sommaire

Remerciements		i
Liste des figures		iii
Liste des tableaux		iv
Liste des algorithmes		vi
Liste des abréviations		vii
Synoptique du manuscrit de thèse		ix
Introduction et objectifs de la thèse		1
Chapitre I : Concepts de bases : contexte et positionnement		
I.1.	Introduction	5
I.2.	Organisation et gestion des systèmes de production	5
I.2.1.	Définition de la fonction production	5
I.2.2.	Définition de la gestion de production	5
I.2.3.	Classification des systèmes de production	5
I.2.3.1.	Classification selon les quantités fabriquées et la répétitivité	6
I.2.3.2.	Classification selon le flux de production	6
I.2.3.3.	Classification selon la relation avec le client	7
I.3.	La chaîne logistique (Supply Chain - SC)	8
I.4.	Gestion de la chaîne logistique (Supply Chain Management - SCM)	9
I.5.	Les flux dans l'entreprise et la chaîne logistique	9
I.5.1.	Le flux d'information	9
I.5.2.	Le flux physique ou de service	9
I.5.3.	Le flux financier	9
I.6.	La prise de décision dans l'entreprise et la chaîne logistique	9
I.6.1.	Les décisions stratégiques	10
I.6.2.	Les décisions tactiques	10
I.6.3.	Les décisions opérationnelles	10
I.7.	Les niveaux de planification de la production	11
I.7.1.	Le Plan Industriel et Commercial (PIC)	11
I.7.2.	Programme Directeur de Production (PDP)	11
I.7.3.	Le Plan de Charge (PDC) ou plan de fabrication ou encore planning d'atelier	12
I.8.	Principaux concepts de la maintenance	12
I.8.1.	Définition de la maintenance	12
I.8.2.	Objectifs de la maintenance	12
I.8.3.	La fiabilité	13
I.8.4.	La maintenabilité	13
I.8.5.	La disponibilité	13
I.8.6.	La défaillance	13
I.8.7.	La panne	13
I.8.8.	Les types de maintenance	13
I.8.8.1.	La maintenance corrective (MC)	14
I.8.8.2.	La maintenance préventive (MP)	14
I.8.9.	Les modèles de maintenances	14
I.8.9.1.	Le modèle de maintenance parfaite	14
I.8.9.2.	Le modèle de maintenance minimale	15
I.8.9.3.	Le modèle de maintenance imparfaite	15
I.8.10.	Les politiques de maintenances	17
I.8.10.1.	Politique de maintenance de type âge	17
I.8.10.2.	Politique de maintenance de type bloc	17

I.9.	Les concepts de base de la qualité	17
I.10.	La sous-traitance	19
I.10.1.	Définitions de la sous-traitance	19
I.10.2.	Typologies de la sous-traitance	20
I.10.2.1.	La sous-traitance de capacité	20
I.10.2.2.	La sous-traitance de spécialité	20
I.10.3.	Les avantages de la sous-traitance	20
I.10.4.	Les inconvénients de la sous-traitance	22
I.11.	Les performances	23
I.11.1.	Agir par les variables de décision	23
I.11.2.	Principaux indicateurs du management de la chaîne logistique	24
I.11.2.1.	Degré de partenariat	24
I.11.2.2.	La réduction des coûts	25
I.11.2.3.	Maintenir un meilleur niveau de la qualité	26
I.11.2.4.	La réduction des délais de livraison	26
I.12.	Modélisation du management de la chaîne logistique	26
I.12.1.	Modélisation d'entreprise	26
I.12.2.	Les modèles analytiques	26
I.12.3.	Les modèles de simulation	26
I.12.4.	L'offre logicielle	27
I.13.	Conclusion	27
Chapitre II : Revue de littérature sur les modèles de planification de la production et des capacités		
II.1.	Introduction	28
II.2.	Contexte générale de la thèse : travaux traitant la coordination et l'association entre les membres de la chaîne logistique	28
II.3.	Taxonomie de la recherche	30
II.3.1.	Planification traditionnelle de la production et des capacités	32
II.3.2.	Planification de la production et des capacités avec des contrats de sous-traitance	33
II.3.3.	Planification de la production et des capacités avec prise en compte de la maintenance	35
II.3.4.	Planification de la production et des capacités avec option de sous-traitance et de maintenance	40
II.3.5.	Planification de la production et des capacités avec prise en compte de la qualité	42
II.3.6.	Planification de la production et des capacités avec prise en compte de la maintenance et la qualité	43
II.3.7.	Planification de la production et des capacités avec option de sous-traitance, maintenance et qualité	47
II.4.	Contributions de la thèse	47
II.5.	Conclusion	50
Chapitre III : Optimisation de l'intégration des activités de sous-traitance sous contraintes de fiabilité et maintenance : planification sur une seule période		
III.1.	Introduction	51
III.2.	Mise en situation dans le contexte industriel	51
III.3.	Optimisation de l'intégration des activités de sous-traitance sous contraintes de fiabilité et maintenance	52
III.3.1.	Description du problème	52
III.3.1.1.	Notations	52
III.3.1.2.	Hypothèses	53
III.3.2.	Modèles mathématiques	54

III.3.2.1.	Les modèles de planification de la production sans option sous-traitance	54
III.3.2.2.	Les modèles de planification de la production après l'insertion de la tâche de sous-traitance	56
III.3.3.	Procédure de résolution	57
III.3.4.	Exemple numérique et analyse de sensibilité	59
III.4.	Optimisation de la sous-traitance coopérative entre un seul donneur d'ordres et multiple sous-traitants	67
III.4.1.	Description du problème	67
III.4.1.1.	Notations	67
III.4.1.2.	Hypothèses	68
III.4.2.	Modèles mathématiques	69
III.4.2.1.	Le modèle du plan de production du sous-traitant i sans option de sous-traitance	69
III.4.2.2.	Le modèle du plan de production du sous-traitant i après l'insertion de la tâche de sous-traitance	70
III.4.3.	Procédures de résolution	70
III.4.4.	Exemples numériques et étude comparative	73
III.5.	Conclusion	76
Chapitre IV : Plannification de la production et des capacités avec option de sous-traitance : de l'étude sous contraintes de fiabilité et maintenance simples à l'étude sous des politiques de maintenance intégrée		
IV.1.	Introduction	77
IV.2.	Optimisation intégrée production interne/sous-traitance sous contraintes de fiabilité et maintenance	77
IV.2.1.	Description du problème	77
IV.2.1.1.	Notations	79
IV.2.1.2.	Hypothèses	80
IV.2.2.	Modèle mathématique	80
IV.2.2.1.	Le coût de stockage	80
IV.2.2.2.	Le coût de pénurie	80
IV.2.2.3.	Le coût de sous-traitance	81
IV.2.2.4.	Le coût de production	81
IV.2.2.5.	Le coût de maintenance	81
IV.2.3.	Procédure de résolution	82
IV.2.4.	Exemple numérique – résultats et discussions –	83
IV.3.	Planification des capacités avec contrats de sous-traitance sous une politique de maintenance intégrée	86
IV.3.1.	Description du problème	86
IV.3.1.1.	Notations	86
IV.3.1.2.	Hypothèses	87
IV.3.2.	Modèle mathématique	88
IV.3.2.1.	Le coût de stockage	88
IV.3.2.2.	Le coût de pénurie	88
IV.3.2.3.	Le coût de sous-traitance	89
IV.3.2.4.	Le coût de production	89
IV.3.2.5.	Le coût de maintenance	89
IV.3.3.	Procédure de résolution	90
IV.3.4.	Exemple d'illustration	95
IV.3.4.1.	Les données du problème	95
IV.3.4.2.	Résultats et discussions	96
IV.4.	Conclusion	104

Chapitre V : Métaheuristique et heuristiques pour la planification de la production et des capacités avec option de sous-traitance sous une politique de maintenance intégrée		
V.1.	Introduction	105
V.2.	Description du problème	105
V.2.1.	Notations	106
V.2.2.	Hypothèses	108
V.2.3.	Politique de couplage production interne/sous-traitance	108
V.2.4.	Politique de maintenance	109
V.3.	Modèles mathématiques	110
V.3.1.	Modèle de planification intégrée du donneur d'ordres sans sous-traitance	110
V.3.1.1.	Le revenu brut	111
V.3.1.2.	Le coût de stockage	111
V.3.1.3.	Le coût de production	112
V.3.1.4.	Le coût de pénurie	113
V.3.1.5.	Le coût de maintenance	113
V.3.2.	Modèle de planification intégrée du sous-traitant sans sous-traitance secondaire	114
V.3.2.1.	Le revenu brut	114
V.3.2.2.	Le coût de stockage	115
V.3.2.3.	Le coût de production	115
V.3.2.4.	Le coût de maintenance	115
V.3.3.	Modèle de planification intégrée du donneur d'ordres avec sous-traitance	115
V.3.3.1.	Le revenu brut	115
V.3.3.2.	Le coût de stockage	116
V.3.3.3.	Le coût de production	116
V.3.3.4.	Le coût de pénurie	117
V.3.3.5.	Le coût de sous-traitance	117
V.3.3.6.	Le coût de maintenance	118
V.3.4.	Modèle de planification intégrée du sous-traitant avec sous-traitance secondaire	118
V.3.4.1.	Le revenu brut	118
V.3.4.2.	Le coût de stockage	118
V.3.4.3.	Le coût de production	119
V.3.4.4.	Le coût de maintenance	119
V.3.5.	Première formulation : optimisation séparée	119
V.3.6.	Deuxième formulation : optimisation intégrée	120
V.4.	Procédures de résolution	121
V.4.1.	Optimisation séparée	121
V.4.2.	Optimisation intégrée – Procédure de calcul à base d'algorithmes génétiques	126
V.4.2.1.	Motivation pour une approche à base d'algorithmes génétiques	126
V.4.2.2.	L'approche métaheuristique "Algorithmes Génétiques" (AGs)	126
V.5.	Le design expérimental et l'analyse des résultats	132
V.5.1.	Les données du problème	132
V.5.2.	Résultats et discussions	136
V.5.2.1.	Variation du nombre de donneurs d'ordres et de sous-traitants	136
V.5.2.2.	Influence du coût de production des donneurs d'ordres	137
V.5.2.3.	Influence du coût de pénurie des donneurs d'ordres	139
V.5.2.4.	Influence de la variation des demandes	139
V.6.	Conclusion	141
Chapitre VI : Optimisation intégrée production/sous-traitance sous contraintes de fiabilité, maintenance et qualité		
VI.1.	Introduction	142

VI.2.	Description du problème	142
VI.2.1.	Hypothèses	143
VI.2.2.	Notations	144
VI.3.	Modèle mathématique	145
VI.3.1.	Le revenu brut	146
VI.3.2.	Le coût de production	146
VI.3.3.	Le coût de stockage	147
VI.3.4.	Le coût de sous-traitance	147
VI.3.5.	Le coût de maintenance	147
VI.3.6.	Le coût de pénalité	148
VI.4.	Procédure de résolution à base d'algorithmes génétiques	148
VI.5.	Exemple numérique – résultats et discussions –	150
VI.6.	Conclusion	152
Conclusions et perspectives de recherche		153
Annexe : Détail des résultats de calcul du chapitre V		156
Références bibliographiques		161
Production scientifique		172

Remerciements

Ces travaux de recherche ont été développés dans le cadre d'une thèse co-encadrée par le Laboratoire d'Automatique et Productique (LAP) de l'Université Batna 2 et plus particulièrement l'équipe Gestion Industrielle et Logistique (GIL) d'une part, et le Laboratoire de Génie Industriel, de Production et de Maintenance (LGIPM) de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Metz (ENIM) et l'Université de Lorraine (UL), et plus particulièrement l'équipe Management de la Maintenance et la Production (MPM) de l'autre part.

Ces travaux sont financés par la Direction de Coopération et des Echanges Inter-Universités (DCEIU) du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique (MESRS), et de l'Université de Batna (UdB) en Algérie et le LGIPM de l'ENIM et l'UL en France. Je les remercie infiniment pour leur soutien financier de cette recherche, et j'espère avoir été digne de cette confiance.

Je tiens à remercier Madame Leila Hayet MOUSS, Directrice du LAP, pour m'avoir accueilli dans son laboratoire et de m'avoir ainsi permis d'effectuer ces travaux de recherche. Aussi, j'exprime ma profonde gratitude à Monsieur Nidhal REZG, Directeur du LGIPM pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire.

Je tiens tout particulièrement à exprimer ma profonde reconnaissance à ma Directrice de thèse, Mlle Kinza Nadia MOUSS, pour sa sympathie, sa disponibilité tout au long de ces années et pour ses critiques qui m'ont permis de mener à bien ces travaux. Je ne saurais jamais assez la remercier pour son soutien et ses encouragements.

Toute ma profonde gratitude à mon Co-Directeur de thèse Monsieur Mohammed DAHANE, Maître de Conférences à l'UL. Je lui suis sincèrement reconnaissant pour la confiance qu'il m'a témoignée depuis le début et tout au long de la thèse, pour son encadrement, ses précieux conseils et orientations, mais également pour sa disponibilité et son dévouement. Qu'il sache qu'il a été pour moi un co-encadrant, un ami et un frère. Je le remercie aussi pour sa disponibilité et ses encouragements qui m'ont été d'une grande utilité. J'espère avoir été digne de cette confiance.

Une mention particulière au Laboratoire de Génie Industriel, de Production et de Maintenance de l'ENIM et l'UL pour m'avoir ouvert au monde passionnant de la recherche. Mes remerciements vont également aux membres, anciens et actuels, de ce laboratoire pour la sympathie, les conseils et l'amitié que j'ai trouvés en eux. Je ne saurais oublier leur équipe administrative et technique pour leur disponibilité et leur efficacité.

Je remercie Mlle Emelie DEMUTH, ex responsable du service international de l'UL, pour son accueil, ses aides, sa disponibilité et ses conseils durant mon séjour en France.

Je dédie ce mémoire à mes parents qui ont sacrifié tant de leurs efforts et de leur temps pour assurer mon éducation et ma réussite. Je leur dois beaucoup.

J'adresse, enfin, une pensée particulière à mon épouse, pour sa patience silencieuse, pour son amour profond et sa gentillesse sincère, qui ont su créer un climat favorable sans lequel ce travail n'aurait jamais pu être achevé. Mes pensées vont également à mes chers enfants Anes Dhia Eddine et Alaa. Sans oublier toute les membres de ma grande famille.

Je tiens également à adresser mes plus vifs remerciements aux membres du jury. Je suis honoré qu'ils aient accepté d'évaluer mon travail de thèse.

Merci à Madame Leila Hayet MOUSS, Professeur à l'Université Batna 2 d'avoir accepté de présider ce jury. Merci à Messieurs Daoud Aït-Kadi, Farouk Yalaoui et Abdel Kamel Tari d'avoir accepté d'être examinateurs de cette thèse.

Un remerciement particulier à mon cher M'hamed SAHNOUN Maître de Conférences à l'Institut de Recherche en Innovation et Sciences de l'Industrie et à l'Ecole d'ingénieurs CESI de Rouen. Sans oublier Monsieur Hakim KHATAB, Maître de Conférences à l'ENIM et Monsieur Sofiane DELLAGI Maître de Conférences à l'Université de Lorraine.

Ensuite, je tiens à remercier les reviewers anonymes de toutes mes publications, pour leurs commentaires constructifs, et ses conseils judicieux qui ont été précieux pour moi.

C'est avec un grand plaisir et une grande joie et fierté que j'exprime plus ma reconnaissance fraternelle à mes amis rencontrés à Metz et particulièrement : Hamza BOUDHAR, Abderrahmane BENSMAINE, Akram ZOUGARRI, Amine BOUTICHE, Maaen ATLI, Ibrahima SIDIBI, Housseem CHOUIKHI, Djilali GHANI, qui m'ont soutenu et qui n'ont épargné aucun effort pour m'aider surtout pendant les moments difficiles.

Je tiens également à remercier vivement l'ensemble des chercheurs et secrétaires des laboratoires pour leurs aides scientifiques et administratives, ainsi que pour l'ambiance amicale dans lesquelles s'est déroulé ce travail.

Je remercie tous mes collègues à l'université de Batna 1 et 2. Plus particulièrement, du département Génie Industriel où je me suis affilié. Ma reconnaissance et ma profonde gratitude s'adressent particulièrement à Monsieur Ahmed SENOUSSE et Toufik BENTRICA.

Mes remerciements vont également à Monsieur Farouk YALAOUI Professeur à l'Université de Technologie de Troyes et Lyes BENYUCEF Professeur à l'Université d'Aix-Marseille pour ses encouragements.

Mohammed HAOUES

Batna, Mai 2017

Liste des figures

Figure. Synoptique du manuscrit de thèse.	ix
Figure II.1 Eléments d'intégration et taxonomie de recherche.	31
Figure III.1. Système à deux étages avec option de sous-traitance.	52
Figure III.2. Les profits générés de la sous-traitance – optimisation séparée –	61
Figure III.3. Intervalle d'équilibre des profits entre le sous-traitant et le donneur d'ordres sous un partenariat gagnant-gagnant.	62
Figure III.4. Variation des profits du sous-traitant, du donneur d'ordres et du profit total en fonction de la période de sous-traitance.	63
Figure III.5. Variation des profits du sous-traitant, du donneur d'ordres et du profit total en fonction du coût de sous-traitance.	65
Figure III.6. Structure du chromosome pour les stratégies 1 et 2.	72
Figure III.7. Structure du chromosome de la stratégie 3.	72
Figure III.8. Variation de la meilleure valeur, et de la valeur moyenne de la fonction objectif en fonction des générations – stratégie 1 –	75
Figure III.9. Variation de la meilleure valeur, et de la valeur moyenne de la fonction objectif en fonction des générations – stratégie 2 –	75
Figure IV.1 La structure de la chaîne logistique considérée.	78
Figure IV.2. Structure du chromosome.	83
Figure IV.3. La structure de la chaîne logistique considérée.	86
Figure IV.4. Structure du chromosome.	91
Figure IV.5. Deux chromosomes avant l'opération de croisement.	94
Figure IV.6. Deux chromosomes après l'opération de croisement.	94
Figure IV.7. Un chromosome avant et après l'opération de mutation.	94
Figure IV.8. La courbe caractéristique de convergence de l'approche pour résoudre des problèmes de petites tailles.	98
Figure IV.9. La courbe caractéristique de convergence de l'approche pour résoudre des problèmes de moyennes tailles.	99
Figure IV.10. La courbe caractéristique de convergence de l'approche pour résoudre des problèmes de grandes tailles.	100
Figure V.1. La structure de la chaîne logistique considérée.	106
Figure V.2. Le graphe d'évolution production – stockage du donneur d'ordres.	112
Figure V.3. Le graphe d'évolution production – stockage du sous-traitant.	119
Figure V.4. Organigramme ASO.	125
Figure V.5. Structure du chromosome.	127
Figure V.6. Organigramme ADCIO.	131
Figure VI.1. La chaîne logistique considérée dans ce problème.	143

Liste des tableaux

Tableau III.1. Paramètres des unités.	60
Tableau III.2. Les coûts générés, les profits et les revenus sans option de sous-traitance.	60
Tableau III.3. Les coûts générés et les profits avec option de sous-traitance – optimisation séparée –	60
Tableau III.4. Les coûts générés et les profits avec option de sous-traitance – optimisation combinée –	61
Tableau III.5. Résultats de l'analyse de sensibilité basée sur les périodicités de sous-traitance.	64
Tableau III.6. Résultats de l'analyse de sensibilité basée sur les coûts de sous-traitance.	66
Tableau III.7. Données des sous-traitants.	73
Tableau III.8. Configuration des valeurs de paramètres utilisés par le solveur GA du GOT du Matlab.	74
Tableau III.9. Configuration du solveur GA du GOT du Matlab.	74
Tableau III.10. Les périodes et les quantités de sous-traitance – stratégie 1 –	74
Tableau III.11. Les périodes et les quantités de sous-traitance – stratégie 2 –	75
Tableau III.12. Les périodes et les quantités de sous-traitance – stratégie 31 –	76
Tableau III.13. Les périodes et les quantités de sous-traitance – stratégie 32 –	76
Tableau IV.1. Données des demandes du donneur d'ordres.	83
Tableau IV.2. Configuration des valeurs de paramètres utilisés par le solveur GA du GOT du Matlab.	84
Tableau IV.3. Configuration du solveur GA du GOT du Matlab.	85
Tableau IV.4. Pourcentages d'utilisation de la capacité interne/de réservation de la capacité chez le sous-traitant.	85
Tableau IV.5. Demandes périodiques.	96
Tableau IV.6. Les données des sous-traitants.	96
Tableau IV.7. Résumé des solutions.	97
Tableau IV.8. Résultats du désign expérimental pour différentes valeurs de fluctuation du prix de vente.	101
Tableau IV.9. Pourcentages de représentativité des coûts partiels par rapport aux coûts totaux – fluctuation du prix de vente –	101
Tableau IV.10. Exemple 1 de plan optimal de maintenance et de production interne/sous-traitance du donneur d'ordres.	102
Tableau IV.11. Exemple 2 de plan optimal de maintenance et de production interne/sous-traitance du donneur d'ordres.	103
Tableau V.1. Les taux de production maximaux.	132
Tableau V.2. Demandes périodiques des donneurs d'ordres.	134
Tableau V.3. Demandes périodiques des sous-traitants – Demandes élevées –	134
Tableau V.4. Demandes périodiques des sous-traitants – Demandes moyennes –	134
Tableau V.5. Demandes périodiques des sous-traitants – Demandes faibles –	135
Tableau V.6. Résumé des solutions avec des coûts de pénurie faibles et élevés.	137
Tableau V.7. Pourcentage de profit réalisé, de réduction ou d'augmentation des coûts – coûts de production faibles des donneurs d'ordres –	138
Tableau V.8. Pourcentage de profit réalisé, de réduction ou d'augmentation des coûts – coûts de production moyens des donneurs d'ordres –	138
Tableau V.9. Pourcentage de profit réalisé, de réduction ou d'augmentation des coûts – coûts de production élevés des donneurs d'ordres –	139
Tableau V.10. Pourcentage de profit réalisé, réduction ou augmentation des coûts – demandes faibles des sous-traitants–	140
Tableau V.11. Pourcentage de profit réalisé, réduction ou augmentation des coûts – demandes élevées des sous-traitants–	140
Tableau VI.1. La structure du chromosome.	148

Tableau VI.2. Données de la demande du donneur d'ordres.	150
Tableau VI.3. Données des sous-traitants.	150
Tableau VI.4. Résultats optimaux pour chaque partie de la chaîne.	151
Tableau A.II.1. Résultats du design expérimental pour différentes valeurs de fluctuation de la demande – demandes plus élevées des sous-traitants –	156
Tableau A.II.2. Résultats du design expérimental pour différentes valeurs de fluctuation de la demande – demandes faibles des sous-traitants –	157
Tableau A.II.3. Résultats du design expérimental pour différents niveaux de coûts de production – coûts de production faibles des donneurs d'ordres –	158
Tableau A.II.4. Résultats du design expérimental pour différents niveaux de coûts de production – coûts de production moyens des donneurs d'ordres –	159
Tableau A.II.5. Résultats du design expérimental pour différents niveaux de coûts de production – coûts de production élevés des donneurs d'ordres –	160

Liste des algorithmes

Algorithme III.1. Algorithme d'optimisation séparée.	58
Algorithme III.2. Algorithme d'optimisation combinée.	59
Algorithme IV.1. Algorithme de contrôle de faisabilité.	92
Algorithm IV.2. Calcul de la date de maintenance préventive optimale.	93
Algorithme V.1. Obtention de la date de maintenance préventive optimale.	122
Algorithm V.2. Heuristique pour obtenir le taux de production minimal.	123
Algorithme V.3. Heuristique pour l'obtention du taux de production minimal pondéré.	124
Algorithme V.4. Heuristique d'allocation.	129

Liste des abréviations

2OPMD	Obtaining the Optimal Preventive Maintenance Date
ABAO	As Bad As Old
ADCIO	Algorithm for Decoding of Chromosomes in Integrated Optimization
AG – GA	Algorithmes Génétiques (en anglais, Genetic Algorithms)
AGAN	As Good As New
AGMO – MOGA	Algorithmes Génétiques Multi-objectif (en anglais, Multi-Objective Genetic Algorithms)
AH	Allocation Heuristic
AOQL	Average Outgoing Quality Limit
APS	Advanced Planning Systems
ARIS	Architecture of Integrated Information Systems
CBM	Condition Based Maintenance
CPLEX	Est un solveur de la programmation linéaire édité par la société ILOG-IBM
COA	Combined Optimization Algorithm
ED	Experimental Design
EMQ	Economic Manufacturing Quantity
ENIM	Ecole Nationale d'Ingénieurs de Metz
EPQ	Economic Production Quantity
ERP	Enterprise Resource Planning
FMS	Flexible Manufacturing System
GERAM	Generalised Enterprise Reference Architecture and Methodology
GOT	Global optimization Toolbox
HOMPR	Heuristic for Obtaining the Minimum Production Rate
HOWMPR	Heuristic for Obtaining the Weighted Minimum Production Rate
int	intervention
INSEE	Institut National des Statistiques et des Etudes Economiques
ISO	International Standardisation Organisation
JAT	Juste A Temps
LAP	Laboratoire d'Automatique et Productique
LGIPM	Laboratoire de Génie Industriel, de Production et de Maintenance
LP	Linear Programming
MATLAB	MATrix LABoratory
MC	Maintenance Corrective
MP	Maintenance Préventive
MRP	Manufacturing Ressource Planning
OEM	Original Equipment Manufacturer
PDC	Plan de Charge
PDP	Programme Directeur de Production
PERA	Purdue Enterprise Reference Architecture
PHM	Proportionnal Hazard Model
PIC	Plan Industriel et Commercial
RM	Réparations Minimales
RP	Remplacement Préventif
RSM	Response Surface Methodology
SC	Supply Chain
SCM	Supply Chain Management
SCOR	Supply Chain Operations Reference
SESSI	Service des Etudes et Statistiques Industrielles
SOA	Separate Optimization Algorithm
SOP	Sales and Operations Plan
UL	Université de Lorraine
u.m	unité monétaire

u.t	unité de temps
VLE	Virtual Laboratory Environment

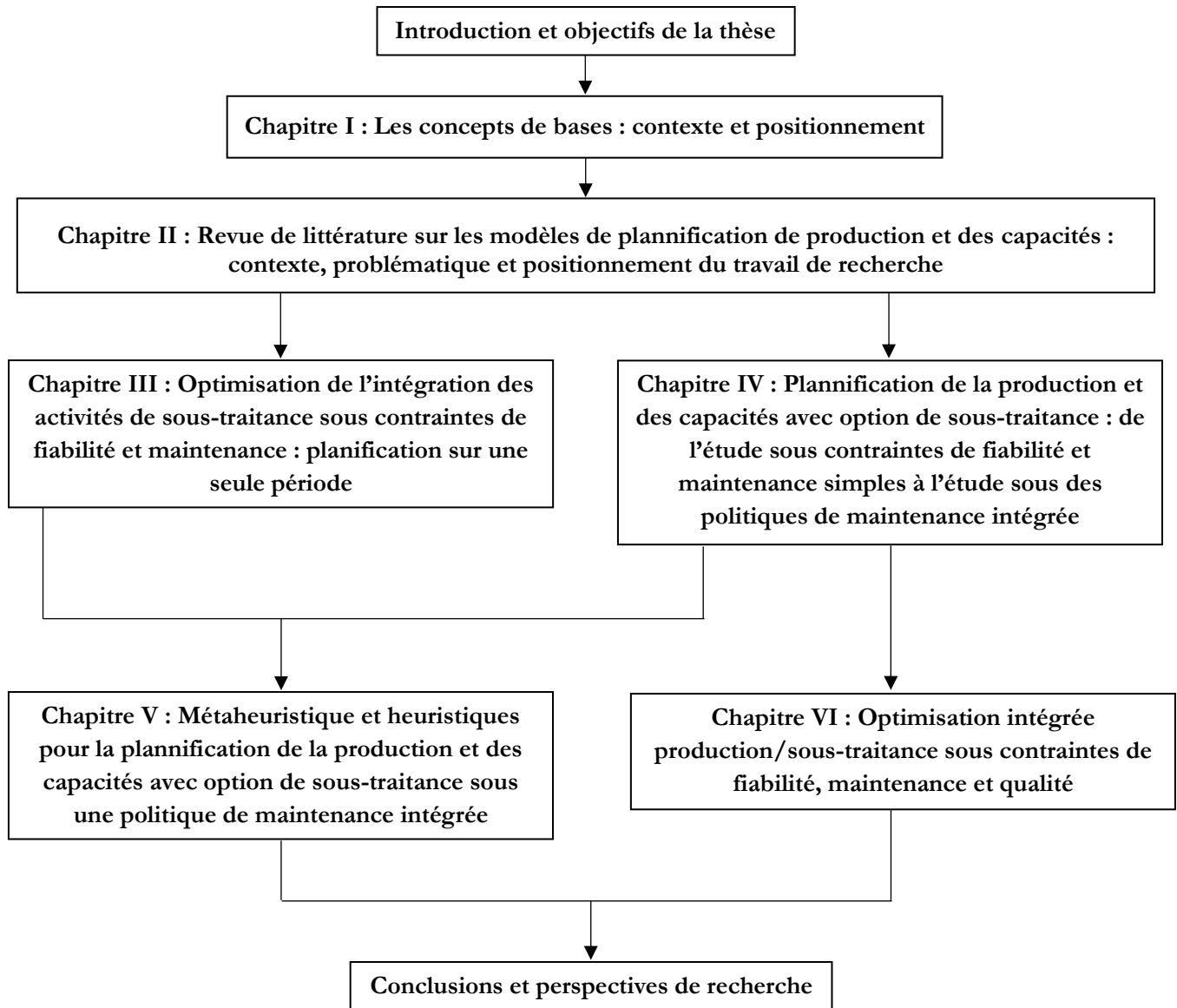


Figure. Synoptique du manuscrit de thèse

Introduction et objectifs de la thèse

Introduction et objectifs de la thèse

Face aux fluctuations des marchés, des alliances stratégiques entre les entreprises ont émergé pour rechercher des complémentarités industrielles et partager les risques. Ainsi l'idée du Supply Chain est née. Elle résulte du principe de coopération entre les entreprises, dont l'ensemble des acteurs doivent travailler ensemble afin d'optimiser les processus (Thomas, 2003).

De nos jours, dans un environnement économique concurrentiel, les fabricants fournissent des produits de qualité en temps opportun à un prix concurrentiel. Aussi, pour satisfaire ces exigences, les fabricants doivent prévoir en plus la capacité nécessaire et suffisante pour répondre aux demandes du marché. Cependant, la planification des capacités est une tâche ardue pour de nombreux fabricants.

Traditionnellement, un fabricant s'appuie uniquement sur la capacité de ses ressources internes de production. Cependant, cette approche présente plusieurs inconvénients :

- Le fabricant doit supporter des coûts fixes élevés associé à l'utilisation des ressources internes.
- Le fabricant doit gérer ses ressources internes par lui-même.
- Le fabricant ne peut pas bénéficier de la technologie développée ou utilisée par d'autre fabricant.
- Généralement, les fournisseurs peuvent fournir de la capacité à un coût inférieur, et cela en tirant parti des avantages des économies d'échelle.

Dans ce contexte, la notion de sous-traitance s'est développé, en effet, les fabricants (donneurs d'ordres) au lieu de renforcer leurs capacités internes, ils externalisent leurs procédés de fabrication et loue la capacité des fournisseurs (sous-traitants) à travers des contrats de sous-traitance de la capacité. A titre d'exemple, dans l'industrie électronique, un fabricant peut concevoir un produit en interne, externaliser la fabrication des différents composants à différents sous-traitants et effectuer l'assemblage final ainsi que les essais finaux par lui-même.

Actuellement, la sous-traitance est devenue une pratique courante dans plusieurs industries. Elle peut jouer un rôle croissant pour fournir des capacités complémentaires et de l'expertise aux fabricants. Aussi, pour assurer la réservation de capacité, le fabricant doit établir des contrats avec ses fournisseurs pour préciser la capacité dont il aura besoin et leur prix. Cependant, quand la demande est incertaine ou imprécise, la structure de la chaîne devient très complexe et par conséquent rend difficile la précision et l'établissement de ces contrats de capacité.

En outre, la planification de capacité avec option de sous-traitance a une structure différente de celle de la planification des capacités traditionnelles. Dans l'approche traditionnelle, après la planification de capacité, un coût est engagé et il est irrécupérable. Par contre, dans un contrat de réservation de capacité avec option de sous-traitance, le fabricant peut réserver la capacité de ses fournisseurs pour certaines périodes seulement, par conséquent, le fabricant augmente ou diminue sa capacité par la signature de contrats pour des durées convenables.

Des fabricants peuvent également sous-traité avec des contrats optionnels. Un contrat optionnel est un contrat qui sépare entre les deux types de coûts reliant le sous-traitant au donneur d'ordres : les coûts fixes (coûts relatif par exemple aux salaires et aux équipements) et les coûts variables (les coûts des heures supplémentaires, coûts d'énergie, ...). Ainsi avec des contrats optionnels, le fabricant achète les droits d'utilisation d'une quantité fixe de capacité avec un paiement fixe à l'avance. Dans ce cas, il doit payer le prix de chaque unité de la capacité utilisée réellement.

L'évaluation des performances exige de nos jours une remise à plat des politiques de gestion. Cette dernière est essentielle pour la pérennité des firmes évoluant dans un contexte de compétition globalisée, sans limites ni frontières. Les politiques de planification de la production et des capacités des systèmes de production ne s'éloignent pas de ce constat, et leur remise en cause est indispensable. En effet, la planification de la production et des capacités classiques ne permettent pas de garantir la pérennité et la croissance durable pour les firmes d'aujourd'hui, où la réduction des coûts et des délais, ainsi que l'accroissement de la qualité sont devenus des objectifs capitaux. Pour répondre à cet objectif, une des solutions est de faire appel à la

sous-traitance qui est devenue la règle et non l'exception. Ce qui impose une nouvelle contrainte dans la planification des capacités. En plus, les nouvelles politiques de planification de la production et des capacités doivent intégrer des contraintes de fiabilité, de maintenance et de qualité. Ces politiques doivent être réactives pour anticiper sur les solutions de recouvrement simples et robustes afin de respecter les délais de production ou de services et satisfaire au mieux les clients.

Dans ce cadre, nous visons dans cette thèse à développer de nouvelles politiques de planification de la production et des capacités avec des contrats de sous-traitance, sous contraintes de fiabilité, de maintenance, et de qualité.

Objectifs de la thèse

Trois objectifs principaux sont fixés, à savoir, positionner notre problématique dans le vaste domaine de recherche sur le management des chaînes logistiques, l'étude de nouveaux problèmes et la proposition de nouveaux modèles, et enfin l'analyse des modèles et la proposition des méthodes de résolution. Plus précisément, les trois objectifs peuvent être définis de la manière suivante :

Positionnement

La thèse est entamée par une analyse de la littérature sur les différents concepts de bases relatifs à notre thème, un positionnement par rapport à l'état des connaissances est effectué. Ensuite, nous présentons une revue de littérature sur les modèles qui prennent en compte la planification de la production et des capacités, les contrats de sous-traitance, le management de la maintenance et le contrôle de la qualité. En effet, nous proposons une nouvelle taxonomie basée sur de nouveaux éléments d'intégration.

Nouveaux problèmes

Ces travaux de thèse abordent la planification tactique et conjointe des activités de production et de sous-traitance sous contraintes de fiabilité, de maintenance, de qualité, et des approches de management intégré. Nous présentons de nouveaux modèles mathématiques et outils pour aider les acteurs de la chaîne logistiques (donneurs d'ordres ou sous-traitants) à prendre des décisions complexes de planification de la capacité d'une manière globale et efficace. De plus, nous considérons les contrats de sous-traitance et des contrats à capacité optionnels.

Ainsi, ces problèmes sont étudiés pour le cas de période unique ou multi-périodes. En plus, ils sont traités selon un point de vue donneur d'ordres, sous-traitant et les deux à la fois.

Méthodes de résolution

Nous avons développé des algorithmes d'optimisation pratiques pour répondre à trois questions, relatives à (1) la sélection des fournisseurs pour chaque fabricant, (2) la capacité qu'il faut réserver, et (3) les paramètres des contrats liants les différentes parties de la chaîne.

Nous comparons numériquement les performances qui apportent les différentes formulations et stratégies. Ces dernières prennent en compte les aléas de production (pannes machines, non qualité, ...), les différentes politiques de production, de sous-traitance, de maintenance et de qualité, les divers degrés de collaboration entre les acteurs, et les éventuels conflits sur l'utilisation d'une ressource partagée.

Structure de la thèse

La thèse est organisée comme suit :

Dans le chapitre I, des notions de bases sur les différents mots clés liées au sujet sont présentées. Une analyse de la littérature sur les différents concepts et un positionnement par rapport à l'état des connaissances sont exposés.

Dans le chapitre II, nous effectuons une revue de littérature sur les modèles qui tiennent compte de la relation entre la planification de la production et des capacités, la sous-traitance, le management de la

maintenance et le contrôle de la qualité. Nous proposons une nouvelle taxonomie et nous discutons également les différentes classes afin d'identifier les lacunes et de mettre en évidence nos contributions.

Dans le chapitre III, nous proposons un cadre d'étude pour le problème d'optimisation des activités de sous-traitance sous contraintes de fiabilité et maintenance pour le cas de période unique. Nous étudions deux structures de la chaîne logistique. Le premier problème consiste à trouver un équilibre entre un seul donneur d'ordres et un seul sous-traitant dans un partenariat gagnant – gagnant. Nous développons des algorithmes exacts pour résoudre ce problème, ensuite une analyse de sensibilité basée sur les paramètres de sous-traitance a été effectuée. Dans le deuxième problème nous comparons quatre stratégies de sous-traitance coopérative, entre un donneur d'ordres et multiple sous-traitants. Nous développons des approches d'optimisation basées sur les algorithmes génétiques mono objectif, dans le but de partager les requêtes de sous-traitance entre les différents sous-traitants, et de trouver les meilleurs instants de sous-traitance.

Dans le chapitre IV, nous abordons le problème de balancement entre deux modes de production : la production en interne et la sous-traitance dans un contexte multi-périodes. Nous étudions ce problème sous contraintes de fiabilité et maintenance simples. Puis nous étendons cette étude sous une politique de maintenance intégrée. Pour les deux problèmes, nous proposons des procédures d'optimisation basée sur la métaheuristique algorithmes génétiques. Afin de montrer l'applicabilité de notre approche, nous menons des expériences pour étudier les perspectives de gestion pour les modèles et les procédures développées.

Dans le chapitre V, nous traitons le problème de planification des capacités avec possibilités de sous-traitance, sous une politique de maintenance intégrée. Nous étudions les méthodes pour équilibrer entre multiple sous-traitants, et multiple donneurs d'ordres grâce au développement d'une plate-forme de cotraitance. Des modèles mathématiques et des procédures d'optimisation à base d'algorithmes exactes et métaheuristiques sont mis-en-œuvre pour la résolution des modèles développés.

Dans le chapitre VI, nous effectuons une extension des travaux des chapitres III et IV pour des modèles plus complets par rapport aux périodicités et aux contraintes d'intégration. Nous étudions le problème de balancement entre la production en interne et la sous-traitance dans une chaîne logistique en deux étapes sous des contraintes de fiabilité, de maintenance, et de qualité. Nous nous concentrons sur le problème de sélection des sous-traitants et nous visons à intégrer et à analyser le problème de la qualité de la production dans la relation de sous-traitance.

Enfin, un bilan des travaux réalisés est effectué, ensuite nous discutons les orientations futures de notre recherche.

Le travail de recherche de cette thèse a donné lieu à une publication dans une revue internationale (Journal of Intelligent Manufacturing) et six papiers de conférences internationales (CIE 41, IFAC-INCOM 2012, CIE 42, IFAC-IMS 2013, IEEE-ETFA 2013 et IEEE-SMC 2013).

Haoues, M., Dahane, M., Mouss, N. K., and Rezg, N. (2011). Optimization of outsourcing activity under a win-win single outsourcer – single subcontractor relationship, Proceedings of the 41st International Conference on computers & Industrial Engineering, 343–348.

Haoues, M., Dahane, M., Mouss, N.K., & Rezg, N. (2012). Optimization of cooperative outsourcing between single-outsourcer multiple-subcontractors: a genetic algorithm based approach. The 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, 14(1), 975–980.
et IFAC Proceedings Volumes, Volume 45, Issue 6, 23–25 May 2012, Pages 975–980

Haoues, M., Dahane, M., Mouss, N.K., & Rezg, N. (2012). Integrated Maintenance Problem in Two-Stage Supply Chain Coordination With an Outsourcing Option. In Proceedings of the 42st International Conference on computers & Industrial Engineering (Cie42), Cie & Saiie, Cape Town, South Africa, 16-18 July, 937–951.

- Haoues, M., Dahane, M., Mouss, N.K., & Rezg, N. (2013). Integrated Optimisation of In-House Production and Outsourcing Strategy: Genetic Algorithm Based Approach. The 11th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, 11(1), 420–425.
et IFAC Proceedings Volumes, Volume 46, Issue 7, May 2013, Pages 420–425
- Haoues, M., Dahane, M., Mouss, N.K., & Rezg, N. (2013). Production Planning in Integrated Maintenance Context for Multi-Period Multi-Product Failure-Prone Single-Machine, in the 18th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'13), Cagliari, Italy, 10-13 September 2013. 1–8.
- Haoues, M., Dahane, M., Mouss, N.K., & Rezg, N. (2013). Optimization of Single-Manufacturer Multiple-Contractors Outsourcing Relationship in Integrated Approach of Production, Maintenance and Quality, in the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC'13), Manchester, UK, October 13-16, 2013. 935 – 940.
- 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, DOI 10.1007/s10845-016-1273-3, 1–25.

Chapitre I

Concepts de bases : contexte et positionnement

I.1. Introduction

Le but de ce chapitre est de présenter et définir, de manière succincte, toutes les notions et concepts de bases, relatif aux travaux de cette thèse. Ainsi ce chapitre débute par des notions sur l'organisation et la gestion des systèmes de production. Nous commençons par les systèmes de production, leurs classifications, et les différentes politiques de gestion de production. Puis, nous définissons les termes de chaîne logistique (*Supply Chain* – SC), et de gestion de la chaîne logistique (*Supply Chain Management* – SCM), qui seront suivis par des notions sur les flux et la prise de décision dans les entreprises et les chaînes logistiques, ensuite nous mettons en revue les notions de la maintenance et ses différents types, modèles et politiques. Après nous présentons les principaux concepts de la qualité dans le management des entreprises, à savoir, son objectif, son utilité, le management de la qualité et ses outils.

Nous introduisons par la suite le concept de la sous-traitance industrielle, ainsi que les avantages et les inconvénients que les entreprises peuvent rencontrer en ayant recours à la sous-traitance, et cela comme étant des sous-traitants ou des donneurs d'ordres de sous-traitance.

Ces différents points sont suivis par des rappels sur la notion de performance et de la modélisation du management de la chaîne logistique. Une analyse de la littérature pour chaque concept est proposée. À chaque point, nous effectuons un positionnement par rapport à l'état des connaissances qui nous permette de positionner ce travail de thèse dans le vaste domaine de recherche sur le management des chaînes logistiques.

I.2. Organisation et gestion des systèmes de production

Pour pouvoir donner une définition de la gestion de production, il faut d'abord définir ce que l'on entend par la fonction production.

I.2.1. Définition de la fonction production

La fonction production est l'ensemble des activités transformant les flux de matières, financiers et d'informations en produits finis (biens ou services), grâce aux ressources de production (les machines, les opérateurs,...etc).

Les entreprises se trouvent devant deux objectifs globaux contradictoires que sont la satisfaction des besoins des clients, et la réalisation d'un maximum de bénéfices (De Wolf, 2003 ; Haoues, 2006 et Haoues, 2010).

I.2.2. Définition de la gestion de production

La gestion de production consiste dans la recherche d'une organisation efficace de la production des biens et services. Selon (De Wolf, 2003), la gestion de production consiste à obtenir un produit donné dont les caractéristiques sont connues, en mettant en œuvre un minimum de ressources. Dans la gestion de production, on considère généralement les caractéristiques du produit comme étant des données. Elles consistent en : la définition du produit, le processus de fabrication, et la structure de la demande à satisfaire.

Ces trois caractéristiques relèvent des sciences de l'ingénieur, des sciences fondamentales, des sciences économiques et de gestion, et des sciences sociales et humaines.

I.2.3. Classification des systèmes de production

Dans la littérature, plusieurs critères de classification des systèmes de production sont distingués. Nous pouvons les classer selon les critères suivants :

- Les quantités fabriquées et répétitivités.
- L'organisation des flux de production.
- La relation avec les clients.

I.2.3.1. Classification selon les quantités fabriquées et la répétitivité

La première différence notable entre les systèmes de production est le volume de production. Selon ce critère, on peut classer les modes d'organisation de la production en quatre grandes classes :

- Production unitaire.
- Production par petites séries.
- Production par moyennes séries.
- Production par grandes séries.

Pour chacune de ces séries, les lancements peuvent être répétitifs ou non.

I.2.3.2. Classification selon le flux de production

Cette classification est basée sur l'analyse du flux des produits lors de leur passage à travers le système de production. Dans cette classe, les systèmes de production sont souvent classés en trois grandes catégories :

- Les systèmes discontinus appelés aussi discrets (produits énumérables).
- Les systèmes continus, tels que les raffineries, l'industrie chimique et autres.
- Les systèmes hybrides qui combinent les caractéristiques des deux premières catégories.

Selon la cadence, les spécifications des produits, et le volume de la demande, deux approches d'organisation sont largement employées pour les systèmes discrets : l'aménagement en ligne, l'aménagement par procédé (fonctionnel) et les ateliers flexibles.

- **Aménagement en ligne "en série" ou "par produit"**

- Sont conçus pour la fabrication d'un produit ou d'une gamme de produits similaires.
- Tous les produits suivent le même circuit, les produits passent systématiquement sur chaque poste de travail implanté sur la ligne toujours dans le même ordre.
- Utilisé dans les industries de production à grand volume et dans les ateliers d'assemblage.
- Le but principal de ces lignes consiste à minimiser le temps d'occupation des équipements.
- Les temps de production et les niveaux d'en-cours très bas.

Dans la littérature, beaucoup de chercheurs se sont intéressés à ce type d'organisation. Par exemple, Pinto et al. (1981) ; Bard (1989) ; Klein et Scholl (1996) ; Scholl et Becker (2005) ; Lei et Guo (2015) et Li et al. (2017) ont étudié les problèmes d'équilibrage de la charge de production. Suri et Diehl (1986), Conway et al. (1988), Kalir et Sarin (2009), Bautista et Cano (2011) et Wedel et al. (2015) ont pris en considération dans leurs études les phénomènes aléatoires qui perturbent le bon fonctionnement de ce type de lignes.

- **Aménagement par procédé**

Dans ce type d'organisation des systèmes de production :

- Les machines qui réalisent les mêmes opérations, ou bien des opérations analogues, sont regroupées.
- Les délais de production sont relativement longs et les niveaux d'en-cours sont élevés.
- Les équipements sont, en général, sous exploités et les dates de livraison des demandes sont difficilement maîtrisées.
- Vu la grande variété des produits traités simultanément, les demandes des clients ainsi que la diversité des équipements, le contrôle de la production devient très complexe.
- Les temps dans le système relativement longs et incertains sont les principales sources de problèmes dans ce type d'organisation.
- Les produits traités n'ont pas souvent la même séquence d'opérations, et les temps de production relatifs varient d'une station de travail à l'autre.

- Le caractère aléatoire du taux d'arrivée des lots et les temps de fabrication, implique une variabilité dans la réquisition des ressources à travers le temps, ce qui rend complexe la planification et l'ordonnancement des produits.

Un grand nombre de travaux dans le domaine de la planification et l'ordonnancement des produits ont abordé ce type d'aménagement. On peut citer à titre d'exemples Johnson (1954) ; McKay et al. (1988) ; Tagawa (1996) ; Kim et al (2003) ; Liu et Kozan (2016) et Xiong et al. (2017).

Aujourd'hui, les exigences des clients et le développement des systèmes de communication, nous amènent à parler de plus en plus des systèmes de production flexibles.

- **Ateliers flexibles**

Les ateliers flexibles n'admettent pas un aménagement caractéristique. Ils sont plutôt reconnus par leurs aptitudes :

- à s'adapter aux multiples changements de l'environnement extérieur et intérieur ;
- pour traiter une grande variété de produits sans la nécessité de temps de préparations et de transferts importants.

Plusieurs auteurs ont étudié des systèmes de production flexibles tels que : Talavage et Hannam (1988) ; D'Alfonso et Ventura (1995) ; Groover (2000) ; Dugardin et al. (2010) ; Naderi et Azab (2015) ; Spina et al. (2016) et Li et al (2016).

Ces travaux de thèse se focalisent sur les chaînes logistiques dont les systèmes de production sont manufacturiers (produits énumérables) modélisés comme étant une seule machine. Les organisations de production de services "Servuction" (secteur des assurances, banques, hôpitaux, ...) ne seront pas considérées ici.

I.2.3.3. Classification selon la relation avec le client

Courtois et al. (1995) et Giard (2003) distinguent trois catégories de relation avec les clients : production sur stock, production sur commande et assemblage à la commande.

- **Production sur stock**

L'objectif d'une production sur stock est d'anticiper la demande des clients, les fabricants se basent sur des prévisions. Les clients achètent des produits déjà fabriqués et stockés. Une production sur stock est préconisée dans les deux cas suivants :

- Si le délai de production est supérieur à celui de la livraison (produits de grande consommation, électroménager, vêtements,...).
- La fabrication en grandes séries afin de rentabiliser des coûts d'exploitations assez élevés (tirage des livres, fabrication de vêtements ...).

- **Production sur commande**

Dans ce type de production, l'achat des matières premières, des composants et des consommables et la fabrication du produit sont déclenchés à la réception d'une commande ferme du client. Ceci évite alors (sauf cas d'annulation) le stock de produits finis.

Ce type de production, est favorisé par rapport au premier, il permet une diminution des coûts de stockage.

- **Assemblage à la commande où production mixte**

Ce type d'organisation de la production est le plus rencontrée dans la pratique, il se situe entre les deux premiers. Dans le cas où le délai de fabrication est trop long, les fabricants préfèrent anticiper l'achat et la fabrication des composants, en procédant à l'assemblage dès qu'ils ont une commande ferme ("Juste À Temps – JAT"). Cette organisation permet :

- de réduire de façon importante le délai entre la commande et la livraison d'un produit ;
- d'avoir de bonnes prévisions de ventes afin de ne pas constituer de stocks excessifs de composants ;
- de réduire la valeur des stocks et de personnaliser le plus en aval possible tout en étant constitué de composants et sous-ensembles standards.

L'inconvénient d'une telle organisation est l'obligation d'avoir un bon système de production qui présente le minimum d'aléas afin de ne pas perturber les délais. Donc, l'utilisation d'une politique de maintenance intégrée à la production est très recommandée. Dans le cadre de cette thèse, les deux dernières politiques de commandes sont considérées.

Cependant, il existe d'autre type de classification des systèmes de production. De Wolf, (2003) les a classifiés en quatre classes : production en série unitaire, en ateliers spécialisés, en ligne, et en industries de process.

- **Production en série unitaire**

La production unitaire est une production mobilisant sur une période assez longue, l'essentiel des ressources d'une entreprise pour réaliser un nombre très limité de produits. À titre d'exemples, on peut citer la construction de grands avions, les grands chantiers des œuvres d'art de travaux publics, ...

- **Production en ateliers spécialisés**

On parle d'organisation en ateliers spécialisés lorsque tous les équipements assurant une fonction spécialisée sont réunis en un même lieu. À titre d'exemple, on peut citer un atelier d'emboutissage des tôles de voitures, un atelier de peinture dans une usine d'assemblage automobile, ...

- **Production en lignes**

On parle d'organisation en lignes de production lorsqu'un flux régulier de produits passe d'un poste à l'autre, l'ordre de passage étant fixé. À titre d'exemple, les lignes d'assemblage des automobiles.

- **Les industries de process**

On parle d'industries de process lorsque le mode d'organisation est caractérisé par un flux régulier et important de matières premières destinées à être transformées en matières plus élaborées. Comme exemples, on peut citer la sidérurgie, la pétrochimie, le secteur de la chimie lourde, le secteur agro-alimentaire, etc.

Bien que ces critères de classification ne soient pas exhaustifs, ils permettent tout de même de cerner le type d'une entreprise. La typologie de production conditionne le choix des méthodes de gestion de production, la stratégie de maintenance et de contrôle de qualité qui en suit et qui sont les plus adaptées (Ayed, 2011).

I.3. La chaîne logistique (Supply Chain - SC)

Il n'y a pas une définition universelle du terme chaîne logistique, ce terme vient de l'anglais Supply Chain qui signifie littéralement chaîne d'approvisionnement.

Selon Génin, (2003), une chaîne logistique est un réseau d'organisations ou de fonctions géographiquement dispersées sur plusieurs sites qui coopèrent, pour réduire les coûts et augmenter la vitesse des processus et des activités entre les fournisseurs et les clients. Si l'objectif de satisfaction du client est le même, la complexité varie d'une chaîne logistique à l'autre.

D'autres termes semblables ou proches du terme chaîne logistique sont aussi plus ou moins utilisés : entreprise étendue, entreprise virtuelle, entreprise réseau, réseau d'entreprises, entreprise fédérale, entreprises en trèfle, en grappe, fractale, organisation triple I, joint-venture, consortium d'entreprises, constellations d'entreprises,... Il existe bien sûr des nuances ou des particularités entre tous ces termes, mais qui ne sont pas détaillées ici. Pour des définitions plus précises, le lecteur peut se reporter à Hammami (2003).

I.4. Gestion de la chaîne logistique (Supply Chain Management - SCM)

Geunes et Chang, (2001) ont défini la gestion de la chaîne logistique comme étant "la coordination et l'intégration des activités de la chaîne logistique avec l'objectif d'atteindre un avantage compétitif viable". La gestion de la chaîne logistique comprend un large panel de problématiques stratégiques, financières et opérationnelles.

I.5. Les flux dans la chaîne logistique

Généralement, trois types de flux circulant dans une chaîne logistique : le flux d'information, le flux physique ou de service et le flux financier.

I.5.1. Le flux d'information

Le flux d'information représente l'ensemble des échanges de données entre les différentes parties de la chaîne. Ces informations peuvent être d'ordre commerciale, telles que, la liste des options d'un produit, la fréquence de livraison, ... Mais aussi des informations d'ordre technique, telles que les gammes opératoires, les capacités de production et de transport, le niveau de stock. Cette dernière est devenue très réclamée par les clients qui souhaitent connaître l'état d'avancement de leur commande.

I.5.2. Le flux physique et de service

Le flux physique est constitué par le mouvement des marchandises transportées et transformées depuis le fournisseur des fournisseurs (matières premières et produits semi-finis) jusqu'au client final (produits finis). En passant par les divers stades de produits semi-finis. Un flux de service passe par les mêmes étapes, sans qu'il n'y ait de transformation de matières.

I.5.3. Le flux financier

Le flux financier concerne toute la gestion pécuniaire des entreprises : ventes, achats et autres dépenses. Il s'agit d'informations d'ordre comptable. Ces derniers permettent d'avoir une idée sur les avoirs et les dettes, sur la capacité des acteurs à dégager un profit, mais permettent aussi de calculer les coûts de production et de fournir une idée sur marges de manœuvre futures.

I.6. La prise de décision dans l'entreprise et la chaîne logistique

Traditionnellement, on distingue trois niveaux ou types de décisions dans une entreprise : stratégique, tactique et opérationnel, correspondant respectivement à des horizons à long, moyen et court terme. Ces notions ont été étendues et appliquées à une chaîne logistique. Dans une revue de littérature sur le SCM Ganeshan et al. (1999) ont classifié les travaux en fonction du niveau décisionnel.

I.6.1. Les décisions stratégiques

Les décisions stratégiques engagent l'entreprise sur le long terme (de 6 mois à plusieurs années), elles conditionnent la manière dont l'entreprise va s'insérer dans son environnement pour tirer le maximum de profit des ressources engagées. Ces décisions sont prises par la direction générale qui cherche à répondre à la question centrale "quoi produire ?" et son corollaire "quels moyens à mettre en œuvre pour produire d'une manière efficace ?".

Ganeshan et al. (1999) ont classé les travaux de recherche relatifs à une chaîne logistique en quatre sous-classes :

- Les travaux déterminant des objectifs stratégiques : il s'agit de déterminer les objectifs pour l'ensemble des partenaires.
- Les travaux qui s'intéressent à la conception ou la configuration : il s'agit de déterminer la structure de la chaîne, la sélection des fournisseurs et sous-traitants, la décision d'ouverture ou de fermeture d'un site de production ou leur délocalisation, l'affectation d'une nouvelle zone de marché à un centre de distribution, ...
- Les travaux qui se concentrent sur le développement d'avantages compétitifs : il s'agit d'analyser comment la gestion de la chaîne logistique peut développer ou améliorer la compétitivité des entreprises partenaires.
- Les travaux qui se focalisent sur l'évolution des stratégies des entreprises en matière de chaîne logistique.

I.6.2. Les décisions tactiques

Ces décisions permettent de définir comment utiliser les ressources pour atteindre les objectifs identifiés au niveau stratégique. Elles s'appliquent sur un horizon de quelques semaines à quelques mois. À ce niveau, les décisions sont prises par les sous-directeurs "métier". Elles portent sur les problèmes d'organisation de l'acquisition et l'affectation des ressources de l'entreprise, en particulier la planification des activités sur ces ressources.

Selon Ganeshan et al. (1999), les travaux sur le management de la chaîne logistique, au niveau tactique se divisent en quatre sous-classes :

- Les travaux visant à développer des relations inter-entreprises, que celles-ci soient horizontales ou verticales, bilatérales ou multilatérales.
- Les travaux qui s'intéressent à la gestion des opérations intégrées, c'est-à-dire la gestion des activités des entreprises pour garantir l'efficacité globale de la chaîne logistique.
- Les travaux qui se focalisent sur la gestion des systèmes collectifs de transport et de distribution.
- Les travaux développant des systèmes d'information qui cherchent à améliorer l'échange d'informations dans le cadre des objectifs stratégiques.

Shapiro (1999) considère que ce niveau tactique a été très peu étudié par les industriels et les scientifiques.

I.6.3. Les décisions opérationnelles

Ces décisions s'appliquent dans le cadre de la gestion courante de l'entreprise (de la journée à la semaine), et concernent l'utilisation optimale des ressources allouées dans le cadre du processus productif de l'entreprise.

Enfin, au niveau opérationnel, Ganeshan et al. (1999) classent la littérature en quatre sous-classes :

- Les travaux relatifs au contrôle et gestion des stocks et des flux physiques.
- Les travaux qui s'intéressent à la coordination de la planification de la production.

- Les travaux qui s'intéressent à la spécification du partage des informations opérationnelles.
- Et enfin, les travaux qui s'intéressent au développement d'outils de pilotage opérationnel.

Les travaux présentés dans cette thèse portent sur la planification de la production et des capacités, au niveau tactique.

Si on se positionne par rapport à la littérature de Ganeshan et al. (1999), nous nous intéressons à la gestion des opérations intégrées, c'est-à-dire la gestion des activités des entreprises pour garantir l'efficacité globale de la chaîne logistique. De plus, nous cherchons à développer des systèmes d'aide à la décision qui améliorent l'échange d'informations dans le cadre des objectifs stratégiques.

Nous cherchons à gérer et optimiser un réseau existant plutôt que le concevoir. Cependant, le niveau stratégique est traité partiellement, à travers le problème de choix des sous-traitants et des donneurs d'ordres. Nous analysons comment le management de la chaîne logistique peut développer ou améliorer la compétitivité des entreprises partenaires.

I.7. Les niveaux de planification de la production

La planification de la production consiste à définir, en fonction des délais et des priorités, les dates de début des opérations d'un ordre (ordre de travail, ordre de fabrication, ordre de maintenance, ordre d'achat, ...), afin d'être terminées dans les délais prévus.

Globalement, la planification de la production obéit à la démarche suivante :

- Estimation des besoins par famille de produits.
- Décomposition des besoins de chaque famille en références finales (produit fini).
- Calcul des besoins bruts sur la base de la nomenclature.
- Évaluation des stocks, calcul des besoins nets et planification des ordres.
- Planification des charges (main d'œuvre, machines...) sur la base des gammes d'opération.
- Exécution du plan de fabrication.

La planification de la production est séquentielle et suit une hiérarchie à trois niveaux :

I.7.1. Le Plan Industriel et Commercial (PIC)

Le premier plan est conçu au niveau stratégique de l'entreprise, le PIC est une représentation des activités de production et de vente des macros-produits. Il aide à prendre des décisions sur la gestion des ressources (capacité de production, main d'œuvre, capacité de stockage, capacité de transport, activités sous-traitées, fiabilité des sources d'approvisionnement...) et à trouver l'adéquation entre ces ressources, les moyens financiers et les objectifs de vente.

Les informations fournies par le PIC sont par la suite déclinées en plans de production, d'approvisionnement, financier, d'investissement, de recrutement et formations, ...

I.7.2. Programme Directeur de Production (PDP)

Le PDP reprend les données du PIC sur un horizon moyen et les convertit en programme pour les produits finis. Il sert à :

- Déterminer les besoins bruts et les dates réelles de ces besoins.
- Calculer les besoins nets. C'est-à-dire les quantités réelles de produits à fabriquer si les stocks disponibles ne permettent pas de couvrir entièrement les besoins bruts.
- Équilibrer les stocks sur la base de données de planification (stock minimum, stock maximum, délais, stock de sécurité, stratégie de calcul des lots de commande, ...).

- Équilibrer les charges par l'entremise du MRP (*Manufacturing Ressource Planning*), et sur la base des gammes opératoires.

I.7.3. Le Plan de Charge (PDC) ou Plan de Fabrication ou encore Planning d'Atelier

Après calcul des besoins nets, et sur la base de la nomenclature de chaque produit, les besoins en composants sont calculés par la méthode MRP. Les matières et composants calculés peuvent être approvisionnés de deux manières :

- Approvisionnement interne : Les composants sont fabriqués par les ateliers ou livrés par le stock déjà constitué. Le système MRP génère dans ce cas des ordres planifiés.
- Approvisionnement externe : Un achat sera effectué auprès des fournisseurs. Le système MRP lance alors des demandes d'approvisionnement externes.

Pour les composants à fabriquer, et sur la base des gammes d'opérations, un plan de charges est réalisé. Le plan de charge détermine l'adéquation entre la quantité de travail à affecter et la capacité nominale des ressources de production. Dans le cas d'un dépassement de cette capacité, on peut :

- Effectuer un lissage en transférant une partie des tâches sur les périodes précédentes moins pleines, en d'autres termes, on procède à un déplacement des ressources dans le temps.
- Augmenter la capacité de certaines ressources (recrutement de personnel, travail en heures supplémentaires, augmentation du nombre de magasins de stockage, acquisition de nouveaux équipements, ...).
- Avoir recours à la sous-traitance pour une partie de la production ou seulement pour certaines opérations de fabrication.

Le plan de charge est fait sur un horizon plus court que celui de PDP (quelques semaines). Sa mise à jour est quotidienne.

I.8. La fonction maintenance

"De nos jours, la fonction maintenance est une composante indissociable de la satisfaction du client, puisque une machine défaillante engendre une diminution de la cadence de production, mais bien souvent également génère des rebuts, et que les coûts induits obligent à augmenter le montant du coût de production. Elle est désormais devenue une des fonctions stratégiques de l'entreprise".

I.8.1. Définition de la maintenance

On peut définir la maintenance comme étant, "l'ensemble des activités destinées à maintenir ou rétablir un bien dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management" (Afnor, 2001).

I.8.2. Missions de la maintenance

Monchy (2000) décompose les missions de la maintenance suivant trois plans interdépendants :

- Le plan technique :
 - accroître la durée de vie des équipements ;
 - améliorer la disponibilité.
- Le plan économique :
 - réduire les prix en minimisant les coûts de maintenance ;
 - réduire le coût global de possession des équipements.

- Le plan social :
 - réduire le nombre d'évènements imprévus, en réduisant le risque d'accidents ;
 - améliorer la qualité du travail.

I.8.3. La fiabilité

Selon l'Afnor (2001), la fiabilité est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise ou à satisfaire les besoins des utilisateurs, dans des conditions données, pendant une durée donnée (Ly et al. 2016). C'est aussi, la probabilité qu'aucune défaillance ne se produise pendant cette durée (Le Digabel, 2016).

I.8.4. La maintenabilité

Selon l'Afnor (2001), la maintenabilité est l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données avec des procédures et des moyens prescrits (Ly et al. 2016). C'est aussi, la probabilité de rétablir un système dans des conditions de fonctionnement spécifiées (Le Digabel, 2016).

I.8.5. La disponibilité

Selon (Afnor, 2001), la disponibilité est "l'aptitude d'un bien, sous les aspects combinés de sa fiabilité, maintenabilité et de l'organisation de la maintenance, à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions de temps déterminées".

La disponibilité est une grandeur qui intègre la fiabilité et la maintenabilité. Elle exprime la probabilité pour que le système accomplisse sa fonction, donc qu'il soit exempté de fautes, à l'instant t , sachant qu'il a pu en receler auparavant (Ly et al. 2016).

En effet, si la maintenabilité permet de réduire la durée des pannes et leur coût, la fiabilité permet de réduire la fréquence de ces pannes. Toutes deux, grâce au choix d'une politique de maintenance appropriée, ont pour but d'augmenter la disponibilité des systèmes ou des équipements et de diminuer les coûts d'entretien et les stocks de pièces de rechange (Tech-ing, 2016).

I.8.6. La défaillance

Bellaouar et Beleulmi (2014) et Ly et al. (2016), ont défini la défaillance comme étant un passage d'une entité d'un état de fonctionnement normal à un état de fonctionnement anormal ou de panne.

I.8.7. La panne

La panne est l'inaptitude d'une entité à accomplir une fonction requise ou son incapacité à assurer le service approprié à la suite d'une défaillance. (Bellaouar et Beleulmi, 2014 ; et Ly et al. 2016)

Une panne est généralement la conséquence d'une défaillance ; néanmoins, elle peut exister sans défaillance préalable. C'est l'ensemble des défaillances des composants. La cause supposée d'une panne est un défaut physique ou une erreur humaine (Ly et al. 2016).

I.8.8. Les types de maintenance

On distingue deux catégories principales de maintenances :

I.8.8.1. La maintenance corrective (MC)

Selon Doyen et Gaudoin, (2004) et Le Digabel (2016), la maintenance corrective est "un ensemble d'activités effectuées suite à la détection d'une défaillance. L'objectif, est de remettre une entité dans un état de fonctionnement normal, pour accomplir une fonction requise." Elle est réalisée par une série d'opérations dont :

- *test* : comparaison des mesures avec une référence ;
- *détection* : déceler l'apparition d'une défaillance ;
- *localisation* : identification des éléments par lesquels la défaillance se manifeste ;
- *diagnostic* : analyse des causes de la défaillance ;
- *dépannage, réparation* : remise en état de fonctionnement normal avec ou sans modification ;
- *contrôle* : contrôle du bon fonctionnement.

La maintenance corrective se subdivise en deux types :

- **Maintenance palliative** : dépannage de l'équipement (provisoire), permettant à celui-ci d'assurer tout ou partie de sa fonction requise ; elle doit toutefois être suivie d'une action curative.
- **Maintenance curative** : réparation (durable) consistant en une remise en l'état initial.

I.8.8.2. La maintenance préventive (MP)

Selon Doyen et Gaudoin (2004) et Ly et al. (2016), la maintenance préventive est "un ensemble d'activités effectuées quand le système est en état de fonctionnement, a pour but de ralentir le vieillissement et réduire la fréquence d'apparition des défaillances".

Différentes activités telles que l'inspection, le contrôle, la visite et le test peuvent être accomplies pour maîtriser l'évolution de l'état d'un bien, effectuées de manière continue ou à des intervalles réguliers calculés en fonction du temps ou du nombre d'unités d'usage. La maintenance préventive se subdivise en :

- **Maintenance systématique** : ensemble d'opérations effectuées systématiquement, soit selon un échéancier (à périodicité temporelle fixe), soit selon une périodicité d'usage (heures de fonctionnement, nombre d'unités produites, nombre de mouvements effectués, etc).
- **Maintenance conditionnelle** : opérations réalisées à la suite de relevés, de mesures, de contrôles révélateurs de l'état de dégradation de l'équipement.
- **Maintenance prévisionnelle** : opérations réalisées à la suite d'une analyse de l'évolution de l'état de dégradation de l'équipement.

I.8.9. Les modèles de maintenance

Afin d'évaluer les coûts de maintenance et prévoir les interventions, on a recours à l'élaboration d'un modèle du système qui permettra de connaître la probabilité de panne à chaque instant. Ces modèles sont définies pour trois types de maintenance : les maintenances minimales, parfaites et imparfaites.

I.8.9.1. Le modèle de maintenance parfaite

Dans ce modèle, les actions de maintenance peuvent être considérées comme des remplacements. Chaque action remet le système à neuf *As Good As New* (AGAN), autrement dit *Aussi Bon Que Neuf*. Les durées inter-défaillances, et donc inter-maintenance, sont alors indépendantes et de même loi. Pour modéliser l'effet de la

maintenance corrective et/ou préventive, nous utiliserons l'expression du taux de défaillance en fonction du temps donnée par :

$$\lambda_t = \lambda n(t - T_{N_t}) \quad (I.1)$$

Le processus aléatoire correspondant est appelé Processus de Renouvellement (PR).

λ_t : Fonction du taux de défaillance.

$\lambda n(t)$: Fonction nominale du taux de défaillance.

T_{N_t} : Date de la dernière défaillance.

I.8.9.2. Le modèle de maintenance minimale

Ce modèle suppose que l'effet d'une action de maintenance est de restituer le système dans un état opérationnel (où il était juste avant la défaillance), c'est-à-dire *As Bad As Old* (ABAO), qui signifie *Aussi Mauvais Que Vieux*. L'intensité de défaillance est alors une fonction uniquement du temps et ne dépend que du passé du processus, donc :

$$\lambda_t = \lambda(t) \quad (I.2)$$

En effet, ces actions de maintenance n'améliorent pas l'état du système. L'expression du taux de défaillance est donnée par un Processus de Poisson Homogène (PPH) dont l'intensité de défaillance est constante :

$$\lambda(t) = \lambda n \quad (I.3)$$

I.8.9.3. Le modèle de maintenance imparfaite

Une maintenance imparfaite est considérée comme un état intermédiaire entre une maintenance parfaite et une maintenance minimale. Aussi, dans la littérature, on distingue quatre approches de modélisation de la maintenance imparfaite :

La première approche repose sur l'idée que les effets de maintenance ne dépendent ni des dates, ni des actions réalisées précédemment. Pour Brown et Proschan (1983), la maintenance préventive peut être considérée comme parfaite avec une probabilité r et minimale avec la probabilité complémentaire $(1 - r)$.

r : Facteur de réduction, appelé aussi, facteur d'amélioration.

Ainsi, l'efficacité de l' $i^{\text{ème}}$ action de maintenance est une variable aléatoire Y_i telle que :

$$Y_i = \begin{cases} 1 & \text{si la maintenance est AGAN} \\ 0 & \text{si la maintenance est ABAO} \end{cases} \quad (I.4)$$

Les Y_i sont des variables aléatoires indépendantes et de même loi de Bernoulli de paramètre r . L'intensité de défaillance du modèle de Brown et Proschan s'écrit comme suite :

Ainsi, le modèle pour le cas d'une maintenance imparfaite est donné par :

$$\lambda_t^N(N, Y) = \lambda n \left(t - T_{N_t} + \sum_{j=1}^{N_t} \left[\prod_{k=j}^{N_t} (1 - Y_k) \right] X_j \right) \quad (I.5)$$

Avec :

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

La deuxième approche, s'articule sur la réduction d'âge. Kijima et al. (1988) ont proposé un modèle suivant lequel l'efficacité de la maintenance est caractérisée par une réduction de l'âge virtuel (quantité proportionnelle à la durée écoulée depuis la dernière maintenance). L'expression de l'âge du système est donnée par :

$$A_i = A_{i-1} + (1 - Z_i) \cdot X_i \quad \forall i \geq 1 \quad (I.6)$$

Z_i : Facteur de réduction de la durée X_i .

Dans un autre modèle, Kijima (1989) a supposé que la réduction d'âge est proportionnelle à l'âge virtuel lui-même qui peut s'écrire comme suit :

$$A_i = (1 - Z_i)(A_{i-1} + X_i) \quad \forall i \geq 1 \quad (I.7)$$

On peut alors écrire les intensités de défaillances de ces modèles respectivement comme :

$$\lambda_t^N(N, Y) = \lambda n \left(t - T_{N_t} + \sum_{j=1}^{N_t} (1 - Y_j) X_j \right) \quad (I.8)$$

$$\lambda_t^N(N, Y) = \lambda n \left(t - T_{N_t} + \sum_{j=1}^{N_t} \left[\prod_{k=j}^{N_t} (1 - Y_k) \right] X_j \right) \quad (I.9)$$

Suivant la même logique de raisonnement, Doyen et Gaudoin (2004) ont proposé des modèles à réduction arithmétique de l'âge. Les auteurs ont pris en considération les instants de défaillances précédents, qui peuvent influencer l'intensité de défaillance du système. Le taux de défaillance est donné par la formule suivante :

$$\lambda(t) = \lambda n \left(t - r \sum_{j=0}^{\min(m-1, N_t-1)} (1 - r)^j T_{N_t-j} \right) \quad (I.10)$$

m : Nombres de derniers instants de défaillances mémorisés ;

La troisième approche se base sur la modification du taux de défaillance. Nakagawa, (1988) a supposé qu'après chaque maintenance préventive, l'intensité de la fonction de taux de défaillance augmente. Par contre, après chaque action imparfaite, le taux de défaillance est ramené à zéro, comme si, à cet instant, le système était considéré comme neuf.

La dernière approche repose sur la réduction du taux de défaillance. Chan et Shaw (1993) ont proposé qu'après une maintenance, l'intensité de défaillance se réduit d'une quantité proportionnelle à sa valeur juste avant la défaillance. Après la $i^{\text{ème}}$ maintenance dont la durée est supposée négligeable, l'expression du taux de défaillance est donnée par :

$$\lambda_{T_i^+} = \lambda_{T_i^-} - r \cdot \lambda_{T_i^-} \quad (I.11)$$

Où $\lambda_{T_i^+}$ respectivement $\lambda_{T_i^-}$ est la limite à droite respectivement à gauche de λ_t quand t tend vers T_i . Entre deux défaillances, l'intensité est supposée évoluer comme celle d'un système neuf. L'intensité de défaillance de ce modèle est de la forme :

$$\lambda_t = \lambda(t) - r \sum_{j=0}^{N_t} (1-r)^j \lambda(T_{N_t-j}) \quad (I.12)$$

Pour plus de détails sur les modèles de maintenance, le lecteur pourra consulter le rapport de Doyen et Gaudoin (2004).

I.8.10. Les politiques de maintenance

Les politiques de maintenances les plus utilisées dans la pratique sont basées sur la seule connaissance du temps de fonctionnement du système. Gertsbakh, (1977) identifie deux : une de type âge et l'autre de type bloc.

I.8.10.1. Politique de maintenance de type âge

La politique de maintenance de type âge, consiste à réaliser des actions de maintenance préventive à un intervalle d'âge fixe. Si une défaillance survient avant l'échéance de la maintenance préventive, une action de maintenance corrective est réalisée. Suite à cette maintenance corrective, l'échéance de maintenance préventive est décalé (mise à jour).

L'optimisation des politiques de type âge est basée sur la détermination du nombre optimal des maintenances préventives à réaliser, avant d'effectuer le remplacement de l'unité. Cependant, il est également nécessaire de déterminer la taille optimale de ces intervalles de temps (échéances).

Dans la littérature, plusieurs modèles de la stratégie de maintenance de type âge ont été développées pour répondre aux besoins de l'industrie comme la minimisation du coût de production et l'optimisation de la disponibilité des machines.

Parmi les auteurs nous pouvons citer : Barlow et Hunter (1960) ; Barlow et Proschan (1965) ; Cox (1972) ; Cheung et Hausmann (1997) ; Ouali et al. (2002) ; Rezg et al. (2004) ; Beit (2004) ; Dellagi (2006) et Dahane (2007).

I.8.10.2. Politique de maintenance de type bloc

La politique de maintenance de type bloc, consiste à maintenir l'équipement au moment prévu pour faire la maintenance préventive, et à le réparer suite à une panne sans modifier l'échéance de la maintenance préventive. L'optimisation de cette politique se traduit par la détermination du nombre optimal des périodes de maintenance préventives, ainsi que la durée optimale de ces périodes minimisant les coûts de maintenances (Nakagawa, 1986). Cette politique est plus simple à gérer qu'une politique de remplacement basée sur l'âge, à cause du nombre important des variables de décisions et la corrélation de ces variables. Cependant, elle présente le risque de remplacer des systèmes neufs (Barlow et Hunter 1960). Les politiques de type bloc trouvent leur intérêt dans l'étude de la maintenance pour des systèmes formés de plusieurs composants.

Parmi les travaux utilisant cette stratégie nous pouvons citer : Nakagawa (1979) ; Chelbi et Ait-Kadi (2004) ; Beit (2004) et (Dahane, 2007).

I.9. Les concepts de base de la qualité

La qualité est la satisfaction au mieux possible des besoins exprimés ou potentiels des clients, en utilisant des processus maîtrisés, et en s'assurant que l'amélioration ne se traduit pas par un surcoût général ("sur-qualité"). Il est possible d'améliorer un grand nombre de dysfonctionnements à moindre coût, mais à l'inverse, plus on souhaite se rapprocher de la perfection plus les coûts grimpent.

Aucune entreprise ne souhaite fournir un produit non-conforme à ses clients. Par conséquent, toutes les entreprises se trouvent dans l'obligation de gérer la qualité avec une volonté plus ou moins affirmée et dans un environnement plus ou moins propice. Le management de la qualité ne doit donc pas être implanté dans une entreprise, il doit être organisé.

En effet, l'entreprise, dans sa conquête de la qualité totale, serait confrontée à des problèmes multiples que ce soit de types organisationnels ou techniques. Afin de les surmonter, la démarche qualité propose toute une panoplie d'outils (méthode, analyse, statistique, et contrôle). Dans le cadre de leurs actions de conseil auprès des entreprises, les fondateurs de la démarche qualité distinguent trois catégories d'outils : les outils de recueil des données, les outils d'analyse et les outils d'aide à la décision. Dans le présent document, nous nous intéressons au développement des outils d'aide à la décision et des méthodes de contrôle de la qualité sous des approches de management intégrées.

Juran, (1993) et El Ghazi (2009) ont donné une panoplie chronologique d'outils de la qualité :

- **Le contrôle unitaire des produits**

Le contrôle unitaire des produits est à ce jour applicable pour les entreprises adoptant une organisation de la production unitaire.

Historiquement, durant la phase de l'économie de production, le souci des entreprises manufacturières est de produire plus au moindre coût. Dans cette phase, les industriels ne se préoccupent que des problèmes techniques et de financement. Le volume de production était assez faible, pour pouvoir assurer la qualité de ces produits, un contrôle unitaire final est appliqué. (El Ghazi, 2009)

- **L'inspection par échantillonnage**

Dans une organisation de type production de masse. Il est rare qu'on puisse contrôler la qualité de chaque produit fabriqué. C'est ici qu'entre en jeu le contrôle par échantillonnage, qui permet de juger de l'acceptabilité des lots de produits à partir de l'inspection d'un échantillon provenant du lot. Ce contrôle peut être réalisé pour l'inspection des produits finis, des composants d'assemblage, des matières premières, et des opérations de maintenance. Mais, il est évident que cette méthode ne peut pas permettre de détecter toutes les non-conformités. Elle permet uniquement de constater a posteriori la qualité des lots produits.

- **La maîtrise Statistique des Procédés**

Au lieu de contrôler des produits déjà fabriqués, il vaut mieux contrôler leur procédé, ceci afin d'éviter de fabriquer un produit non conforme. Cette approche utilise un certain nombre de techniques telles le contrôle de réception, les plans d'expérience, les techniques de régression, les diagrammes de Pareto, les cartes de contrôle, etc.

- **L'assurance qualité**

L'assurance qualité est l'aptitude de l'organisation à satisfaire le niveau de qualité désiré. Elle était orientée vers les fournisseurs, qu'au lieu d'inspecter les pièces reçues, l'objectif était de s'assurer que le fournisseur était parfaitement organisé.

- **Les normes internationales**

C'est au début des années 1980 que la mission de l'élaboration des normes et guides en matière de management et d'assurance de la qualité fût confiée à l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO). Les Normes internationales garantissent des produits et services sûrs, fiables et de bonne qualité. Pour les entreprises, elles sont des outils stratégiques permettant d'abaisser les coûts, en augmentant la productivité et en réduisant les déchets et les erreurs. Elles ouvrent l'accès à de nouveaux marchés, établissent des règles du jeu équitables pour les pays en développement et facilitent le libre-échange et le commerce équitable dans le monde (Iso, 2016).

- **Le management total de la qualité**

Il s'agit d'une démarche de gestion de la qualité dont l'objectif est d'intégrer les exigences du client aux processus d'affaires de l'entreprise. Cette démarche repose sur les normes internationales ISO 9004, pour parvenir à une qualité parfaite en réduisant au maximum les gaspillages et en améliorant en permanence les éléments de sortie.

I.10. La sous-traitance

Dans la littérature, on trouve plusieurs façons de définir la sous-traitance :

I.10.1. Définitions de la sous-traitance

La Commission Européenne (CE) et l'Association Française de NORmalisation (Afnor, 1987), définissent la sous-traitance comme "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 une partie du contrat d'entreprise ou une partie du marché public conclu avec le maître d'ouvrage". La notion du maître d'ouvrage réfère à un donneur d'ordres au profit duquel l'ouvrage est réalisé. Du fait de sa position, le donneur d'ordres doit définir clairement sa commande en termes de spécifications, délais, qualité, ... Le maître d'œuvre (sous-traitant) doit réaliser l'ouvrage en respectant les objectifs et les contraintes du maître d'ouvrage.

Selon l'association française de normalisation (Afnor, 1987), la sous-traitance industrielle est définie comme : "Opérations concourant, pour un cycle de production déterminé, à l'une ou plusieurs des opérations de conception, d'élaboration, de fabrication, de mise en œuvre ou de maintenance du produit en cause, dont une entreprise dite donneur d'ordres, confie la réalisation à une entreprise, dite sous-traitant ou preneur d'ordres, tenue de se conformer exactement aux directives ou spécifications techniques arrêtées en dernier ressort par le donneur d'ordres".

Van Mieghem, (1999), Andersen, (1999) et Cagliano et Spina, (2002) définissent la sous-traitance comme étant "la livraison des produits ou des services, selon la conception et les caractéristiques d'une entreprise donneur d'ordres".

Souquet (2003) a distingué l'achat des produits sur catalogue du contrat de sous-traitance. Dans la première, la responsabilité juridique et commerciale émane du producteur, alors que dans la deuxième la responsabilité émane du concepteur.

Selon Grosmann, (2005), la sous-traitance signifie plus que juste l'achat des produits et des produits intermédiaires. "Elle consiste à trouver un associé avec lequel l'entreprise peut établir un rapport bilatéral. Ce dernier, est basé sur un cahier de charges précis, de sorte qu'il devienne capable de produire les marchandises ou les services adaptés selon les besoins de l'entreprise.

Dahane (2007), a défini la sous-traitance comme "une relation entre deux entreprises, suivant laquelle une des entreprises appelée sous-traitant (ou preneur d'ordres) accomplit des tâches confiées par l'autre entreprise dite donneur d'ordres (donneur d'ouvrages), en respectant un cahier de charges précis, contenant les différentes spécifications en matière de prix, délais, qualité, quantités...etc".

Juridiquement, la sous-traitance est un contrat par lequel une entreprise demande à une autre entreprise ou un ensemble d'entreprises de réaliser une partie de sa production.

À travers ces définitions nous pouvons considérer la sous-traitance comme "un arrangement dans la chaîne logistique, permettant à une entreprise donneur d'ordres d'externaliser certains de ses processus internes de fabrication à un ou plusieurs sous-traitants, ou dans certains cas, permettant à une entreprise 'sous-traitant'

d'externaliser (louer) ses ressources (par exemple, machines, véhicules, ...) à des donneurs d'ordres, en respectant un cahier de charges précis".

I.10.2. Typologies de la sous-traitance

Selon l'Institut National des Statistiques et des Études Économiques (INSEE) et le Service des Études et Statistiques Industrielles (SESSI) – France, au regard de l'intention du donneur d'ordres, il existe deux formes de sous-traitance : la sous-traitance de capacité et la sous-traitance de spécialité (Amesse et al. 2001) ; (Bertrand et Sridharan, 2001) ; (Morcos, 2003) ; (Sessi, 2006) et (Dahane, 2007).

I.10.2.1. La sous-traitance de capacité

"L'entreprise donneur d'ordres, équipée elle-même pour produire un produit a recours à une autre entreprise soit occasionnellement, soit de façon plus ou moins habituelle parce que, désireuse de conserver une capacité propre dans une fabrication déterminée, elle entend utiliser des capacités de production disponibles à l'extérieur" (Afnor, 1987).

I.10.2.2. La sous-traitance de spécialité

"L'entreprise donneuse d'ordres, décide de faire appel à un spécialiste disposant des équipements et de la compétence adaptée à ses besoins, parce qu'elle ne peut ou ne souhaite pas, pour des raisons relevant de sa propre stratégie, se doter des moyens nécessaires au lancement ou au développement d'une fabrication, ou encore parce qu'elle estime ses installations insuffisantes ou insuffisamment compétitives pour cette fabrication" (Afnor, 1987).

Dans le présent travail, nous nous intéressons à la sous-traitance de capacité. Dans certains problèmes, nous considérons un donneur d'ordres incapable de réaliser une demande, ou son désir de minimiser les coûts d'exploitation de son système. Dans d'autres cas, le donneur d'ordres fait appel à un sous-traitant pour louer des ressources de production pour combler le manque de capacité.

I.10.3. Les avantages de la sous-traitance

Comme dans (Morcos, 2003) et (Dahane, 2007), les avantages de la sous-traitance sont classés en fonction des deux partenaires de cette relation. Ainsi, pour les donneurs d'ordres les avantages sont résumés dans les points suivants :

- **Réduction des coûts**

La majorité des études menées sur l'association et la coordination entre les membres des chaînes logistiques, plus particulièrement sur la sous-traitance insistent sur l'aspect de réduction des coûts d'exploitation.

- **Amélioration de la qualité**

La sous-traitance permet de garantir un niveau supérieur de la qualité des produits. Les sous-traitants peuvent fournir aux donneurs d'ordres des produits de haute qualité avec un prix raisonnable tout en utilisant une technologie de pointe (Morcos, 2003) et (Liu et al. 2008).

- **Réduction des délais**

Le donneur d'ordres fait appel à des sous-traitants, afin de réagir au plus vite face aux fluctuations du marché. L'objectif principal des entreprises est de produire et livrer les produits aux clients dans les meilleurs délais, sans retard ni report, et de réduire les délais de traitement des commandes ...

- **Accéder à des nouveaux marchés**

Plusieurs entreprises utilisent la sous-traitance comme un moyen pour pouvoir accéder à des nouveaux marchés, avec de forts potentiels de croissance et de développement (Morcos, 2003).

Du côté des sous-traitants les principaux avantages peuvent être résumés dans les points suivants :

- **Économies d'échelle**

Le fait que les donneurs d'ordres se concentrent sur leurs activités principales, ils offrent aux sous-traitants la possibilité de réaliser des économies d'échelles (Andersen et Christensen, 2000) et (Morcos, 2003).

- **Transfert de technologie**

Les sous-traitants possèdent une technologie de pointe, et un savoir-faire qui demeuraient inaccessibles à cause de leurs coûts élevés ou en raison de manque de compétences (Andersen et Christensen, 2000). Les sous-traitants peuvent accéder à la technologie, aux compétences et à l'expérience du donneur d'ordres qu'elles finissent par s'approprier totalement.

- **Appui financier**

Selon Morcos, (2003) et Dahane, (2007), la sous-traitance permet aux sous-traitants de recevoir un appui financier des donneurs d'ordres, par exemple, sous forme d'avances de paiement. De plus, un contrat de sous-traitance peut constituer un atout et une garantie pour accéder à des prêts de la part des organismes financiers.

Nous distinguons des avantages communs pour les deux parties résumés dans les points suivants :

- **Flexibilité de la planification des capacités**

Selon Van Mieghem (1999), la sous-traitance tient en compte des ajustements nécessaires pour faire face aux fluctuations et variations temporelles de la demande. En se basant sur le principe de l'avantage comparatif, le donneur d'ordres choisit le plan de production en interne et le plan de sous-traitance qui minimisent les coûts totaux. Les résultats démontrent que les coûts élevés de production en interne motivent les entreprises à sous-traiter à une autre entreprise indépendante. Aujourd'hui, dans les chaînes logistiques globales, peu d'entreprises fabriquent des produits en interne sans recours à la sous-traitance (Zhen, 2012 ; Ni et al, 2009).

Selon Morcos, (2003) et Qi (2011), la sous-traitance peut permettre aux entreprises de maximiser l'utilisation des capacités disponibles. Les sous-traitants réservent une partie de leurs capacités pour des donneurs d'ordres de la sous-traitance. Une meilleure exploitation des capacités et compétences permet d'augmenter les profits directs, mais surtout les retours sur investissements et les rendements des équipements, matériels et compétences (Dahane, 2007).

- **Efficacité économique plus élevée**

Selon Thomas et Griffin, (1996), Berry, (1997), Tserng et Lin (2002) et Gunasekaran et al. (2015), la coopération inter-entreprises, notamment, la sous-traitance permet d'augmenter l'efficacité économique des entreprises et améliorer leurs performances.

- **Partage et réduction des risques**

Comme mentionné auparavant, un grand nombre de chercheurs se sont intéressés au partage et réduction des risques liés à la sous-traitance, tel que, les risques causés par des incertitudes ou des pénuries (Morcos, 2003). La combinaison des qualifications des deux parties de la relation de sous-traitance peut minimiser ces risques (Andersen et Christensen, (2000) ; Gan et al. (2011) ; Arshinder et al. (2011) et Choi et Cheng (2011)).

I.10.4. Les causes de réussite et d'échec de la sous-traitance

Malgré les avantages multiples de la sous-traitance pour les différentes parties de la chaîne, la sous-traitance peut présenter certains inconvénients. Plusieurs auteurs ce sont intéressés à l'analyse de ces facteurs.

- Dans leur étude Weidenbaum (2005) constate qu'environ la moitié des contrats de sous-traitance conclus finissent par être résiliés, pour une variété de raisons. A titre d'exemple, les entreprises qui sous-traitent seulement parce que "tout le monde le fait" peuvent être surpris par des coûts imprévus et des complications. En effet, les différentes parties de la relation de sous-traitance doivent comparer les coûts de production en interne et celui de la sous-traitance, avant de s'engager dans un contrat de sous-traitance, et analyser tous les facteurs qu'il entoure.
Nous prenons en considération cet aspect dans notre travail de thèse.
- La multiplication des partenaires complique les relations entre les différentes firmes. Cette complication finit dans certains cas à un échec de la relation de sous-traitance (Andersen et Christensen 2000). Van Mieghem (1999) a constaté que les donneurs d'ordres deviennent plus vulnérables en perdant le contrôle et la maîtrise de toute leur chaîne de production. Dans d'autres cas, ils peuvent perdre la confidentialité ou le monopole du savoir-faire.
- La relation de sous-traitance peut augmenter le risque de dépendance entre les acteurs de la chaîne (Van Mieghem, 1999). En effet, le donneur d'ordres peut devenir dépendant de la capacité de production, des ressources ou des compétences du sous-traitant dans la mise en œuvre de ses propres produits. De même, le sous-traitant peut se retrouver dans une situation de dépendance technique, financière ou économique vers ses donneurs d'ordres.
- Certaines entreprises ont connu des échecs avec leurs stratégies de sous-traitance. Selon Liu et al. (2008) les décisions de sous-traitance dépendent de nombreux facteurs quel que soit le niveau de décision. L'une des causes de ces échecs, est le manque de méthodes et d'outils d'aide à la décision fondés sur la science, pour aider les managers à prendre des décisions de sous-traitance averties. Cela, peut être en raison de peu d'études sur les stratégies de sous-traitance dans le cadre des approches de gestion intégrée. Cette thèse vise à fournir des méthodes d'aide à la décision efficace et efficiente, fondées sur des stratégies de sous-traitance industrielle et des approches de gestion intégrée, à savoir, production-maintenance et production-maintenance-qualité.
- Les nouveaux entrants à la sous-traitance peuvent traiter avec des sous-traitants non pas fiables. Même s'ils sont fiables, il est très difficile, voire même impossible parfois, d'avoir des informations sur leurs systèmes et sa gestion (dégrée de fiabilité, programme de maintenance préventive, disponibilité, efficacité de leurs politiques et leurs effets sur les coûts, les délais et la qualité des produits). En effet, selon Weidenbaum (2005), le manque d'information et de transparence complique la tâche des managers de production et les oblige à augmenter leur production, ou à changer brusquement leurs plans afin d'éviter des retard de livraison et ainsi l'insatisfaction des clients potentiels.
- De plus, les entreprises limitent leurs relations de sous-traitance à l'ingénierie de routine et les tâches de maintenances, car ils craignent que leurs technologies de base puissent être volées par les entreprises qui ne respectent pas les droits de la propriété industrielle (Weidenbaum, 2005).

Autres complications coûteuses peuvent survenir :

- Le transport qui engendre des coûts parfois très élevés, il complique la maîtrise des délais exigés par les clients.
- Les réseaux de transport peuvent être inadéquats.
- Le contrôle et le suivi de la qualité du produit.
- Le problème de la gestion de la maintenance pour les deux parties.
- Les faibles investissements engendrent – dans la plupart des cas – peu d'innovation.

I.11. Les performances

L'objectif principal du management de la chaîne logistique est d'améliorer le système global de l'entreprise. Pour cela, elles mettent en place un système d'indicateurs de performance, ces derniers sont parfois difficilement quantifiables (Tan, 2001 ; Min et Zhou, 2002), à titre d'exemple : la satisfaction du client, l'amélioration de la productivité, un meilleur partage de l'information, la gestion et le partage des risques, la diversification des produits, la compétitivité... cependant certains sont quantifiables, tels que les retards de livraison, temps de réponse client,... (Beamon, 1998).

Dans l'objectif d'améliorer les compétences de la chaîne logistique, une première étape consiste à connaître la performance effective, les managers se fixent les cibles à atteindre au bout d'un certain délai. Plusieurs critères de performance sont envisageables, principalement ceux détaillés ci-après. Ensuite, il faut prendre des décisions de réingénierie et agir sur le système à travers des variables de décision afin d'atteindre les objectifs fixés.

Cela suppose que l'entreprise se coordonne efficacement avec ses partenaires (Llerena, 2003). À ce propos, en plus de l'idée de coordination, vient se greffer la justification stratégique des chaînes logistiques, qui est d'établir entre elles un rapport gagnant-gagnant aux entreprises partenaires, quitte à accorder des compensations aux maillons défavorisés. Mais ce système de compensation nécessite une très bonne confiance entre les acteurs de la chaîne (François, 2007).

François (2007) identifie trois types d'indicateurs de performance de la chaîne logistique :

- Les indicateurs de coopération relatifs à la performance du flux d'information.
- Les indicateurs de coûts pour le flux financier.
- Les indicateurs de délai de livraison pour le flux physique.

Dans cette thèse, nous nous intéressons à ces trois types d'indicateurs. Afin d'optimiser les performances de la chaîne logistique, les managers utilisent des variables de décision.

I.11.1. Agir par les variables de décision

Beamon (1998) a élaboré une liste non exhaustive de variables de décision généralement utilisées en management de la chaîne logistique :

- Le nombre d'acteurs que comprend la chaîne.
- Les relations clients-fournisseurs définissant les paramètres d'un contrat.
- Le nombre de produits intermédiaires et finis différents.
- La spécification de l'étape du processus de fabrication à partir de laquelle les produits sont différenciables.
- L'allocation d'une production à une usine ou centre de production.
- L'allocation d'un client à un centre de distribution.
- La planification de la production et de la distribution (c'est-à-dire la quantité à produire ou à livrer).
- Les niveaux de stocks des composants, des produits intermédiaires et des produits finis...

Ces variables de décision sont évaluées par les décideurs qui ont la charge de gérer ou manager la chaîne logistique, ou plus localement, une entreprise, un site de production, un atelier, ...

I.11.2. Principaux indicateurs du management de la chaîne logistique

I.11.2.1. Degré de partenariat

Dans la littérature, le sujet de partenariat est largement étudié. On peut citer : Huguet (1994), Thomas et Griffin (1996), Camalot (2000), Jayaraman et Pirkul (2001), Monteiro (2001), Haehling von Lanzener et Pilz-Glombik (2002), Dudek et Stadler (2005), Monsarrat-Despontin et al. (2005), Sepulveda et Frein (2005), Mahmoudi et al. (2006), François (2007), Lehoux et al. (2010), Wee et Wang (2013), Renna (2015) et Zabihi et Bafruei (2016).

Le degré de partenariat est mesuré par la communication, la coordination, la coopération, ... Selon François (2007), l'entente industrielle est un choix stratégique d'entreprises, motivé par la recherche d'avantages tels :

- L'accroissement des compétences.
- La maîtrise et le partage des risques.
- Le bénéfice d'une création de valeur.

Elle permet donc une action collective et conjointe qui dépasse les limites individuelles. Divers degrés d'entente entre partenaires d'une chaîne logistique peuvent être mis en évidence. Nous distinguons la coopération, la coordination, la collaboration, la communication, la codécision et la négociation ...

La distinction entre ces termes demande une réflexion particulière. Nous nous proposons ici de développer ces différents aspects de la coopération pour structurer le cadre de notre travail.

- **Définition de la coopération**

Selon le dictionnaire Larousse, la coopération est définie comme étant "une méthode d'action par laquelle des individus ou des familles ayant des intérêts communs constituent une entreprise où les droits de tous sont égaux et où le profit réalisé est réparti entre les seuls associés au prorata de leur participation à l'activité sociétaire" (Larousse, 2016).

Ainsi, la *coopération* est une action collective dirigée vers un but commun. Dans les entreprises, cette *coopération* met en jeu des processus en interaction. Pour être porteuses d'une plus grande productivité, ces interactions nécessitent une *communication* et des *négociations* entre les différents acteurs. Ainsi, la désagrégation du but commun vers un ensemble de buts individuels, demande de la *coordination* et de la *codécision*. Ces *codécisions* sont *négociées* pour prévenir ou régler des conflits pouvant apparaître entre les décisions et les buts individuels.

- **Aspects de la coopération**

La littérature identifie plusieurs aspects de la coopération. Nous en développons ici plusieurs formes. D'après Monteiro (2001) :

- *La coordination*

La coordination est la synchronisation des actions dans le temps. Elle cherche à gérer la cohérence des actions individuelles par rapport à l'ensemble des activités et à valider les objectifs individuels par rapport au but commun.

- *La collaboration*

La collaboration signifie travailler ensemble. Le terme de collaboration est utilisé en lieu et place de coopération lorsque les actions individuelles ne sont pas différenciables. Ainsi, lors de la conception d'un produit nouveau, des collaborations s'installent entre les différents métiers. On parle alors dans ce cas particulier de co-conception.

- *La communication*

L'ensemble des phénomènes concernant la possibilité, pour un sujet, de transmettre une information à un autre sujet, par un langage ou un code. La communication est l'outil indispensable pour que la codécision, la négociation, la coordination, et la collaboration soient faites correctement.

- *La codécision*

La codécision est une collaboration relative au processus de décision. Dans le cas d'une décision prise en commun par un ensemble d'acteurs on parlera de codécision. Celle-ci se définit comme une collaboration décisionnelle.

- *La négociation*

La négociation se définit comme un moyen permettant la coopération entre différents partenaires. Elle vise à trouver un compromis acceptable entre des objectifs locaux, parfois divergeants, qui sont issus des différents centres de décision.

Notre objectif, est de proposer des formulations mathématiques de coopération entre entreprises. Plus précisément, le cas des relations donneurs d'ordres – sous-traitants dans un contexte de management intégré (production-maintenance et production-maintenance-qualité). Ainsi, pour nos approches, la coopération est étudiée selon deux points de vue : partenariat direct ou à travers des plates-formes de sous-traitance. La coopération dans notre travail de thèse est vue comme une action de prise de décision collective, la *communication* est un moyen indispensable pour *synchroniser* les actions réparties chez les différents partenaires. Nous sommes dans un contexte de *codécision*, destiné à la *coordination* d'actions individuelles de chaque acteur. Cette *coopération* s'appuie sur la *négociation* que nous définirons plus précisément.

I.11.2.2. La réduction des coûts

La plupart des travaux menés sur le management des chaînes logistiques, insistent sur la réduction des coûts aux différents niveaux de la chaîne. La réduction des coûts totaux permet ainsi de réduire le prix des produits, et ainsi, offre la possibilité d'acquérir de nouvelles parts de marché, et d'assurer des bénéfices pour de futurs investissements.

Les gains de productivité sont recherchés partout dans les chaînes logistiques tant dans le transport que sur les ateliers, en limitant par exemple les en-cours, les stocks amont et aval, les temps improductifs de changement de série sur les équipements etc.

En effet, la sous-traitance permet de réduire les frais d'exploitation, en plus, elle assure des conditions d'investissement inférieures (Van Mieghem, 1999). Autre facteur de réduction des coûts est la différence entre les coûts de production et le niveau des salaires entre les pays industrialisés et les pays d'économie émergente (Dahane, 2007).

I.11.2.3. Maintenir un meilleur niveau de la qualité

La réduction des coûts n'est pas le seul avantage que les acteurs de la chaîne logistique peuvent tirer du partenariat. Par exemple, la sous-traitance permet de garantir le niveau désiré de la qualité de produit. Cela, est

généralement dû à la complication et la sophistication des procédés de production qui poussent les entreprises à chercher des partenaires plus aptes et plus compétents (Andersen et Christensen, 2000) et (Morcos, 2003).

I.11.2.4. La réduction des délais de livraison

Les entreprises doivent réagir rapidement face aux variations du marché, afin d'en tirer des bénéfices. Ainsi, l'objectif principal des entreprises est de produire et livrer les produits aux clients dans les meilleurs délais, et de réduire les délais de traitement des commandes, ...

I.12. Modélisation du management de la chaîne logistique

Pour aider les managers de la chaîne logistique, des approches et des outils ont été développés par les chercheurs du domaine et transférés en offre logicielle. Il s'agit, d'une part, de la modélisation d'entreprise pour comprendre le positionnement des activités dans les processus d'entreprise et, d'autre part, des modèles mathématiques, de simulation et de résolution optimale, supports en particulier à la planification des activités.

I.12.1. Modélisation d'entreprise

Selon François (2007), l'objectif de la modélisation d'entreprise est de représenter une partie ou l'intégralité d'une entreprise pour :

- en comprendre son fonctionnement ;
- en analyser son comportement et ses performances ;
- détecter des dysfonctionnements ;

En vue naturellement d'en améliorer les performances, ou de valider une organisation nouvelle.

La modélisation d'entreprise utilise des formalismes de modélisation générique, tels que la grille et les réseaux GRAI (Doumeingts, 1998), CIM-OSA, PERA, ARIS, GERAM, SCOR ... Ces outils peuvent être utilisés seuls, ou intégrés sous forme de méta-modèle qui permet d'intégrer différentes modélisations par décomposition puis recombinaison de composants élémentaires présents dans ces modélisations (Roque, 2005).

En général, ces modèles sont centrés ou focalisés sur une entreprise, plutôt que les chaînes logistiques (François, 2007).

I.12.2. Les modèles analytiques

Un modèle analytique représente les caractéristiques d'un problème par des équations mathématiques. L'approche retenue pour notre travail de thèse, est le développement des modèles mathématiques pour le management de la chaîne logistique, afin d'offrir un outil d'aide à la décision. Une revue de littérature plus avancée sur ce type de modèle est présentée dans le chapitre suivant.

I.12.3. Les modèles de simulation

Dans certains problèmes, il est difficile de trouver une relation entre les variables et paramètres du système, c'est-à-dire nous ne pouvant pas le mettre sous la forme d'un modèle mathématique analytique. Dans ce cas, le recours à la simulation est très recommandé pour palier à cette limitation. Les modèles de simulation sont des modèles à la fois stochastiques et dynamiques.

Plusieurs auteurs se sont intéressés à ce type de modèles. Maria (1997) a classifié les modèles de simulation en deux groupes : les modèles statiques dans lesquels le temps n'est pas pris en compte, et les modèles dynamiques.

I.12.4. L'offre logicielle

Des progiciels de gestion intégrée ont été développés pour pallier aux problèmes de communication dans les entreprises industrielles.

En effet, le progiciel de planification des ressources de l'entreprise (*Enterprise Resource Planning* – ERP), extension du terme *Manufacturing Resource Planning* – MRP, fournit à l'ensemble des métiers de l'entreprise des images unifiées, cohérentes et homogènes de l'ensemble des informations dont ils ont besoin (Botta-Genoulaz, 2005). Afin de réduire l'incertitude de ces informations, les ERP reposent sur quatre concepts : la disponibilité, la précision, le délai de réponse, la périodicité d'actualisation (Dominguez et Lashkari, 2004). Les progiciels de planification avancée des systèmes (*Advanced Planning Systems* – APS) peuvent simuler plusieurs scénarios de planification et gérer des entreprises multi-sites ou des réseaux d'entreprises. Pour plus de détail, le lecteur peut consulter la thèse de François (2007).

I.13. Conclusion

À travers ce premier chapitre, nous avons présenté les concepts de base sur lesquels repose cette thèse. Dans un premier temps, nous avons expliqué les différents mots clés sur l'organisation et la gestion des systèmes de production et des chaînes logistiques, à savoir, la fonction production, la fonction maintenance, la fonction qualité, les flux et la prise de décision. Dans un second temps, nous avons exposé la notion de la sous-traitance industrielle, à travers ses différentes définitions, ses diverses formes, ainsi que les avantages et inconvénients que les entreprises peuvent rencontrer en ayant recours à la sous-traitance. La troisième partie de ce chapitre, était consacrée à la présentation de la notion de performance et de la modélisation du management de la chaîne logistique.

Pour chaque partie, nous avons également présenté différents travaux traitants ces problèmes, et bien sûr nous avons exposé un positionnement de nos travaux dans le domaine de recherche sur le management des chaînes logistiques.

Chapitre II

Revue de littérature sur les modèles de planification de production et des capacités

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une revue de littérature des modèles mathématiques qui tiennent en compte la relation entre la production, la sous-traitance, la maintenance et la qualité. Cette relation peut être définie selon différentes approches. Aussi nous présentons les différents travaux traités dans la littérature et cela suivant différentes approches. Cette revue de littérature nous a permis de mettre en exergue certaines "lacunes" que nous avons essayé de combler. Aussi notre contribution a consisté en la proposition d'une nouvelle taxonomie basée sur la planification de la production et des capacités, les contrats de sous-traitance, le management de la maintenance, et le contrôle de la qualité. Nous établissons un positionnement de ces contributions par rapport à l'existant, et bien sûr nous exposerons quelques perspectives de recherche.

II.2. Contexte générale de la thèse : travaux traitant la coordination et l'association entre les membres de la chaîne logistique

Notre travail de recherche, dans le cadre de cette thèse, porte sur deux grandes axes ; à savoir la sous-traitance et les approches intégrées de management. Avec la mondialisation de l'économie et le développement des technologies de l'information, la notion de sous-traitance a pris beaucoup d'ampleur, en effet actuellement la majorité des entreprises sous-traitent leurs opérations ou leurs ressources de production avec leurs partenaires, pour faire face à un marché concurrentiel plus acharné (Guan et Liu, 2011). La sous-traitance est devenue une pratique incontournable pour améliorer efficacement la planification globale dans différentes entreprises. Une relation de sous-traitance appropriée peut raccourcir les délais, réduire les coûts totaux, et rendre une organisation plus flexible (Lee et Sung, 2008 ; Lee et Choi, 2011). Elle peut rendre une entreprise plus compétitive (Cachon et Harker, 2002 ; Vaxevanou et Konstantopoulos, 2015).

Dans la littérature plusieurs papiers se sont intéressés à la coopération et l'association entre entreprises avec l'analyse des performances des stratégies de sous-traitance. Dans son étude, Deavers (1997) explicite les raisons de l'adoption de la sous-traitance par certaines entreprises. Pour Thomas et Griffin, (1996) et Gunasekaran et al. (2015), la sous-traitance est une stratégie qui améliore les performances de la chaîne logistique.

Quelques chercheurs ont proposé des cadres pour l'étude des stratégies de sous-traitances effectives et efficaces. Thomas et Griffin, (1996) ont effectué une revue de la littérature des problèmes traitant la planification coordonnée entre deux ou plusieurs échelons de la chaîne logistique. Leur conclusion est que cette dernière améliore leurs performances. Dans le même contexte, Abdel-Malek et al. (2005) proposent un cadre pour évaluer la performance des stratégies de sous-traitance dans une chaîne d'approvisionnement multicouches.

Ameknassi et al. (2016) ont développé des modèles qui combinent les décisions de sous-traitance avec certaines questions de planification stratégiques des chaînes logistiques, telles que la sécurité des approvisionnements, la segmentation des clients et la responsabilité élargie du producteur. L'objectif est de minimiser à la fois le coût logistique et les émissions de gaz à effet de serre de la chaîne d'approvisionnement, dans un contexte incertain d'économie de l'environnement.

Gunasekaran et al. (2015) ont présenté une taxonomie des travaux traitant les mesures de performance, et des métriques utilisées dans les décisions de sous-traitance. Plus précisément, avant, au cours et après la sous-traitance.

L'approche la plus habituelle dans la littérature classifiant les travaux relatifs à la sous-traitance dans les chaînes logistiques, est celle en fonction des niveaux de décision. Par exemple, pour le niveau stratégique : on trouve les problèmes d'implantation et de délocalisation des usines et la sélection des sous-traitants. Pour le niveau tactique, c'est plutôt l'aspect d'équilibrage de charge-capacité (sous-traitance, heures supplémentaires...). Au niveau opérationnel (également appelé "contrôle de flux") plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'ordonnancement de la production.

Pour ce dernier aspect, Ruiz-Torres et al. (2006) ont étudié le problème de machines parallèles internes associées à des machines parallèles sous-traitantes. Lee et Choi (2011) ont analysé la complexité d'un problème d'ordonnancement de production en deux échelons. Deux options sont considérées pour le traitement des tâches : la production avec l'utilisation des ressources internes ou le recours à la sous-traitance. Dans (Chen et Li, 2008 ; Lee et Sung 2008 ; Tavares Neto et al. 2015) la sous-traitance est utilisée en parallèle avec la production en interne. Elle est utilisée pour promouvoir la qualité globale de la planification.

Comme mentionné dans le premier chapitre, dans nos travaux nous nous intéressons partiellement aux travaux liés aux décisions tactiques. Le niveau stratégique est traité partiellement, à travers le problème de choix des acteurs (partenaires). Le niveau opérationnel n'est pris en compte qu'à travers les modèles hiérarchiques (modèles intégrant plusieurs niveaux de décision).

Dans le contexte de la planification de la production, les travaux de Huiskonen et Pirttilä (2002) traitent d'une manière relativement détaillée différents mécanismes de coordination entre deux companies différentes dans une relation de sous-traitance. Ils ont conclu que le développement de certains mécanismes a un potentiel concurrentiel avantageux pour les fournisseurs de services logistiques.

Kim (2003) a investigué une situation dans laquelle une entreprise sous-traite ses opérations d'assemblage à deux sous-traitants, en tenant compte simultanément du temps (comme un facteur dynamique) et le niveau de traitement (en termes d'assemblage). Il a supposé que chaque sous-traitant a différents niveaux d'amélioration de la capacité de réduction des coûts de la chaîne. Deux types de sous-traitant sont pris en compte : (i) celui qui offre un prix moins cher, mais ayant une faible capacité d'amélioration et donc peu de potentiel pour une future réduction des coûts ; (ii) l'autre, offre un prix plus élevé, et possède une capacité d'amélioration supérieure. Le problème de décision que doit prendre le donneur d'ordres est double : (a) combien devrait-on confier à chaque sous-traitant (à savoir, le moins capable ou plus capable) ; et (b) comment devraient être traitées (en termes d'assemblage) les unités semi-finis retournées des sous-traitants. Les auteurs ont développé un modèle de contrôle optimal pour résoudre ce problème de décision.

Feng et al. (2011) ont formulé un modèle multi-objectif pour la sélection d'un groupe de sous-traitants, pour différents processus de services/produits. Ce modèle est avéré NP-hard, les auteurs ont développé un algorithme multi-objectif basé sur la recherche Tabou pour le résoudre.

Une revue de littérature systématique jetant la lumière sur l'importance de la coordination dans les chaînes logistiques est présentée dans Arshinder et al. (2011). Les auteurs ont rapporté et examiné divers points de vue sur la question de coordination. Ils ont exposé les divers mécanismes de coordination et de gestion de l'incertitude des chaînes logistiques, et ont identifié les lacunes existantes dans la littérature. Enfin, divers perspectives sur différentes mesures de coordination sont proposées.

Dolgui et Proth (2013) ont fourni une analyse de l'état de l'art sur la sous-traitance. Ils ont présenté un examen des avantages et des inconvénients de la sous-traitance à moyen et à long termes. Les auteurs ne sont pas intéressés à la question comment sous-traiter, mais ils ont montré les conséquences possibles d'une telle décision.

Dans un autre travail, Kim (2003) a proposé une approche pour la prise de décision dynamique de la sous-traitance pour des entreprises faisant appels à des sous-traitants avec des capacités d'innovation différentes. De nombreuses entreprises se focalisent principalement sur les structures de coûts courantes quand ils choisissent leurs fournisseurs ou de prendre une décision de localisation. L'auteur montre que la concentration sur des structures courantes des coûts peut conduire à une solution à court terme mais avec une possibilité de sous-optimalité à long terme. Afin d'être efficace à long terme, l'entreprise doit tenir compte de l'évolution dynamique de la structure des coûts, ce qui est souvent réalisé par les activités innovantes des fournisseurs.

Xu et al. (2015) ont analysé les méthodes de coordination des centres d'appels en relation de sous-traitance avec une chaîne logistique, sous contrainte financière. Ils ont considéré une chaîne de sous-traitance composée d'une entreprise donneur d'ordres et un centre d'appel. Les auteurs comparent trois types de contrats : contrat de partage des revenus, contrat de pénalité et contrat de partage des coûts. Ils ont montré que le contrat de partage des coûts améliore le profit de chaque entreprise membre ; toutefois, les deux autres contrats n'améliorent que le profit de l'entreprise donneur d'ordres.

Nwokocha et Madu (2015) ont analysé l'influence des contraintes de sous-traitance sur les performances des entreprises au Nigeria. Une étude de la littérature a identifiée un certain nombre de contraintes (la divulgation de secrets commerciaux, les services pauvres, et les conflits d'intérêt) entravant un accord de sous-traitance efficace. Les auteurs ont trouvé que ces contraintes n'affectent pas l'utilisation de la sous-traitance dans les pays à faible intensité de capital. Toutefois, ces contraintes n'affectent pas la performance des industries manufacturières dans la zone d'étude. Pour cela, ils ont suggéré que les industries manufacturières au Nigeria devraient investir d'avantage dans les mécanismes et les outils de manière à augmenter la sous-traitance et la coopération entre les industries.

Les approches intégrées de management permettent la gestion de plusieurs activités différentes (production, maintenance, qualité et sécurité ...) au sein d'une organisation. Ce type d'approches combine les exigences et les objectifs des différentes fonctions afin que l'organisation devienne plus efficace pour atteindre les objectifs visés. Elle permet une vision globale de l'entreprise, en prenant en compte les interactions entre les différentes fonctions de gestion. Dans ces conditions, l'étude des approches intégrées de la production, de la maintenance et de la qualité est aujourd'hui primordiale dans le domaine de l'optimisation des systèmes de production et des chaînes logistiques.

La planification de la production, le management de la maintenance, et le contrôle de la qualité sont trois composantes fondamentales des systèmes de production. Dans le passé, ces aspects ont été traités séparément. Cependant, il existe une forte interdépendance entre elles. Une intégration efficace de ces composants donnera à une industrie un avantage concurrentiel sur le marché (Ben-Daya et Rahim, 2001). Dans leur étude, Ben-Daya et Rahim, (2001) ont classé les modèles traitant l'intégration de la maintenance, la production et la qualité en quatre classes. La première classe est relative à l'intégration de la production et la qualité, la seconde l'intégration de la production et la maintenance. La troisième comprend des modèles intégrant la maintenance et la qualité. Enfin, la quatrième contient les modèles intégrant la production, la maintenance et la qualité.

II.3. Taxonomie de la recherche

Dans le cadre de ce travail de thèse, nous proposons une nouvelle taxonomie basée sur quatre éléments d'intégration, à savoir, la planification de la production, la sous-traitance, le management de la maintenance et le contrôle de la qualité. Nous avons distingué sept classes, la première, regroupe les modèles considérant la planification traditionnelle de la production et/ou des capacités. La deuxième, lorsque les modèles intègrent la production, et/ou des capacités et la sous-traitance. La troisième catégorie se compose des modèles qui répondent à l'intégration de la production et de la maintenance. La quatrième, intègre la sous-traitance à la troisième. La cinquième, comprend des modèles intégrant la production et la qualité. La sixième, contient des modèles communs pour la production, la maintenance et la qualité. Enfin, la septième intègre la sous-traitance à la sixième.

La majorité des travaux intégrant la maintenance et la qualité s'intéressent seulement à l'étude de l'effet de la maintenance sur la qualité ou l'inverse. La production est introduite implicitement, mais ne rentre pas dans l'optimisation (par exemple la détermination de la taille du lot...). Pour cela, l'intégration de la maintenance et la qualité n'est pas prise en compte dans cette classification.

De plus, la plus part des modèles intégrant la production et la qualité, considèrent des systèmes de production qui se dégradent (classe 6), et lorsque le système de production se dégrade, il en résulte un pourcentage de produits non-conformes. Donc, l'intégration de la sous-traitance dans la cinquième classe nous amène à la septième classe. L'objet de la partie suivante de cette revue de littérature, est d'étudier les différentes approches

d'intégration, dont la planification de la production ou des capacités sont l'une de ses éléments. Donc, l'étude de la qualité, la sous-traitance, la maintenance, la qualité – sous-traitance, la maintenance – sous-traitance et qualité – maintenance – sous-traitance sortent du cadre de notre étude. La figure II.1 montre clairement les éléments pris en compte par cette taxonomie.

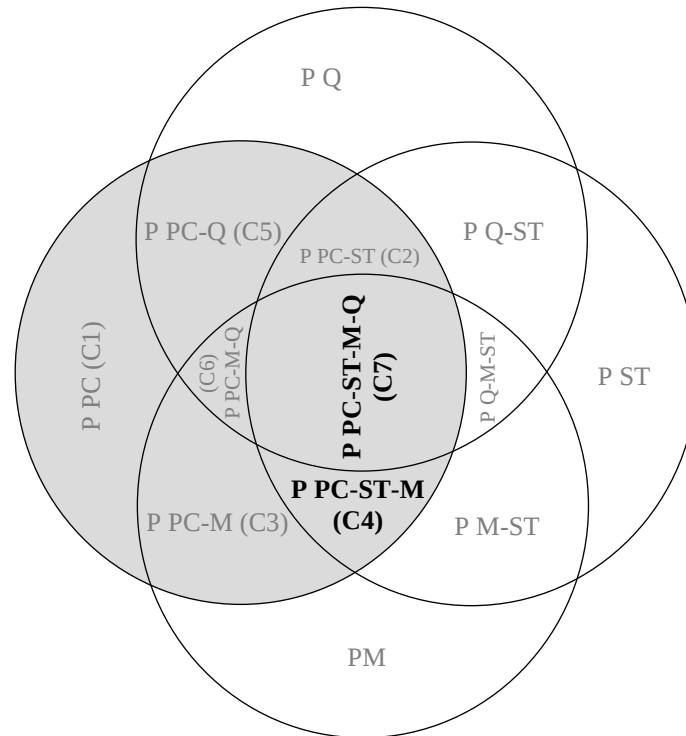


Figure II.1 Eléments d'intégration et taxonomie de recherche.

Légende pour la lecture de la figure II.1

P PC (C1)	Plannification de la production et des capacités.
P PC-ST (C2)	Plannification de la production et des capacités avec des contrats de sous-traitance.
P PC-M (C3)	Plannification de la production, des capacités et de la maintenance.
P PC-ST-M (C4)	Plannification de la production, des capacités et de la maintenance avec des contrats de sous-traitance.
P PC-Q (C5)	Plannification de la production, des capacités et de la qualité.
P PC-M-Q (C6)	Plannification de la production, des capacités, de la maintenance, et de la qualité.
PC-ST-M-Q (C7)	Plannification de la production, des capacités, de maintenance, et de la qualité avec des contrats de sous-traitance.
P Q	Plannification de la qualité.
P M	Plannification de la maintenance.
P ST	Plannification de la sous-traitance.
P Q-ST	Plannification de la qualité et de la sous-traitance.
P-M-ST	Plannification de la maintenance et de la sous-traitance.
P Q-M-ST	Plannification de la maintenance, de la qualité et de la sous-traitance.

II.3.1. Planification traditionnelle de la production et des capacités

Nous présentons dans ce point une synthèse d'un certains nombre de travaux relatifs à la planification traditionnelle de la production et des capacités. Hagle et Sen (1996) ont fourni une revue sur la façon d'appliquer la programmation linéaire stochastique pour résoudre un grand nombre de problèmes de planification des capacités. Il est courant qu'un problème de planification de la capacité implique des décisions globales. Dans ces situations, ces décisions peuvent être modélisées comme variables de décision entières.

Dans Van Mieghem (2003), l'auteur a donné une revue de littérature sur les modèles traitant la gestion stratégique des capacités. La détermination des tailles, des types et des calendriers des investissements de capacité, et des ajustements sont prisent en compte. Dans cette revue, une attention particulière a été accordée aux développements intégrant plusieurs décideurs, plusieurs types de capacités, la couverture et l'aversion au risque.

Geng et Jiang (2009) ont présenté une revue des méthodes fondamentales pour la planification stratégique de la capacité dans l'industrie des semi-conducteurs. En raison des coûts très élevés des investissements de capital, la planification stratégique de la capacité joue un rôle important dans l'amélioration de la performance des entreprises. Les raisons qui font que ces problèmes sont particulièrement difficiles : le processus complexe de fabrication, les changements rapides de la technologie et des produits, le long délai, le coût élevé de l'accroissement de la capacité, et la demande incertaine élevée. Les auteurs ont identifié les méthodes émergentes pour la planification des capacités, et ils ont dressé des perspectives pour des futurs travaux de recherche.

Volling et al. (2013) ont fourni un aperçu des modèles de recherche opérationnelle et leurs applications dans l'industrie automobile. Les auteurs se sont concentrés sur la planification des capacités et des commandes.

Angelus et Porteus (2002) ont étudié un problème de planification simultanée des capacités et de production. Le système considéré, produit un seul type de produit durant un horizon fini avec une demande incertaine. Ils ont déterminé une solution au problème du niveau de capacité par l'ajout et la suppression de la capacité à chaque période.

Ahmed et al. (2003) ont étudié un problème de planification des capacités dans une chaîne logistique produisant un seul produit, et utilisant plusieurs machines. Ils ont modélisé l'incertitude de la demande comme un arbre de scénarios. Le problème est formulé comme un programme stochastique en nombres entiers en plusieurs niveaux. Une reformulation du problème a été proposée en utilisant la variable de désagrégation pour exploiter la sous-structure du dimensionnement de lots. La reformulation a réduit de manière significative l'écart entre la relaxation linéaire et le programme en nombres entiers. Une heuristique a été proposée pour perturber les solutions du problème linéaire relaxé, afin de produire des solutions entières de bonne qualité. Pour résoudre le problème d'optimalité globale, les auteurs ont présenté un algorithme Branch and Bound, qui utilise la stratégie de reformulation comme un minorant et l'heuristique comme schéma de la limite supérieure.

Zhang et al. (2004) ont considéré une chaîne logistique dans l'industrie des semi-conducteurs composée de plusieurs machines produisant plusieurs types de produits. Les auteurs ont supposé que la demande est non stationnaire, ils ont montré que le problème peut être résolu comme un problème de flot maximal et coupe minimale (max-flow min-cut problem). Les expériences numériques ont montré que l'approche proposée est très efficace, surtout pour les problèmes de grandes instances.

Pai et al. (2004) ont développé une approche basée sur la logique floue pour étudier l'incertitude et l'imprécision dans la planification de la capacité.

Dans le même domaine d'application, Huh et al. (2006) ont développé un modèle de planification des capacités en temps continu qui traite des problèmes de taille et de complexité réalistes dans l'industrie des semi-conducteurs. Ils ont considéré le cas de produits multiples, chaque produit nécessite des opérations particulières

qui peuvent être exécutées par un ou plusieurs groupes d'outils. Ainsi, plusieurs politiques d'allocation des capacités sont considérés. Les auteurs ont développé une heuristique qui incorpore à la fois des techniques de réduction de la variance de la littérature de simulation, et les principes d'un algorithme de flot maximal généralisé de la littérature d'optimisation des réseaux.

Nagali et al. (2008) du groupe de gestion des risques d'approvisionnement chez la compagnie Hewlett-Packard (hp) ont développé et mis en œuvre un modèle mathématique, un processus d'affaires et un logiciel basés sur l'application des contrats de sous-traitances optionnelles à la gestion des risques d'approvisionnement, pour mesurer et gérer ces derniers. En 2006, le système de gestion mis en œuvre a aidé de gérer plus de 7 milliards de dollars de dépenses ; ce qui a entraîné une minimisation des coûts de 128 millions de dollars. Ils ont réalisé plus de 425 millions de dollars d'économie de coûts dans une période de six ans. Cependant, les auteurs ne fournissent pas de détails sur les modèles qu'ils ont utilisés pour l'évaluation de ces contrats.

Kaya et al. (2014) ont étudié le problème de planification de capacité, de production et de stockage dans une chaîne logistique inverse, sous une demande incertaine et retour du produit. Plus précisément, ils ont examiné les opérations de démontage, de remise à neuf et des produits modulaires tels que les ordinateurs et les téléphones mobiles.

Le problème a été modélisé comme un programme mixte en nombres entiers, et résolu par une procédure à deux étapes. Dans la première étape, ils ont utilisé une optimisation stochastique pour déterminer les décisions stratégiques concernant les capacités de démontage et de remise à neuf des sites compte tenu de différents scénarios concernant les incertitudes du système. Dans la deuxième étape, ils ont utilisé l'optimisation robuste pour analyser les décisions opérationnelles telles que la production, les stocks et les taux d'élimination.

Ogier et al. (2015) se sont intéressés à la modélisation de la planification décentralisée de la capacité avec un minimum de partage d'information dans une chaîne logistique à deux échelons, avec multiple acteurs à chaque échelon. Les fournisseurs gèrent la production et le stockage à l'échelon amont, tandis que les détaillants gèrent le transport et le stockage à l'échelon aval. La planification des acteurs est modélisée comme un problème de dimensionnement de lots avec capacité sur un horizon fini, l'accent est mis sur la qualité du service. L'objectif est de minimiser les coûts, avec une pénalité élevée si la demande n'a pas été satisfaite. Deux autres problèmes de décision sont modélisés avec la programmation mixte en nombres entiers : (1) l'allocation des ventes perdues entre les détaillants lorsque leurs demandes ne peuvent être satisfaites ; et (2) la répartition des commandes entre les fournisseurs. Les auteurs ont développé un système multi-agents qui combine la simulation du processus de planification et l'optimisation des processus décisionnels locaux.

Rossi et al. (2017) ont proposé une méthodologie qui combine la planification traditionnelle des capacités de la méthode MRP et une approche basée sur la programmation linéaire. Cette approche a été proposée pour surmonter certaines faiblesses, y compris la contrainte de la capacité de production ignorée et des délais fixes. Ces faiblesses conduisent souvent à des dates de production infaisables, qui déclenchent des charges de travail fluctuantes au fil du temps, un effort d'ajustement significatif et finalement imprévisible de longs délais.

II.3.2. Plannification de la production et des capacités avec des contrats de sous-traitance

Il existe de nombreuses variantes de modèles traitant la planification de la capacité sous des options de sous-traitance. Bertrand et Sridharan (2001) ont étudié un problème de sous-traitance où la demande est supérieure à la capacité de production. Ils ont considéré que les délais de livraison sont exogènes et très variables. Les auteurs ont développé des règles heuristiques afin de minimiser les coûts totaux et maximiser la fiabilité de livraison.

Coman et Ronen (2000) ont formulé le problème de sous-traitance comme un programme linéaire, et ont identifié une solution analytique. Ils ont comparé leur solution avec deux modèles de décision : le calcul des coûts standard et la théorie des contraintes.

Dans un autre travail, Bradley (2004) a considéré un problème de production-stockage, où un fabricant doit satisfaire une demande stationnaire stochastique d'un seul produit utilisant une politique de construction d'un stock de produits finis. Le stock peut être alimenté par deux moyens de production, la production interne ou la sous-traitance, les deux options ayant une capacité finie. L'auteur a développé une approximation brownienne du problème de contrôle optimal, en supposant que le fabricant utilise une politique "dual base-stock" pour contrôler l'approvisionnement à partir des deux sources, en minimisant le coût moyen. L'auteur a montré que la capacité optimale globalement unique peut être calculée numériquement.

Yang et al. (2005) ont développé des politiques optimales de production – stockage – sous-traitance pour une entreprise. Pour satisfaire une demande stochastique, l'entreprise possède deux options, une capacité de production interne supposée markovienne ou la possibilité de sous-traitance.

Sinha et Sarmah (2007) ont développé un modèle mathématique pour analyser la situation des ventes perdues dans une chaîne logistique. Ils étudient le cas où la capacité de production du fournisseur est inférieure à la demande annuelle du détaillant. Le fournisseur peut recouvrir le déficit par la sous-traitance. Le problème est formulé et résolu comme un problème d'optimisation non-linéaire.

Liu et al. (2008) ont traité un problème en considérant (1) toutes les demandes sont satisfaites par la production interne ou la sous-traitance sans report ou retard, (2) la production, les stocks et la sous-traitance ont tous des niveaux limites, et (3) les fonctions de coût sont considérées stochastiques et variables dans le temps. Le problème a été résolu par un algorithme pseudo-polynomial qui inclut la formation de la région des solutions faisables. La procédure de solution est basée sur les techniques de la programmation dynamique. Cependant, cette approche n'est valable que pour des problèmes de petite et moyenne taille. Pour les problèmes de grande taille une approche basée sur les algorithmes génétiques a été développée.

Wang et Chen (2009) se sont intéressés à la planification des capacités et à l'allocation des ressources. Ils considèrent un donneur d'ordres qui adopte une politique de planification des ressources spécifiques, pour améliorer son objectif tout en réservant la capacité des ressources chez un sous-traitant. Ce dernier sous-traite la capacité supplémentaire des ressources pour les donneurs d'ordres. La méthode proposée permet d'élaborer un plan de capacité des ressources mutuellement acceptable par les deux parties. Ils ont considéré que le coût et le prix sont privés lors de la négociation. Ils ont proposé un algorithme de colonie de fourmis pour résoudre un ensemble de problèmes de programmation non-linéaires en nombres entiers mixtes.

Une analyse des politiques de contrôle pour une chaîne logistique en deux échelons avec des sous-traitants à chaque partie est présentée par Saharidis et al. (2009). Les décisions concernant les stocks de sécurité, les demandes en retard et la sous-traitance sont faites conjointement ou séparément. L'objectif est de maximiser le taux moyen de profit du système. Les paramètres de contrôle optimaux sont calculés par la recherche exhaustive en utilisant les chaînes de Markov. Cette analyse a montré que les politiques conjointes fournissent des profits de l'ensemble (système) beaucoup plus élevés que les politiques séparées, même si, ces derniers sont individuellement plus rentables pour la partie correspondante.

Des chercheurs se sont intéressés à la question de la planification des capacités avec des options de sous-traitance dans un environnement de planification hiérarchique. Boulaksil et Fransoo (2009) ont considéré un fabricant d'équipement d'origine (*Original Equipment Manufacturer* – OEM) qui externalise une partie de ses activités de production à un sous-traitant qui sert plusieurs clients avec la même ligne de production. Le sous-traitant n'est pas disposé à partager toute information pertinente avec l'OEM, donc, une situation complexe se pose pour l'OEM afin de contrôler correctement les opérations externalisées. Les auteurs ont proposé et comparé la performance de différentes stratégies de déclenchement de commandes. Ces stratégies, diffèrent par le nombre de niveaux de décision. Les modèles proposés sont des programmes mathématiques déterministes. Les résultats de simulation ont montré qu'une stratégie avec des niveaux de décision multiples est meilleure par rapport à une stratégie avec un seul niveau de décision.

Boulaksil et al. (2011) ont considéré un sous-traitant qui sert un nombre limité de donneurs d'ordres sur une seule ligne de production à capacité. Les donneurs d'ordres ont différents niveaux d'incertitude sur la demande, et le sous-traitant se trouve face à la question de savoir comment répartir la flexibilité de la capacité d'une manière optimale. La flexibilité de la capacité contractuelle est un paramètre du contrat qui fixe la quantité de la demande des donneurs d'ordres qui doit être acceptée par le sous-traitant. Les auteurs ont développé un modèle hiérarchique qui se compose de deux niveaux de décision. Au niveau tactique, le sous-traitant attribue la flexibilité des capacités aux différents donneurs d'ordres en maximisant le profit. Ce problème est formulé comme un programme en nombres entiers. Il permet d'offrir plus de flexibilité pour le donneur d'ordres le plus incertain qui génère des revenus plus élevés, mais augmente aussi les coûts de pénalité. Les flexibilités de capacités allouées (déterminées à ce niveau) sont des paramètres d'entrée au niveau de décision opérationnel. A ce niveau, pour mesurer la performance opérationnelle du système, une étude de simulation a été réalisée, où un modèle de programmation mathématique dans un horizon de planification mobile est résolu.

Boulaksil et al. (2009) ont traité un problème où le sous-traitant produit pour plusieurs OEM sur la même ligne de production. Le sous-traitant exige que tous les OEMs réservent la capacité au début de l'horizon de planification et répondre à ces réserves par acceptation ou rejet partiel, en fonction de ses règles d'allocation qui sont inconnus à l'OEM. Par conséquent, la capacité allouée pour les OEMs n'est pas connue à l'avance, aussi parce que ces derniers n'ont pas d'informations sur les réservations des autres. Ainsi, l'OEM est face à une demande stochastique, en même temps le sous-traitant est face à une répartition des capacités stochastique. Les auteurs ont développé un modèle de programmation dynamique stochastique pour choisir la meilleure politique optimale.

Suivant la même logique de raisonnement de Kim (2003), Chiao et al. (2012) ont répondu à la question : comment un fabricant détermine la quantité de sous-traitance à attribuer à chaque type de donneur d'ordres ? Ils ont considéré deux types de donneur d'ordres : (1) un donneur d'ordres qui offre un prix de sous-traitance plus faible, mais dispose d'une installation moins performante, qui se traduit par un taux de détérioration plus élevé (2) un autre qui a une installation de technologie avancée, entraînant un taux de détérioration plus faible, mais nécessite un prix de sous-traitance très élevé.

Lee et Lan, (2013) ont étudié le problème du dimensionnement des lots avec une installation secondaire de sous-traitance. Les auteurs ont considéré la sous-traitance pour répondre à la partie non satisfaite des demandes aléatoires.

Zhen (2012) a étudié un problème où une entreprise fabrique plusieurs produits en plusieurs périodes. L'auteur a comparé deux modes alternatifs : sous-traiter des produits ou fabriquer des produits en interne, puis les assembler afin de satisfaire des demandes stochastiques. Il a proposé une approche analytique pour le choix de la décision optimale au cours de chaque période du plan.

Kenyon et al. (2015) ont analysé les effets de la sous-traitance sur la performance opérationnelle de l'entreprise (temps de cycle de fabrication, délais de livraison, la livraison, l'efficacité d'exploitation de l'équipement), et la fidélité des clients. Les auteurs ont constaté que la sous-traitance de la production a des effets étouffants sur la performance opérationnelle, des réductions significatives de l'efficacité d'exploitation des équipements et sur les délais de livraison. De plus, elle a une influence négative sur la fidélité des clients en cas de médiation par le biais de la performance opérationnelle.

II.3.3. Planification de la production et des capacités avec prise en compte de la maintenance

Dans la littérature, plusieurs études portant sur la planification conjointe de la production et de la maintenance ont été publiées. Dans Boudai et al. (2008), un aperçu général des modèles mathématiques qui tiennent compte des interactions entre la maintenance et la production est discuté. Selon ces auteurs, la relation entre la production et la maintenance existe selon plusieurs points de vue. En premier, lors de la planification de la maintenance on prend en compte la production. Deuxièmement, la maintenance peut également être considérée

comme un processus de production qui doit être planifié et enfin, des modèles intégrés pour la maintenance et la production.

Il a été largement montré dans la littérature que l'intégration des politiques de maintenance préventive pour des machines ou des unités de production peut être un moyen efficace pour augmenter leurs durées de vie et réduire le coût d'exploitation (Barlow et Proschan, (1965) ; Nakagawa, (1981) et Wang, (2002)). Dans les systèmes de production modernes, les composants sont généralement fiables et les décisions de maintenance préventive devraient être intégrées au niveau tactique (Fitouhi et Nourelfath, 2012). L'intégration de la maintenance et de la production a été largement étudiée dans la littérature.

Pour les premiers travaux sur les politiques d'inspection et de maintenance des systèmes soumis à des défaillances, des études complètes ont été réalisées par Sherif et Smith (1981) et Valdez-Flores et Feldman (1989). Bien que ces politiques tiennent compte des politiques d'inspection et de maintenance optimales pour des machines sujettes à des pannes, généralement, ils ne sont pas concernés par les politiques de production/stocks optimaux pour des produits manufacturés.

Hsu (1991) a traité le problème de la maintenance préventive pour les systèmes de production en série. Un modèle mathématique a été formulé pour analyser l'impact d'une politique de maintenance préventive sur un système de production en série sans avoir recours à la simulation.

Srinivasan et Seong (1996) ont étudié les effets combinés de la maintenance préventive et les décisions de production/stockage sur le coût de fonctionnement de l'entreprise. Ils se sont intéressés à l'intégration des aspects liés à la fiabilité d'une installation de production avec les décisions de production/stocks qui lui sont faites.

Gharbi et Kenné (2000) ont considéré un système de production composé de plusieurs machines identiques soumises à des pannes aléatoires. Des réparations et des maintenances préventives sont considérées. Leurs objectifs étaient de déterminer les taux de production, et de maintenance préventive des machines afin de minimiser le coût total de stockage et des demandes en retard. Ils ont combiné un formalisme analytique et la simulation à base d'outils statistiques tels que le design expérimental (*Experimental Design* – ED), et la méthodologie de surface de réponse (*Response Surface Methodology* – RSM) pour obtenir une approximation de la politique de contrôle optimale.

Boukas et Haurie (1990) ont proposé un modèle de contrôle stochastique pour la planification simultanée de la production et de la maintenance d'un système de production flexible (FMS). Une technique efficace de calcul de la politique de contrôle optimal a été développée. Le modèle proposé diffère des formulations précédentes par la prise en considération d'un taux de défaillance de la machine qui dépend de l'âge, et qui permet le contrôle d'influence sur certains taux de saut (à savoir les activités de maintenance préventive). Ils ont adapté la technique d'approximation proposée par HJ Kushner (1979) dans les cas des systèmes de morceaux déterministes dans le domaine du contrôle optimal des diffusions, pour montrer la possibilité de la commande optimale d'un système à deux machines.

Iravani et Duenyas (2002) ont considéré un système de production composé d'une seule machine qui se dégrade, et qui produit un seul type de produit. La politique de production adoptée est celle de la production sur stock. Les auteurs ont utilisé le processus de décision Markovien pour formuler les décisions intégrées de production – maintenance. Ils ont utilisé une approche de résolution à double seuils, qui combine une méthode exacte et une approximative.

Dans Kenné et Gharbi (2004), les auteurs continuent leurs travaux de (2000), en considérant une demande constante, et une maintenance corrective qui améliore la disponibilité des machines. Les taux de production et de réparation influencent respectivement les niveaux de stock et la capacité du système. Ils ont démontré que pour un taux de demande constant et un taux de défaillance et de réparation exponentielle, la politique de point de commande est optimale (*bedging point policy*). Cette politique est modifiée et paramétrée par des seuils de

production et de stockage pour la maintenance corrective. Des simulations sont combinées avec le design expérimental et la méthodologie de surface de réponse pour estimer la politique optimale de production et de maintenance corrective.

Chelbi et Ait-Kadi (2004) ont considéré une unité de production à l'entrée d'une ligne de montage fonctionnant selon une configuration juste à temps. Cette unité est soumise à des défaillances aléatoires. Des actions de maintenance préventive sont régulièrement effectuées sur l'unité de production aux instants $T, 2T, 3T, \dots$. Les actions de maintenance ont des durées aléatoires. Afin de pallier les perturbations provoquées par les actions de maintenance, les auteurs ont proposé une stratégie qui consiste à construire un stock tampon, au début de chaque cycle de maintenance préventive, permettant de couvrir au moins la demande moyenne pendant les périodes de réparation et de maintenance préventive.

Des modèles mathématiques ont été développés pour déterminer la politique optimale intégrant la maintenance et la production, une politique qui détermine la capacité optimale du stock et l'âge de maintenance préventive optimale de l'unité de production, assurant un coût total moyen minimal.

Ben-Daya et Rahim (2001), Budai-Balke (2009) et Najid et Alaoui-Selsouli (2011) ont classifiés les problèmes d'intégration production-maintenance en deux classes : modèles en temps discret et ceux à temps continu. Dans la littérature, les modèles à temps continu avec un horizon de temps infini ont été présentés, tels que les modèles de la quantité de production économique (*Economic Production Quantity* - EPQ) pour des produits avec inspection de défauts.

Sung (2005) a proposé un modèle intégrant la quantité de production économique, la maintenance préventive et l'inspection. Il a considéré que le temps pour l'inspection est non nul, et il a identifié l'influence des stratégies de production pour plusieurs inspections. La taille du lot de production, le coût d'inspection et le niveau d'erreur de maintenance sont pris en compte dans la fonction d'évaluation.

Liao et Sheu (2011) ont intégré la maintenance préventive périodique à un modèle EPQ, pour un processus de production qui se dégrade stochastiquement avec un taux de risque croissant. Dans le cas hors contrôle, le système subit une réparation minimale et les produits sont refabriqués. La réparation minimale remet le système à l'état sous-contrôle. Deux types de maintenance préventive sont utilisés, à savoir la maintenance imparfaite et parfaite. Les auteurs ont supposé que la probabilité que la maintenance préventive est parfaite dépend du nombre d'opérations de maintenance imparfaites effectuées depuis le dernier cycle de renouvellement.

Liao (2012) a appliqué la maintenance préventive périodique à un système de production réparable en cas de panne. Trois types de maintenance sont considérés : la maintenance imparfaite, la maintenance parfaite et la maintenance ratée (elle augmente le taux de panne du système).

Bukhari et Goharys (2012) ont considéré un processus de production dont la performance se dégrade en fonction du temps. Ils ont supposé que le rendement du procédé peut être mesuré en termes de pourcentage de produits finis conformes. Les auteurs ont utilisé le principe de Pontryagin (Diliberto, 1967), pour déterminer le taux de production et de maintenance préventive optimaux. Le problème est modélisé par un système d'équations différentielles non linéaires, la solution est trouvée numériquement.

Li (2014) a étendu le modèle de Bukhari et El-Goharys (2012) à un modèle plus général. L'auteur a appliqué la théorie de la commande optimale pour résoudre le problème de production – maintenance avec prise en compte de la dégradation des produits, la taxe sur les émissions et la pollution sur les investissements de la R&D.

Fitouhi et Nourelfath (2014) ont intégré la maintenance préventive non cyclique à la planification de la production au niveau tactique dans les systèmes multi-états. Le modèle proposé fournit simultanément les instants appropriés pour la maintenance préventive et la taille optimale des lots qui permettra de minimiser le coût total, tout en satisfaisant la demande. Un algorithme de recuit simulé a été développé pour résoudre des problèmes de grande taille. Les auteurs ont utilisé une approche de contrôle Bayésienne multivariée. Les

statistiques de probabilités sont mises à jour à chaque échantillonnage en utilisant la règle de Bayes. Lorsque cette probabilité dépasse la limite de commande, le système de production s'arrête et une inspection complète est déclenchée, suivie par une maintenance préventive. La production reprendra lorsque tous les stocks disponibles sont épuisés ou lorsque l'action de maintenance préventive est terminée. Le taux de production et de la demande sont supposés constantes dans le temps.

Yalaoui et al. (2014) ont intégré la planification de la maintenance préventive dans le modèle traditionnel de planification de la production basée sur une formulation de la programmation linéaire. Ils ont formulé le problème comme un programme linéaire en nombres mixtes, et ils ont proposé une approche hybride pour la détermination du plan de production optimal avec un coût total minimum. Le modèle développé prend en compte les cas multi-lignes, multi-périodes, multi-produits, et la détérioration des lignes. Cette dernière est considérée comme une réduction des capacités des lignes en fonction du temps. Les actions de maintenance sont censées restaurer les lignes dans un état aussi bon que neuf (As Good As New).

Les auteurs ont développé une technique de relaxation optimale basée sur la théorie polyédrale pour améliorer le temps de calcul. De plus, une heuristique "Fixer et Relaxer" a été développée pour résoudre les grandes instances.

Jafari et Makis (2015) ont développé une approche d'optimisation conjointe de la quantité de production économique (*Economic Manufacturing Quantity* - EMQ) et la politique de maintenance préventive pour un système de production soumis à des dégradations et à la surveillance. Ils ont utilisé le modèle à risques proportionnels (*Proportional Hazard Model* - PHM) pour considérer les informations de surveillance et l'âge du système. Le processus de dégradation est modélisé avec un processus de Markov à temps continu. Les informations d'inspection sont considérées disponibles à chaque période d'inspection (fin cycle de production). Le taux de risque est estimé à chaque mise à jour des informations. L'objectif des auteurs est de réduire à long terme le coût moyen par unité de temps.

Jafari et Makis (2016) reprennent leurs travaux de 2015, mais cette fois-ci les auteurs ont considéré les informations partielles sur l'état caché du système.

Peng et Houtum (2016) ont utilisé la théorie de renouvellement pour évaluer le taux du coût moyen à long terme d'un système de production soumis à des dégradations. La quantité de production économique optimale, et la politique de maintenance conditionnelle (CBM) sont obtenues par la réduction du taux de coût moyen à long terme, qui inclut les coûts de set-up, le coût de stockage, le coût des ventes perdues, le coût de maintenance prédictive et corrective. La particularité de ce travail réside dans l'utilisation du temps continu et les processus de dégradation de l'état continu.

Contrairement aux modèles à temps continu, les modèles à temps discret considèrent que la planification est finie et divisée en périodes distinctes, pour lesquelles une demande est donnée et peut varier entre les périodes. D'autres chercheurs se sont intéressés par cet aspect, concernant principalement ce qu'on appelle les problèmes de dimensionnement de lots, multi-produits et à capacité (*Multi-Item Capacitated Lot-Sizing Problem*) intégrant des stratégies de maintenance.

Weinstein et Chung (1999) ont proposé un modèle en trois étapes pour évaluer la politique de maintenance d'une organisation. Dans la première étape, un plan de production globale est généré en utilisant une formulation de programmation linéaire suggérée par Chung et Krajewski (1984). Dans la deuxième étape, un calendrier de production est conçu pour minimiser les écarts pondérés des objectifs spécifiés par le plan de la production global. Dans la troisième étape, les exigences de chargement de la station de travail sont utilisées pour simuler les pannes d'équipement au cours du plan global de la production.

Aghezzaf et al. (2007) ont considéré un système de production à capacité, qui produit un ensemble de produits dans des lots tout au long d'un horizon de planification finie. Ils ont supposé que le système de production est soumis à des pannes aléatoires, et que toute opération de maintenance réduit la capacité du système au cours de

différentes périodes. Les auteurs ont développé une stratégie intégrée de dimensionnement de lots et de maintenance préventive du système, qui satisfait la demande des produits sur l'ensemble de l'horizon sans accumulation de retards et qui minimise la somme des coûts de production et de maintenance. Les auteurs ont eu recours au solveur CPLEX pour résoudre un programme mixte en nombres entiers.

Dans le même contexte, Aghezzaf et Najid (2008) ont fait une extension du problème précédant pour un système composé de lignes parallèles. Chaque fois qu'une ligne de production est sujette à une politique de maintenance préventive cyclique, le problème intégré de planification de la production et de la maintenance résultant est modélisé comme un programme mixte en nombres entiers non linéaire. Lorsqu'une politique de maintenance préventive non cyclique est autorisée, le problème est modélisé comme un programme mixte en nombres entiers linéaire. Une méthode heuristique basée sur la relaxation Lagrangienne a été développée pour résoudre le premier modèle. Les sous-problèmes, utilisés itérativement pour construire une solution optimale approximative, sont les versions ligne unique du problème. Les relaxations linéaires des sous-problèmes sont résolues pour donner les coûts de production marginaux pour chaque ligne. Ces coûts combinés avec les sous-multiplicateurs gradients sont utilisés pour affecter les demandes aux lignes.

L'approche proposée par Yalaoui et al. (2014) montre qu'elle peut traiter un plus large éventail de problèmes que ceux d'Aghezzaf et Najid (2008).

Hajej et al. (2011) ont traité le problème de la planification intégrée production – maintenance d'un système de production qui répond à une demande aléatoire. Ils ont proposé une approche consistant d'abord à établir un plan de production optimal, plan qui tient en compte de la dégradation de la machine en fonction de son taux de production et qui minimise le coût total moyen des stocks et de la production. Puis, ils utilisent ce plan de production optimal pour établir un plan de maintenance optimal qui minimise les coûts de maintenance. L'approche analytique proposée est basée sur un modèle d'optimisation stochastique qui utilise le concept d'âge opérationnel, et qui révèle l'influence significative du taux de production sur la dégradation du système, et par conséquent sur la politique intégrée de production – maintenance.

Suivant la même logique de raisonnement d'Aghezzaf et al. (2007), Najid et al. (2011) ont développé un modèle intégrant la planification de la production et la maintenance avec des fenêtres de temps et des coûts de pénurie. Le problème de la production porte sur la question de la taille des lots. La maintenance préventive est effectuée suivant des fenêtres de temps pour rétablir la ligne de production à un état neuf, et quand une panne est survenue, une réparation minimale est effectuée pour restaurer le système dans l'état avant la défaillance. Les auteurs ont modélisé le problème comme un programme mixte en nombres entiers linéaire.

Dahane et al. (2012) ont traité le problème de dépendance entre les taux de production et de défaillance dans un contexte multi-produits. Ils ont fourni une réponse aux questions de cadence de production et du type de produit à produire, et cela sur un horizon de planification fini. Les auteurs considèrent un système de production soumis à des défaillances aléatoires, produisant deux produits. Le premier produit répond à la demande stratégique du client principal via un stock tampon. Le second est produit, pour répondre à une demande secondaire, au cours d'un intervalle donné à la fin de chaque période. Un algorithme génétique a été développé pour déterminer simultanément le taux de production optimal du premier produit au cours de chaque période, et la durée optimale de l'intervalle du deuxième produit qui maximisent le profit total.

Roux et al. (2013) ont combiné plusieurs outils afin d'optimiser les problèmes de maintenance préventive multi-composants. La dynamique du système production – maintenance est modélisée par une combinaison de l'outil Réseaux de Petri Temporisés et un modèle implémenté dans le simulateur VLE (*Virtual Laboratory Environment* : environnement de multi-modélisation et de simulation). Les paramètres de simulation sont optimisés par une méthode de Nelder-Mead, Appelée également (*downhill simplex method*).

Aghezzaf et al. (2016) traite le cas d'un système dont son état de fonctionnement est stochastiquement prévisible en fonction de son âge opérationnel, et peut être maintenue préventivement pendant des périodes pré-établies.

La maintenance préventive est supposée imparfaite. Les auteurs proposent une approche intégrée de planification de la production et de la maintenance préventive, qui tient compte de la capacité du système de production et de son état de fiabilité opérationnelle. Le problème est formulé comme un problème d'optimisation non linéaire en nombres entiers. Une reformulation en programmation linéaire mixte a été proposée. Une étude comparative en termes de temps de calcul entre les deux formulations a été faite. Les auteurs ont proposé une procédure Fixe-et-Optimise. Les expériences numériques démontrent qu'elle réduit considérablement le temps de calcul, par rapport aux résultats trouvés par d'autres approches.

Cheng et al. (2016) ont proposé une approche intégrée de production – maintenance, pour les systèmes de fabrication à un seul type de produit, pour répondre à une demande constante. Ils ont considéré que le taux de production n'influence pas la durée de vie des outils de coupe ni la fiabilité de la machine. La stratégie de maintenance proposée consiste à effectuer une maintenance préventive après un certain nombre de remplacements d'outils, et à effectuer des réparations minimales en cas de panne. Les périodes d'indisponibilités causées par des arrêts pour maintenance sont gérés par des stocks. Des modèles intégrés sont développés, pour déterminer simultanément le taux de production optimale et la politique de maintenance préventive qui minimisent le coût total.

Amelian et al. (2015) ont étudié un problème de planification de la production et du taux de la maintenance préventive dans un système de fabrication sujet à des défaillances en utilisant la simulation à événements discrets.

Ni et al. (2015) ont étudié les possibilités supplémentaires "cachées" de la maintenance préventive, c'est-à-dire pendant la production sans perturber le système. Ils ont développé un modèle de prédiction pour identifier des fenêtres d'opportunité de la maintenance préventive, pour les systèmes de production qui se basent sur les données des systèmes d'information en temps réel.

Assid et al. (2015) se sont penchés sur l'optimisation intégrée setup – production et production – maintenance pour les systèmes de production sujets à des pannes, et produisant deux types de produits. Vu la complexité du problème dans un environnement dynamique et stochastique. Dans la littérature, ce problème traite séparément chaque aspect tout seul (configuration, production et maintenance). Les auteurs ont fourni une politique de contrôle qui combine les deux aspects, en développant une approche de résolution basée sur la combinaison des modèles de simulation à événements continus/discrets.

Nous constatons que la tendance actuelle dans les modèles intégrant la production et la maintenance va plus vers le développement des politiques de maintenance conditionnelle intégrées (*Condition Based Maintenance - CBM*).

II.3.4. Plannification de la production et des capacités avec option de sous-traitance et de maintenance

Pour les travaux présentés dans le paragraphe II.3.3, les auteurs ont traité l'importance de l'intégration de la maintenance et de la production. Ils montrent que l'intégration de la planification maintenance – production peut réduire les coûts totaux.

Il est clair que les sous-traitants peuvent fournir aux donneurs d'ordres des produits de haute qualité, avec un prix raisonnable, tout en utilisant une technologie de pointe. La plupart des problèmes portant sur les stratégies de sous-traitance considèrent la sous-traitance dans la planification de la production, et ne prennent pas en compte d'autres paramètres qui pourraient conduire à des coûts supplémentaires pour l'entreprise. A la lumière de cette discussion, nos motivations dirigées vers l'étude de la sous-traitance sous des approches de management intégrée.

La plupart des études examinées ont considéré principalement la sous-traitance dans la planification de la production et/ou des capacités et dimensionnement de lots. Cependant les études portant sur la sous-traitance sous des approches combinées de contrôle de la production et de gestion de la maintenance ont été moins considérées. Nous trouvons plutôt des recherches sur des problèmes proches. Par exemple, dans (Dahane et al.

2008), (Dellagi et al. 2010), (Dahane et al. 2011), (Hajej et al. 2014) et (Ayed et al. 2016) la sous-traitance est considérée comme contrainte opérationnelle.

Dans la littérature, les modèles à temps continu ont été présentés par peu de chercheurs, tels que les modèles de :

Dahane et al. (2008) ont traité le problème de la maintenance intégrée à la production, dite maintenance intégrée, sous une contrainte de sous-traitance. Ils ont considéré un système composé d'une machine unique, qui subit des actions de maintenance correctives et préventives de durées aléatoires. Un stock à capacité finie est construit pour satisfaire une demande constante. De plus, la machine est allouée pour effectuer des tâches de sous-traitance, pour une durée effective au cours de laquelle elle ne peut pas être utilisée pour répondre à la demande du système. Une étude analytique a été réalisée lorsque la machine est forcée d'effectuer une tâche de sous-traitance unique au cours de chaque cycle. Puis une généralisation est présentée de la contrainte de sous-traitance, qui implique l'attribution de la machine à la sous-traitance à plusieurs reprises au cours de chaque cycle.

Dellagi et al. (2010) ont considéré un système de production soumis à des défaillances aléatoires et incapable de répondre à une demande constante. Pour satisfaire cette demande, l'entreprise fait appel à un ensemble de sous-traitants. Les auteurs ont développé deux stratégies, la première stratégie consiste à choisir un seul sous-traitant parmi plusieurs. Ils ont montré analytiquement que le choix des machines de sous-traitance est conditionné par le coût unitaire engendré en raison d'une demande non satisfaite d'un produit ; la deuxième stratégie consiste à alterner entre deux machines de sous-traitants.

Dahane et al. (2011) ont développé une approche intégrant une politique de maintenance et une politique de production juste-à-temps dans un environnement de sous-traitance. Les auteurs ont traité le problème selon deux perspectives. La première consiste à étudier une unité de production du donneur d'ordres qui utilise la sous-traitance dans le but de satisfaire une demande constante des clients. La sous-traitance est représentée par une machine qui a un taux de défaillance constant. Trois politiques de maintenance sont proposées, testées et évaluées. La seconde perspective traite un système de production en tant que fournisseur de la sous-traitance, qui réserve une partie de sa capacité de production à la sous-traitance, de façon à satisfaire une demande constante. Les auteurs ont prouvé l'efficacité des politiques de maintenance intégrée qui combinent les décisions de production et de maintenance sous contraintes de sous-traitance.

D'autres chercheurs se sont focalisés sur des modèles à temps discret. Parmi lesquels :

Hajej et al. (2014) ont traité un problème d'intégration production – maintenance. Ils ont considéré une seule machine qui peut satisfaire une demande aléatoire sur un horizon de planification fini. Ce producteur peut avoir recours à la sous-traitance pour combler l'incapacité de son système avec la prise en compte du retard de transport. Une formulation analytique du problème a été proposée. Elle consiste à générer un plan de production optimal pour lequel un plan optimal de maintenance préventive a été calculé.

Ayed et al. (2016) ont considéré le même système de Hajej et al. (2014) sauf que dans cette étude, ils ont considéré que la satisfaction de la demande est sous une contrainte d'un niveau de service requis. La dégradation du système de production est fonction du taux de production et de la disponibilité. Un plan de production optimal avec la prise en compte de la dégradation de la machine est proposé. L'objectif est de minimiser simultanément la somme des coûts de stockage, de maintenance et de production. Un algorithme basé sur l'analyse de perturbation finie est proposée afin de déterminer le plan de production optimal.

Cependant, les sous-traitants utilisent généralement leurs équipements avec des cadences élevées pour obtenir plus de contrats, mais sans tenir compte du fait que l'unité de production se dégrade rapidement. Pour ce faire, les sous-traitants cherchent des stratégies pour déterminer un compromis entre ses objectifs, qui prennent en

compte des aspects liés à la fiabilité et la disponibilité de leurs processus de production ainsi que les exigences du fabricant en termes de prix, de délais, de quantités et de la qualité.

Pour les donneurs d'ordres, le coût supplémentaire de la maintenance en raison de l'exploitation de la machine avec des cadences très élevées encourage ces entreprises à sous-traiter au lieu d'utiliser ses ressources internes. De même, les sous-traitants ne s'engagent pas dans un contrat, que s'il est rentable. Ainsi, "il est préférable de ne pas sous-traiter que de sous-traiter sans tenir compte de la dégradation des machines et des coûts supplémentaires". Ce contexte a donné lieu aux problèmes d'optimisation de la sous-traitance dans une approche combinée de la production et de la maintenance.

Nos modèles sont différents de celui développés par ces études. Dans leurs modèles, les auteurs se sont intéressés à des stratégies de production et de maintenance. Ils ont développé des approches intégrées de production et de maintenance pour une unité soumise à des contraintes de sous-traitance.

Selon Liu et al. (2008) les décisions de sous-traitance dépendent de nombreux facteurs quel que soit le niveau de décision. Certaines entreprises, ont obtenu des succès avec leurs stratégies de sous-traitance, mais d'autres ont connu plusieurs échecs. L'une des causes de ces échecs, est le manque de méthodes et d'outils d'aide à la décision fondés sur la science, pour aider les managers à prendre des décisions de sous-traitance avisées. Ceci est dû au manque des études sur les stratégies de sous-traitance dans le cadre des approches de gestion intégrée. Cette thèse vise à fournir des méthodes d'aide à la décision efficaces et efficientes, fondées sur des stratégies de sous-traitance industrielle et dans le cadre des approches de gestion intégrée, à savoir, production – maintenance et production – maintenance – qualité.

II.3.5. Planification de la production et des capacités avec prise en compte de la qualité

Du point de vue sélection des fournisseurs de la sous-traitance, Liou et Chuang (2010) ont proposé un modèle hybride de prise de décision multicritère. Cependant, dans ce travail, la question de savoir comment les commandes sont affectées pour chaque sous-traitant n'est pas abordée. Différents modèles ont été proposés, qui tentent de surmonter ces inconvénients.

Wadhwa et Ravindran (2007) ont étudié le problème de sélection des fournisseurs de la sous-traitance comme un problème d'optimisation multi-objectif, où un ou plusieurs acheteurs commandent plusieurs produits de différents fournisseurs dans un réseau d'approvisionnement multiples. Le prix, les délais, et le rebut (dû au problème de qualité) sont explicitement considérés comme trois critères contradictoires qui doivent être minimisés. Un modèle de tarification sous des rabais de quantité est utilisé pour représenter le coût d'achat. Plusieurs méthodes d'optimisation ont été développées, comprenant l'objectif pondéré, la programmation des objectifs et la programmation par compromis.

Yoo et al. (2012) ont étudié un système de production, avec inspection imparfaite, retour des produits aux clients et élimination des produits non-conformes. Ils ont développé un modèle de dimensionnement du lot optimal avec des investissements de production et d'inspection de la qualité, intégrant tous les coûts de la qualité. La taille optimale du lot, la fréquence de refabrication, le taux de non-conformité, et les proportions d'erreurs d'inspection qui minimisent le coût de la qualité totale et maximisent le profit total sont pris en compte. Les auteurs ont analysé les solutions pour des décisions partielles, séquentielles et intégrées de la production et/ou les processus d'inspection en termes de coûts de qualité.

Sarkar et Moon (2013) ont montré que, dans un processus de production imparfait, la relation entre l'amélioration de la qualité, le point de commande, et le délai est affectée par le taux de rupture de stock. Afin de réduire le coût total du système, les auteurs ont proposé et optimisé le coût de set-up, la taille du lot, les délais de livraison, le point de commande, et les paramètres du processus de qualité simultanément. Ils ont considéré que le délai de livraison de la demande suit une distribution normale et ils ont appliqué l'approche de distribution libre pour le délai de livraison de la demande.

Hlioui et al. (2015) ont coordonné et intégré conjointement la production, l'approvisionnement et le contrôle de la qualité dans une chaîne logistique en trois étapes. Une étape de transformation du produit en un produit fini pour répondre à une demande de marché stable. Après un délai de livraison aléatoire, le fournisseur fournit des matières premières dans des lots qui peuvent contenir un certain pourcentage de produits défectueux. Quand les lots de matières premières sont reçus, un plan d'échantillonnage d'acceptation est appliqué, puis une décision est prise en ce qui concerne l'acceptation ou le rejet du lot échantillonné. Les auteurs se sont focalisés sur l'interaction entre les décisions de contrôle de la qualité et les décisions de réapprovisionnement et de contrôle de la production. L'objectif est de déterminer une politique de contrôle de la production, d'approvisionnement, et de la qualité qui minimise le coût total, comprenant les coûts d'achat, de la production, et d'inspection de la qualité, ainsi que les coûts de stockage/des demandes en retard. Un modèle de simulation, et une méthodologie de surface de réponse sont utilisés pour trouver les paramètres optimaux de la politique proposée. Les résultats obtenus montrent que l'intégration de la politique d'échantillonnage, et l'acceptation ou le rejet du lot complet est plus bénéfique, et garantit une meilleure coordination à moindre coût.

Colledani et al. (2015) ont proposé une approche pour la prédiction de la distribution des temps de livraison dans les systèmes de production à plusieurs étapes avec des machines non fiables. La méthode permet de régler de manière optimale les niveaux de stocks, pour obtenir les meilleures performances en termes de qualité de production. Une application sur un système réel, du secteur médical, confirme les résultats obtenus.

II.3.6. Planification de la production et des capacités avec prise en compte de la maintenance et de la qualité

La plus part des travaux effectués dans ce domaine, ont présenté des modèles à temps continu. Cependant, les modèles à temps discret sont moins développés. Pour les deux types de modèles, nous constatons, qu'il y a eu essentiellement deux orientations. Une communauté de chercheurs s'est basée sur le modèle de Rosenblatt et al. (1986), et d'autres chercheurs se sont intéressés au développement des modèles qui se basent sur des outils de la qualité, comme par exemple les taux de rejet (rebut) et les cartes de contrôle...

Avant de présenter les modèles à temps continu, et qui sont basés sur le modèle de Rosenblatt et al. (1986), nous présentons les travaux de Rosenblatt et Lee (1986) qui ont considéré un système de production soumis à un processus aléatoire de dégradation, qui le fait passer à un état "hors-contrôle", caractérisé par le fait qu'il commence à produire des produits non-conformes. Les auteurs montrent qu'il est préférable, dans de telles situations, de produire des tailles beaucoup plus petites que celles préconisées par le modèle classique de calcul des quantités de production économiques.

Lin (2004) a étudié l'influence des erreurs de la maintenance préventive sur la production, l'inspection et le coût. Cette étude a considéré un processus de production imparfait. L'auteur a supposé que, si la maintenance préventive est effectuée après l'atteinte d'un point de contrôle, le processus est donc dans un état de contrôle. Par contre, si la maintenance préventive est réalisée après le dépassement d'une limite, le système commence à produire des produits non conformes. Il a montré que l'exactitude de la performance de maintenance aura un impact direct sur la fréquence d'inspection, l'intervalle d'inspection, la quantité de production et le coût ou le profit.

Alfares et al. (2005) ont proposé un modèle dans lequel les produits et l'équipement de production se dégradent. Lorsque le système de production se dégrade, il se déplace vers un état hors contrôle, et commence à produire un pourcentage de produits défectueux, nécessitant une action de maintenance corrective. Ils ont formulé un modèle pour intégrer plusieurs aspects réalistes, y compris la dégradation du produit et du processus, la variation de la demande et du taux de production, la qualité, l'inspection et la maintenance. Une heuristique a été développée pour déterminer le plan de production et de contrôle.

Panagiotidou et Tagaras (2008) ont développé un modèle pour l'optimisation des procédures de maintenance dans un processus de production avec deux états de qualité. En plus de la dégradation avec l'âge, l'équipement

peut transiter à un état hors-contrôle, qui se caractérise par des rendements de production plus faibles, et une probabilité de panne plus élevée. Les temps des pannes et de changement de la qualité sont distribués aléatoirement. Les auteurs ont considéré deux types de maintenance : réparation minimale qui améliore l'état de la qualité de l'équipement sans affecter son âge et maintenance préventive parfaite qui remet l'équipement à neuf.

Dhouib et al. (2012) ont proposé une approche intégrée pour l'optimisation conjointe de la production, du stockage et de la maintenance préventive pour une cellule de production comprenant un processus imparfait, où, durant la période "sous-contrôle" la dégradation suit une distribution générale. La politique de contrôle production – stockage est basée sur la politique de point de commande. Elle consiste à construire et à maintenir un stock de sécurité de produits finis afin de répondre à une demande et ainsi éviter les pénuries au cours des actions de réparation. Ces actions de réparation sont prévues lorsque le système passe à l'état "hors-contrôle" et commence à produire des produits non conformes. La cellule de production est également soumise à une politique de maintenance préventive basée sur l'âge, afin de réduire le taux de passage à l'état "hors-contrôle". L'objectif est de déterminer la politique conjointe optimale qui minimise le coût total, composé des coûts de set-up, de maintenance, de stockage, de pénurie et de non-qualité.

Rivera-Gómez et al. (2013-a) ont étudié la planification simultanée de la production et du contrôle de la qualité pour un système de production. Le système considéré dans cette étude est composé d'une seule machine pour répondre à la demande d'un seul type de produit. La machine est sujette à des dégradations, leurs effets sont observés sur le taux de non-conformité, qui augmente de façon continue dans le temps. En raison de l'incertitude causée par les défaillances, la machine ne peut pas répondre à la demande à long terme. Une révision peut être menée afin de minimiser l'effet de la dégradation. L'objectif de cette étude est de déterminer simultanément le plan de production et le programme de révision optimal pour minimiser le coût total, composé du coût des stocks, des commandes en retard et de maintenance, sur un horizon de planification infini. Les auteurs ont développé un modèle de programmation dynamique stochastique pour résoudre le problème. Un modèle de simulation et une méthodologie de surface de réponse sont utilisés pour approcher les paramètres de contrôle optimaux de la politique proposée.

Rivera-Gómez et al. (2013-b) ont pris en compte simultanément la politique de production et de maintenance (réparation/révision) sous l'effet de dégradations. La politique de décision optimale proposée minimise les coûts totaux engagés, comprenant les stocks, les commandes en retards, de réparation et de révision sur un horizon de planification infini. Par rapport aux travaux précédents, les auteurs ont considéré l'historique de la machine, défini par le nombre de réparations et des différents états de fonctionnement.

Nourelfath et al. (2016) ont traité le problème d'intégration de la production, de la maintenance, et de la qualité pour un processus imparfait, dans un contexte de dimensionnement de lot multi-périodes et multi-produits à capacité. Le système de production est modélisé comme une machine imparfaite, dont l'état est considéré soit sous contrôle ou hors contrôle. Lorsque la machine est hors contrôle, elle produit un pourcentage de produits non conformes. Durant chaque période, la machine est inspectée et des maintenances préventives imparfaites sont effectuées pour réduire son âge, proportionnel au niveau de la maintenance préventive effectuée. L'objectif est de minimiser le coût total, tout en satisfaisant la demande de tous les produits. Les auteurs ont formulé un modèle d'optimisation permettant une sélection conjointe des valeurs optimales du plan de production et la politique de maintenance, tout en tenant compte des coûts liés à la qualité. Ils ont constaté que l'augmentation du niveau de la maintenance préventive conduit à une réduction des coûts de contrôle de la qualité. En revanche, si le coût de la maintenance préventive est élevé au point où il n'est pas compensé par des réductions de coûts liés à la qualité, dans ce cas la maintenance préventive n'est pas justifiée. Enfin, l'adoption d'une politique de maintenance périodique avec la possibilité de plusieurs niveaux de maintenance préventive peut se traduire par une amélioration du coût total.

Lin et al. (2016) ont abordé le problème d'intégration de la production, la maintenance préventive, l'inspection et le stockage pour un processus imparfait avec la prise en compte des réparations minimales, des erreurs de la

maintenance préventive et de refabrication. Ils ont développé un modèle mathématique pour optimiser le nombre d'inspections, l'intervalle d'inspection et la quantité de production économique. Le modèle suppose que le processus de production est, soit dans l'état sous-contrôle ou dans un état hors-contrôle. Si le processus de production est sous-contrôle, la maintenance préventive peut être effectuée. Si le processus de production est dans l'état hors contrôle, deux changements sont possibles. Le premier type, est un changement de processus de production relativement léger dans lequel une réparation minimale peut rétablir le processus à l'état sous contrôle. Le deuxième type est un changement plus conséquent qui arrête complètement le cycle de production.

D'autres chercheurs se sont intéressés au problème où la fréquence de maintenance préventive est discrète et continue. Tsao (2013) a considéré un système de production imparfait qui se dégrade. Pour maintenir le système, des actions de maintenance préventive et corrective sont effectuées. Tsao a supposé qu'il y a un pourcentage constant pour produire des produits défectueux dans l'état "sous-contrôle" et un pourcentage très élevé pour produire des produits défectueux dans l'état "hors-contrôle". Le processus de production peut se déplacer de manière aléatoire à partir d'un état de contrôle à un état hors-contrôle pendant un cycle de production. Afin de déterminer le temps de cycle de production optimal et la fréquence de la maintenance préventive qui minimisent le coût total, deux algorithmes sont proposés avec prise en compte de la fréquence de maintenance préventive discrète et continue.

Pour les modèles qui se basent sur les outils et les concepts de la qualité, Ben-Daya et Makhdom (1998) ont étudié l'effet de plusieurs politiques de maintenance préventive sur l'optimisation conjointe de la quantité de production économique et la conception économique des cartes de contrôle. Ils ont considéré un processus où la dégradation de la période de contrôle suit une distribution de probabilité générale avec un taux de risque croissant. Pour chaque stratégie, le modèle détermine la quantité de production économique, la conception optimale de la carte de contrôle et le niveau de la maintenance préventive optimal.

Toujours dans le même contexte, Ben-Daya (1999) a développé un modèle intégré pour l'optimisation conjointe de la quantité de production économique, la conception économique des tableaux de commande, et le niveau de maintenance optimal. Il a considéré un processus où la dégradation de la période de contrôle suit une distribution de probabilité générale, avec un taux de risque croissant. Dans le modèle proposé, les activités de maintenance préventive réduisent le taux de passage à l'état hors-contrôle qui est proportionnel au niveau de la maintenance préventive effectuée.

Sung et Lin (2006) ont considéré des erreurs d'estimation dans l'inspection et la maintenance préventive dans un processus de production imparfait. Ils ont analysé l'influence des erreurs d'estimation sur le nombre d'inspections, le premier intervalle d'inspection, la taille du lot de production ainsi que sur les coûts générés.

Radhoui et al. (2009) ont développé une approche intégrée de contrôle de la qualité et de management de la maintenance. Le système de production considéré est soumis à des défaillances aléatoires, et produisant des produits conformes et non conformes. Ils ont considéré que selon le pourcentage des produits non conformes sur chaque lot, et par rapport à des seuils de contrôle, on décide d'entreprendre ou non des actions de maintenance sur le système. Un stock tampon est construit pour assurer l'approvisionnement continu de la ligne de production. Les auteurs ont développé un modèle mathématique combiné avec la simulation pour déterminer simultanément le taux optimal de non-conformité, la taille optimale du stock et les limites de contrôle qui minimisent le coût total.

Colledani et Tolio (2012) ont présenté une théorie générale pour analyser le taux de conformité des produits dans les systèmes manufacturiers avec dégradation des machines et du niveau de la maintenance préventive. Les résultats montrent que l'amélioration de la performance du système, est obtenue par une analyse conjointe de des fonctions production, maintenance et qualité.

Rivera-Gómez et al. (2013-c) ont étudié un système manufacturier sujet à des dégradations de la qualité et de la fiabilité. Ils ont supposé que la dégradation du système conduit à une augmentation continue du nombre moyen des pannes et une diminution de la qualité des pièces produites. La dégradation implique un double effet sur le

système, lorsque la machine tombe en panne, une réparation minimale est effectuée, laissant la machine au même niveau de détérioration avant la panne (As Bad As Old). Par conséquent, la qualité des pièces produites et la fréquence des défaillances ne changent pas. Pendant ce temps, une rénovation se réfère à une réparation parfaite qui restaure complètement la qualité des pièces, et de l'intensité de défaillance de la machine. Cette option élimine complètement tous les effets de la dégradation. La maintenance préventive peut également être effectuée, mais elle réduit partiellement le niveau de dégradation, l'amélioration de la qualité des produits et l'intensité des pannes. Les auteurs ont formulé un modèle de contrôle qui détermine en même temps le plan optimal de production, de rénovation, et des stratégies de maintenance préventive. Cette politique de contrôle conjointe minimise le coût total, y compris le coût de stockage, les commandes non satisfaites, de révision, de maintenance préventive, et des coûts de non qualité sur un horizon de planification infini. Le processus de décision semi-Markovien est utilisé pour modéliser la dynamique de l'évolution du système. Les méthodes numériques sont appliquées pour déterminer la politique de contrôle.

Bouslah et al. (2014) ont développé une politique intégrée de contrôle de la production et la conception d'un plan d'échantillonnage pour un système de production par lots. La production est contrôlée par une politique de point de commande modifiée, qui consiste à construire un stock de sécurité de produits finis pour éviter les pénuries pendant la maintenance corrective. L'objectif principal de ce travail était de déterminer simultanément la quantité de production économique, le niveau de stock de sécurité optimale et la conception du plan d'échantillonnage qui minimisent le coût total. Un modèle mathématique stochastique est développé et résolu par l'utilisation d'une approche d'optimisation par simulation basée sur la méthodologie de surface de réponse. La simulation a été utilisée pour imiter le comportement dynamique et stochastique du processus. Ils ont démontré que les interactions fortes entre la quantité de production, l'état du stock et la conception du plan d'échantillonnage confirment la nécessité de considérer conjointement les paramètres de production et de contrôle de la qualité dans un modèle intégré. De plus, ils ont montré un impact significatif de la fiabilité du système de production sur la conception du plan d'échantillonnage et donc sur la qualité du produit fini.

Bouslah et al. (2016) ont examiné le problème d'intégration production, maintenance préventive et contrôle de la qualité d'un système de production, soumis à la fois à des contraintes de fiabilité et de dégradation du niveau de la qualité. Une stratégie de production sur stock est adoptée pour assurer l'alimentation d'un stock utile pour faire face aux incertitudes. Le contrôle de la qualité est effectué en utilisant un seul échantillonnage d'acceptation par attributs. La stratégie de maintenance préventive consiste à effectuer une maintenance imparfaite au début de chaque lot de production, tandis qu'un remplacement (révision) est effectué une fois qu'un pourcentage d'unités défectueuses, dans un lot rejeté, atteint ou dépasse un seuil donné. L'objectif principal des auteurs était d'optimiser conjointement la taille du lot de production, le seuil d'inventaire, les paramètres du plan d'échantillonnage et le seuil de révision en minimisant le coût total. Pour répondre aux besoins des clients, le problème d'optimisation est soumis à une contrainte sur la limite de la qualité moyenne après contrôle (*Average Outgoing Quality Limit – AOQL*). Le problème a été formulé comme un modèle mathématique stochastique et résolu en utilisant une approche d'optimisation basée sur la simulation.

Al-Salamah (2016) a développé un modèle EPQ pour un processus imparfait de production et d'inspection. Contrairement aux modèles existant dans la littérature, le modèle proposé par Al-Salamah vise à trouver la taille du lot optimale pour un fabricant qui produit des produits par lots ; les lots sont soumis à un processus d'échantillonnage d'acceptation destructif ou non destructif. Deux types d'erreurs peuvent se produire : si un lot est rejeté, il passe par une étape d'échantillonnage non destructif qui consiste à séparer de ce lot les produits non défectueux, à re-fabriquer, ou à récupérer. Par contre, si un lot est vendu et il s'avère défectueux, il est retourné au fabricant, avec un coût de retour. Dans ce cas, les produits retournés sont soit re-fabriqués, soit vendus sous forme de rebut. Pour les deux situations d'échantillonnages destructifs et non destructifs, la taille optimale du lot a été trouvée et le critère d'optimalité a été testé.

Toutefois, toutes ces études s'appuient sur le fait que la non-conformité des produits est due à la dégradation du système de production. C'est à ce niveau que se fait le lien entre la qualité des produits et la maintenance des équipements qui les produisent. Selon Radhoui (2008), la politique de production est intégrée au niveau du

dimensionnement de la taille des lots ou des stocks tampon qui servent à diminuer les risques de pénurie durant les périodes de maintenance consacrées à améliorer l'état des équipements et faire diminuer le risque de produire de la non-qualité. Cependant, dans le cas où la capacité de production en interne est inférieure à la demande du marché, l'entreprise doit avoir recours à la sous-traitance pour combler le manque entre la production interne et la demande. De plus, l'adoption d'une politique de sous-traitance n'est pas toujours justifiée par l'incapacité du système productif, mais aussi due à d'autres considérations (coûts, qualité,...)

Nous partons de ce constat, à notre connaissance, sont rare les travaux relatifs à l'intégration production-sous-traitance, maintenance et qualité.

II.3.7. Plannification de la production et des capacités avec option de sous-traitance, maintenance et qualité

Haoues et al. (2013-b) ont considéré un donneur d'ordres possédant une seule machine réparable sujette à des pannes aléatoires, produisant un seul type de produit. Il doit répondre à des demandes déterministes en périodicités non-homogènes où le report ou l'accumulation de retards des quantités de pénurie sont non autorisés et génèrent un coût de pénalité. Les auteurs ont supposé que le donneur d'ordres est en relation avec de multiples sous-traitants. Ils ont considéré que le coût de sous-traitance dépend du taux de non conformité des produits ; aussi le taux de défaillance dépend du taux de production et du temps. L'objectif était de déterminer simultanément le plan de production interne, le plan de maintenance, les sous-traitants appropriés ainsi que les quantités de sous-traitance associées tout en maximisant le profit total du donneur d'ordres. Un modèle mathématique de programmation linéaire mixte a été proposé et résolu par une procédure basée sur les algorithmes génétiques.

Rivera-Gómez et al. (2016) ont étudié un système de production soumis à des détériorations, produisant des produits conformes et non-conformes, dans le but de satisfaire un taux de demande constant. Le système est constitué d'une machine réparable soumise à des défaillances aléatoires. En raison du double effet de la variation aléatoire de la disponibilité et de la dégradation, le système ne parvient pas à répondre à la demande à long terme. En effet, lorsque le stock de produits finis est positif, les demandes des clients sont remplies à temps et sans retard. En revanche, lorsqu'une demande est en retard, les options de sous-traitance sont utilisées, à un coût plus élevé, permettant ainsi de compléter le déficit de la capacité de production interne. L'effet de la dégradation des machines se reflète sur la qualité des produits, le taux de non-conformité augmente en fonction de la dégradation des machines. Des activités de maintenance préventive (remplacement) peuvent être menées pour atténuer l'effet de la dégradation.

Dans ce contexte, nous remarquons que nos modèles sont significativement différents des problèmes des classes {II.3.1, II.3.2, II.3.5} en termes des considérations relatives à la fiabilité et la maintenance, et des problèmes des classes {II.3.1, II.3.3, II.3.5, II.3.6} en termes de la flexibilité permettant de modifier la capacité, et d'incorporer des contrats de sous-traitance secondaires.

Plusieurs différences majeures existent entre notre travail et la littérature existante portant sur les contrats de sous-traitance dans le cadre des approches intégrées de management : d'abord, dans certains problèmes de notre travail nous intégrons la durée des contrats de sous-traitance. Aussi, nous intégrons des contraintes de fiabilité et maintenance. En plus, nous considérons une structure générale de chaîne logistique, intégrant les deux parties protagonistes de la relation de sous-traitance, à savoir, les donneurs d'ordres et les sous-traitants.

II.4. Contributions de la thèse

Ce travail de thèse s'inscrit dans la suite de plusieurs travaux effectués depuis plusieurs années sur le problème de l'optimisation des activités de maintenance intégrée sous contrainte de sous-traitance pour des systèmes de production de biens et services, menés au sein du laboratoire LGIPM (Laboratoire de Génie Industriel, de Production et de Maintenance) à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Metz et l'Université de Lorraine (France).

Parmi ces travaux, nous pouvons citer par exemple : la thèse de Sofiène Dellagi (2006), sur le développement des stratégies de maintenance dans un contexte de sous-traitance partielle de production. La thèse de

Mohammed Dahane (2007), sur l'élaboration des politiques de maintenance intégrées sous contrainte de sous-traitance dans le cas d'entreprises prestataires de sous-traitance. La thèse de Mehdi Radhoui (2008) sur l'analyse des performances des systèmes de production sujets à des défaillances aléatoires, pouvant engendrer des produits non conformes dans un environnement incertain. La thèse de Zied Hajej (2010) qui a étendue les travaux de Dellagi (2007) pour un environnement stochastique, et la thèse de Souheil Ayed (2011) qui a traitée particulièrement la gestion économique du soutien productique d'un ou de plusieurs sous-traitants qui diffèrent par leurs disponibilités et leurs coûts de production.

Toutes ces études ont prouvé la faisabilité des approches intégrée production – maintenance et production – maintenance – qualité. D'autres études (Dahane et Rezg, (2010) ; Dahane et Rezg, (2011) et Haoues et al. (2011) ; et Haoues et al, (2012-b)) ont prouvé la faisabilité et la rentabilité d'une approche intégrant la production et la maintenance dans le cas des relations donneurs d'ordres – sous-traitants. Ces travaux sont poursuivis avec la présente thèse.

Cette thèse de Doctorat s'intéresse à la problématique de la planification de production et des capacités avec options de sous-traitance, sous des approches combinées de management de la maintenance, gestion de production et contrôle de la qualité. Ces approches considèrent simultanément les contraintes des activités de maintenance (disponibilité et fiabilité des systèmes ...), les exigences de gestion de production (niveau des stocks, taux de production, demande prévisionnelle...), et les objectifs de contrôle de la qualité (contrôle de la qualité des opérations sous-traitées, inspection des systèmes, retour des produits...). On cherche à travers cette thèse à étudier et à proposer des stratégies intégrant ces exigences, à la fois pour les entreprises donneurs d'ordres et sous-traitantes.

L'intégration de ces deux acteurs de la sous-traitance présente un défi pour la recherche. D'une part, les entreprises donneurs d'ordres font appel aux services de sous-traitance avec l'objectif d'améliorer leurs capacités de production et leur niveau de qualité, afin de satisfaire les demandes de leurs clients permanents. Dans ce cas, la sous-traitance est motivée par l'incapacité de la production en interne mais aussi par des considérations de minimisation des coûts. D'autre part les entreprises prestataires de sous-traitance cherchent à optimiser l'exploitation de leurs systèmes et leurs compétences pour maximiser leurs profits.

La maximisation de la productivité des systèmes de production est directement affectée par les pannes des machines et reste très sensible aux différentes politiques de gestion de production, de maintenance et de contrôle de qualité adoptées. Ainsi, déterminer les périodes optimales de sous-traitance peut engendrer une réduction importante des délais, des coûts de pénurie, de stockage et de maintenance. Ce travail vise à :

- Trouver un compromis entre les objectifs : du management de la maintenance, de contrôle de la qualité, de la gestion de production et des services de sous-traitance de chaque entreprise.
- Garantir et maîtriser la qualité et la pérennité des relations interentreprises.

Les cinq volets cités ci-dessus correspondent à des préoccupations socio-économiques qui nous permettront de juger la pertinence et l'efficacité des méthodes, modèles et outils développés. Ceci passe en premier lieu par la formalisation et la résolution des problèmes d'optimisation (construction d'une fonction de coût, profit ..., spécification des contraintes "production, maintenance, qualité, sous-traitance et coopération...", détermination du schéma d'optimisation sous contrainte).

Cette recherche contribue à la littérature sur la coopération et l'association entre entreprises dans une chaîne logistique à deux échelons avec des contrats de sous-traitance. Plus clairement, sur la planification de la production et des capacités avec options de sous-traitance et dans le cadre des approches de management intégrée "production – maintenance" et "production – maintenance – qualité".

Du point de vue fiabilité et maintenance, nous considérons le problème d'intégration de la maintenance préventive non cyclique dans la planification tactique de la production interne et de la sous-traitance pour une

seule machine. La politique de maintenance suggère des réparations minimales en cas de pannes et des remplacements préventifs qui dépendent du taux de production observé et de la durée de la période.

Dans la littérature, le problème de contrôle de la qualité des opérations ou des activités sous-traitées est généralement considéré sous deux aspects. Dans le premier, il s'agit de l'inspection de la qualité au niveau du système du donneur d'ordres ou du sous-traitant. Le problème revient ainsi à déterminer comment contrôler les produits fabriqués et comment classer et re-fabriquer ceux non conformes. Le deuxième aspect s'intéresse au contrôle de qualité des produits sous-traités afin d'évaluer la relation de sous-traitance et sélectionner les meilleurs partenaires. Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à ce deuxième aspect. Le donneur d'ordres met en place des dispositifs pour le contrôle de la qualité des produits sous-traités.

A cause de la détérioration ou un mauvais réglage d'une machine d'inspection, le processus d'inspection de la qualité est considéré imparfait. Ce dernier peut générer un pourcentage de produits non-conformes. D'autres facteurs non liés au processus de production et de contrôle de la qualité peuvent être pris en comptes (par exemple des dommages pendant le transport ...), et cela génèrent un certain pourcentage des produits non-conformes. Tous les produits non-conformes sont retournés aux sous-traitants, et aucune re-fabrication n'est effectuée.

La plupart des études sur les problèmes de la gestion de la chaîne logistique avec options de sous-traitance ont considéré principalement le point de vue des donneurs d'ordres ou des sous-traitants, et optimisent une seule partie. Cela ne conduit pas nécessairement à une situation optimale pour l'ensemble des membres de la chaîne (Jain et al. 2015 ; Behnamian et Fatemi Ghomi, 2016). Même les travaux qui tiennent en compte les deux parties, prennent en considération le fait que le sous-traitant ne produit que pour le donneur d'ordres. Pour les problèmes de réservation de capacité, les auteurs ne considèrent que la partie des donneurs d'ordres. La partie des sous-traitants est considérée comme des demandes. Certains n'ont pas suffisamment d'attention aux motivations de la sous-traitance, comme le manque de capacité de production, la minimisation des coûts, et la sous-traitance de spécialité. Dans notre travail, nous proposons des modèles en se basant sur les finalités de la sous-traitance.

Dans un autre cadre, plusieurs chercheurs considèrent que les niveaux de production, des stocks et ceux de la sous-traitance ne disposent pas de limites, et les fonctions de coûts sont fixes. D'autres chercheurs n'ont pas considérés le stockage entre plusieurs périodes. Cependant dans le monde réel, et en se basant sur la théorie de la rareté des ressources, la production, les stocks et la sous-traitance ont des limites. Les fonctions de coût sont arbitraires et varient en fonction du temps et d'autres facteurs de production.

Les problèmes de sous-traitance considérés dans le présent document possèdent les caractéristiques suivantes :

- (1) deux modes sont pris en compte : la sous-traitance d'une partie du lot ou le lot entier, toutes les demandes de sous-traitance sont à satisfaire sans report ni accumulation de retards ;
- (2) chaque partie a un barème des coûts basé sur le taux de production (capacité) ou la capacité réservée auprès des sous-traitants (taux de production sous-traité) ;
- (3) le niveau de sous-traitance a une limite.

Par ailleurs, nos contributions se regroupent en quatre points :

- Nous visons à accroître l'efficacité de la relation donneurs d'ordres – sous-traitants grâce à la proposition de plusieurs types de plate-formes de sous-traitance existantes dans le monde réel, à savoir, les plates-formes créées par les donneurs d'ordres, les plates-formes créées par les sous-traitants, et les plates-formes de co-traitance (également appelées plate-formes pour les connexions inter-entreprises).
- Nous proposons des stratégies de coopération intégrant la production, la sous-traitance, la maintenance et la qualité, pour des plans à une seule période et multi-périodes, mono acteur ou multi-acteurs.

- La recherche d'un équilibre entre les deux parties de la relation donneurs d'ordres-sous-traitants, c'est-à-dire, la définition d'un intervalle de profitabilité pour un rapport gagnant- gagnant. En d'autre termes, déterminer les paramètres du contrat qui arrangent les deux parties (durée, date de début et de fin, le taux de production et de sous-traitance, le plan de maintenance ...).
- Dans certains cas, pour les donneurs d'ordres, les décisions concernent la façon d'équilibrer la production en interne et la sous-traitance. En d'autres termes, déterminer les taux de production en interne et des stratégies de sous-traitance à travers le partage entre les sous-traitants sélectionnés. Pour ces derniers, les décisions concernent la façon de décrocher des contrats directs, ou via des plate-formes tout en optimisant la recherche de partenaires.

II.5. Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons effectué une revue de littérature très approfondie de l'intégration des fonctions production, sous-traitance, maintenance et qualité. Ces quatre fonctions constituent les piliers sur lesquels repose notre travail de thèse. Dans un premier temps, nous avons entamé la revue par l'exposition des travaux traitants l'analyse des performances des stratégies de coopération et d'association entre les entreprises. Dans la seconde section, qui constitue la grande part de ce chapitre, nous avons réalisé un état des lieux des travaux et modèles mathématiques qui tiennent en compte l'association entre la production, la sous-traitance, la maintenance et la qualité. Cette intégration est traitée selon divers points de vue, et selon nos orientations, nous avons exposé ces modèles selon une nouvelle taxonomie. Par la suite, nous avons mis en évidence nos contributions, en procédant au positionnement de nos recherches par rapport aux travaux existants dans la littérature.

Chapitre III

**Optimisation de l'intégration des activités de sous-traitance
sous contraintes de fiabilité et maintenance : planification
sur une seule période**

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions le problème d'optimisation des activités de sous-traitance pour le cas d'une période unique. L'approche de période unique se justifie par le fait que dans certaines situations, la planification des capacités ou de la sous-traitance est un événement ponctuel qui peut être modélisé comme un problème de période unique.

Ce chapitre est organisé en deux sections. Dans la première, nous avons développé un modèle mathématique permettant d'identifier un intervalle de profitabilité assurant un rapport gagnant- gagnant entre les deux parties de la relation de sous-traitance, à savoir le donneur d'ordres et le sous-traitant. Il s'agit de déterminer les paramètres du contrat qui arrangent les deux parties (durée, dates de début et de fin, le taux de production et de sous-traitance, le plan de maintenance ...). Nous développons ensuite des algorithmes exactes pour résoudre le problème d'optimisation à période unique. Enfin, nous considérons une analyse de sensibilité basée sur les paramètres de sous-traitance (coût, périodicité, ...) pour déterminer leurs effets sur le profit total généré par ce système.

Dans la deuxième section, nous gardons les mêmes conditions de fiabilité et maintenance de la précédente section, et nous analysons des stratégies de sous-traitance coopérative, entre un donneur d'ordres et de multiple-sous-traitants. Les stratégies proposées permettent de réduire le risque de la sous-traitance. Nous développons des modèles mathématiques et des méthodes d'optimisations basées sur les algorithmes génétiques, pour partager une requête de sous-traitance entre différents sous-traitants, et de trouver les périodes de sous-traitance optimales à contracter avec le donneur d'ordres de manière à maximiser les profits du système.

III.2. Mise en situation dans le contexte industriel

Dans l'objectif d'augmenter leurs productivités et réduire leurs coûts, les entreprises adoptent diverses stratégies basées sur le recours aux services de la sous-traitance. Cependant, les entreprises donneurs d'ordres se trouvent confronter aux problèmes suivants :

- Le problème de transport des produits sous-traités. Les entreprises donneurs d'ordres doivent inclure les coûts supplémentaires du transport des produits par rapport à une production en interne, comme ceux du transport.
- Le problème de contrôle de qualité des produits sous-traités. L'entreprise risque de recevoir des produits non conformes aux normes désirées. Pour cela, les donneurs d'ordres sous-traitent des moyens de production, afin de contrôler la production. Le problème de contrôle des produits sous-traités est analysé dans le sixième chapitre.
- Le problème de la gestion des activités de maintenance pour l'ensemble des acteurs. En effet, les niveaux de fiabilités des unités de production du sous-traitant ainsi que l'efficacité de ses plans de maintenance ont un impact direct sur l'efficacité de la réponse qu'il peut apporter aux requêtes du donneur d'ordres. Ce problème n'est pas pris en compte dans le présent travail, il fait l'objet d'un travail en cours.

En général, le donneur d'ordres produit le maximum en interne et complète par la sous-traitance. On note que la gestion de la maintenance de l'entreprise donneur d'ordres est gérée indépendamment du sous-traitant. Les stratégies de maintenance adoptées par le donneur d'ordres ne dépendent que de la fiabilité et de l'exploitation de ses machines. Elles ne tiennent pas compte de l'état du sous-traitant qui peut imposer des périodes d'indisponibilité pouvant coïncider avec les périodes de maintenance des machines de l'entreprise donneur d'ordres.

III.3. Optimisation de l'intégration des activités de sous-traitance sous contraintes de fiabilité et maintenance

L'objectif de cette première section est d'étudier une relation donneur d'ordres – sous-traitant, nous visons d'accroître l'efficacité, à travers une optimisation des activités de la sous-traitance sous contraintes de fiabilité et maintenance. En effet, nous nous intéressons au problème de l'optimisation simultanée des profits du sous-traitant et du donneur d'ordres, sous un partenariat gagnant – gagnant. Bien que des politiques similaires peuvent être optimales individuellement pour chaque partie du système, la somme des profits générés individuellement peut être beaucoup plus faible que le profit maximum du système qui pourrait engranger sous une politique coordonnée (Saharidis et al. 2009). Dans ce cadre, la plupart des modèles de planification de la production avec option de sous-traitance ne déterminent que la quantité à sous-traiter dans chaque période de production, et ne prennent pas en considération l'aspect temporel de la sous-traitance (meilleur moment), alors que le modèle proposé traite conjointement la quantité à sous-traiter et le moment optimal de sous-traitance.

Cette section est organisée en trois sous-sections. Dans la première sous-section, nous présentons la position du problème. La sous-section 2 est consacrée aux modèles mathématiques des plans de production. Un exemple numérique et une analyse de sensibilité sont présentés dans la sous-section 3 afin d'illustrer les résultats obtenus.

III.3.1. Description du problème

Nous considérons deux unités de production, chaque unité se compose d'une seule machine, réparable et sujette à des défaillances aléatoires (figure III.1). La première appartient au sous-traitant, notée (u_s), qui fournit des produits à un client direct (client principal), où sa capacité de production dépasse la demande principal. La seconde unité appartient au donneur d'ordres, notée (u_o). Ce dernier fait appel aux services de sous-traitance, avec l'objectif d'améliorer sa capacité de production pour satisfaire une demande constante des clients. Dans ce cas, la sous-traitance est motivée par l'incapacité de la production en interne.

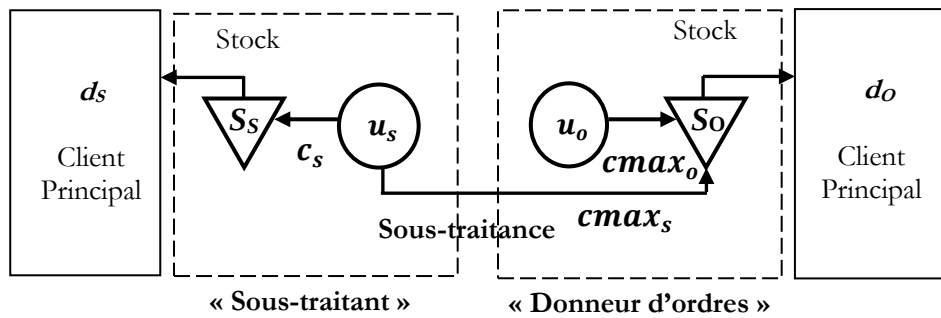


Figure III.1. Système à deux échelons avec option de sous-traitance.

III.3.1.1. Notations

Les notations utilisées tout au long de cette section sont :

Indices

- i Indice machine, avec $i = s$ représente la machine du sous-traitant et $i = o$ celle du donneur d'ordres.
- j Indice plan, avec $j = \overline{wo}$ signifie que la planification se fait sans sous-traitance et $j = wo$ avec sous-traitance.

Variables de décision

S_i^1, S_i^2	Les instants de début et de fin de la sous-traitance pour l'acteur i .
$f_i(\cdot)$	La fonction de densité de probabilité associée au taux de défaillance de l'unité i .
$F_i(\cdot)$	La fonction de distribution de probabilité associée au taux de défaillance de l'unité i .
$\lambda n_i(t)$	La fonction de taux de défaillance nominale de l'unité u_i , lorsque la machine fonctionne avec la cadence de production nominale (avec $\lambda n_i(0) = 0$).
$I_i^j(t)$	Le niveau de stock à l'instant t de l'unité i et du plan j .
$M_i^j(T)$	Le nombre moyen de défaillances au cours de l'intervalle T de l'unité i et du plan j .
IC_i^j, MC_i^j et PC_i^j	Les coûts totaux de stockage, de maintenance et de production pendant la période de planification Δt_i .
π_i^j, Rev_i^j	Le profit et le revenu totaux de la production pendant la période Δt_i et le plan j .
SC^j, dq^j	Le coût et la quantité de pénurie pendant la période Δt_o et le plan j .
$Revst$	Le revenu total réalisé par la sous-traitance pendant la période Δt_s .
OC	Le coût total de sous-traitance de la machine u_s pendant la période Δt_o .
π_i	Le profit total réalisé par l'intégration de la sous-traitance pendant la période Δt_i .

Paramètres

u_i	L'unité de production i .
Δt_i	La longueur de la période de production de l'unité i .
Δr_i	La longueur de la période de production avant et après la sous-traitance.
Δs_i	La longueur de la période de sous-traitance, où $\Delta t_o = \Delta r_o + \Delta s_o$ et $\Delta t_s = \Delta r_s + \Delta s_s$.
P_i^1, P_i^2	Les instants de début et de fin de l'intervalle de production de l'unité i .
d_i	La demande directe adressée à l'unité i .
c_i	Taux de production de l'unité u_i .
$cmax_i$	Taux de production maximal de l'unité u_i .
hc_i	Le coût de stockage d'une unité de produit pendant une unité de temps pour l'unité de production i .
pc_i, sp_i	Le coût de production et le prix de vente d'une unité produite par l'unité de production i .
cmc_i, pmc_i	Le coût d'une réparation minimale et d'une intervention de maintenance préventive de l'unité de production i .
sc	Le coût de pénurie d'une unité pour le donneur d'ordres.
stp	Le prix unitaire de la sous-traitance, quand la machine u_s est sous-traitée pendant une unité de temps.
stc	Le coût de sous-traitance payé par le donneur d'ordres quand il fait appel à la machine u_s pendant une unité de temps.

III.3.1.2. Hypothèses

Pour cette section à savoir l'optimisation de la sous-traitance sous contraintes de fiabilité et maintenance, nous avons opté pour les hypothèses suivantes :

1. La demande non satisfaite est perdue.
2. Les défaillances sont détectées instantanément.
3. La maintenance des machines est effectuée par les propriétaires (i.e. donneur d'ordres ou sous-traitant). La loi de dégradation des machines est de type Weibull, dont le taux de défaillance est croissant avec l'usage. Les machines sont sous contrôle du point de vue de la maintenance (chez le donneur d'ordres ou le sous-traitant).

4. Les durées des réparations minimales et des actions de maintenances préventives sont considérées négligeables.
5. Les machines sont soumises à des politiques de maintenance préventive dont le but est de réduire l'occurrence des pannes. Les périodes d'indisponibilité des machines suite à des arrêts de maintenance sont supposées négligeables (hypothèse 4), et par conséquence, n'engendrent pas une perte de la demande.
6. Les actions de maintenance préventive sont considérées comme parfaites. Chaque action restaure la machine à la configuration "As Good As New".
7. Les produits sont impérissables avec le temps.
8. La durée de traitement de la requête de sous-traitance est considérée négligeable.
9. Pendant la période de production Δt_o , u_o est utilisée avec un taux de production maximal $cmax_o$.
10. Pendant la période de production Δt_s , la machine u_s est utilisée avec des taux de production constants : c_s pendant Δr_s^1 et Δr_s^2 (où $c_s \leq cmax_s$). Δr_s^1 et Δr_s^2 sont respectivement les périodes avant et après l'insertion de la tâche de sous-traitance.
11. Pendant la période de sous-traitance, u_s est utilisée avec un taux de production maximal $cmax_s$.
12. Le plan de production peut commencer avec un niveau de stock non nul : $(I_i^j(t_i^1) \geq 0)$.
13. La condition de sous-traitance pour le donneur d'ordres : la machine u_o ne peut pas produire la quantité demandée pendant l'intervalle Δt_o : $(d_o - I_i^j(t_o^1)) > cmax_o \Delta t_o$.
14. La condition de sous-traitance pour le sous-traitant : la machine u_s peut satisfaire toute la demande : $cmax_s \cdot (\Delta r_s^1 + \Delta r_s^2) \geq (d_s - I_i^j(t_s^1))$.
15. Les machines u_s et u_o avec la sous-traitance de u_s produisent exactement les quantités sollicitées.

Nous considérons que le taux de défaillance au cours de chaque intervalle dépend de la cadence de production. Ainsi, la production à une cadence élevée augmente la dégradation des machines, et par conséquence, le nombre et le coût total des réparations augmentent. Pour un intervalle donné, le taux de défaillance est défini par :

$$\lambda_i(t) = \frac{c_i}{cmax_i} \lambda n_i(t) \quad (III.1)$$

Pour chaque unité de production, nous effectuons une action de maintenance préventive à la fin de chaque période de production. Cependant, deux autres actions de maintenance préventive sont effectuées sur la machine u_s au début et à la fin de la période de sous-traitance, qui restaure l'unité de production pour la prochaine période de production. Ces actions sont parfaitement exécutées.

III.3.2. Modèles mathématiques

Notre objectif est de déterminer simultanément les profits optimaux du sous-traitant et du donneur d'ordres pendant un horizon de planification fini Δt_i , sous un partenariat gagnant – gagnant. Les modèles analytiques proposés sont basés sur les revenus et les coûts générés. Nous présentons en premier lieu les modèles de planification de la production, pour le sous-traitant et le donneur d'ordres sans option de sous-traitance, puis avec l'insertion de la sous-traitance.

III.3.2.1. Les modèles de planification de la production sans option de sous-traitance

- **Le sous-traitant**

Sans option de sous-traitance, la politique de contrôle de production du sous-traitant consiste à construire un stock de produits finis avec un taux de production c_s , afin de satisfaire la demande directe d_s de son client principal.

Nous avons :

$$c_s = \frac{(d_s - I_s^{\overline{w\bar{o}}}(t_s^1))}{\Delta t_s} \quad (III.2)$$

La machine produit exactement la quantité $d_s - I_s^{\overline{w\bar{o}}}(t_s^1)$ (hypothèse 15).

Ainsi, le profit réalisé sans sous-traitance est donné par l'expression suivante :

$$\pi_s^{\overline{w\bar{o}}} = Rev_s^{\overline{w\bar{o}}} - (IC_s^{\overline{w\bar{o}}} + MC_s^{\overline{w\bar{o}}} + PC_s^{\overline{w\bar{o}}}) \quad (III.3)$$

Tels que :

Le revenu brut est exprimé par la formule suivante :

$$Rev_s^{\overline{w\bar{o}}} = d_s \cdot sp_s \quad (III.4)$$

Le coût de production est exprimé par l'équation suivante :

$$PC_s^{\overline{w\bar{o}}} = (d_s - I_s^{\overline{w\bar{o}}}(t_s^1)) \cdot pc_s \quad (III.5)$$

Le coût de stockage est donné par l'équation (III.6) :

$$IC_s^{\overline{w\bar{o}}} = [I_s^{\overline{w\bar{o}}}(t_s^1) \cdot \Delta t_s + (d_s - I_s^{\overline{w\bar{o}}}(t_s^1)) \frac{\Delta t_s}{2}] \cdot hc_s \quad (III.6)$$

Le coût de maintenance est calculé par l'expression suivante :

$$MC_s^{\overline{w\bar{o}}} = M_s^{\overline{w\bar{o}}}(\Delta t_s) cmc_s + pmc_s \quad (III.7)$$

Où, le nombre moyen de pannes durant la période Δt_s est calculé comme suit :

$$M_s^{\overline{w\bar{o}}}(\Delta t_s) = \frac{c_s}{cmax_s} \int_{t_s^1}^{t_s^2} \lambda n_s(t) dt \quad (III.8)$$

- **Le donneur d'ordres**

La politique de contrôle de production du donneur d'ordres, consiste à exploiter la machine avec la capacité de production maximale, afin de minimiser les coûts de pénurie et les quantités à sous-traiter (hypothèse 9). Sans option de sous-traitance, la machine u_o fonctionnant au $cmax_o$ ne peut pas répondre à la demande des clients d_o . Le profit réalisé sans option de sous-traitance est donné par l'expression suivante :

$$\pi_o^{\overline{w\bar{o}}} = Rev_o^{\overline{w\bar{o}}} - (IC_o^{\overline{w\bar{o}}} + MC_o^{\overline{w\bar{o}}} + PC_o^{\overline{w\bar{o}}} + SC_o^{\overline{w\bar{o}}}) \quad (III.9)$$

Avec :

Le revenu brut est exprimé par la formule suivante :

$$Rev_o^{\overline{w\bar{o}}} = cmax_o \cdot \Delta t_o \cdot sp_o \quad (III.10)$$

Le coût de production est calculé comme suit :

$$PC_o^{\overline{w\bar{o}}} = cmax_o \cdot \Delta t_o \cdot pc_o \quad (III.11)$$

L'expression du coût de pénurie est donnée par :

$$SC_o^{\overline{w\bar{o}}} = dq_o^{\overline{w\bar{o}}} \cdot sc = \left[\max \left[0, \left(d_o - (I_o^{\overline{w\bar{o}}}(t_o^1) + cmax_o \cdot \Delta t_o) \right) \right] \right] \cdot sc \quad (III.12)$$

Le coût total de stockage est écrit comme suit :

$$IC_o^{\overline{wo}} = \Delta t_o \cdot \left[I_o^{\overline{wo}}(t_o^1) + \frac{c_{max_o} \cdot \Delta t_o}{2} \right] \cdot hc_o \quad (III.13)$$

En fin, la formule (III.14) donne le coût de maintenance total durant l'horizon de planification :

$$MC_o^{\overline{wo}} = M_o^{\overline{wo}}(\Delta t_o) \cdot cmc_o + pmc_o \quad (III.14)$$

Sachant que, le nombre moyen de pannes durant le plan du donneur d'ordres est donné par :

$$M_o^{\overline{wo}}(\Delta t_o) = \int_{t_o^1}^{t_o^2} \lambda n_o(t) dt \quad (III.15)$$

III.3.2.2. Les modèles de planification de la production après l'insertion de la tâche de sous-traitance

- **Le sous-traitant**

L'insertion de la tâche de sous-traitance exige une nouvelle optimisation du plan de production basé sur de nouveaux taux de production. Considérons d'abord le taux c_s de production pendant les périodes de production Δr_s^1 et Δr_s^2 (respectivement avant et après l'insertion de la tâche de sous-traitance). Le sous-traitant utilise sa machine avec la cadence maximale pendant la période de sous-traitance.

L'expression du profit du sous-traitant est basée sur les revenus réalisés de la production et de la sous-traitance, ainsi que les coûts engendrés du stockage, de la maintenance, et de la production. Elle est donnée comme suit :

$$\pi_s^{wo} = Rev_s^{wo} + Rev_{st} - (IC_s^{wo} + MC_s^{wo} + PC_s^{wo}) \quad (III.16)$$

Avec :

Le revenu brut Rev_s^{wo} et le coût de production PC_s^{wo} sont donnés par les expressions III.4 et III.5 on remplace $\overline{wo}$ par wo .

Le profit réalisé de la sous-traitance est donné comme suit :

$$Rev_{st} = \Delta s_s \cdot stp \quad (III.17)$$

Le coût de stockage est donné par l'équation suivante :

$$IC_s^{wo} = \left[c_s \cdot \Delta r_s^1 \cdot \left(\frac{\Delta r_s^1}{2} + \Delta s_s + \Delta r_s^2 \right) + I_s^{wo}(t_s^1) \cdot \Delta t_s + \frac{c_s \cdot (\Delta r_s^2)^2}{2} \right] \cdot hc_s \quad (III.18)$$

Le coût de maintenance est calculé par l'expression suivante :

$$MC_s^{wo} = M_s^{wo}(\Delta t_s) cmc_s + 3pmc_s \quad (III.19)$$

Sachant que, le nombre moyen de pannes durant la période Δt_s est calculé comme suit :

$$M_s^{wo}(\Delta t_s) = \left[\frac{c_s}{c_{max_s}} \left(\int_{t_s^1}^{t_s^2} \lambda n_s(t) dt + \int_{t_s^2}^{t_s^3} \lambda n_s(t) dt \right) + \frac{c_s}{c_{max_s}} \cdot \int_{t_s^1}^{t_s^2} \lambda n_s(t) dt \right] \quad (III.20)$$

- **Le donneur d'ordres**

Pour le donneur d'ordre, l'option de sous-traitance consiste à louer la machine u_s du sous-traitant pour améliorer sa capacité de production. Avec la prise en compte des hypothèses 9 et 15, l'expression de profit du donneur d'ordres est basée sur le revenu réalisé de la production et les coûts de stockage, de maintenance, de production, de pénurie et de sous-traitance :

$$\pi_o^{wo} = Rev_o^{wo} - (ICw_o^o + MC_o^{wo} + PC_o^{wo} + SC^{wo} + OC) \quad (III.21)$$

Avec :

Le revenu brut est exprimé par la formule suivante :

$$Rev_o^{wo} = (cmax_o \cdot \Delta t_o + cmax_s \cdot \Delta s_s) sp_o \quad (III.22)$$

Le coût de production PC_o^{wo} , le coût de pénurie SC^{wo} et le coût de maintenance MC_o^{wo} sont donnés par les expressions III.11, III.12 et III.14.

Le coût total de stockage est écrit comme suit :

$$IC_o^{wo} = \left[\begin{aligned} &cmax_o \cdot \Delta r_o^1 \cdot \left(\frac{\Delta r_o^1}{2} + \Delta s_o + \Delta r_o^2 \right) + I_o^{wo}(t_o^1) \cdot \Delta t_o \\ &+ \frac{cmax_o (\Delta r_o^2)^2}{2} + \Delta s_o \cdot (cmax_o + cmax_s) \cdot \left(\frac{\Delta s_o}{2} + \Delta r_o^2 \right) \end{aligned} \right] \cdot hc_o \quad (III.23)$$

En fin, le coût de sous-traitance est exprimé par la formule (III.24) :

$$OC = \Delta s_s \cdot stc \quad (III.24)$$

III.3.3. Procédure de résolution

Nous utilisons la recherche exhaustive pour résoudre efficacement ces modèles. Tous les tests de ce chapitre ont été effectués sur un ordinateur de bureau, Pentium 4 avec processeur Intel Core 2 Duo CPU (2.93 GHz), et de 2 Go de RAM. Nous avons utilisé MATLAB® pour le développement des différents algorithmes.

Dans ce qui suit, nous donnons les différents algorithmes de notre procédure de résolution analytique.

Algorithme III.1. Algorithme d'optimisation séparée (*Separate Optimization Algorithm – SOA*)

Initialisation

Initialisation des différents paramètres et variables ;
Calculer les différents coûts, revenus et profits du donneur d'ordres et du sous-traitant sans option de sous-traitance ;

Programme principal

ProfitDOMax = $-\infty$;

Pour $S_o^1 = t_o^1$ à $t_o^2 - 1$

Pour $S_o^2 = S_o^1 + 1$ à t_o^2

 Calculer les différents coûts, revenu et profit du donneur d'ordres avec option de sous-traitance ;

Si ProfitDO > ProfitDOMax

 Sauvegarder les meilleurs résultats ;

Fin Si

Fin Pour

Fin Pour

ProfitSTMax = $-\infty$;

Pour $S_s^1 = t_s^1$ à $t_s^2 - 1$

Pour $S_s^2 = S_s^1 + 1$ à $\min \left(\Delta t_s - \left(\frac{d_s - I_s^{wo}(t_s^1)}{cmax_s} \right) + S_s^1, t_s^2 \right)$

 Calculer les différents coûts, revenu et profit du sous-traitant avec option de sous-traitance ;

Si ProfitST > ProfitSTMax

 Sauvegarder les meilleurs résultats ;

Fin Si

Fin Pour

Fin Pour

Algorithme III.2. Algorithme d'optimisation combinée (Combined Optimization Algorithm – COA)

Initialisation

Initialisation des différents paramètres et variables ;
Calculer des différents coûts, revenus et profits du donneur d'ordres et du sous-traitant sans option de sous-traitance ;

Programme principal

ProfitDOMax = - ∞ ;

ProfitSTMax = - ∞ ;

ProfitTotalMax = - ∞ ;

Pour $S_s^1 = t_s^1$ à $t_s^2 - 1$

Pour $S_s^2 = S_s^1 + 1$ à $\min \left(\Delta t_s - \left(\frac{d_s - I_s^{wo}(t_s^1)}{cmax_s} \right) + S_s^1, P_s^2 \right)$

Pour $S_o^1 = t_o^1$ à $t_o^2 - 1$

Pour $S_o^2 = S_o^1 + 1$ à t_o^2

Si $S_s^1 = S_o^1$ & $S_s^2 = S_o^2$

Calculer des différents coûts, revenus et profits du donneur d'ordres et du sous-traitant avec option de sous-traitance ;

Si ProfitTotal > ProfitTotalMax

Sauvegarder les meilleurs résultats ;

Fin Si

Fin Si

Fin Pour

Fin Pour

Fin Pour

Fin Pour

III.3.4. Exemple numérique et analyse de sensibilité

Dans cette sous-section, nous donnons un exemple numérique pour illustrer nos résultats. Considérons deux unités de production, une pour le sous-traitant et l'autre pour le donneur d'ordres. Les données pour le sous-traitant sont tirées de (Dahane et Rezg, 2010). $d_s = 32$ unités ; $\Delta t_s = 30$ jours ; $cmax_s = 2$ unités/jour ; $I_s^j(t_s^1) = 2$ unités.

Pour le donneur d'ordres nous avons opté pour les valeurs suivantes : $d_o = 65$ unités ; $\Delta t_o = 25$ jours ; $cmax_o = 2$ unités/jour ; $I_o^j(t_o^1) = 5$ unités.

Nous considérons que la fonction du taux de défaillance lorsque les deux unités de production fonctionnent avec la cadence maximale $cmax_i$ suit une distribution de Weibull à deux paramètres $\alpha = 2$ et $\beta = 100$. Ainsi, la fonction s'écrit comme suit :

$$\lambda n_i(t) = (2/100). (t/100)$$

Le reste des paramètres est résumés dans le tableau III.1 :

Paramètres [u.m]	Coûts unitaires						Prix de vente et de sous-traitance	
Unité de production	hc_i	pc_i	cmc_i	pmc_i	sc	stc	sp_i	stp
Sous-traitant	0.19	1.5	41	23	-	-	13	35
Donneur d'ordres	0.2	2	40	22	22	35	12	-

Tableau III.1. Paramètres des unités de production.

Pour ces paramètres, les résultats du cas sans intégration de la sous-traitance sont résumés dans le tableau III.2 :

Paramètres	Coûts totaux [u.m]				Profit total [u.m]	Profit de sous-traitance
Unité de production	IC_i^{wo}	MC_i^{wo}	PC_i^{wo}	SC^{wo}	π_i^{wo}	π_i [u.m]
Sous-traitant	96.9	24.845	45	-	249.255	-
Donneur d'ordres	150	24.5	100	220	105.5	-

Tableau III.2. Les coûts générés, les profits et les revenus sans option de sous-traitance.

Sans sous-traitance le profit du sous-traitant est égal à 249.255 u.m. La machine répond à la totalité de la demande, mais la capacité de production n'est pas utilisée de manière optimale. Pour le donneur d'ordres le profit est de 105.5 u.m, mais une situation de pénurie est générée, et génère un coût de pénurie égal à 220 u.m. Ainsi, le profit total réalisé par les deux parties du système sans partenariat est égal à 354.755 u.m.

L'intégration de la sous-traitance implique une nouvelle optimisation du système. Si nous traitons chaque partenaire séparément, (c'est-à-dire l'optimisation séparée (tableau III.3)), le sous-traitant réalise un profit total de 392.095 u.m, il est obtenu pour $S_s^1 = 0$ et $S_s^2 = 5$. Soit un profit tiré de l'intégration de la sous-traitance de 142.84 u.m. ce qui représente 36.43 % du profit total du sous-traitant. Le profit réalisé par le donneur d'ordres est de 265,5 u.m ; il est obtenu pour $S_o^1 = 20$ et $S_o^2 = 25$. Le profit tiré de l'intégration de la sous-traitance est de 160 u.m. soit 60.26 % du profit total du donneur d'ordres. Dans ce cas, le partenariat gagnant – gagnant est impossible parce que chaque entreprise cherche à maximiser son profit sans tenir compte de l'autre partie (Il n'y a pas d'intersection entre les deux plans).

Paramètres	Coûts totaux [u.m]				Profit total [u.m]	Profit de sous-traitance [u.m]
Unité de production	IC_i^{wo}	MC_i^{wo}	PC_i^{wo}	SC^{wo}	π_i^{wo}	π_i
Sous-traitant	82.65	71.255	45	-	392.095	142.84
Donneur d'ordres	155	24.5	100	175	265.5	160

Tableau III.3. Les coûts générés et les profits avec option de sous-traitance – optimisation séparée –

La figure III.2. (a) et (b) montre le profit généré pour le sous-traitant et le donneur d'ordres avec option de sous-traitance – optimisation séparée, comparée avec le profit généré sans sous-traitance.

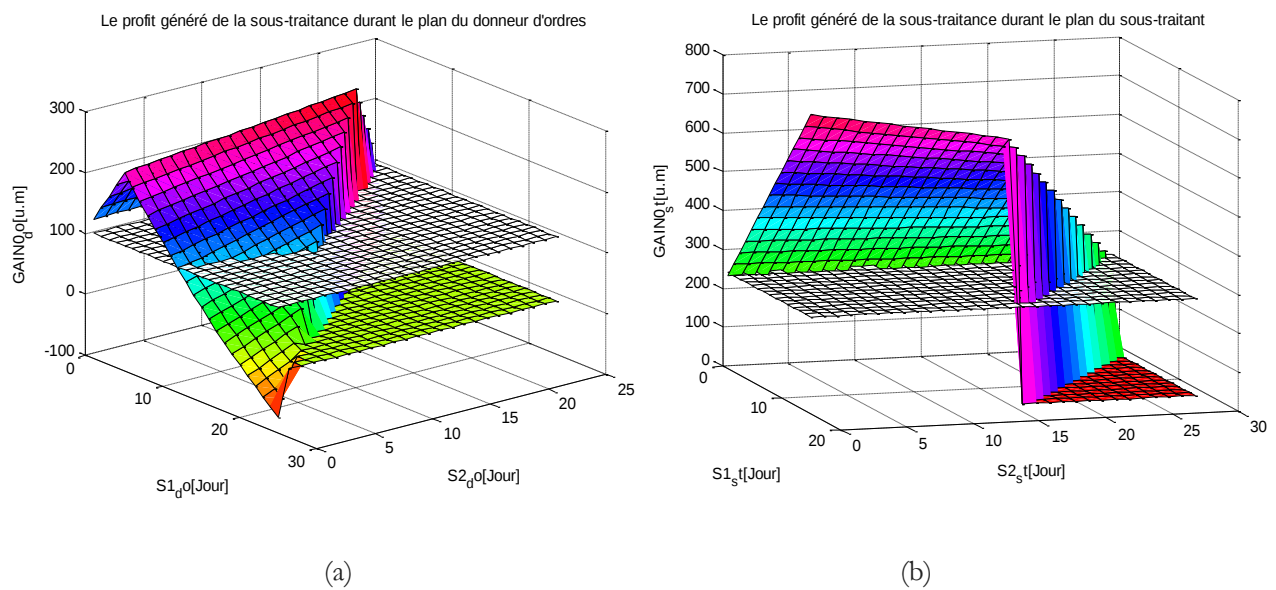


Figure III.2. Les profits générés de la sous-traitance – optimisation séparée –

Cependant, le profit total des deux parties réalisé par l'optimisation combinée (Tableau III.4) sous un partenariat gagnant – gagnant est de 809.467 u.m. Obtenu à $S_o^1 = S_s^1 = 20$ et $S_o^2 = S_s^2 = 25$. Le profit tiré de l'intégration de la sous-traitance dans le système complet est de 279.712 u.m. Soit 34.55 % du profit total du système. Si nous analysons chaque partie à part, nous pouvons constater que : le sous-traitant réalise une augmentation du profit de 54.18 % par rapport au cas sans intégration de la sous-traitance. Pour le donneur d'ordres, une augmentation de 39.74 % a été réalisée. Les résultats confirment les conclusions de Saharidis et al. (2009) que nous avons mentionnés dans le § III.3 (page 53).

Paramètres	Coûts totaux [u.m]					Profit total [u.m]		profit de Sous-traitance [u.m]
	IC_i^{wo}	MC_i^{wo}	PC_i^{wo}	SC^{wo}	OC	π_i^{wo}	$Revst$	
Sous-traitant	105.45	71.583	45	-	-	368.967	175	119.712
Donneur d'ordres	155	24.5	100	0	175	265.5	-	160

Tableau III.4. Les coûts générés et les profits avec option de sous-traitance – optimisation combinée –

La figure III.3. Montre l'intervalle d'équilibre des profits (intervalle de faisabilité et profitabilité) entre le sous-traitant et le donneur d'ordres sous une optimisation combinée, comparé avec l'optimisation séparée.

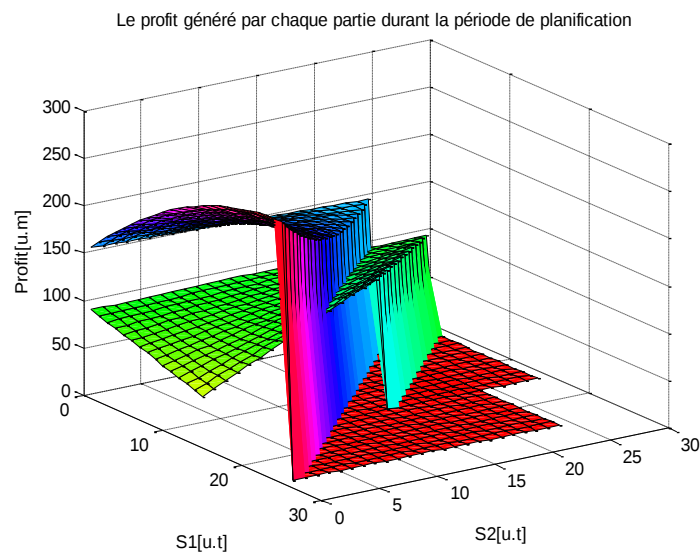


Figure III.3. Intervalle d'équilibre des profits entre le sous-traitant et le donneur d'ordres sous un partenariat gagnant – gagnant.

Enfin, nous effectuons une analyse de sensibilité basée sur les paramètres de sous-traitance (coût, périodicité, ...) pour trouver leurs effets sur le profit individuel réalisé par chaque sous-traitant, ainsi que le profit total réalisé par le donneur d'ordres.

- **Analyse de sensibilité basée sur la périodicité de sous-traitance**

Le tableau III. 5 récapitule les résultats des expériences traitant la variation du profit du sous-traitant, du donneur d'ordres, ainsi que du système complet en fonction de la période de sous-traitance. Les résultats obtenus confirment les lemmes, les conditions de faisabilité et de rentabilité posés par Dahane et Rezg (2010). Nous constatons que le changement (lissage) de la période de sous-traitance a un effet sur le coût de stockage des deux parties (lemme 3 de Dahane et Rezg (2010)), sur les coûts de maintenance du sous-traitant ; et par conséquent, sur les profits réalisés par le sous-traitant et le donneur d'ordres.

Cependant, ce changement n'a pas d'effet sur le profit d'intégration de la sous-traitance (lemme 2 de Dahane et Rezg (2010)), sur les coûts de production des deux parties (lemme 1 de Dahane et Rezg (2010)), sur le profit de sous-traitance, sur le coût de sous-traitance du sous-traitant et du donneur d'ordres, et enfin sur le coût de maintenance du donneur d'ordres (lemme 4 de Dahane et Rezg (2010)).

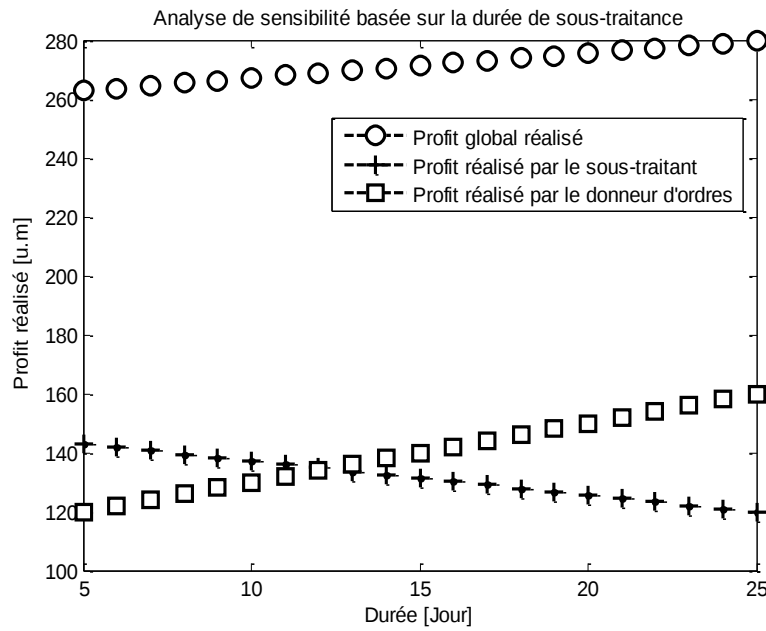


Figure III.4. Variation des profits du sous-traitant, du donneur d'ordres et du profit total en fonction de la période de sous-traitance.

En effet d'après la figure III.4, nous observons que le glissement de la période de sous-traitance sur l'horizon de planification a un effet sur le profit réalisé par le sous-traitant, le donneur d'ordres et le système complet. Il est à noter que la durée de sous-traitance est fixée et calculée en respectant les conditions de sous-traitance (hypothèse 15). Sur l'axe des abscisses, par exemple la coordonnée $S_i^2 = 5$ correspond à la période de sous-traitance ($S_i^1 = 0, S_i^2 = 5$), la coordonnée $S_i^2 = 25$ correspond à la période ($S_i^1 = 20, S_i^2 = 25$) (voir tableau III.5), etc.

Nous observons qu'avant le point d'intersection des profits individuels (point d'équilibre), le profit de la sous-traitance du sous-traitant est supérieur à celui du donneur d'ordres. Le sous-traitant loue sa machine au début de l'horizon, et laisse la satisfaction des demandes principales en dernier. Cela, dont le but de minimiser les coûts de stockages, qui sont très élevés par rapport à celui de la maintenance. Par contre, la situation s'inverse après le point d'équilibre.

Cependant, notre objectif est de maximiser le profit total du système qui augmente en variant la périodicité de la sous-traitance jusqu'à la valeur optimale qui correspond à la période (20 – 25).

Chapitre III : Optimisation de l'intégration des activités de sous-traitance sous contraintes de fiabilité et maintenance : planification sur une seule période

Paramètres		Périodicités de sous-traitance																			
S_t^1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
S_t^2	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Sous-traitant																					
Rev_s^{wo}	416	416	416	416	416	416	416	416	416	416	416	416	416	416	416	416	416	416	416	416	416
IC_s^{wo}	82.65	83.79	84.93	86.07	87.21	88.35	89.49	90.63	91.77	92.91	94.05	95.19	96.33	97.47	98.61	99.75	100.89	102.03	103.17	104.31	105.45
MC_s^{wo}	71.255	71.2714	71.2878	71.3042	71.3206	71.337	71.3534	71.3698	71.3862	71.4026	71.419	71.4354	71.4518	71.4682	71.4846	71.501	71.5174	71.5338	71.5502	71.5666	71.583
PC_s^{wo}	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
$Revst$	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175
π_s^{wo}	142.84	141.6836	140.5272	139.3708	138.2144	137.058	135.9016	134.7452	133.5888	132.4324	131.276	130.1196	128.9632	127.8068	126.6504	125.494	124.3376	123.1812	122.0248	120.8684	119.712
π_s	392.095	390.9386	389.7822	388.6258	387.4694	386.313	385.1566	384.0002	382.8438	381.6874	380.531	379.3746	378.2182	377.0618	375.9054	374.749	373.5926	372.4362	371.2798	370.1234	368.967
Donneur d'ordres																					
SC^{wo}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rev_o^{wo}	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720
IC_o^{wo}	195	193	191	189	187	185	183	181	179	177	175	173	171	169	167	165	163	161	159	157	155
MC_o^{wo}	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5
PC_o^{wo}	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
OC	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175
π_o	225.5	227.5	229.5	231.5	233.5	235.5	237.5	239.5	241.5	243.5	245.5	247.5	249.5	251.5	253.5	255.5	257.5	259.5	261.5	263.5	265.5
Système																					
π_T	617.595	618.4386	619.2822	620.1258	620.9694	621.813	622.6566	623.5002	624.3438	625.1874	626.031	626.8746	627.7182	628.5618	629.4054	630.249	631.0926	631.9362	632.7798	633.6234	634.467
π_T^{wo}	262.84	263.6836	264.5272	265.3708	266.2144	267.058	267.9016	268.7452	269.5888	270.4324	271.276	272.1196	272.9632	273.8068	274.6504	275.494	276.3376	277.1812	278.0248	278.8684	279.712

Tableau III.5. Résultats de l'analyse de sensibilité basée sur les périodicités de sous-traitance.

- **Analyse de sensibilité basée sur le coût de sous-traitance**

Le tableau III. 6 récapitule les résultats des expériences traitant la variation du profit du sous-traitant, du donneur d'ordres, ainsi que du système complet en fonction du prix unitaire de sous-traitance (de 35 u.m à 50 u.m).

En effet, d'après la figure III.5, nous constatons que la variation du prix de sous-traitance a un effet sur le profit de sous-traitance et le coût de sous-traitance ; et par conséquent, sur les profits réalisés par le sous-traitant et le donneur d'ordres. Ils sont inversement proportionnels, donc, il n'a pas d'effet sur le profit total du système complet. De la même manière pour le gain généré par l'intégration des activités de sous-traitance. Pour le reste des paramètres du tableau III.6, nous remarquons que ces paramètres restent inchangés durant les expériences.

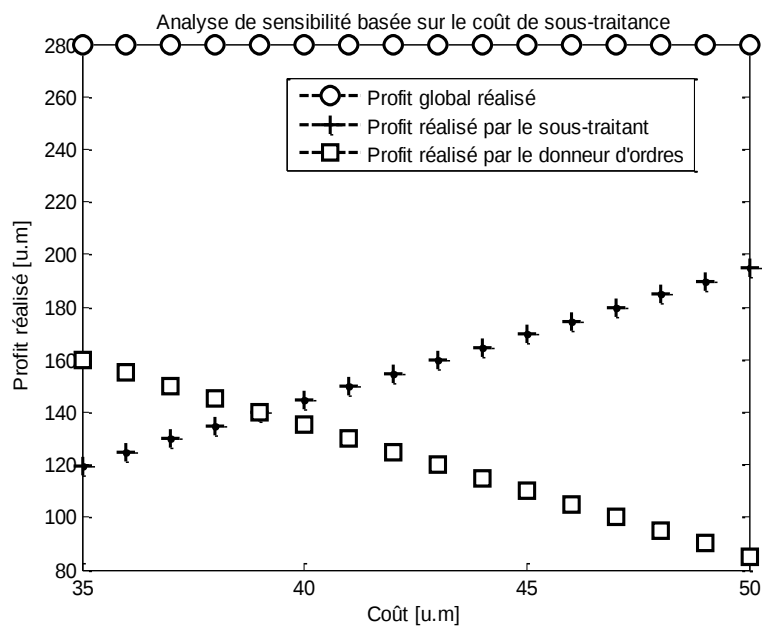


Figure III.5. Variation des profits du sous-traitant, du donneur d'ordres et du profit total en fonction du coût de sous-traitance.

Il est nécessaire que d'autres stratégies de partenariat puissent être adaptées telle que la favorisation de l'une des parties, mais avec une compensation de l'autre.

Paramètres		Coûts de sous-traitance															
		Sous-traitant															
$Revst$		175	180	185	190	195	200	205	210	215	220	225	230	235	240	245	250
Rev_s^{wo}		416	416	416	416	416	416	416	416	416	416	416	416	416	416	416	416
IC_s^{wo}		105.45	105.45	105.45	105.45	105.45	105.45	105.45	105.45	105.45	105.45	105.45	105.45	105.45	105.45	105.45	105.45
MC_s^{wo}		71.583	71.583	71.583	71.583	71.583	71.583	71.583	71.583	71.583	71.583	71.583	71.583	71.583	71.583	71.583	71.583
PC_s^{wo}		45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
π_s^{wo}		368.967	373.967	378.967	383.967	388.967	393.967	398.967	403.967	408.967	413.967	418.967	423.967	428.967	433.967	438.967	443.967
π_s		119.712	124.712	129.712	134.712	139.712	144.712	149.712	154.712	159.712	164.712	169.712	174.712	179.712	184.712	189.712	194.712
		Donneur d'ordres															
OC		175	180	185	190	195	200	205	210	215	220	225	230	235	240	245	250
SC^{wo}		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rev_o^{wo}		720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720
IC_o^{wo}		155	155	155	155	155	155	155	155	155	155	155	155	155	155	155	155
MC_o^{wo}		24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5
PC_o^{wo}		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
π_o^{wo}		265.5	260.5	255.5	250.5	245.5	240.5	235.5	230.5	225.5	220.5	215.5	210.5	205.5	200.5	195.5	190.5
π_o		160	155	150	145	140	135	130	125	120	115	110	105	100	95	90	85
		Système															
π_T^{wo}		634.467	634.467	634.467	634.467	634.467	634.467	634.467	634.467	634.467	634.467	634.467	634.467	634.467	634.467	634.467	634.467
π_T		279.712	279.712	279.712	279.712	279.712	279.712	279.712	279.712	279.712	279.712	279.712	279.712	279.712	279.712	279.712	279.712

Tableau III.6. Résultats de l'analyse de sensibilité basée sur les coûts de sous-traitance.

III.4. Optimisation de la sous-traitance coopérative entre un seul donneur d'ordres et de multiple sous-traitants

L'objectif de cette section est d'étudier une relation donneur d'ordres – sous-traitants, et nous visons à accroître leur efficacité grâce à une plate-forme coopérative de sous-traitance. Nous nous concentrons sur le problème de la sous-traitance coopérative sous contraintes de fiabilité et maintenance.

La plate-forme considérée se compose de multiple sous-traitant indépendant ; chacun possède une seule machine réparable, sujette à des défaillances aléatoires. L'objectif est de développer des modèles mathématiques pour le partage de la demande de sous-traitance entre les sous-traitants, et de trouver les meilleures périodes de sous-traitance. Plusieurs stratégies multi-sous-traitants sont adoptées, à savoir, la stratégie de distribution équitable, la stratégie de sous-traitance concurrentielle et la stratégie de minimisation du coût facturé au donneur d'ordres. Pour chaque modèle, nous développons des algorithmes d'optimisation et nous réalisons des expériences de calcul pour étudier les perspectives de gestion pour les modèles et les algorithmes.

Cette section est organisée comme suit : dans la sous-section suivante, nous présentons le système considéré, les notations et les hypothèses. Les modèles mathématiques ont été développés dans la sous-section 2, tandis que la méthode de résolution est examinée à la sous-section 3. Des exemples numériques sont réalisés dans la sous-section 4 pour illustrer les résultats obtenus.

III.4.1. Description du problème

Nous considérons une plate-forme de sous-traitance composée de n sous-traitants indépendants ; chacun possède une seule machine fournissant des produits à ses clients principaux, sa capacité de production dépasse la demande des clients principaux (Chaque sous-traitant a un plan spécifique de production). La plate-forme reçoit la demande de sous-traitance notée $R = (Q, [S_o^1, S_o^2])$ avec Q la quantité de sous-traitance et $[S_o^1, S_o^2]$ l'intervalle pendant lequel la sous-traitance doit être satisfaite.

III.4.1.1. Notations

Les notations utilisées dans cette section sont :

Indices

i	Indice du sous-traitant.
j	Indice du plan, avec $j = \overline{wo}$ la planification est faite sans sous-traitance, et $j = wo$ la planification est réalisée avec prise en compte de la sous-traitance.

Variables de décision

S_i^1, S_i^2	Les instants de début et de fin de la sous-traitance pour le sous-traitant i .
q_i	La quantité de sous-traitance produite par le sous-traitant i .
Δr_i	La longueur des périodes de production avant et après la sous-traitance pour le sous-traitant i .
Δs_i	La durée de la période de sous-traitance du sous-traitant i .
π_i^j, Rev_i^j	Le profit et le revenu totaux de la production pendant la période Δt_i et le plan j , où $\Delta t_i = \Delta s_i + \Delta r_i$.
IC_i^j, MC_i^j et PC_i^j	Les coûts totaux de stockage, de maintenance et de production pendant la période de planification Δt_i et le plan j .
Π_i	Le profit total réalisé par l'intégration de la sous-traitance du sous-traitant i pendant la période Δt_i .
Π_T	Le profit total réalisé par l'intégration de la sous-traitance par l'ensemble des sous-traitants.

OC_i	Le coût total de sous-traitance facturé au donneur d'ordres par le sous-traitant i pendant la période Δt_i .
TrC_i	Le coût total de transport facturé au donneur d'ordres par le sous-traitant i pendant la période Δt_i .
TC_i et TC_T	Le coût de sous-traitance facturé au donneur d'ordres par le sous-traitant i et l'ensemble des sous-traitants.
$I_i^j(t)$	Le niveau de stock de l'unité du sous-traitant i à l'instant t et la plan j .
$f_i(\cdot)$	La fonction de densité de probabilité associée au taux de défaillance du sous-traitant i .
$F_i(\cdot)$	La fonction de distribution de probabilité associée au taux de défaillance du sous-traitant i .
$\lambda n_i(t)$	La fonction de taux de défaillance nominale de la machine u_i du sous-traitant i , lorsque la machine fonctionne avec la cadence de production maximale (avec $\lambda n_i(0) = 0$).
$M_i^j(T)$	Le nombre moyen de défaillances au cours de l'intervalle T du sous-traitant i et le plan j .

Paramètres

t_i^1, t_i^2	Les instants de début et de fin de l'intervalle de production du sous-traitants i .
S_0^1, S_0^2	Les instants de début et de fin de l'intervalle de sous-traitance pendant lequel la requête doit être satisfaite, pour le plan de production du donneur d'ordres.
$c_i(t)$	Taux de production de la machine u_i à l'instant t du sous-traitant i .
α_i, β_i	Paramètres de la distribution de défaillance de la machine du sous-traitant i .
d_i	La demande principale (prioritaire) adressées au sous-traitant i .
Q	La quantité de pénurie du donneur d'ordres (manque de capacité).
$cmax_i$	Taux de production maximal de la machine du sous-traitant i .
hc_i	Le coût de stockage d'une unité de produit pendant une unité de temps pour le sous-traitant i .
pc_i, sp_i	Le coût de production et le prix de vente d'une unité produite par le sous-traitant i .
cmc_i, pmc_i	Le coût d'une réparation minimale et d'une intervention de maintenance préventive par le sous-traitant i .
stp_i	Le prix de sous-traitance du sous-traitant i pendant une unité de temps (payé par le donneur d'ordres, quand il fait appel à la machine).
dt_i	La durée de transport moyenne entre le sous-traitant i et le donneur d'ordres.
tc_i	Le coût de transport de la machine du sous-traitant i durant une unité de temps.

III.4.1.2. Hypothèses

Les hypothèses suivantes sont considérées :

1. La maintenance des machines est effectuée par les propriétaires. La loi de dégradation des machines est de type Weibull, dont le taux de défaillance est croissant avec l'usage. Les machines sont sous contrôle d'un point de vue de la maintenance (quel que soit sa situation, chez le donneur d'ordres ou le sous-traitant).
2. La durée des réparations minimales et des actions de maintenances préventives est considérée négligeable.
3. Les machines sont soumises à des politiques de maintenance préventive pour réduire l'occurrence des pannes. Les périodes d'indisponibilité des machines suite à des arrêts de maintenance sont supposées négligeables (hypothèse 2), et par conséquent, n'engendrent pas une perte de la demande.
4. Chaque sous-traitant a son propre plan de production qui est indépendant des autres sous-traitants.
5. Le choix de la période de sous-traitance est imposé par le donneur d'ordres.
6. Les défaillances sont détectées instantanément.

7. Les actions de maintenance préventive sont considérées comme parfaites. Chaque action restaure la machine à la configuration "As Good As New".
8. Les produits sont impérissables avec le temps.
9. Le sous-traitant peut répondre à des requêtes qui ne nécessitent pas de passer par la plate-forme (demandes directes).
10. Le plan de production peut commencer avec un niveau de stock non nul : $(I_i^j(t_i^1) \geq 0)$.
11. L'ensemble des sous-traitants peuvent satisfaire le manque de capacité du donneur d'ordres.

III.4.2. Modèles mathématiques

III.4.2.1. Le modèle du plan de production du sous-traitant i sans option de sous-traitance

Sans option de sous-traitance, la politique de contrôle de production du sous-traitant consiste à construire un stock de produits finis, avec un taux de production c_i , pour satisfaire la demande directe d_i de son client principal.

Nous reprenons les modèles de planification du sous-traitant sans et avec option de sous-traitance des § III.3.2.1 et III.3.2.2. Dans ces derniers, l'indice représente la machine du donneur d'ordres ou du sous-traitant. Cependant, dans cette sous-section l'indice i identifie le sous-traitant (prise en compte de l'aspect multiple sous-traitant).

Nous avons :

$$c_i = \frac{(d_i - I_i^{\overline{w0}}(t_i^1))}{\Delta t_i} \quad (III.25)$$

C'est-à-dire, la machine produit exactement la quantité $d_i - I_i^{\overline{w0}}(t_i^1)$.

Pour le calcul du profit réalisé par le sous-traitant nous utilisons l'expression suivante :

$$\pi_i^{\overline{w0}} = Rev_i^{\overline{w0}} - (IC_i^{\overline{w0}} + MC_i^{\overline{w0}} + PC_i^{\overline{w0}}) \quad (III.26)$$

Avec :

Le revenu brut du sous-traitant i est exprimé par la formule suivante :

$$Rev_i^{\overline{w0}} = sp_i \cdot d_i \quad (III.27)$$

Le coût de production est exprimé par l'équation suivante :

$$PC_i^{\overline{w0}} = (d_i - I_i^{\overline{w0}}(t_i^1)) \cdot pc_i \quad (III.28)$$

Le coût de stockage de chaque sous-traitant est donné comme suit :

$$IC_i^{\overline{w0}} = [I_i^{\overline{w0}}(t_i^1) \cdot \Delta t_i + (d_i - I_i^{\overline{w0}}(t_i^1)) \cdot \frac{\Delta t_i}{2}] \cdot hc_i \quad (III.29)$$

Le coût de maintenance de chaque sous-traitant est calculé par l'expression suivante :

$$MC_i^{\overline{w0}} = M_i^{\overline{w0}}(\Delta t_i) \cdot cmc_i + pmc_i \quad (III.30)$$

Où, le nombre moyen de pannes durant la période Δt_i est calculé comme suit :

$$M_i^{\overline{wo}}(\Delta t_i) = \frac{c_i}{c_{max_i}} \cdot \int_{t_i^1}^{t_i^2} \lambda n_i(t) dt \quad (III.31)$$

III.4.2.2. Le modèle du plan de production du sous-traitant i après l'insertion de la tâche de sous-traitance

L'insertion de la tâche de sous-traitance exige une nouvelle optimisation du plan de production, basée sur de nouveaux taux de production. Durant les périodes avant et après insertion de la tâche de sous-traitance, le sous-traitant adopte un taux de production c_i . Cependant, durant la période de sous-traitance ce taux est maximal.

L'expression du profit du sous-traitant est basée sur les revenus générés de la production et de la sous-traitance, et les coûts engendrés du stockage, de maintenance, et de production. Elle est exprimée comme suit :

$$\pi_i^{wo} = Rev_i^{wo} + Revst_i - (IC_i^{wo} + MC_i^{wo} + PC_i^{wo} + TrC_i) \quad (III.32)$$

Avec :

Le revenu brut Rev_i^{wo} et le coût de production PC_i^{wo} sont exprimés respectivement par les formules (III.27) et (III.28) remplaçons $\overline{wo}$ par wo .

Le revenu dégagé de la sous-traitance est calculé comme suit :

$$Revst_i = \Delta s_i \cdot stp_i \quad (III.33)$$

La particularité dans ce cas c'est l'ajout d'un coût de transport. Le coût de transport de la machine entre le sous-traitant et le donneur d'ordres est exprimé comme suit :

$$TrC_i = dt_i \cdot tc_i \quad (III.34)$$

Le coût de stockage est donné par l'équation (III.35) :

$$IC_i^{wo} = \left[(c_i \cdot \Delta r_i^1) \cdot \left(\frac{\Delta r_i^1}{2} + \Delta s_i + \Delta r_i^2 \right) + I_i^{wo}(t_i^1) \cdot \Delta t_i + \frac{c_i (\Delta r_i^2)^2}{2} \right] \cdot hc_i \quad (III.35)$$

Le coût de maintenance est calculé par l'expression suivante :

$$MC_i^{wo} = M_i^{wo}(\Delta t_i) \cdot cmc_i + 3 pmc_i \quad (III.36)$$

Sachant que, le nombre moyen de pannes durant la période Δt_s est calculé comme suit :

$$M_i^{wo}(\Delta t_i) = \left[\frac{c_i}{c_{max_i}} \cdot \int_{t_i^1}^{S_i^1} \lambda n_i(t) dt + \int_{S_i^1}^{S_i^2} \lambda n_i(t) dt + \frac{c_i}{c_{max_i}} \cdot \int_{S_i^2}^{t_i^2} \lambda n_i(t) dt \right] \quad (III.37)$$

III.4.3. Procédures de résolution

Plusieurs stratégies peuvent être envisagées au niveau de la plate-forme. Dans chacune d'elle, nous cherchons à déterminer la meilleure requête à envoyer pour chaque sous-traitant i . Parmi ces stratégies nous pouvons citer, celle de la maximisation du profit total du système ou de la minimisation de la facture à envoyer au donneur d'ordres. Ainsi, des stratégies de partage peuvent être distinguées.

• **Stratégie 1 : "stratégie de distribution concurrentielle"**

Dans cette stratégie, le problème de prise de décision est de partager la requête de sous-traitance entre les sous-traitants et de trouver les meilleures périodes de sous-traitance. Le critère d'optimisation représenté par l'expression (III. 38) (fonction objectif) est la maximisation du profit réalisé par tous les sous-traitants, sous les contraintes suivantes. La contrainte d'inégalité (III. 39) indique que le sous-traitant sous-traite au moins pendant une unité de temps. La deuxième contrainte prend en considération le fait que le sous-traitant réserve une capacité (intervalle de temps) pour satisfaire la demande des clients directs (inégalité III. 40). La limitation des quantités à sous-traiter est définie par la troisième contrainte (inégalité III. 41).

Les contraintes (III. 42) et (III. 43) sont relatives aux instants de début et de fin de la durée de sous-traitance (à savoir, la pénurie n'est pas autorisée). La contrainte d'égalité (III. 44) indique que la surproduction n'est pas permise. Le sous-traitant i produit exactement la quantité envoyée par la plateforme avec le taux de production maximal. Sachant que, le donneur d'ordres envoie à la plateforme exactement le manque de capacité.

La fonction objectif de cette stratégie s'écrit comme suit :

$$\max \Pi_T = \max \sum_{i=1}^n \Pi_i = \max \sum_{i=1}^n (\pi_i^{wo} - \pi_i^{\overline{wo}}) \quad (III. 38)$$

Sous les contraintes suivantes :

$$S_i^2 - S_i^1 \geq 1 \quad (III. 39)$$

$$S_i^2 \leq \left(S_i^1 + \Delta t_i - \left((d_i - I_i^j(t_i^1)) / cmax_i \right) \right) \quad (III. 40)$$

$$0 \leq \Delta S_i \cdot cmax_i \leq Q \quad (III. 41)$$

Tel que : $q_i = \Delta S_i \cdot cmax_i$

$$\max(t_i^1, S_o^1) \leq S_i^1 \leq (t_i^2 - 1) \quad (III. 42)$$

$$\max(t_i^1, S_o^1) + 1 \leq S_i^2 \leq \min(t_i^2, S_o^2) \quad (III. 43)$$

$$\sum_{i=1}^n \Delta S_i \cdot cmax_i = Q \quad (III. 44)$$

Tel que : $Q = d_o - I_o^j(t_o^1) - \Delta t_o \cdot cmax_i$

• **Stratégie 2 : "stratégie de minimisation de la facture à envoyer au donneur d'ordres"**

Le problème de prise de décision de cette stratégie est de partager la demande de sous-traitance entre les sous-traitants et de trouver les meilleures périodes de sous-traitance. Le critère d'optimisation (la fonction objectif III.45) est la minimisation du coût total à la charge du donneur d'ordres.

$$\min: TC_T = \min \sum_{i=1}^n TC_i = \min \sum_{i=1}^n \Delta S_i \cdot stp_i \quad (III. 45)$$

Cette stratégie est basée sur les mêmes contraintes que celles de la première, de plus, nous avons ajouté la condition nécessaire pour la rentabilité de la sous-traitance. Elle est définie par :

$$\pi_i^{wo} - \pi_i^{\overline{wo}} > 0 \quad (III. 46)$$

Pour ces deux premières stratégies, la structure du chromosome utilisée par nos procédures d'optimisation basées sur les algorithmes génétiques est illustrée par la figure III.6 :

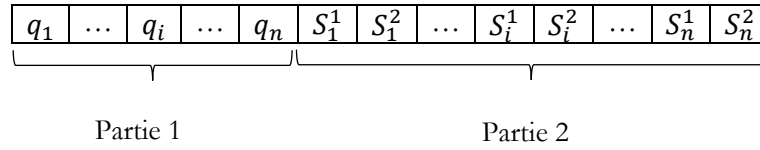


Figure III.6. Structure du chromosome pour les stratégies 1 et 2.

Chaque gène de la première partie du chromosome représente la quantité de sous-traitance adressée pour chaque sous-traitant i . Dans la deuxième partie du chromosome, les gènes représentent les instants de début et de fin de l'intervalle de sous-traitance pour chaque sous-traitant.

Dans ce chapitre nous ne détaillons pas les différents opérateurs génétiques. Parce que nous avons utilisé les solveurs des Algorithmes Génétiques (*Genetic Algorithms* – GAs) de la boîte à outils optimisation globale (*Global optimization Toolbox* – GOT) du logiciel de calcul mathématique Matlab, avec personnalisation des fonctions codage, interprétation et évaluation.

- **Stratégie 3 : "stratégie de distribution équitable et proportionnelle"**

Pour cette stratégie, le problème de prise de décision est de partager équitablement la requête de sous-traitance entre les sous-traitants, et de trouver les meilleures périodes de sous-traitance. Le critère d'optimisation est la maximisation du profit réalisé par tous les sous-traitants.

$$\max \Pi_T = \max \sum_{i=1}^n \Pi_i = \max \sum_{i=1}^n (\pi_i^{wo} - \pi_i^{\bar{wo}}) \quad (III.51)$$

Deux options de partage sont prises en compte :

Pour la première option, nous prenons :

$$q_i = Q/n \quad (III.47)$$

Pour la deuxième option, nous considérons q_i proportionnelle à la capacité réservée à la sous-traitance secondaire.

$$q_i = \frac{\left((d_i - I_i^j(t_i^1)) / cmax_i \right) cmax_i Q}{\sum_{i=1}^n \left((d_i - I_i^j(t_i^1)) / cmax_i \right) cmax_i} \quad (III.48)$$

Chaque option donnera lieu à une variante de la stratégie 3 respectivement les stratégies 3.1 et 3.2.

Les expressions de contraintes "(III.38),(III.39),(III.41),(III.42) et (III.43)" sont prises en compte dans ces stratégies.

Pour ces dernières, la structure des chromosomes est un peu différente que celle des deux autres stratégies. Elle a la forme suivante (figure III.7) :

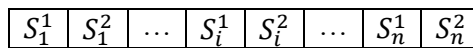


Figure III.7. Structure du chromosome de la stratégie 3.

Chaque gène du chromosome représente les instants de début et de fin de l'intervalle pour insérer la tâche de sous-traitance.

Il est difficile de résoudre les modèles mentionnés ci-dessus en utilisant les techniques d'optimisation classiques. La complexité augmente également avec l'augmentation du nombre de sous-traitant ou des variables de décision. Dans de tels cas, les heuristiques et les algorithmes évolutionnaires ont été largement

utilisés par de nombreux chercheurs. Ainsi, nous avons utilisé les algorithmes génétiques pour résoudre efficacement les modèles proposés.

Un algorithme génétique (AG) est une métaheuristique de recherche inspirée de la théorie de l'évolution naturelle. Les concepts de base des AGs ont été introduits par Holland en 1975. Ces algorithmes sont très efficaces pour générer des solutions globales pour des problèmes complexes avec des temps de calcul raisonnables (Liu et al. 2008). Les algorithmes génétiques ont été reconnus comme une méthode d'optimisation puissante et largement applicable, en particulier pour résoudre des problèmes d'optimisation globaux et des problèmes NP-difficiles (Michalewicz, 1996). Une revue de ces problèmes a été faite par Michalewicz (1996).

III.4.4. Exemples numériques et étude comparative

Les données d'entrée suivantes (tableau III.7) ont été utilisées pour illustrer notre approche et trouver la meilleure stratégie de partage.

Considérons un donneur d'ordres et quatre sous-traitants. Le donneur d'ordres envoie une requête de sous-traitance $R = (240, [10,50])$ à la plate-forme.

Nous considérons pour chaque sous-traitant, que la fonction de taux de défaillance de l'unité de production lorsque celle-ci fonctionne avec la cadence maximale $cm_{\max_i}$, suit une distribution de Weibull à deux paramètres α_i et β_i . Ainsi, la fonction s'écrit comme suit :

$$\lambda n_i(t) = (\alpha_i/\beta_i). (t/\beta_i)^{(\alpha_i-1)}.$$

Sous-traitant (i)	1	2	3	4
$cm_{\max_i}$ [u/u.t]	2	3	2	4
α_i	2	2.94	2.98	2.85
β_i	100	126	120	134
d_i [u]	20	40	35	90
$I_i^j(t_i^1)$ [u]	5	12	16	30
dt_i [u.t]	0.08	0.1	0.13	0.2
t_i^1 [u.t]	8	8	8	8
t_i^2 [u.t]	50	50	55	55
hc_i [u.m./u/u.t]	0.18	0.2	0.22	0.25
pc_i [u.m./u]	2	2.7	2.05	3.5
cmc_i [u.m./int]	40	55	38.75	60
pmc_i [u.m./int]	22	29	23.25	36
tc_i [u.m./u.t]	3.75	3.95	3.98	3.95
stp_i [u.m./u]	13	15	12.5	19.5
sp_i [u.m./u]	18	20	18.7	22

Tableau III.7. Données des sous-traitants

Le tableau III.8 récapitule les principaux paramètres des algorithmes génétiques, et leurs valeurs associées utilisées dans toutes les expériences. Il est à noter que tous les paramètres sont restés constants pour les différentes stratégies. Ces paramètres sont dimensionnés après une campagne de tests et d'expériences.

Paramètres	Valeurs
Nombre de générations	100
Taille de la population	60
Nombre d'élites	7
Taux de croisement	80%
Intervalle de migration	20
Limite de temps	$+\infty$
Limite de la fonction objectif	$-\infty$
La fonction d'approximation de la fonction objectif	10^{-6}
La fonction d'approximation des contraintes	10^{-6}
Pénalité initiale	10
Facteur de pénalité	100

Tableau III.8. Configuration des valeurs de paramètres utilisés par le solveur GA du GOT du Matlab

Le tableau III.9 résume les différentes fonctions utilisées par le solveur GA de l'outil d'optimisation globale du Matlab. À cause de contraintes de compatibilités, ces fonctions sont configurées par défaut.

Fonction	Désignation
Direction de migration	En avant "forward"
Fonction de création	Uniforme
Mise en échelle	Par rang
Sélection	Stochastique uniforme
Croisement	Dispersés "Scattered Crossover"
Mutation	Gaussienne

Tableau III.9. Configuration du solveur GA du GOT du Matlab.

Le tableau III.10 résume les résultats de la stratégie 1, qui consiste à maximiser le profit total de tous les sous-traitants.

$S_i^1-S_i^2$	22-35	22-39	12-40	13-40
q_i	26	51	56	108
Π_T	4796.3257			

Tableau III.10. Les périodes et les quantités de sous-traitance – stratégie 1

La figure III.8 représente l'évolution de la meilleure valeur de la fonction objectif, ainsi que la valeur moyenne à chaque génération. Nous remarquons bien la convergence de l'algorithme génétique à partir de la génération 65.

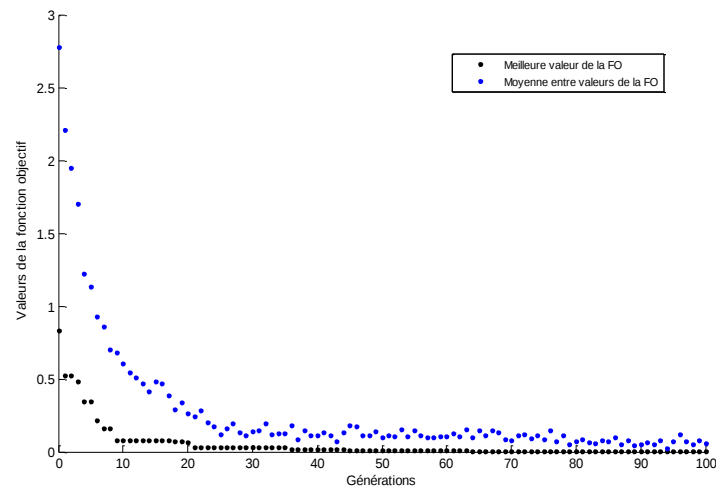


Figure III.8. Variation de la meilleure valeur, et de la valeur moyenne de la fonction objectif en fonction des générations – stratégie 1 –

D'une manière analogue que pour la stratégie 1, nous résumons dans le tableau III.11 les résultats de la stratégie 2, stratégie qui vise à minimiser la facture à envoyer au donneur d'ordres. Cette stratégie permet de générer un coût total de sous-traitance égale à 700 u.m.

$S_1^i - S_2^i$	14-24	12-38	29-44	15-43
q_i	20	79	30	118
TC_T	700			

Tableau III.11. Les périodes et les quantités de sous-traitance – stratégie 2 –

La figure III.9 représente l'évolution de la meilleure valeur de la fonction objectif, ainsi que la valeur moyenne à chaque génération pour la stratégie de minimisation de la facture à envoyer au donneur d'ordres.

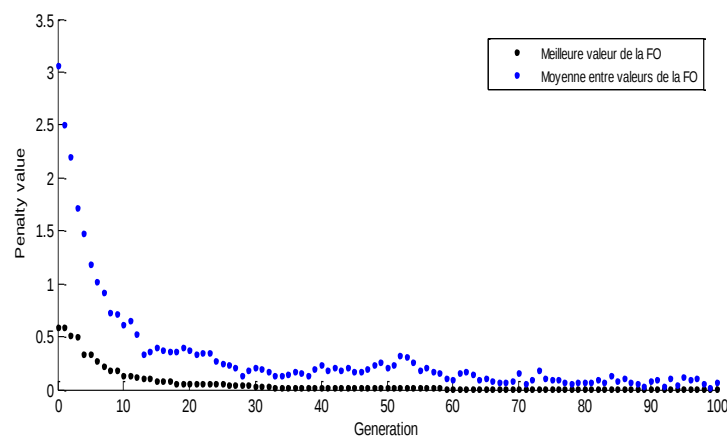


Figure III.9. Variation de la meilleure valeur, et de la valeur moyenne de la fonction objectif en fonction des générations – stratégie 2 –

Les tableaux III.12 et III.13 récapitulent respectivement les résultats des stratégies 3.1 et 3.2 de distribution équitable dont l'objectif est de maximiser le profit total de tous les sous-traitants.

$S_i^1-S_i^2$	14-44	16-36	15-45	11-26
q_i	60	60	60	60
Π_T	4593,7936			

Tableau III.12. Les périodes et les quantités de sous-traitance – stratégie 3.1

$S_i^1-S_i^2$	16-46	22-42	12-42	11-26
q_i	30	55	37	118
Π_T	4571,3123			

Tableau III.13. Les périodes et les quantités de sous-traitance – stratégie 3.2

D'après les résultats obtenus ci-dessus, nous concluons que :

- Selon le critère de maximisation du profit total des sous-traitants, il est évident que la stratégie 1 est la meilleure ; elle génère un profit supplémentaire de 4.4 % par rapport à la stratégie 3.1, et de 4.92 % par rapport à la stratégie 3.2. Cependant, si nous cherchons à trouver un équilibre entre les sous-traitants, une des stratégies de partage équitable sera la mieux adaptée.
- D'autre part, si on cherche à minimiser la facture à envoyer au donneur d'ordres, nous adoptons la stratégie 2.
- Cependant, le premier critère d'optimisation, penche vers les sous-traitants. Alors que le deuxième critère, n'optimise que le coté donneur d'ordres. Comme perspective à cette recherche, nous envisageons une optimisation multi-objectif.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le problème d'optimisation de l'intégration des activités de sous-traitance pour le cas de période unique de production. Dans la première section de ce chapitre, nous avons développé un modèle mathématique pour trouver un équilibre entre un seul donneur d'ordres et un seul sous-traitant. Des algorithmes de recherche exhaustive ont été développés pour définir un intervalle de profitabilité afin de garantir un rapport gagnant- gagnant. Les différents paramètres du contrat qui arrangent les deux parties sont déterminés (durée, date de début et de fin, le taux de production et de sous-traitance, ...). Pour montrer la robustesse de nos modèles, nous avons réalisé une analyse de sensibilité basée sur les paramètres de sous-traitance (coût, périodicité, ...) pour déterminer leurs effets sur le profit par chaque acteur et tout le système.

Dans la deuxième section, nous avons étendu le problème de la première section, en un problème de sous-traitance coopérative entre un donneur d'ordres et plusieurs sous-traitants. Des modèles mathématiques et des optimisations basées sur les algorithmes génétiques sont développés, dans le but de partager une requête de sous-traitance envoyée à une plate-forme de sous-traitance composée de multiples sous-traitants indépendants. L'objectif est de définir les dates de début et de fin des contrats, ainsi que les quantités à réserver pour chaque sous-traitant. Plusieurs stratégies ont été proposées, à savoir, la stratégie de distribution concurrentielle entre les sous-traitants, stratégie de minimisation de la facture du donneur d'ordres, et la stratégie de partage équitable entre les sous-traitants. Plusieurs critères d'optimisation sont considérés, à savoir, la maximisation du profit des sous-traitants, la minimisation du coût à facturer au donneur d'ordres.

Chapitre IV

Plannification de la production et des capacités avec option de sous-traitance: de l'étude sous contraintes de fiabilité et maintenance simples à l'étude sous des politiques de maintenance intégrée

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons le problème de balancement entre deux modes alternatifs de production : la production en interne et la sous-traitance. Nous entamons ce chapitre par l'étude de ce problème sous des contraintes de fiabilité et de maintenance simples, en étendant l'étude du chapitre précédent dans un contexte multi-périodes. Ensuite, nous présentons une autre extension de cette étude sous une politique de maintenance intégrée.

Ce chapitre est organisé en deux grandes sections. Dans la première section, nous étudions le problème d'équilibrage entre deux modes de production : la production en interne et la sous-traitance, sous contraintes de fiabilité et de maintenance dans un contexte multi-périodes. Le système de production du donneur d'ordres considéré est constitué d'une seule machine réparable, sujette à des défaillances aléatoires, produisant un seul type de produit. Le donneur d'ordres vise à satisfaire les demandes du marché, avec des taux de production variables, durant des périodes non homogènes, en sous-traitant l'intégralité ou une partie de la production. Nous considérons que le sous-traitant produit pour le donneur d'ordres et offre un barème de prix (plusieurs niveaux de production) qui dépend des taux de production. L'objectif principal est de déterminer simultanément pour chaque période, les taux de production en interne et de sous-traitance afin de satisfaire toutes les demandes, tout en minimisant le coût total généré du donneur d'ordres, y compris les coûts de production, de stockage, de maintenance, de sous-traitance et de pénurie. Une procédure d'optimisation basée sur les algorithmes génétiques est proposée. Dans la dernière partie de cette section nous présentons des expériences numériques pour étudier les perspectives de gestion pour le modèle et la procédure développée.

La deuxième section de ce chapitre est consacrée à l'étude du problème de la planification des capacités avec possibilités de sous-traitance, sous contraintes de fiabilité et de maintenance dans le cadre d'une relation de sous-traitance caractérisée par un seul donneur d'ordres – plusieurs-sous-traitants. Dans cette section, les services de sous-traitance sont proposés au donneur d'ordres, avec des prix de vente fixes par un ensemble de sous-traitants indépendants formant une plate-forme. L'objectif est de déterminer simultanément le plan intégré optimale de production interne/maintenance et le plan de sous-traitance tout en minimisant les coûts totaux du donneur d'ordres durant l'horizon de planification. Nous développons un modèle mathématique et une procédure d'optimisation à base d'algorithmes génétiques pour résoudre le problème considéré. Afin de montrer l'applicabilité de notre approche, plusieurs expériences sont réalisées.

IV.2. Optimisation intégrée production interne-sous-traitance sous contraintes de fiabilité et de maintenance

Dans cette première section, nous étudions le problème d'optimisation des activités de production interne-sous-traitance dans une chaîne logistique à deux échelons sous contraintes de fiabilité et maintenance.

La section est organisée comme suit : dans la sous-section suivante nous présentons le système considéré, les notations et les hypothèses. Le modèle mathématique global est développé dans la sous-section 2. La procédure de résolution est examinée dans la sous-section 3. La sous-section 4 présente et discute un exemple numérique.

IV.2.1. Description du problème

Il s'agit de déterminer le plan optimal mixte production interne – sous-traitance, selon un point de vue du donneur d'ordres, qui entretient une relation avec un sous-traitant dans un contexte multi-période. La figure IV.1 montre la structure de la chaîne logistique que nous étudions tout au long de cette section.

L'entreprise du donneur d'ordres est composée d'une seule machine réparable, sujette à des défaillances aléatoires, produisant un seul type de produit. Elle doit répondre à la demande de ses clients avec des taux de production variables durant des périodes non homogènes k ($k = 1, \dots, N$).

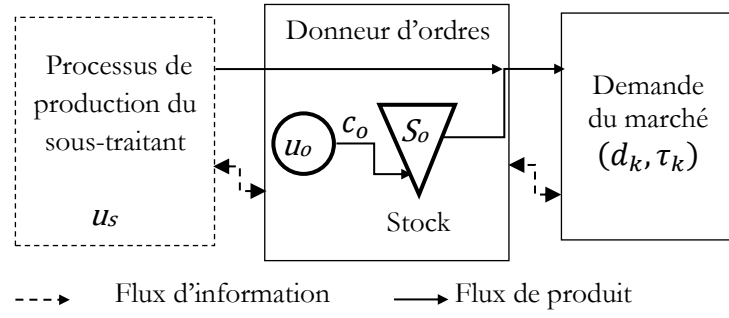


Figure IV.1 La structure de la chaîne logistique considérée.

Du point de vue fiabilité et maintenance, le fabricant produit avec des taux de production variables pour chaque période de production. Dans ce contexte, nous considérons une dépendance entre le taux de défaillance et le taux de production. Le coût de production dépend du taux de production adopté (barème du coût de sous-traitance). Ainsi, utiliser la machine avec des taux de production élevés engendre une dégradation importante de la machine, et par conséquent nécessite des coûts supplémentaires (le nombre d'actions de maintenance augmente en fonction de la cadence). A ce titre, dans (Haoues et al. 2013), les auteurs ont utilisé un modèle qui tient compte de la dépendance entre le taux de production et le taux de défaillance.

Soit $\lambda_k(t)$ le taux de défaillance au cours de la période k ($k \geq 1$), il dépend de la cadence de production $c_{l,k}$. Pour un intervalle $T = [t_1, t_2]$, le taux de défaillance est défini par l'expression suivante :

$$\lambda_k(t) = \frac{c_{l,k}}{c_{max}} \lambda_n(t) \quad (IV.1)$$

$\lambda_n(t)$ représente la fonction nominale de taux de défaillance lorsque la machine produit avec le taux de production maximal c_{max} .

Chaque période k de l'horizon H est caractérisée par son propre taux de production $c_{l,k}$ établi à partir du plan de production préliminaire. Le taux de défaillance change durant chaque intervalle en fonction du taux de production choisi.

Soit c_1, c_2 deux taux de production différents, sachant que $c_1 < c_2$. Selon l'hypothèse de dépendance entre le taux de panne et le taux de production, nous avons donc :

$$\lambda_1(t) < \lambda_2(t).$$

$$\text{Ainsi, } MC_1 < MC_2.$$

Avec MC_i le coût de maintenance :

$$MC_k = cmc.M(k) + Npm.pmc \quad (IV.2)$$

Par conséquent, les taux de production internes influent sur le coût total généré. Rappelons que $\lambda(t)$ est le taux de défaillance d'une machine à l'instant t :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} \quad (IV.3)$$

Où $f(t)$ est la fonction de densité de probabilité de défaillance de la machine, $F(t)$ est sa fonction de distribution cumulative :

$$F(t) = \int_0^t f(x)dx \quad (IV.4)$$

Du point de vue sous-traitance, l'entreprise du sous-traitant est constitué par une seule machine réparable, sujette à des défaillances aléatoires. Elle produit pour le donneur d'ordres sous des obligations contractuelles. Le sous-traitant offre des taux de sous-traitance, chaque taux correspond à un coût spécifique.

IV.2.1.1. Notations

Soit un horizon H de planification du donneur d'ordres, comprenant N périodes de durées non homogènes $\Delta\tau_k$ ($k = 1, \dots, N$).

Ci-dessous, nous présentons les notations qui seront utilisées tout au long de cette section :

Indices

k	Indice de période.
l	Le niveau dans le barème des coûts de sous-traitance.

Variables de décision

c_k^o	Taux de production interne du donneur d'ordres dans la période k .
$c_{l,k}^s$	Taux de production du sous-traitant avec le niveau l dans le barème des prix de vente dans la période k .
I_k	Le niveau de stock du donneur d'ordres à la fin de la période k .
$\lambda n(t)$	La fonction de taux de défaillance nominale de la machine, si elle fonctionne avec la cadence de production maximale.
$\lambda(t)$	La fonction de taux de défaillance de la machine à l'instant t .
$M(T)$	Le nombre moyen de défaillances au cours de l'intervalle T .
PC_k, PC	Le coût total de production du donneur d'ordres respectivement pour la période k et pour tout l'horizon.
IC_k, IC	Le coût total de stockage du donneur d'ordres respectivement pour la période k et pour tout l'horizon.
MC_k, MC	Le coût total de maintenance du donneur d'ordres respectivement pour la période k et pour tout l'horizon.
SC_k, SC	Le coût total de pénurie du donneur d'ordres respectivement pour la période k et pour tout l'horizon.
OC_k, OC	Le coût total de sous-traitance du donneur d'ordres respectivement pour la période k et pour tout l'horizon.

Paramètres

d_k	La demande des clients du donneur d'ordres pendant la période k .
τ_k	Délai de livraison de la demande adressée au donneur d'ordres dans la période k .
Npm	Le nombre d'actions de maintenance préventive du donneur d'ordres.
α, β	Paramètres de la distribution de défaillance de la machine du donneur d'ordres.
pc	Le coût unitaire de production du donneur d'ordres.
hc	Le coût unitaire de stockage du donneur d'ordres.
sc	Le coût de pénurie d'une unité pour le donneur d'ordres.
pmc	Le coût d'une action de maintenance préventive du donneur d'ordres.
cmc	Le coût d'une action de réparation minimale du donneur d'ordres.
oc_l	Le coût unitaire de sous-traitance et son niveau dans le barème des coûts de sous-traitance.
$cmax^o$	La capacité de production maximale du donneur d'ordres.

$cmax^s$ La capacité de production maximale du sous-traitant.
 $cmin^s$ La capacité de production minimale du sous-traitant.

IV.2.1.2. Hypothèses

Le problème considéré est traité on prend en considération les hypothèses suivantes :

1. La maintenance de la machine du donneur d'ordres est à sa charge. Sa loi de dégradation est de type Weibull, dont le taux de défaillance est croissant avec l'usage. La machine est donc sous contrôle du point de vue de la maintenance.
2. La durée des réparations minimales et des actions de maintenances préventives est considérée négligeable.
3. La machine est soumise à une politique de maintenance préventive dont le but est de réduire l'occurrence des défaillances. Les périodes d'indisponibilité des machines suite à des arrêts de maintenance sont supposées négligeables (hypothèse 2), et par conséquent, n'engendrent pas une perte de la demande.
4. La demande non satisfaite est perdue, ce qui génère un coût de pénurie. Le donneur d'ordres peut ne pas recourir à l'option de sous-traitance et assume un coût de pénurie, comme il peut sous-traiter toute ou une partie de la quantité qui ne pas être satisfaite.
5. Le coût de sous-traitance payé par le donneur d'ordres est variable. Il dépend de la capacité de production réservée auprès du sous-traitant.
6. Le sous-traitant délivre la quantité de sous-traitance au donneur d'ordres à la fin de chaque période.
7. Les données de la demande sont reçues au début de l'horizon de planification.
8. Les défaillances sont détectées instantanément.
9. Les actions de maintenance préventive sont considérées comme parfaites. Chaque action restaure la machine à la configuration "As Good As New".
10. Les produits sont impérissables avec le temps.
11. Le plan de production peut commencer avec un niveau de stock non nul : $(I_0 \geq 0)$.

IV.2.2. Modèle mathématique

Dans le modèle proposé, le coût total prévu comprend : les coûts de production, les coûts de stockage, les coûts de maintenance, les coûts de pénurie et les coûts de sous-traitance.

IV.2.2.1. Le coût de stockage

Le coût de stockage total IC comprend le coût des stocks au cours de chaque période. Il est donné par l'expression suivante :

$$IC = hc \sum_{k=1}^N IC_k = hc \sum_{k=1}^N \int_{\tau_{k-1}}^{\tau_k} Z_k \quad (IV.5)$$

Z_k est la surface générée par l'évolution du niveau de stock au cours de la période k ($k = 1, \dots, N$). Elle est donnée par :

$$Z_k = \frac{c_k^o (\tau_k - \tau_{k-1})^2}{2} + (\tau_k - \tau_{k-1}) I_{k-1} \quad (IV.6)$$

Rappelons que le stock restant de la période précédente sera réintégrer dans le stock de la période actuelle. Le niveau de stock à chaque fin de période est donné par l'expression suivante :

$$I_k = \max(S_{k-1} + (c_k^o + c_{l,k}^s)(\tau_k - \tau_{k-1}) - d_k, 0) \quad (IV.7)$$

IV.2.2.2. Le coût de pénurie

Lorsque la capacité de production interne du donneur d'ordres (et/ou) la capacité réservée auprès du sous-

traitant ne répond (ent) pas à la demande, une situation de pénurie survient, provoquant la génération d'un coût de pénurie exprimé par la formule suivante :

$$SC = sc \sum_{k=1}^N \left| \min \left((c_k^o + c_{l,k}^s)(\tau_k - \tau_{k-1}) + I_{k-1} - d_k, 0 \right) \right| \quad (IV.8)$$

IV.2.2.3. Le coût de sous-traitance

Nous considérons la dépendance entre le prix de sous-traitance et la capacité de production réservée auprès du sous-traitant, ce dernier offre ainsi un barème de prix. Le donneur d'ordres vise toujours à sous-traiter avec un coût minime, surtout dans le cas où le temps nécessaire pour l'achèvement de la demande est suffisamment long.

L'unité de production du sous-traitant fonctionne avec différents taux de production, pour satisfaire les besoins du donneur d'ordres. Chaque taux de production correspond à un prix spécifique. Le donneur d'ordres cherche à déterminer pour chaque période, les taux de production optimaux qui minimisent les coûts totaux.

Soit un modèle de barème des coûts de sous-traitance avec L niveaux $\{oc_l, c_{l,k}^s\}$, $l \in \{1, \dots, L\}$. Il se compose du prix de sous-traitance oc_l et le taux de production correspondant $c_{l,k}^s$. La formule suivante est la forme générale du barème des prix proposé par le sous-traitant.

$$oc_l = \begin{cases} oc_1 & \text{si } cmin^s < c_{l,k}^s < cmax^s \text{ fact } (1) \\ \dots & \dots \\ oc_l & \text{si } cmax^s \text{ fact } (l-1) < c_{l,k}^s < cmax^s \text{ fact } (l) \\ \dots & \dots \\ oc_L & \text{si } cmax^s \text{ fact } (L-1) < c_{l,k}^s < cmax^s \end{cases} \quad (IV.9)$$

Où $fact$ est le vecteur composé de $(L-1)$ éléments, il contient les niveaux d'utilisation des capacités de la machine du sous-traitant.

Ainsi, l'expression du coût total de sous-traitance est écrite comme suit :

$$OC = \sum_{l \in \{1, \dots, L\}} \sum_{k=1}^N OC_k = \sum_{l \in \{1, \dots, L\}} \sum_{k=1}^N (\tau_k - \tau_{k-1}) c_{l,k}^s oc_l \quad (IV.10)$$

IV.2.2.4. Le coût de production

L'unité de production du donneur d'ordres produit avec un taux de production variable pour chaque période de production. Ainsi, le coût de production total est donné par l'expression suivante :

$$PC = \sum_{k=1}^N PC_k = c_p \sum_{k=1}^N c_k^o (\tau_k - \tau_{k-1}) \quad (IV.11)$$

IV.2.2.5. Le coût de maintenance

Le coût de maintenance du donneur d'ordres est donné par la formule précédente (IV.2) :

$$MC = cmc.M(H) + Npm.pmc \quad (IV.12)$$

Le nombre moyen de panne du donneur d'ordres durant l'horizon de planification est exprimé par la relation suivante :

$$M(H) = \sum_{k=1}^N \int_{\tau_{k-1}}^{\tau_k} \lambda_k(t) dt \quad (IV.13)$$

Autrement dit :

$$MC = cmc \sum_{k=1}^N \int_{\tau_{k-1}}^{\tau_k} \lambda_k(t) dt + Npm.pmc \quad (IV.14)$$

Ainsi, la formulation de la programmation mathématique résultante (programme en nombres entiers) est donnée par :

Le coût total peut être écrit comme suit :

$$\min (IC + PC + OC + MC + SC) \quad (IV.15)$$

Sous les contraintes suivantes :

$$I_k = \max(I_{k-1} + (c_k^o + c_{l,k}^s)(\tau_k - \tau_{k-1}) - d_k, 0) \quad (IV.16)$$

$$0 \leq c_k^o \leq cmax^o \quad (IV.17)$$

$$cmin^s \leq c_{l,k}^s \leq cmax^s \quad (IV.18)$$

$$c_{l,k}^s, c_k^o, I_k \in \mathbb{Z}_+ \quad (IV.19)$$

$$M(T), PC, PC_k, IC, IC_k, MC, MC_k, SC, SC_k, OC, OC_k \in \mathbb{R}_+$$

$$\forall k = 1, \dots, N; \forall l = 1, \dots, L$$

L'expression (IV.15) représente le minimum du coût total agrégé de production, des stocks, de maintenance, de pénurie et de sous-traitance. La contrainte (IV.16) montre l'évolution du niveau du stock au cours de l'horizon de planification, elle assure que la capacité du donneur d'ordres, ainsi que la capacité allouée par le sous-traitant doivent répondre à toutes les demandes. Dans le cas où la capacité totale est supérieure aux exigences, le donneur d'ordres assume un coût de stockage supplémentaire. Cependant, dans le cas contraire, le donneur d'ordres doit payer un coût de pénurie. La machine du donneur d'ordres peut fonctionner avec un taux de production qui dépend des options de sous-traitance. La contrainte (IV.17) définit les bornes du taux de production du donneur d'ordres. La contrainte (IV.18) montre que le donneur d'ordres peut réserver une capacité auprès du sous-traitant qui dépend du taux de production de ce dernier, ce taux est compris entre le taux de production minimal et maximal. Enfin, les contraintes de non-négativité et les contraintes représentant les types de variables de décision sont présentées par les contraintes (IV.19). Pour déterminer simultanément le plan intégré production interne – sous-traitance tout en minimisant les coûts totaux du donneur d'ordres durant l'horizon de planification. Nous allons développer un modèle mathématique et une procédure d'optimisation à base d'algorithmes génétiques.

IV.2.3. Procédure de résolution

Nous rappelons que notre objectif, est de déterminer pour chaque période, le plan mixte optimal de production interne – sous-traitance, à savoir, les taux de production interne du donneur d'ordres et le meilleur plan de réservation de capacité chez le sous-traitant qui devraient être adoptés afin de satisfaire les combinaisons de la demande : {quantité, délai de livraison}. Le critère d'optimisation est la minimisation du coût total sur un horizon fini H .

Il est difficile de résoudre le modèle mentionné ci-dessus en utilisant les méthodes d'optimisation exactes. La complexité augmente avec l'augmentation du nombre de périodes, et des niveaux du barème des coûts

de sous-traitance. Dans de tels cas, les métaheuristiques ont été largement utilisées par de nombreux chercheurs. En conséquence, nous avons développé une approche de résolution basée sur les algorithmes génétiques pour résoudre efficacement le modèle de programmation mathématique proposé.

La figure IV.2 illustre la structure du chromosome. C'est un vecteur de $2 \cdot N$ colonnes. Chaque gène de la première partie du chromosome représente le taux de production en interne c_k^o appliqué à une période k du plan du donneur d'ordres. Dans la deuxième partie du chromosome, les gènes représentent le plan de sous-traitance ; chaque gène représente le taux de sous-traitance $c_{l,k}^s$ réalisé par le sous-traitant pour chaque période. Chaque gène est codé par un nombre réel. En réalité, le sous-traitant fourni au donneur d'ordres le barème de prix de vente qui est en fonction du taux de production.

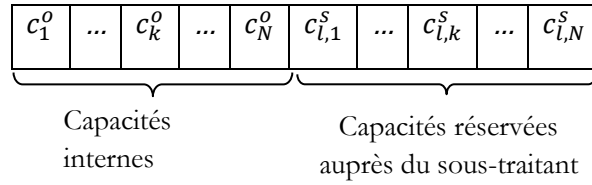


Figure IV.2. Structure du Chromosome.

Dans cette première section de ce chapitre, nous ne détaillons pas les différents opérateurs génétiques. Parce que nous avons utilisé les solveurs GA du logiciel de calcul mathématique Matlab, avec personnalisation des fonctions codage, interprétation et évaluation.

IV.2.4. Exemple numérique – résultats et discussions

Dans cette sous-section, nous présentons un exemple numérique pour illustrer notre approche qui vise à trouver le meilleur plan mixte production interne – sous-traitance. Les problèmes de test consistent en trois groupes selon la demande du marché. Ces groupes sont "forte demande", "demande moyenne" et "faible demande".

L'horizon de planification H est de 120 jours composé de 10 périodes. Les demandes du marché sont présentées dans le tableau IV.1. Nous avons fixé la capacité de production du donneur d'ordres à 20 u/u.t et le coût de production à 22 u.m/unité.

k	τ_k	d_k		
		Faible	Moyenne	Forte
1	15	255	255	550
2	22	80	80	140
3	32	200	200	400
4	40	280	280	280
5	60	280	680	680
6	65	50	200	200
7	80	255	255	550
8	90	100	300	300
9	104	240	540	540
10	120	310	510	510

Tableau IV.1. Demandes du donneur d'ordres.

Les coûts unitaires de maintenances préventives et correctives sont respectivement fixés à 22 u.m et 40 u.m. Les coûts de stockage et de pénurie sont respectivement fixés à 0.1 u.m/u.t et 32 u.m/u. Le stock initial est fixé à 10 unités.

Nous considérons un barème à trois niveaux tels que : Si nous réservons la machine avec un taux compris entre $cmin^s$ et $\frac{1}{3}cmax^s$, un faible coût de production unitaire peut être généré. On le considère moyen pour un taux compris entre $\frac{1}{3}cmax^s$ et $\frac{2}{3}cmax^s$. Il est élevé si le taux est supérieur de $\frac{2}{3}$ de sa capacité maximale.

Nous avons, donc :

$oc_1 = 16$ u. m Si $1 < c_{1,k}^s \leq 10$;
 $oc_2 = 26$ u. m Si $10 < c_{2,k}^s \leq 20$;
 Et $oc_3 = 40$ u. m Si $20 < c_{3,k}^s \leq 30$;

Avec $cmax^s = 30$ unités/u.t.

Aussi, nous supposons que la durée de vie de la machine est distribuée selon une distribution de Weibull à deux paramètres (2, 100). Le nombre moyen de défaillances par période est calculé à l'aide des expressions IV. 1 et IV. 14. Ainsi, la fonction nominale du taux de défaillance est donnée par l'expression suivante :

$$\lambda n(t) = \left(\frac{\alpha}{\beta}\right) \cdot \left(\frac{t}{\beta}\right)^{(\alpha-1)} \quad (IV.20)$$

Le tableau IV.2 récapitule les principaux paramètres de l'algorithme génétique utilisé dans toutes les expériences. Il est à noter que tous les paramètres sont restés constants pour les différents tests. Ces paramètres sont dimensionnés après une campagne de tests.

Paramètres	Valeurs
Nombre de générations	100
Taille de la population	50
Nombre d'élites	10
Taux de croisement	75%
Intervalle de migration	20
Limite de temps	$+\infty$
Limite de la fonction objectif	$-\infty$
La fonction d'approximation de la fonction objectif	10^{-6}
La fonction d'approximation des contraintes	10^{-6}
Pénalité initiale	10
Facteur de pénalité	100

Tableau IV.2. Configuration des valeurs de paramètres utilisés par le solveur GA du GOT du Matlab

Le tableau IV.3 résume les différentes fonctions utilisées par le solveur GA de l'outil d'optimisation globale du Matlab. A cause de contraintes de compatibilités, ces fonctions sont configurées par défaut.

Fonctions	Désignation
Direction de migration	En avant "forward"
Fonction de création	Uniforme
Mise en échelle	Par rang
Sélection	Stochastique uniforme
Croisement	Dispersés "Scattered Crossover"
Mutation	Gaussienne

Tableau IV.3. Configuration du solveur GA du GOT du Matlab.

En utilisant la procédure décrite auparavant, nous avons obtenu les résultats résumés dans le tableau IV.4. Ce tableau présente pour chaque problème de test "forte demande, demande moyenne et faible demande", les pourcentages d'utilisation de la capacité interne du donneur d'ordres et de réservation de la capacité chez le sous-traitant.

Nous observons que même si la demande du donneur d'ordres peut être satisfaite par sa capacité interne (demande moyenne faible), il réserve comme même un certain pourcentage de la capacité du sous-traitant. Parce que le coût de sous-traitance est meilleur, c'est le "principe de l'avantage comparatif." En d'autres termes, la décision de planification de capacité dépend de la structure des coûts internes, du coût de pénurie et du niveau du barème des coûts de sous-traitance. Cela se traduit par un pourcentage moyen d'utilisation de la capacité interne de 84% et un pourcentage moyen de réservation de la capacité chez le sous-traitant de 20 % pour les faibles demandes.

Si la demande moyenne augmente les pourcentages d'utilisation de la capacité interne et de réservation de capacité auprès du sous-traitant augmentent respectivement à 100 % et 25 %.

De même, si la demande moyenne, est très forte par rapport à la capacité interne du donneur d'ordres. Ce dernier utilise presque toute sa capacité interne et réserve plus de la moitié de la capacité du sous-traitant sachant que la capacité de production du sous-traitant dépasse de $\frac{1}{3}$ celle du donneur d'ordres.

k	Demandes faibles		Demandes moyennes		Demandes fortes	
	%In	%Out	%In	%Out	%In	%Out
1	100	20	100	30	100	66.67
2	100	13.33	100	26.67	100	83.33
3	100	20	100	33.33	100	56.67
4	100	30	100	23.33	95	63.33
5	70	26.67	100	33.33	100	33.33
6	50	10	100	23.33	65	33.33
7	85	26.67	100	23.33	100	33.33
8	60	16.67	100	16.67	100	66.67
9	80	23.33	100	26.67	100	33.33
10	95	13.33	100	13.33	95	33.33
$\bar{\%}$	84	20	100	25	95.5	53.33

Tableau IV.4. Pourcentages d'utilisation de la capacité interne/de réservation de la capacité chez le sous-traitant.

Dans la première section, nous avons abordé un problème de planification de la production et des capacités avec option de sous-traitance sous contraintes de fiabilité et de maintenance simples. Dans la section suivante, nous étendons ce problème pour une politique de maintenance intégrée.

IV.3. Planification des capacités avec contrats de sous-traitance sous une politique de maintenance intégrée

IV.3.1. Description du problème

La structure de la chaîne logistique et des coûts dans cette section sont un peu différents de la première. Nous considérons une chaîne à deux échelons composée d'un seul donneur d'ordres en relation avec multiples sous-traitants. L'entreprise du donneur d'ordres est composée d'une seule machine réparable, sujette à des défaillances aléatoires, produisant un seul type de produit. Il produit au profit de ses clients avec des taux de production variables, durant des périodes non homogènes, sans report ni accumulation de retards, mais des situations de pénurie sont possibles. Nous considérons que les sous-traitants produisent pour le donneur d'ordres avec des prix de ventes fixes quelle que soit la cadence de production. Plus clairement, nous nous concentrons sur le problème de la planification des capacités avec des possibilités de sous-traitance sous contraintes de fiabilité et de maintenance intégrée. La structure de la chaîne logistique considérée dans cette section est illustrée par la figure IV.3.

Nous proposons une politique de maintenance intégrée, où les intervalles de maintenance préventive sont en fonction des taux de production adoptées au cours des périodes précédentes. En d'autres termes, la maintenance préventive dépend de la cadence de production observée. Notre problème répond à plusieurs questions tactiques à savoir : Comment produire en interne et comment sous-traiter afin de répondre aux exigences des clients ? Comment planifier la maintenance préventive ? Et enfin, à quels sous-traitants devrions-nous faire confiance ?

Le reste de la section est structuré comme suit. La sous-section 2 détaille le modèle mathématique. Les sous-sections 3 et 4 discutent respectivement la procédure de résolution et les expériences numériques.

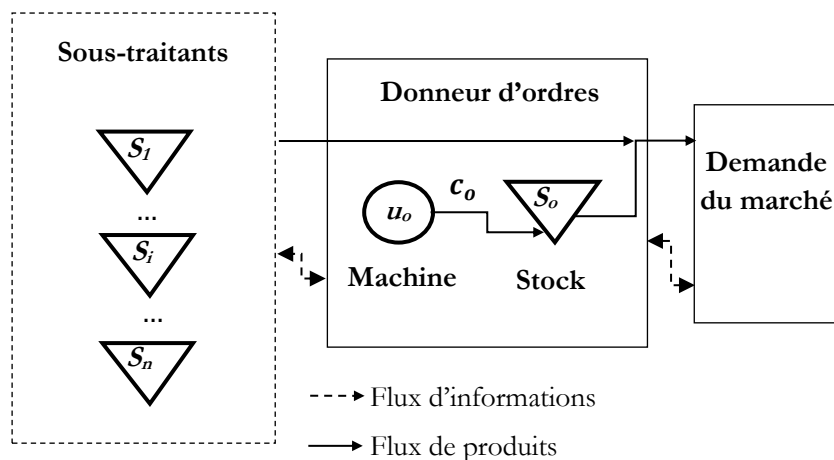


Figure IV.3. La structure de la chaîne logistique considérée.

IV.3.1.1. Notations

Nous présentons les notations utilisées tout au long de cette section :

Indices

- k Indice de période.
- i Indice de sous-traitant.
- l Le niveau dans le barème des coûts de production.

Variables de décision

$c_{l,k}$	Taux de production interne avec le niveau l dans le barème des coûts de production dans la période k .
c_i	Pourcentage de la capacité réservée par le sous-traitant i pour le donneur d'ordres.
$q_{i,k}$	La quantité de sous-traitance produite par le sous-traitant i dans la période k .
I_k	Le niveau de stock du donneur d'ordres à la fin de chaque période k .
T_e^*	La $e^{\text{ème}}$ date de maintenance préventive du donneur d'ordres.
N_{pm}	Le nombre d'actions de maintenance préventive du donneur d'ordres.
$M(T)$	Le nombre moyen de défaillances au cours de l'intervalle T .
$f_M(T)$	La fonction du coût de maintenance du système par unité de temps.
$\lambda n(t)$	La fonction de taux de défaillance nominale de la machine, lorsque la machine fonctionne avec la cadence de production maximale.
$\lambda(t)$	La fonction de taux de défaillance de la machine à l'instant t .
PC_k, PC	Le coût total de production du donneur d'ordres durant la période k et l'horizon de planification.
IC_k, IC	Le coût total de stockage du donneur d'ordres durant la période k et l'horizon de planification.
MC_k, MC	Le coût total de maintenance du donneur d'ordres durant la période k et l'horizon de planification.
SC_k, SC	Le coût total de pénurie du donneur d'ordres durant la période k et l'horizon de planification.
OC_k, OC	Le coût total de sous-traitance du donneur d'ordres durant la période k et l'horizon de planification.

Paramètres

d_k	La demande des clients du donneur d'ordres pendant la période k .
τ_k	Délai de livraison de la demande adressée au donneur d'ordres dans la période k .
α, β	Paramètres de forme et d'échelle de la distribution de défaillance de la machine (loi Weibull).
pc_l	Le coût unitaire de production et son niveau dans le barème des coûts de production.
hc	Le coût unitaire de stockage du donneur d'ordres.
sc	Le coût de pénurie d'une unité pour le donneur d'ordres.
pmc	Le coût d'une action de maintenance préventive du donneur d'ordres.
cmc	Le coût d'une réparation minimale du donneur d'ordres.
sp_i	Le prix de vente unitaire du sous-traitant i .
$cmax$	La capacité maximale de production du donneur d'ordres.
$cmax_i$	La capacité maximale de production du sous-traitant i .

IV.3.1.2. Hypothèses

Tout au long de cette section, les hypothèses 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10 et 11 de la section précédente sont considérées, de plus nous rajoutons les trois hypothèses suivantes :

1. Le sous-traitant délivre la quantité de sous-traitance au donneur d'ordres à la fin de chaque période.
2. Chaque sous-traitant a un plan de production qui ne dépend pas des autres sous-traitants.
3. L'ensemble des sous-traitants peuvent satisfaire le manque de capacité du donneur d'ordres.

Du point de vue fiabilité et maintenance, le donneur d'ordres produit avec des taux de production variables pour chaque période de production. Dans ce contexte, nous considérons une dépendance entre le taux de défaillance et le taux de production. Ainsi, nous considérons que le coût de production est calculé en fonction du taux de production adopté (barème de coût de production).

L'expression du taux de défaillance durant l'intervalle k est définie par la relation VI.1.

Notre objectif est de déterminer simultanément les plans de production en interne, de sous-traitance, et de maintenance. Dans le plan de sous-traitance, nous cherchons les sous-traitants appropriés ainsi que les quantités qui minimisent les coûts totaux du donneur d'ordres. Dans le plan de maintenance, nous visons à déterminer les dates de maintenance préventive optimales, en se basant sur les taux de production observées au cours des périodes précédentes. Pour déterminer les dates optimales de maintenance préventive, nous utilisons la formule bien connue de Barlow et Proschan (1965). L'optimisation de la politique de maintenance est basée sur le résultat suivant :

$$f_M(T) = \frac{cmc.M(H)+Npm.pmc}{T} \quad (IV.21)$$

Avec $T^* / \frac{\partial f_M(T)}{\partial T} = 0$

La dérivée de l'équation f_M nous donne l'instant optimal T^* d'une action de maintenance préventive pour une période de production.

A partir de ces explications, nous pouvons déterminer pour chaque période, le taux de production en interne, les sous-traitants appropriés et leurs quantités associées et les dates de maintenance préventive (plan de maintenance) qui minimisent les coûts totaux du donneur d'ordres. A chaque instant T^* , la machine subit une action de maintenance préventive qui restaure la machine dans la configuration "As Good As New".

IV.3.2. Modèle mathématique

Le coût total généré comprend les coûts de production, de stockage, de maintenance, de pénurie et de sous-traitance.

IV.3.2.1. Le coût de stockage

Le coût de stockage total comprend le coût généré par l'évolution du niveau du stock au cours de chaque période. Il est exprimé comme suit :

$$IC = hc \sum_{k=1}^N IC_k = hc \sum_{k=1}^N \int_{\tau_{k-1}}^{\tau_k} Z_k \quad (IV.22)$$

Où Z_k représente la surface générée par l'évolution du niveau de stock pendant l'intervalle $[\tau_{k-1}, \tau_k]$. Elle est exprimée comme suit :

$$Z_k = (\tau_k - \tau_{k-1}) \cdot c_{l,k} + \frac{I_{k-1}(\tau_k - \tau_{k-1})^2}{2} \quad (IV.23)$$

Rappelons que le stock restant de la période précédente sera réintégrer dans le stock de la période actuelle. Le niveau de stock à chaque fin de période est exprimé par la formule suivante :

$$I_k = \max\left(\sum_{i=1}^n q_{i,k} + c_{l,k}(\tau_k - \tau_{k-1}) + I_{k-1} - d_k, 0\right) \quad (IV.24)$$

IV.3.2.2. Le coût de pénurie

Un coût de pénurie est généré si la demande n'est pas satisfaite, même en ayant recours à la sous-traitance. Il est exprimé par la formule suivante :

$$SC = sc \sum_{k=1}^N \left| \min\left(\sum_{i=1}^n q_{i,k} + c_{l,k}(\tau_k - \tau_{k-1}) + I_{k-1} - d_k, 0\right) \right| \quad (IV.25)$$

IV.3.2.3. Le coût de sous-traitance

Nous supposons que les sous-traitants sont indépendants, chacun produit avec un taux de production fixe. Ainsi, le prix de vente de chaque entreprise est fixe. La formule (IV.26) exprime le coût total de sous-traitance :

$$OC = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^n q_{i,k} sp_i \quad (IV.26)$$

Où,

$$q_{i,k} = (\tau_k - \tau_{k-1}) \cdot cmax_i \quad (IV.27)$$

IV.3.2.4. Le coût de production

L'unité de production du donneur d'ordres fonctionne avec différents taux de production pour satisfaire ses clients. Chaque taux de production correspond à un coût spécifique. Le donneur d'ordres cherche à déterminer pour chaque période, le taux de production optimale qui minimise les coûts totaux.

Soit un modèle de barème des coûts de production avec L niveaux $\{pc_l, c_{l,k}\}$, $l \in \{F, M, E\}$, où F, M et E correspondent respectivement aux niveaux du coût de production : faible, moyen et élevé. Il se compose des coûts de production pc_l et les taux de production correspondant $c_{l,k}$. La formule suivante est la forme générale du barème du coût de production.

$$pc_l = \begin{cases} pc_F & \text{si } 0 < c_{l,k} < cmax \cdot fact(1) \\ \dots & \dots \\ pc_M & \text{si } cmax \cdot fact(1) < c_{l,k} < cmax \cdot fact(2) \\ \dots & \dots \\ pc_H & \text{si } cmax \cdot fact(2) < c_{l,k} < cmax \end{cases} \quad (IV.28)$$

Où $fact$ est le vecteur composé de deux éléments. Il contient les niveaux d'utilisation des capacités de la machine.

On a $pc_F < pc_M < pc_E$

Ainsi, l'expression du coût total de production est écrite comme suit :

$$PC = \sum_{k=1}^N \sum_{l \in L} PC_k = \sum_{k=1}^N (\tau_k - \tau_{k-1}) \sum_{l \in L} c_{l,k} pc_l \quad (IV.29)$$

IV.3.2.5. Le coût de maintenance

Le coût de maintenance est donné par les formules IV.12 et IV.14 expliquées précédemment.

La formulation de programmation mathématique résultante, formulée comme programmation mixte en nombres entiers est donnée par :

Le coût total peut être écrit comme suit :

$$\min (IC + PC + OC + MC + SC) \quad (IV.30)$$

Sous les contraintes :

$$I_k = \max(\sum_{i=1}^n q_{i,k} + c_{l,k}(\tau_k - \tau_{k-1}) + I_{k-1} - d_k, 0) \quad (IV.31)$$

$$q_{i,k} = (\tau_k - \tau_{k-1}) \cdot cmax_i \quad (IV.32)$$

$$f_M = \frac{cmc \sum_{k=1}^N \int_{\tau_{k-1}}^{\tau_k} \lambda_k(t) dt + Npm.pmc}{T} \quad (IV.33)$$

$$T^* / \frac{\partial f_M(T)}{\partial T} = 0 \quad (IV.34)$$

$$0 \leq c_{l,k} \leq cmax \quad (IV.35)$$

$$0 \leq c_i \leq cmax_i \quad (IV.36)$$

$$c_{l,k}, c_i, q_{i,k}, T_e^*, S_k, M(T), PC, PC_k, IC, IC_k, MC, MC_k, SC, SC_k, OC, OC_k \in \mathbb{R}_+ \quad (IV.37)$$

$$Npm, q_{i,k} \in \mathbb{Z}_+ \quad (IV.38)$$

$$\forall k = 1, \dots, N; \forall i = 1, \dots, n; \forall l = 1, \dots, L$$

L'expression (IV.30) représente le minimum du coût total agrégé de production, des stocks, de maintenance, de pénurie et de sous-traitance. La contrainte (IV.31) montre l'évolution du niveau de stock au cours de l'horizon de planification. La contrainte (IV.32) assure que la capacité du donneur d'ordres, ainsi que les capacités allouées par les sous-traitants doivent répondre à toutes les demandes. Dans le cas où la capacité totale est supérieure aux exigences, le donneur d'ordres assume un coût de stockage supplémentaire. Cependant, dans le cas où la capacité est inférieure aux exigences, le fabricant doit payer un coût de pénurie. Les égalités (IV.33) et (IV.34) permettent de déterminer le plan de maintenance préventive optimal assurant le meilleur coût total de maintenance. La machine du donneur d'ordres peut fonctionner avec un taux de production qui dépend des options de sous-traitance. La contrainte (IV.35) exprime la limite inférieure et supérieure du taux de production du donneur d'ordres. La contrainte (IV.36) montre que la machine du sous-traitant peut être utilisée avec un taux de production compris entre le taux de production minimal et maximal. Enfin, les contraintes de non-négativité et qui représentent le type des variables de décision sont présentées par les contraintes (IV.37) et (IV.38).

IV.3.3. Procédure de résolution

L'objectif de cette étude est de déterminer la meilleure planification des capacités "le plan intégré mixte de production interne, de maintenance, et de sous-traitance". Nous déterminons simultanément les taux de production du donneur d'ordres qui devraient être adoptées afin de satisfaire les exigences de ses clients (ou une partie), le plan associé de maintenance, et d'optimiser la sélection des sous-traitants appropriés et ses quantités associées. Le critère d'optimisation est la minimisation du coût total sur un horizon de planification fini.

Comme énoncé précédemment, il est difficile de résoudre le modèle mentionné ci-dessus en utilisant les méthodes d'optimisation exactes. Ainsi, nous avons développé une approche de résolution basée sur les algorithmes génétiques pour résoudre efficacement le modèle proposé de programmation mathématique. La structure adoptée du chromosome est composée de $(n + 1)$ lignes et N colonnes. Chaque gène de la première ligne représente le taux de production en interne $c_{l,k}$ attribué à une période k du plan du donneur d'ordres. Les lignes restantes du chromosome représentent le plan de sous-traitance ; chaque gène représente le taux de sous-traitance $c_{i,k}$ qui devrait être allouée par les sous-traitants pour chaque période. Chaque gène est codé par un nombre réel.

Taux de production internes	{	$c_{l,1}$	...	$c_{l,k}$	...	$c_{l,N}$
		$c_{1,1}$	...	$c_{1,k}$	...	$c_{1,N}$
Pourcentages de reservation des capacités auprès des sous-traitants	{	...	...	...	...	...
		$c_{i,1}$	...	$c_{i,k}$	...	$c_{i,N}$
		...	...	...	...	...
		$c_{n,1}$		$c_{n,k}$		$c_{n,N}$

Figure IV.4. Structure du Chromosome.

En réalité, les sous-traitants fournissent au donneur d'ordres les prix de vente, et les taux de production maximaux, ou en d'autres termes, les quantités qui peuvent être produites dans chaque période du plan. Les caractéristiques de notre procédure de calcul sont décrites dans les étapes suivantes :

Étape 1 : Génération de la population initiale

Pour chaque chromosome, des valeurs aléatoires comprise entre 0 et 1 sont générées; ces valeurs sont décodées comme suit : on multiplie ces valeurs par le taux de production maximale pour obtenir le taux réel de production à adopter. Notez que le schéma de codage de la solution peut générer des solutions infaisables qui se traduisent par des moments négatifs de maintenance. Avant d'évaluer la solution générée une vérification de la faisabilité de la solution est procédée. Ensuite, pour chaque solution possible, nous évaluons la valeur de la fonction objectif. Enregistrer la meilleure solution et mettre $I = 1$.

L'algorithme de contrôle de faisabilité est expliqué comme suit :

Algorithme IV.1. Algorithme de contrôle de faisabilité (Feasibility Control Algorithm – FCA)

Initialisation

PM Vecteur des instants de maintenance préventive durant l'horizon ;
 Npm Le nombre des actions de maintenance préventive durant l'horizon ;
Initialiser les chromosomes et tous les paramètres associés à leurs interprétations ;

Programme principal

Pour chaque chromosome généré et interprété

Penalty = fausse

Pour ind = 1 **jusqu'à** Npm

Si la partie imaginaire de PM (ind) $\neq 0$

Penalty = vraie ;

id = $Npm + 1$;

Fin Si

Fin Pour

I = 1 ;

Tant que Penalty = vraie **Faire**

Générer un autre chromosome ;

Interpréter le chromosome généré ;

Penalty = fausse ;

Pour ind = 1 **jusqu'à** Npm

Si la partie imaginaire de PM (ind) $\neq 0$

Penalty = vraie ;

id = $Npm + 1$;

Fin Si

Fin Pour

I = I+1 ;

Fin Tant que

Evaluer la solution faisable ;

Nous mettons en œuvre un algorithme pour calculer l'instant optimal de la maintenance préventive basée sur la formule IV.27 (algorithme IV.2).

Algorithme IV.2. Calcul de la date de maintenance préventive optimale (Optimal Preventive Maintenance Date Computation – OPMC)

Initialisation des paramètres $\alpha, \beta, c_{l,k}, cmax, t_s, t_e, pmc, cmc$;
 s Indice de la dernière période où la maintenance préventive est effectuée ;
 k Indice de période en court ;
 c Vecteur des taux de production durant l'horizon de planification ;

Programme principal

Le calcul de T^* est basé sur l'optimisation des coûts de maintenance ;

Pour trouver le minimum de la fonction $f_M(T)$, nous avons :

$$\frac{\partial f_M(T)}{\partial T} = 0, \text{ où } f_M(T) = \frac{cmc + M(T).pmc}{T} ;$$

Si une seule période

$$T^* = \sqrt[\alpha]{\frac{cmax(\frac{pmc}{cmc})\beta^\alpha}{c_k(\alpha-1)}} ;$$

Si non multi-période

$$S = \sum_{r=s}^{k-1} \tau_r^\alpha (c_r - c_{r+1})$$

$$T^* = \sqrt[\alpha]{\frac{cmax(\frac{pmc}{cmc})\beta^{\alpha+S}}{c_k(\alpha-1)}} ;$$

Fin Si

Où t_s et t_e sont les dates de début et de fin de l'intervalle où on cherche la date de maintenance préventive optimale.

Étape 2 : Vérifier si les critères d'arrêt sont atteints, mettre fin à la procédure et afficher la solution obtenue. Sinon passer aux prochaines étapes. La procédure se termine si l'un des deux critères suivants est vérifié :

- Le nombre de générations est supérieur à un nombre de générations maximum prédéfini.
- La meilleure solution ne s'améliore pas au cours d'un nombre prédéfini de générations.

Étape 3 : Création d'une nouvelle population

Dans cette étape nous générons la nouvelle population par le biais de quatre sous-étapes (élitisme, croisement, mutation et remplacement aléatoire) ; dans les dernières trois sous-étapes, nous devons vérifier la faisabilité des solutions générées en appelant la fonction de faisabilité (algorithme de faisabilité).

Les opérateurs de croisement et de mutation ont été définis en fonction des propriétés et caractéristiques du problème et du schéma de codage.

1. *Croisement* : cet opérateur génétique consiste à coupler deux individus (appelés parents) pour obtenir d'autres individus (appelés enfants). On effectue des coupes sur les deux parents en un ou plusieurs points (aux mêmes endroits) et nous permutons les parties entre ces points. Dans notre cas nous utilisons le croisement horizontal et vertical en deux points (la limite inférieure – LI – et la limite supérieure – LS –). Les figures IV.5 et IV.6 montrent comment le croisement est effectué.

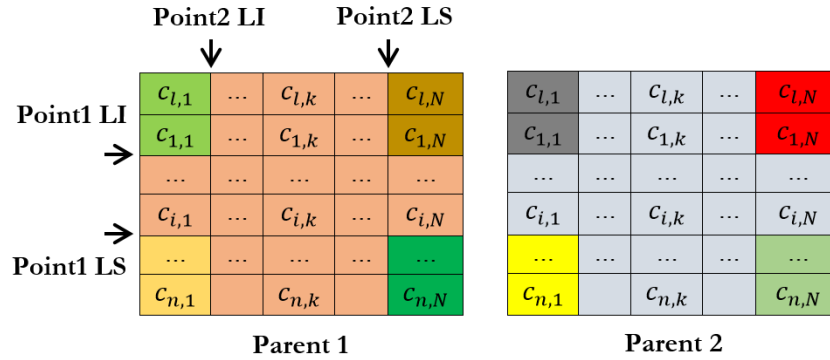


Figure IV.5. Deux chromosomes avant l'opération de croisement.

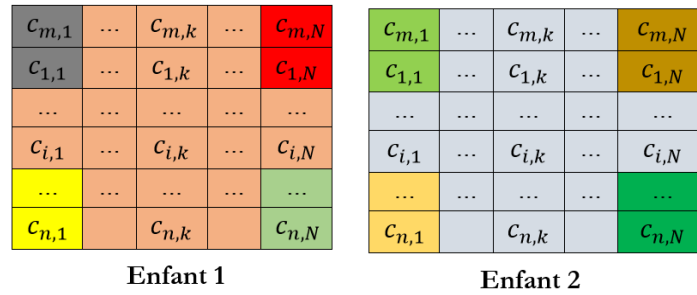


Figure IV.6. Deux chromosomes après l'opération de croisement.

2. *Mutation* : la mutation est la modification aléatoire d'un paramètre (gène) du dispositif (par exemple, l'inversion des données dans le chromosome), elle sert à empêcher l'évolution ou la convergence vers un optimum local. Dans notre procédure, nous adoptons la mutation par permutation, c'est-à-dire, nous tirons au hasard un individu, et nous tirons au hasard deux points et on permute les deux colonnes correspondantes.

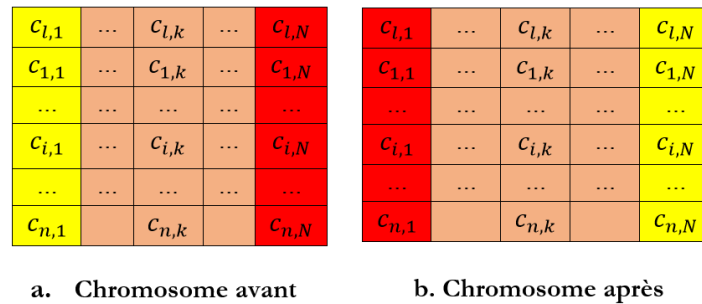


Figure IV.7. Un chromosome avant et après l'opération de mutation.

3. *Élitisme* : Pour une nouvelle génération, nous prenons un pourcentage des meilleurs individus de la génération précédente.

4. *Remplacement aléatoire* : il consiste à générer de manière aléatoire un pourcentage d'individus comme dans le cas de la population initiale.

Étape 4 : évaluation de la fonction objectif

Cette étape consiste à évaluer la fonction objectif de la nouvelle population et enregistrer la meilleure solution. Mettre $I = I + 1$ et retour à l'étape 2.

Des tests numériques ont été effectués pour déterminer les paramètres de l'algorithme génétique. Le taux de croisement, le taux de mutation, le nombre d'élites et le taux de remplacement aléatoire sont fixés respectivement à 0.6, 0.1, 0.1 et 0.2. Le critère d'arrêt est basé sur le nombre maximum de générations et des générations de décrochage. Le nombre de générations est fixé à 600 pour le problème de petite taille, 2500 pour les moyennes et 4000 pour le problème de grande taille. La génération de décrochage est fixée à 50. La taille de la population a été fixée à 300 ; une population de 200 a donné des performances médiocres. Par contre une population de 400 ou 600 n'a pas apporté d'améliorations par rapport au taux de convergence. En outre, comme le temps de calcul augmente linéairement avec la taille de la population, il est avantageux de ne pas augmenter excessivement la taille de la population. La méthode de sélection adoptée dans notre problème est celle de la roulette. La probabilité de sélection d'un individu est proportionnelle à la fonction objectif.

IV.3.4. Exemple d'illustration

Afin d'illustrer et de valider nos résultats et conclusions, un design expérimental basé sur la variation de plusieurs paramètres importants est réalisé.

IV.3.4.1. Les données du problème

Les problèmes de test consistent en trois groupes selon le nombre de sous-traitants. Ces groupes sont respectivement 5, 20 et 35 sous-traitants. Pour chaque groupe, trois problèmes sont générés en faisant varier le coût de pénurie avec trois valeurs possibles "Faible, Moyen et Elevé."

L'horizon de planification H est de 180 jours composé de 10 périodes. Les demandes du marché sont générées entre $[(\tau_k - \tau_{k-1})cmax(1 - \varphi_{min}\%)], [(\tau_k - \tau_{k-1})cmax(1 + \varphi_{max}\%)]$, où les constants φ_{min} et φ_{max} sont fixés respectivement à 34 et 35. Les résultats de cette génération sont présentés dans le tableau IV.5. La capacité de production est fixée à 42 u/u.t.

Les coûts unitaires de maintenances préventives et correctives sont respectivement fixés à 44 u.m et 28 u.m. Le coût de stockage est fixé à 0.19 u.m/u.t. il est généré comme suit : nous générons au hasard le taux η entre $[5,15]$, dans notre cas $\eta = 5$.

Le coût de stockage est donné par : $hc = \eta\%cpmax$; tel que $cpmax$ est le coût unitaire de production lorsque l'unité de production fonctionne avec un taux de production maximale. Il est calculé comme suit : $cpmax = \overline{TC}max(1 + \rho\% + \theta_l\%)$.

θ_l est fixé à partir de trois intervalles différents : 12 pour des problèmes à faible coût de pénurie, 36 pour des problèmes avec des coûts de pénurie moyens, et 55 pour des problèmes avec coût de pénurie élevé.

ρ est le taux de profit du donneur d'ordres généré de façon aléatoire entre 15% et 30%. Tels que $l = \{F, M, E\}$ correspond respectivement à des niveaux de coût de pénurie faible, moyen et élevé.

$\overline{TC}max$ est le coût total moyen du donneur d'ordres quand il fonctionne avec le taux maximal de production.

Le stock initial est fixé à 8 u. Le coût de pénurie varie selon trois niveaux, à savoir :

- Faible coût de pénurie = 31.0553 u.m/u.
- Coût de pénurie moyen = 36.7887 u.m/u.
- Coût de pénurie élevé = 41.3275 u.m/u.

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
τ_k	25	27	33	47	48	78	144	156	164	180
d_k	797	105	274	530	42	1180	1974	415	249	528

Tableau IV.5. Demandes périodiques.

Nous considérons un barème des coûts de production à trois niveaux tels que : si nous utilisons la machine à moins de 50% de sa capacité maximale, un faible coût de production unitaire peut être généré. On le considère moyen pour un taux compris entre 50% et 80%. Il est élevé si le taux est supérieur à 80% de sa capacité maximale.

Aussi, nous supposons que la durée de vie de la machine est distribuée selon une distribution de Weibull à deux paramètres (2, 50). Le nombre moyen de défaillances par période est calculé à l'aide des expressions IV. 1 et IV. 14.

Enfin, nous générons les paramètres de chaque sous-traitant. Pour chacun d'eux, la réservation de capacité est choisie aléatoirement entre [8, 18]. Le prix de vente est généré aléatoirement entre $[[\overline{TCmax}], [\overline{TCmax}(1 + \rho\% + \theta_l\%)]]$. A chaque nouvelle génération de données des sous-traitants, nous gardons les données du groupe de sous-traitants générées précédemment et nous générons de nouvelles données pour les sous-traitants ajoutés récemment. Cette idée peut être justifiée en réalité, par l'adhésion de nouveaux sous-traitants au marché et la mise à jour de ce dernier. Le tableau IV.6 donne la capacité de production, et les prix de vente pour chaque sous-traitant.

i	1	2	3	4	5
$cmax_i$	16	14	13	15	12
sp_i	35	28	36	31	44
Fluctuation du prix de vente					
sp_i^L	31	29	28	30	27
sp_i^M	36	35	36	36	35
sp_i^H	44	42	43	42	44

Tableau IV.6. Les données des sous-traitants.

Tels que sp_i^L , sp_i^M et sp_i^H sont respectivement les prix de vente faibles, moyens, et élevés des sous-traitants.

IV.3.4.2. Résultats et discussions

Dans cette sous-section, nous montrons que l'intégration de la fiabilité et la maintenance dans la planification de la capacité avec des contrats de sous-traitance peut réduire le coût total du donneur d'ordres. Nous nous concentrons sur le niveau de production en interne, de sous-traitance et de pénurie du donneur d'ordres, et leurs relations avec la fluctuation des prix de vente des sous-traitants. Les exemples numériques présentés dans cette sous-section montrent que :

- L'intégration de l'aspect fiabilité et maintenance dans la planification de la production interne/sous-traitance peut réduire le coût total du donneur d'ordres.

- Le coût généré du donneur d'ordres est directement affecté par le taux de production en interne, leurs coûts de maintenance correspondant, par le niveau du coût de la pénurie, et le prix de vente des sous-traitants.

Tous les tests ont été effectués sur un Pentium 4 avec processeur Intel Core 2 Duo CPU (2.93 GHz), et 2 Go RAM. Nous avons utilisé MATLAB® pour implémenter la génération des instances, et le développement des algorithmes.

Le design expérimental se décompose en deux parties. Pour la première, trois problèmes tests sont effectués, où chaque problème est obtenu par le nombre de variations des sous-traitants. Dans les expériences, chaque problème a été lancé avec 20 répliques.

Les figures IV.8, IV.9 et IV.10 montrent la convergence des courbes caractéristiques pour la métaheuristique utilisée pour résoudre le problème dans ses différentes tailles (petite, moyenne et grande).

A partir de ces figures, il est très clair qu'il n'y a pas de changement significatif de la valeur de la fonction objectif après 600, 2500 et 4000 générations respectivement, pour des problèmes de petite taille (5 sous-traitants), de taille moyenne (20 sous-traitants), et de grande taille (35 sous-traitants). Le coût total optimal et le temps moyen d'exécution pour chaque groupe avec prise en compte des trois niveaux de coût de pénurie sont listés dans le tableau IV.7.

n	$Pop\ size$	$Ngen$	l_{sc}	TC^*	$\bar{te}$
5	300	600	L	130506	241
			M	138226	240
			H	153987	231
20	300	2500	L	148878	1218
			M	155656	1198
			H	164321	1230
35	300	4000	L	143597	2051
			M	146502	2302
			H	144612	2081

Tableau IV.7. Résumé des solutions.

Tels que n , $Pop\ size$, $Ngen$ et l_{sc} , sont respectivement, le nombre des sous-traitants, la taille de la population, le nombre de générations et le niveau de coût de pénurie.

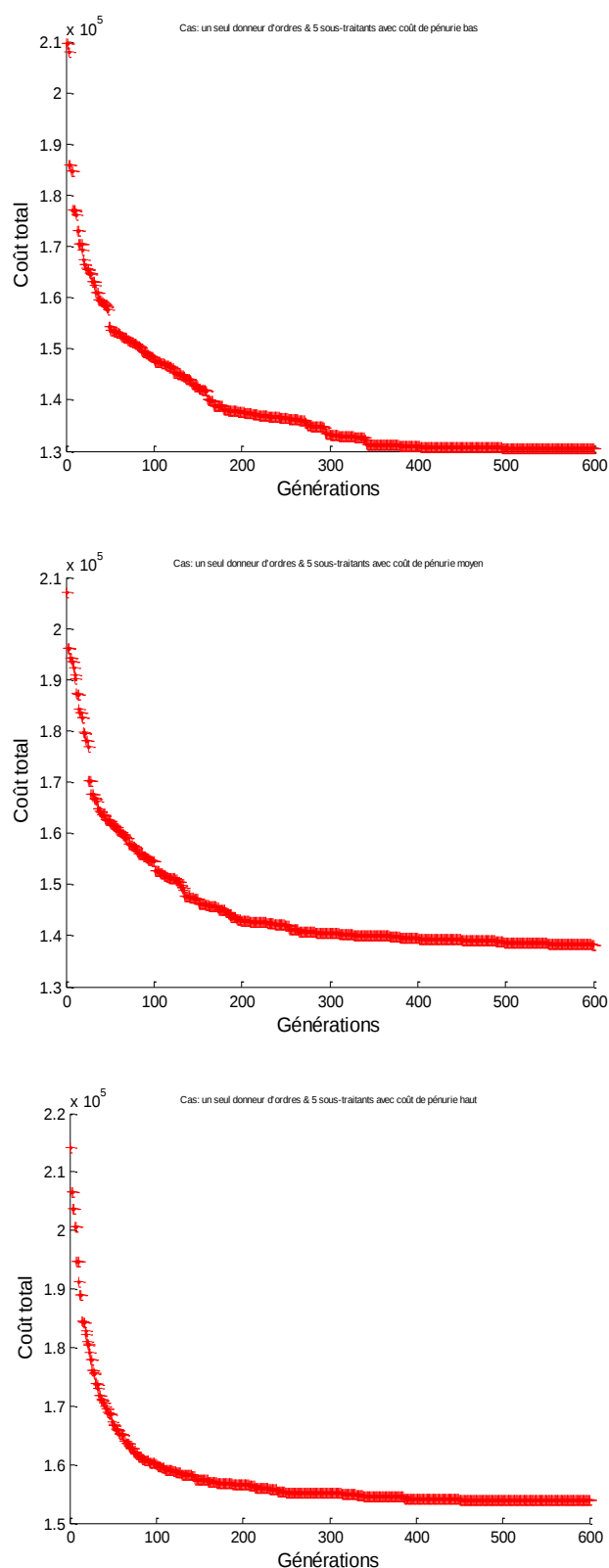


Figure IV. 8. La courbe caractéristique de convergence de l'approche pour résoudre des problèmes de petites tailles.

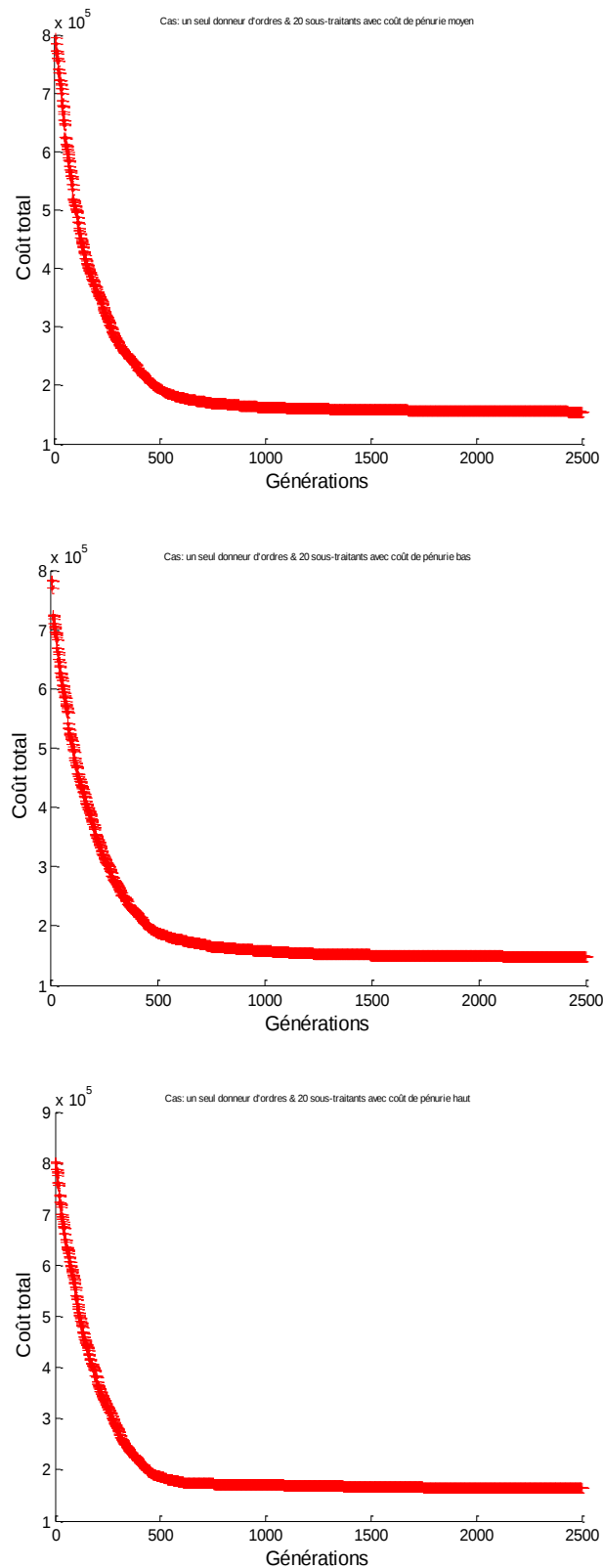


Figure IV. 9. La courbe caractéristique de convergence de l'approche pour résoudre des problèmes de taille moyenne.

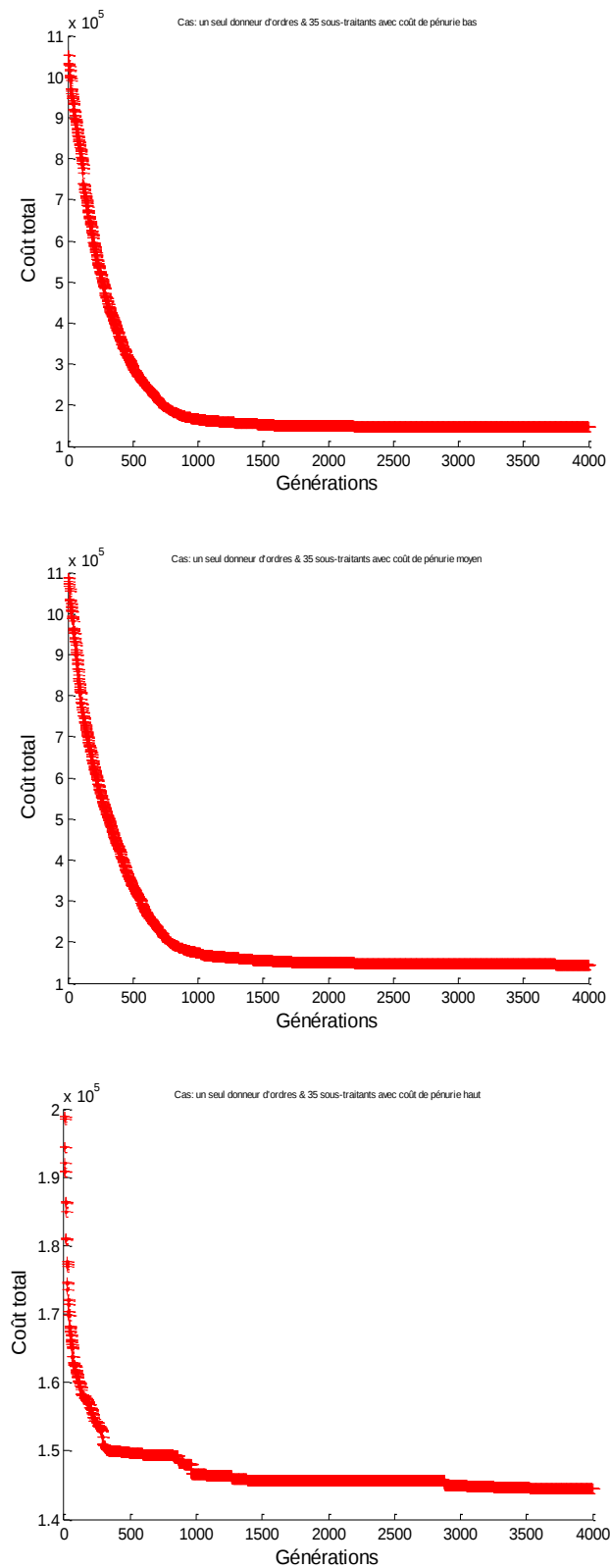


Figure IV. 10. La courbe caractéristique de convergence de l'approche pour résoudre des problèmes de grandes tailles.

Dans la deuxième partie du design expérimental, trois tests sont considérés ; où trois niveaux de prix de vente combinés avec trois niveaux de coût de pénurie sont pris en compte.

Les résultats expérimentaux du tableau IV.8 présente les coûts partiels et totaux du donneur d'ordres pour différentes valeurs du prix de vente des sous-traitants, et différents niveaux de coût de pénurie du donneur d'ordres.

l_{sp}	l_{sc}	TC^*	PC	OC	MC	IC	SC
	L	142378.49	48525	78699	1127.40	11847.91	2179.19
L	M	146710.06	43965	89592	1055.34	10459.83	1637.88
	H	142721.57	48270	82221	1117.58	9997.61	1115.38
	L	116988.23	87945	0	1994.08	19791.72	7257.43
M	M	118679.72	87135	70	2258.26	19493.82	9722.64
	H	152673.71	58350	76468	1643.99	14268.36	1943.36
	L	117092.57	87675	0	2158.57	19645.22	7613.79
H	M	117510.50	89850	704	2323.10	19610.57	5022.82
	H	119260.92	89295	792	2363.40	19677.94	7132.58

Tableau IV.8. Résultats du design expérimental pour différentes valeurs de fluctuation du prix de vente.

Tel que l_{sp} indique le niveau de prix de vente du sous-traitant.

Afin d'évaluer les résultats obtenus, pour chaque problème test, nous comparons les pourcentages de représentativité des différents coûts partiels par rapport aux coûts totaux. Le tableau IV.9 montre ces pourcentages de représentativité pour le problème de fluctuation des prix de vente des sous-traitants.

l_{sp}	l_{sc}	TC^*	PC	OC	MC	IC	SC
	L	100	34.08	55.27	0.79	8.32	1.53
L	M	100	29.97	61.07	0.72	7.13	1.12
	H	100	33.82	57.61	0.78	7	0.78
	L	100	75.17	0	1.7	16.92	6.2
M	M	100	73.42	0.06	1.9	16.43	8.19
	H	100	38.22	50.09	1.08	9.35	1.27
	L	100	74.88	0	1.84	16.78	6.5
H	M	100	76.46	0.6	1.98	16.69	4.27
	H	100	74.87	0.66	1.98	16.5	5.98

Tableau IV.9. Pourcentages de représentativité des coûts partiels par rapport aux coûts totaux – fluctuation du prix de vente –

Nous observons que si les prix de vente des sous-traitants sont faibles, le donneur d'ordres préfère la sous-traitance que la production interne. Le coût total de sous-traitance payé par le donneur d'ordres représente 55.27%, 61.07% et 57.61% du coût total, respectivement, pour les coûts de pénurie faibles, moyens et élevés ; par rapport aux coûts de production internes, qui représentent respectivement 34.08%, 29.97% et 33.82% du coût total.

Dans le cas où les prix de vente sont moyens, les pourcentages de représentativité des coûts de production internes augmentent à 75.17%, 73.42% et 38.22%, respectivement, pour les coûts de pénurie bas, moyens et supérieurs ; par rapport aux coûts de sous-traitance, qui baissent respectivement à 0%, 0.06% et 50.09% du coût total.

De même, si les prix de vente sont élevés, les pourcentages de représentativité des coûts de production internes augmentent pour atteindre respectivement 76.46% et 74.87% pour les coûts de pénurie moyens et élevés. Ils diminuent légèrement pour s'établir à 74.88% pour des coûts de pénurie plus faibles.

Les coûts de sous-traitance ne sont pas modifiés pour les coûts de pénurie bas, augmentent légèrement à 0.6% pour des coûts de pénurie moyens, et décroissent considérablement à 0.66% pour des coûts de pénurie élevés.

Nous constatons que les coûts de maintenance augmentent avec l'augmentation des taux de production interne. Pour des coûts de pénurie faibles du donneur d'ordres, les coûts de maintenance augmentent de 0.79% à 1.7% jusqu'à l'atteint de 1.84% respectivement pour un prix de vente bas, moyen et élevé des sous-traitants. Suivant la même logique de raisonnement, pour des coûts moyens de pénurie, les coûts de maintenance augmentent de 0.72% à 1.9% jusqu'à l'atteint de 1.98% respectivement pour un prix de vente bas, moyen et élevé des sous-traitants. Enfin, pour des coûts de pénurie élevés, les coûts de maintenance augmentent de 0.78% à 1.08% et 1.98% respectivement pour un prix de vente bas, moyen et élevé des sous-traitants. Pour les coûts de possession des stocks et les coûts de pénurie, il n'y a pas de tendance précise, ces coûts augmentent ou diminuent parfois avec la variation des niveaux de pénurie pour le donneur d'ordres et les niveaux de prix de vente des sous-traitants. Elles dépendent des taux de production adoptés au cours de chaque période et des quantités stockées pour les périodes suivantes.

La variation du prix de vente des sous-traitants, et les coûts de pénurie du donneur d'ordres affectent les coûts partiels du fabricant et, par conséquent, affectent son coût total. Le trièdre "prix de vente du sous-traitant - coût total en interne du donneur d'ordres - coût de pénurie du donneur d'ordres" permet de déterminer la décision optimale. Lorsque le coût de pénurie du donneur d'ordres est inférieur au prix de vente des sous-traitants, le donneur d'ordres préfère assumer un coût de pénurie ou de sous-traiter la production dans peu de périodes avec des petites quantités que de produire en interne (par exemple, les résultats du tableau IV.10). En revanche, la tendance s'inverse si le coût de pénurie est très élevé, par rapport au prix de vente chez les sous-traitants. Dans ce cas, en raison des considérations de minimisation des coûts, et en se basant sur le principe de l'avantage comparative, le donneur d'ordres décide de sous-traiter le maximum de demandes. Comme le montre le tableau IV.11, le donneur d'ordres fait appel à la sous-traitance dans toutes les périodes avec des quantités importantes.

Nous présentons deux exemples de plans de maintenance intégrée et de production internes – sous-traitance du donneur d'ordres. Le tableau IV.10 présente un exemple pour un niveau de coût de pénurie plus élevé du donneur d'ordres combiné avec un niveau de prix de vente plus élevés des sous-traitants.

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\% cmax_i$	30.88	41.40	41.25	37.90	40.08	39.40	29.10	38.98	30.76	29.35
qin_k	771	82	247	530	40	1181	1920	467	246	469
I_k	0	0.89	0.80	0.49	0.56	1.08	0.93	52.47	0.75	0.05
qS_k	26	23	27	0	0	0	54	0	3	43
i	Quantités sous-traitées									
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	2	0	0	0	0	16
PM	35.18	69.52	121.61	179.27	180					

Tableau IV.10. Exemple 1 de plan optimal de maintenance et de production interne/sous-traitance du donneur d'ordres.

Le tableau IV.11 présente un exemple pour un niveau de coût de pénurie plus élevé du donneur d'ordres combiné avec un niveau de prix de vente moyen des sous-traitants.

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
% $cmax_i$	0.3	35.46	34.46	37.86	36.8	27.91	24.82	15.44	12.73	17.5
qin_k	7	70	206	530	36	837	1638	185	101	280
I_k	0	0.4	0.07	0.78	0.07	0.19	0.63	0.86	0.71	0.16
qs_k	15	0	1	0	0	12	5	1	3	7
i	Quantités sous-traitées									
1	25	0	30	0	0	60	0	48	8	0
2	225	20	24	0	0	30	66	48	0	64
3	225	8	6	0	4	60	198	0	0	64
4	50	4	6	0	1	120	0	60	56	80
5	250	2	0	0	1	60	66	72	80	32
PM	32.87	75.85	121.78	180						

Tableau IV.11. Exemple 2 de plan optimal de maintenance et de production interne/sous-traitance du donneur d'ordres.

Avec :

qin_k est la quantité produite par les ressources internes du donneur d'ordres pendant la période k .

qs_k est la quantité non satisfaite (pénurie) du donneur d'ordres pendant la période k .

PM est le vecteur de la maintenance préventive pendant le plan du donneur d'ordres.

IV.4. Conclusion

Dans la première section de ce chapitre, nous avons étudié un problème de balancement entre deux modes de production (la production par l'utilisation des ressources internes et le recours aux services de la sous-traitance) dans un contexte multi-période, sous une approche combinée de gestion de la maintenance et de contrôle de la production.

La structure de la chaîne logistique considérée est constituée d'un seul donneur d'ordres en relation avec un seul sous-traitant, chacun d'eux est représenté par une seule machine, réparable et sujette à des défaillances aléatoires, produisant un seul type de produit. Afin de satisfaire la demande du marché, le donneur d'ordres décide de faire appel à la sous-traitance. Le sous-traitant produit en offrant des services de sous-traitance pour le donneur d'ordres avec un barème de prix qui dépend de la capacité réservée pour ce dernier.

Un modèle mathématique et une procédure d'optimisation basée sur les algorithmes génétiques ont été développés dans l'objectif de minimiser les coûts totaux du donneur d'ordres en déterminant simultanément le plan mixte optimal qui intègre le plan de production en interne et le plan de sous-traitance sous des contraintes de fiabilité et de maintenance.

Dans la deuxième section de ce chapitre, nous avons étendu le problème de la première section pour l'étude de la planification des capacités avec des options de sous-traitance sous une politique de maintenance intégrée. La structure de la chaîne considérée dans cette section est constituée d'un seul donneur d'ordres en relation avec un ensemble de sous-traitants. Le système de production du donneur d'ordres est représenté par une seule machine, réparable et sujette à des défaillances aléatoires, produisant un seul type de produit. Pour répondre aux exigences du marché, le donneur d'ordres décide de faire appel à la sous-traitance et/ou produire par l'utilisation des ressources internes. La politique de sous-traitance consiste à produire tout ou partie des demandes du donneur d'ordres. Les sous-traitants produisent en offrant des services de sous-traitance pour le donneur d'ordres avec des prix de vente fixes.

Un modèle mathématique a été proposé et une procédure d'optimisation à base d'algorithmes génétiques a été implémentée pour déterminer simultanément pour le donneur d'ordres : le plan de production interne,

le plan de maintenance préventive et le plan de sous-traitance, c'est-à-dire, la sélection des fournisseurs de la sous-traitance appropriés et ses quantités associées; ceux-ci devraient être adoptées afin de satisfaire les exigences de ses clients, tout en minimisant les coûts totaux pendant l'horizon de planification.

Afin de montrer l'applicabilité de notre approche, nous avons mené des expérimentations pour étudier les perspectives de gestion pour le modèle et la procédure développée.

Chapitre V

Métaheuristique et heuristiques pour la planification de la production et des capacités avec option de sous-traitance sous une politique de maintenance intégrée

V.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons étudié le problème de balancement entre la production en interne et la sous-traitance sous des contraintes de fiabilité et maintenance simples. Comme un début nous avons considéré une chaîne composée d'un seul donneur d'ordres et un seul sous-traitant, et puis nous avons étendu ce problème pour de multiple sous-traitants sous une politique de maintenance intégrée. Ce chapitre étend les travaux du chapitre précédent et la deuxième section du chapitre 3. Nous étudions le problème de la planification des capacités avec possibilités de sous-traitance, sous une politique de maintenance intégrée, et contrairement aux travaux précédents, nous allons étudier comment équilibrer entre multiple sous-traitants, et multiple donneurs d'ordres grâce à une plate-forme de cotraitance. Chaque entreprise se compose d'une unité de production, réparable et soumise à des défaillances aléatoires. Pour répondre aux exigences du marché, les donneurs d'ordres peuvent produire par leurs ressources internes, ou sous-traiter tout ou une partie de la demande. Les services de sous-traitance sont proposés par un ensemble de sous-traitants. Les donneurs d'ordres génèrent leurs plans intégrés de production interne et de maintenance, et recherchent un plan de sous-traitance à travers la plate-forme de sous-traitance. Le but global de la plate-forme est de proposer simultanément les plans intégrés optimaux de production interne – maintenance, et les plans de sous-traitance tout en maximisant le profit total du réseau durant l'horizon de planification.

Nous allons développer des modèles mathématiques et des procédures d'optimisation à base d'algorithmes exactes et métaheuristiques pour les résoudre. Afin de valider notre approche, des expériences numériques sont menées, ce qui permettra d'étudier les perspectives de gestion pour les modèles et les procédures développées.

Le chapitre est organisé comme suit : nous décrivons en premier le système considéré, suivi des modèles mathématiques développés. Les procédures d'optimisation sont discutées dans la section 4. En fin, des expériences numériques sont réalisées puis des conclusions pratiques sont discutées dans la section 5.

V.2. Description du problème

Dans ce chapitre, nous considérons une chaîne logistique à deux échelons composée de multiples donneurs d'ordres et multiples sous-traitants. Nous modélisons chaque unité de production, comme étant une seule machine réparable, sujette à des défaillances aléatoires, produisant un seul type de produit. Pour satisfaire une demande du marché, les unités de production fonctionnent avec des taux de production variables, au cours d'un horizon de planification donné H_r^a incluant N_r^a périodes de longueurs non homogènes $\tau_{k_r}^a$, avec $r = i, j$ et $a = \{o, s\}$. $k_i = 1, \dots, N_i^o$ et $k_j = 1, \dots, N_j^s$.

Chaque demande d doit être satisfaite à la fin de la période. On considère que le coût de production est en fonction du taux de l'utilisation de la machine. En outre, le taux de défaillance dépend du temps et de la cadence de production. Nous supposons que les demandes des produits arrivent au début de l'horizon de planification. Nous considérons une plate-forme de sous-traitance, où les sous-traitants et les donneurs d'ordres adhèrent pour des contrats de sous-traitance stratégiques ou secondaires, qui maximisent leurs profits et le profit de la chaîne.

Chaque sous-traitant a une relation avec des donneurs d'ordres stratégiques et secondaires. Il doit répondre à ses donneurs d'ordres stratégiques sans passer par la plate-forme, et cherche à acquérir des contrats de sous-traitance supplémentaires (avec les donneurs d'ordres secondaires) via la plate-forme tout en optimisant la recherche des partenaires.

Cependant, les donneurs d'ordres secondaires cherchent à équilibrer entre la production en interne et la sous-traitance, en proposant des projets de sous-traitance leur assurant des coûts totaux minimales. Ainsi, la plate-forme reçoit les besoins de sous-traitance des deux parties, les analyse et renvoie la réponse à chaque partie. La figure V.1 montre la structure de la chaîne logistique considérée dans ce chapitre.

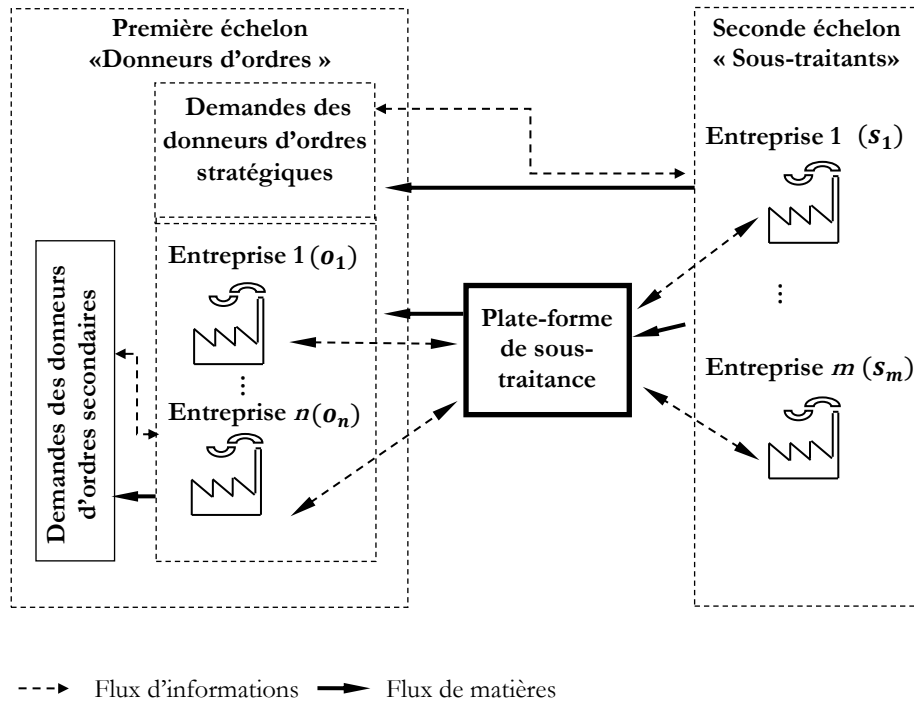


Figure V.1. La structure de la chaîne logistique considérée.

V.2.1. Notations

Dans le but de faciliter la lecture et la compréhension de ce chapitre, nous résumons l'ensemble des notations utilisées comme suit :

Indices

a	Indice du type d'acteur de la chaîne logistique, avec $a = \{o, s\}$, tels que o est relatif au donneur d'ordres et s au sous-traitant.
r	Indice de l'acteur de la chaîne logistique, avec $r = \{i, j\}$.
k_r	Indice de périodes de l'acteur r , $k_r = 1, \dots, N_r^a$, où N_r^a est le nombre de demandes de l'acteur a .
l_r	Indice de niveau dans le barème de coût, $l_r = 1, \dots, L_r$, où L_r est le nombre de niveaux.
i	Indice du donneur d'ordres, où $i = 1, \dots, n$; n est le nombre de donneurs d'ordres.
j	Indice du sous-traitant, où $j = 1, \dots, m$; m est le nombre de sous-traitants.

Variables de décision

$c_{r,k_r,l_r}^{a,\overline{wo}}$ et $c_{r,k_r,l_r}^{a,wo}$	Le taux de production de l'acteur de la chaîne pendant la période k_r et son niveau de coût de production l_r (respectivement, sans / avec option de sous-traitance pour les donneurs d'ordres et respectivement sans/ avec sous-traitance secondaire pour les sous-traitants).
$qin_{i,k_i,l_i}^{\overline{wo}}$ et qin_{i,k_i,l_i}^{wo}	La quantité de production en interne du donneur d'ordres i , au cours de la période k_i produite avec le taux de production $c_{i,k_i,l_i}^{o,\overline{wo}}$ et/ou $c_{i,k_i,l_{i-1}}^{o,\overline{wo}}$ respectivement $c_{i,k_i,l_i}^{o,wo}$ et/ou $c_{i,k_i,l_{i-1}}^{o,wo}$, et son niveau de coût correspondant respectivement l_i et/ou l_{i-1} du barème des coûts de production.
qot_{i,k_i}	La quantité de sous-traitance du donneur d'ordres i dans la période k_i .

qot_{j,k_i,k_j,l_j}	La quantité de sous-traitance produite par le sous-traitant j dans la période k_j pour le donneur d'ordres i , dans la période k_i , et son niveau de coût correspondant respectivement à l_j et l_{j-1} du barème des coûts de production.
$T_{r,e}^a$	$e^{ème}$ date de la maintenance préventive du donneur d'ordres ou du sous-traitant.
e_{k_r}	Variable binaire qui indique si on change le taux de production ou non pendant la période k_r . Elle est exprimée comme suit : $e_{k_r} = \begin{cases} 1 & \text{s'il existe un changement du taux de production} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
$f_{MC}(T)$	La fonction du coût de maintenance du système par unité de temps.
Npm_r^a	Le nombre d'actions de maintenance préventive au cours de l'horizon de planification du donneur d'ordres ou du sous-traitant.
$M(T)$	Le nombre moyen de défaillances au cours de l'intervalle T .
$\overline{sp}_i^o$	Le prix de vente moyen du donneur d'ordres i .
$\overline{sp}_j^{s,st}$	Le prix de vente moyen du sous-traitant j pour les donneurs d'ordres stratégiques.
$\overline{sp}_j^{s,sc}$	Le prix de vente moyen du sous-traitant j pour les donneurs d'ordres secondaires.
sc_i^o	Le coût unitaire de pénurie du donneur d'ordres i .
I_{r,k_r}^a	Le niveau du stock du partenaire r (donneur d'ordres ou du sous-traitant) à la fin de la période k_r .
$\pi_r^{a,\overline{wo}}$ et $\pi_r^{a,wo}$	Le profit de l'acteur r de la chaîne sans ou avec option de sous-traitance.
π_T^{sc}	Profit total de la chaîne logistique.
$GR_r^{a,\overline{wo}}$ et $GR_r^{a,wo}$	Le revenu brut de l'acteur r de la chaîne sans ou avec option de sous-traitance.
$PC_r^{a,\overline{wo}}$ et $PC_r^{a,wo}$	Le coût total de production de l'acteur r de la chaîne sans ou avec option de sous-traitance.
$IC_r^{a,\overline{wo}}$ et $IC_r^{a,wo}$	Le coût total de stockage de l'acteur r de la chaîne sans ou avec option de sous-traitance.
$MC_r^{a,\overline{wo}}$ et $MC_r^{a,wo}$	Le coût total de maintenance de l'acteur r de la chaîne sans ou avec option de sous-traitance.
$SC_r^{a,\overline{wo}}$ et $SC_r^{a,wo}$	Le coût total de pénurie de l'acteur r de la chaîne sans ou avec option de sous-traitance.
OC_i^o	Le coût total de sous-traitance du donneur d'ordres i .

Paramètres

d_k	La demande des clients du donneur d'ordres dans la période k .
H_r^a	Le nombre de sous-périodes du sous-traitant ou du donneur d'ordres indexés de $y = 1$ jusqu'à $y = H_r^a$.
N_r^a	Le nombre de demandes de l'acteur r de la chaîne.
d_{r,k_r}^a	La demande adressée au partenaire r . Il s'agit de la demande au donneur d'ordres secondaire i dans la période k_i , ou à la demande des donneurs d'ordres stratégiques adressée au sous-traitant j dans la période k_j .
$\tau_{k_r}^a$	Le délai de livraison de la demande de l'acteur a dans la période k_r .
hc_{r,k_r}^a	Le $r^{ième}$ coût de stockage de l'acteur r de la chaîne par unité de temps, pour la période k_r .
pc_{r,k_r,l_r}^a	Le coût unitaire de production de l'acteur r de la chaîne dans la période k_r et son niveau correspondant l_r dans le barème des coûts de production.
cmc_{r,k_r,l_r}^a	Le coût unitaire de la maintenance corrective de l'acteur r de la chaîne dans la période k_r et son niveau correspondant l_r dans le barème des coûts de maintenance corrective.

pmc_{r,k_r,l_r}^a	Le coût d'une intervention de maintenance préventive de l'acteur r de la chaîne dans la période k_r et son niveau correspondant l_r dans le barème des coûts de maintenance préventive.
$\lambda_r^a(t)$	La fonction de taux de défaillance de la machine de l'acteur r de la chaîne à l'instant t .
ln_r^a	La fonction de taux de défaillance nominale de la machine de l'acteur r de la chaîne, lorsque la machine fonctionne avec une cadence de production nominale.
$cmax_r^a$	Le taux de production maximal de l'acteur r de la chaîne.
$cmin_r^a$	Le taux de production minimal de l'acteur r de la chaîne.
mg_r^a	Le taux de profit ou le pourcentage de gain réalisé par l'acteur r de la chaîne.
$\bar{t}e$	Temps moyen d'exécution (secondes).
$\alpha_r^a, \beta_{r,l_r}^a$	Paramètres de la distribution de défaillance de la machine de l'acteur r de la chaîne. Pour β on associe le niveau l_r dans le barème des coûts.

V.2.2. Hypothèses

Pour l'étude de ce problème, nous considérons les hypothèses suivantes :

1. L'horizon de planification des sous-traitants ou des donneurs d'ordres est divisé en Δy_r sous-périodes indexées de $y = 1$ à $y = H_r^a$ (où $\Delta y_r = 1$ et $r = i, j$). Ces sous-périodes sont supposées indécomposables.
2. Les données de la demande sont reçues au début de l'horizon de planification.
3. La demande moyenne des donneurs d'ordres stratégiques devrait être relativement grande par rapport à la demande des donneurs d'ordres secondaires. En réalité, les donneurs d'ordres stratégiques sont des acteurs avec qui les sous-traitants entretiennent des relations (contrats) à long termes, renouvelables avec de lots de tailles importantes. Alors que les donneurs d'ordres secondaires ont des contrats occasionnels à moyen terme ayant des demandes de petites tailles.
4. Le sous-traitant doit satisfaire toutes les demandes de ses donneurs d'ordres stratégiques.
5. Les sous-traitants doivent livrer aux donneurs d'ordres les demandes, ou des parties des demandes dans les délais de livraison spécifiés par ce dernier (configuration "juste à temps"). Ainsi, les sous-traitants assument les coûts de stockage.
6. La demande adressée au donneur d'ordres mais non satisfaite est perdue, ce qui génère un coût de pénurie. Le donneur d'ordres peut avoir recours à la sous-traitance et éviter le coût de pénurie, il peut sous-traiter la totalité ou une partie de cette quantité.
7. Le coût de production est variable, et dépend du taux de production.
8. Les produits sont périssables avec le temps.
9. Le temps de traitement des demandes n'est pas pris en compte dans cette étude.
10. Le niveau de stock pris en compte est celui relatif à la fin de chaque sous-période.
11. Le niveau de stock au début et à la fin de l'horizon de planification ne sont pas forcément nuls.
12. Les défaillances sont détectées instantanément.
13. Les durées des réparations minimales et des actions de maintenances préventives sont considérées négligeables.
14. Les machines sont soumises à des politiques de maintenance préventive pour réduire l'occurrence des défaillances. Les périodes d'indisponibilité des machines suite à des arrêts de maintenance sont supposées négligeables (hypothèse 13), et par conséquent, n'engendrent pas une perte de la demande.
15. Les actions de maintenance préventive sont considérées comme parfaites. Chaque action restaure la machine à la configuration "As Good As New".

V.2.3. Politique de couplage production interne – sous-traitance

La politique de contrôle de la production de chaque sous-traitant consiste à : (1) satisfaire la demande des donneurs d'ordres stratégiques en construisant un stock de produits finis, ayant une capacité supérieure à ces demandes, et (2) produire pour les donneurs d'ordres secondaires en offrant des services de sous-traitance secondaires ; en se basant sur les ordres de ces donneurs d'ordres et des obligations contractuelles.

Pour les donneurs d'ordres secondaires, la capacité de production interne est parfois inférieure à la demande du marché. Dans ce cas, afin de satisfaire des demandes très élevées au-delà des prévisions, sans retards, l'entreprise doit recourir à la sous-traitance pour combler l'écart entre la production interne et la demande.

Nous supposons que les unités de production dans chaque partie de la chaîne logistique fonctionnent avec des taux de production variables, durant chaque période de production. Nous considérons une dépendance entre le taux et le coût de production. Celle-ci est justifiée par le fait que dans l'économie, le coût de production se compose de deux éléments distincts : les coûts fixes et coûts variables. Les coûts fixes sont des dépenses qui ne sont pas en fonction du niveau des biens ou services produits par l'entreprise. Ils sont liés au temps, (comme la main-d'œuvre, l'électricité, le loyer,...) et sont souvent appelés coûts généraux. Contrairement aux coûts variables, qui sont liés au volume, et qui sont relatifs à la quantité produite.

Par conséquent, les coûts de fonctionnement de l'unité de production dépendent de leur taux de production. Soit pc_{r,k_r,l_r}^a un modèle de barème de coût avec L_r niveaux $\{pc_{r,k_r,l_r}^a, c_{r,k_r,l_r}^a\}$, $l_r = 1, 2, \dots, L_r$. Il se compose du coût de production pc_{r,k_r,l_r}^a et son taux de production correspondant c_{r,k_r,l_r}^a . La formule suivante représente la forme générale du barème des coûts :

$$pc_{r,k_r,l_r}^a = \begin{cases} pc_{r,k_r,1}^a & \text{si } cmin_r^a < c_{r,k_r,l_r}^a \leq c_{r,k_r,1}^a \\ \dots & \dots \\ pc_{r,k_r,l_r}^a & \text{si } c_{r,k_r,l_r-1}^a < c_{r,k_r,l_r}^a \leq c_{r,k_r,l_r}^a \\ \dots & \dots \\ pc_{r,k_r,L_r}^a & \text{si } c_{r,k_r,L_r}^a < c_{r,k_r,l_r}^a \leq cmax_r^a \end{cases} \quad (V.1)$$

Avec : $pc_{r,k_r,1}^a < \dots < pc_{r,k_r,l_r}^a < \dots < pc_{r,k_r,L_r}^a$
 $cmin_r^a < c_{r,k_r,1}^a < \dots < c_{r,k_r,l_r-1}^a < c_{r,k_r,l_r}^a < \dots < c_{r,k_r,L_r}^a < cmax_r^a$

Supposons que nous utilisons la machine avec des taux de production $c_{r,k_r,1}^a, \dots, c_{r,k_r,l_r}^a, \dots, c_{r,k_r,L_r}^a$. Selon la relation de dépendance entre le taux de défaillance et la cadence de production, nous avons :

$$\lambda_{r,1}^a(t) < \dots < \lambda_{r,l_r}^a(t) < \dots < \lambda_{r,L_r}^a(t) \quad (V.2)$$

C'est-à-dire si nous utilisons la machine avec un taux de production c_r , le taux de défaillance de l'unité de production est $\lambda_{l_r}^a(t)$. Nous avons l'expression suivante des coûts de maintenance :

$$MC_{k_r}^a = CMC_{k_r}^a + PMC_{k_r}^a \quad (V.3)$$

Par conséquent,

$$MC_{k_r,1}^a < \dots < MC_{k_r,l_r}^a < \dots < MC_{k_r,L_r}^a \quad (V.4)$$

V.2.4. Politique de maintenance

Nous considérons que le temps de défaillance pour chaque machine est régi par une distribution de probabilité de Weibull. La politique de maintenance suggère la planification de la maintenance préventive (MP), afin de réduire le risque croissant de défaillance de la machine.

Nous nous référons dans ce chapitre aux actions de maintenance préventive parfaites comme un remplacement préventif (RP). De plus, les réparations minimales (RM) sont effectuées à chaque fois qu'une défaillance de la machine se produit, ainsi, la machine est restaurée à un état de fonctionnement, mais l'âge de la machine ne sera pas réduit (configuration "As Bad As Old").

Nous considérons que le taux de défaillance de la machine augmente avec le temps et dépend de la cadence de production, tel que le taux de défaillance $\lambda_{k_r}^a(t)$ au cours de chaque période dépend du taux de production c_{r,k_r,l_r}^a . Ainsi, la production à cadence élevée accélère la dégradation de la machine et augmente

donc le risque de défaillance, par conséquent, le nombre et le coût total des réparations minimales augmentent (Haoues et al. 2011).

Pour une période donnée $k_r = [t_{k_r-1}, t_{k_r}]$, $k_r \geq 1$, le taux de défaillance est écrit comme suit :

$$\lambda_{k_r}^a(t) = \frac{c_{r,k_r,l_r}^a}{c_{max_r}^a} \lambda_{n_r}^a(t) \quad (V.5)$$

Avec $0 \leq t \leq (t_{k_r} - t_{k_r-1})$

La réparation est minimale, ainsi l'occurrence des défaillances au cours de chaque période de l'horizon de planification est modélisée avec un processus de Poisson non homogène. Donc, le nombre moyen de défaillances est donné par :

$$M(H_r^a) = \sum_{k_r=1}^{N_r^a} \int_{t_{k_r-1}}^{t_{k_r}} \lambda_{k_r}^a(t) dt \quad (V.6)$$

Où $\lambda_{k_r}^a(t)$ est la fonction taux de défaillance de la machine à un instant donné t , obtenue à partir de la fonction de densité de probabilité $f_r^a(t)$ comme suit :

$$\lambda_{k_r}^a(t) = \frac{f_r^a(t)}{1 - F_r^a(t)} \quad (V.7)$$

Avec,

$$F_r^a(t) = \int_0^t f_r^a(x) dx \quad (V.8)$$

$F_r^a(t)$ est la fonction de distribution cumulative de la machine de l'acteur r .

Nous supposons que la maintenance préventive restaure la machine à la configuration "As Good As New", nous pouvons modéliser le fonctionnement et la maintenance de la machine comme un processus de renouvellement, où les points de renouvellement sont : le début de fonctionnement de la machine (début de l'horizon), et la fin de chaque activité de MP (Cassady et Kutanoglu, 2005). Nous effectuons des MP à chaque date optimale de maintenance préventive $T_{r,e}^a$; l'âge effectif de la machine devient nul, parce que la machine est renouvelée.

V.3. Modèles mathématiques

Tout d'abord, nous présentons le modèle du donneur d'ordres sans sous-traitance, et celui du sous-traitant sans sous-traitance secondaire. Dans la deuxième étape, nous considérons la sous-traitance pour les deux parties de la chaîne par l'adhésion à la plate-forme de sous-traitance.

Nous introduisons un indice W afin d'éviter la redondance des expressions pour les donneurs d'ordres et les sous-traitants, dans le même plan ou des plans différents. Pendant le développement des modèles, nous utilisons un barème de coût de production tel que $l_r \in [l_r^{min}, l_r^{max}]$, avec $l_r = 1, \dots, L_r$.

V.3.1. Modèle de planification intégrée du donneur d'ordres sans sous-traitance

Sans option de sous-traitance, la politique de contrôle de la production du donneur d'ordres consiste à construire un stock de produits finis, avec un taux de production variable $c_{i,k_i,l_i}^{o,\overline{w}o}$, pour satisfaire une demande d_{i,k_i}^o de ses clients. Le cas "donneur d'ordres sans options de sous-traitance" permet de déterminer le prix de vente moyen pour les clients, en utilisant seulement la production par l'utilisation des ressources internes.

Le profit du donneur d'ordres, est obtenu par la différence entre le revenu brut et le coût agrégé des coûts de production, de stockage, de maintenance et de pénurie. Il est donné par l'expression suivante :

$$\pi_i^{o,\overline{w}o} = GR_i^{o,\overline{w}o} - (PC_i^{o,\overline{w}o} + IC_i^{o,\overline{w}o} + SC_i^{o,\overline{w}o} + MC_i^{o,\overline{w}o}) \quad (V.9)$$

V.3.1.1. Le revenu brut

Le revenu brut, est le montant de l'ensemble des ventes effectuées au cours de l'horizon de planification ; il comprend les ventes des unités produites par les ressources internes. Il est donné par la formule (V.10):

$$GR_i^{o,\overline{w}o} = \overline{sp}_i^o \sum_{k_i=1}^{N_i^o} GR_{i,k_i}^{o,\overline{w}o} \quad (V.10)$$

Où,

$$GR_{i,k_i}^{o,\overline{w}o} = \begin{cases} d_{i,k_i}^o & \text{Si } \left[(Tmin_{i,k_i}^o - \tau_{k_i-1})c_{i,k_i-1,l_{i-1}}^{o,\overline{w}o} + (\tau_{k_i} - Tmin_{i,k_i}^o)c_{i,k_i,l_i}^{o,\overline{w}o} \right] \geq d_{i,k_i}^o \text{ ou } \Delta\tau_{k_i}c_{i,k_i,l_i}^{o,\overline{w}o} \geq d_{i,k_i}^o \\ G_{i,k_i}^{o,\overline{w}o} & \text{Si non} \end{cases} \quad (V.11)$$

$$\Delta\tau_{k_r} = \tau_{k_r} - \tau_{k_r-1}$$

$$Tmin_{i,k_i}^o = \min_{k_i} T_{i,k_i}^o \quad (V.12)$$

Avec :

$$T_{i,k_i}^o = \{T_{i,1}^o, \dots, T_{i,e}^o, \dots, T_{i,E}^o\}, E \text{ est le nombre d'actions de maintenance préventive durant la période } k_i.$$

et :

$$G_{i,k_i}^{o,\overline{w}o} = \begin{cases} \left[(Tmin_{i,k_i}^o - \tau_{k_i-1})c_{i,k_i-1,l_{i-1}}^{o,\overline{w}o} + (\tau_{k_i} - Tmin_{i,k_i}^o)c_{i,k_i,l_i}^{o,\overline{w}o} \right] & \text{Si } \exists T_{i,e}^o \in [\tau_{k_i-1}, \tau_{k_i}] \\ \Delta\tau_{k_i}c_{i,k_i,l_i}^{o,\overline{w}o} & \text{Si non} \end{cases} \quad (V.13)$$

$c_{i,k_i,l_i}^{o,\overline{w}o}$ est le taux de production interne du donneur d'ordres i , dans la sous-période $[T_{i,e-1}^o, T_{i,e}^o]$ (figure V.2), et son niveau de coût l_i correspondant au barème des coûts de production.

Il est clair que chaque entreprise utilise ses propres mécanismes pour déterminer le prix de vente. Généralement, si un produit est transformé ou fabriqué entièrement, le prix de vente est calculé comme suit :

$$\overline{sp}_i^o = \frac{PC_i^{o,\overline{w}o} + IC_i^{o,\overline{w}o} + MC_i^{o,\overline{w}o}}{\sum_{k_i=1}^{N_i^o} G_{i,k_i}^o} (1 + mg_i^o) \quad (V.14)$$

Le taux de marge est le pourcentage de gain réalisé par l'entreprise. Il inclut le montant de la taxe sur la valeur ajoutée. Le prix de revient comprend la somme des coûts d'achat hors taxes des matières premières et des produits utilisés dans la composition du produit, la main d'œuvre, la contribution sociale, l'amortissement des outils et des coûts de marketing.

V.3.1.2. Le coût de stockage

Chaque demande doit être livrée à l'instant de livraison imposé par les clients. Le stockage du produit génère

des coûts de possession, le coût de possession total du stock comprend le coût de stock de chaque période. Il est donné par l'expression suivante :

$$IC_r^{a,W} = \sum_{k_r=1}^{N_r^a} h c_{r,k_r}^a \left(\sum_{y=2}^{\tau_{k_r}} (y-1) \left[c_{r,k_r,l_{y-1}}^{a,W} + I_{y-1} - [I_{y-1}] \right] \right) \quad (V.15)$$

Avec : $W = \overline{w\overline{o}}$, $a = o$, et $r = i$.

Tel que $c_{i,k_i,l_y}^{o,\overline{w\overline{o}}}$ est le taux de production du donneur d'ordres i pendant la sous-période y et son niveau de coût l_y correspondant au barème des coûts de production. Sachant que I_{k_r} s'écrit comme suit :

$$I_{k_r} = \begin{cases} \max \left[0, \left((Tmin_{r,k_r}^a - \tau_{k_r-1}) c_{r,k_r-1,l_{y-1}}^{a,W} + \right. \right. \\ \left. \left. I_{k_r-1} + (\tau_{k_r} - Tmin_{r,k_r}^a) c_{r,k_r,l_y}^{a,W} \right) - d_{r,k_r}^a \right] & \text{Si } \exists T_{r,e}^a \in [\tau_{k_r-1}, \tau_{k_r}] \\ \max \left[0, \left(I_{k_r-1} + \Delta \tau_{k_r} c_{r,k_r,l_y}^{a,W} \right) - d_{r,k_r}^a \right] & \text{Sinon} \end{cases} \quad (V.16)$$

Pour le donneur d'ordres, la figure V.2 présente un exemple de graphe d'évolution production-stockage pour montrer comment calculer le niveau de stock à la fin de chaque période.

Avec :

$$c_{k_r+1} = \begin{cases} c'_{k_r} & \text{Si } \exists T_{r,e}^a \in [\tau_{k_r-1}, \tau_{k_r}] \\ c_{k_r} & \text{si non} \end{cases} \quad (V.17)$$

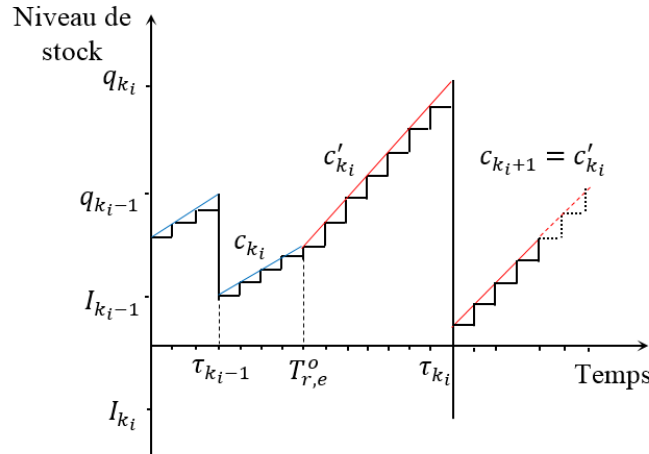


Figure V.2. Le graphe d'évolution production – stockage du donneur d'ordres.

V.3.1.3. Le coût de production

Le système de production du donneur d'ordres produit avec des taux de production variables pour chaque période de production. Ainsi, le coût de production total est donné par l'expression V.18 on pose $= \overline{w\overline{o}}$, $a = o$, et $r = i$:

$$PC_r^{a,W} = \sum_{k_r=1}^{N_r^a} PC_{r,k_r}^{a,W} \quad (V.18)$$

Avec :

$$PC_{r,k_r}^{a,W} = \begin{cases} \left((Tmin_{r,k_r}^a - \tau_{k_r-1}) c_{r,k_r-1,l_{r-1}}^{a,W} p c_{r,k_r,l_{r-1}}^a + (\tau_{k_r} - Tmin_{r,k_r}^a) c_{r,k_r,l_r}^{a,W} p c_{r,k_r,l_r}^a \right) & \text{Si } \exists T_{r,e}^a \in [\tau_{k_r-1}, \tau_{k_r}] \\ p c_{r,k_r,l_r}^a \cdot \Delta \tau_{k_r} \cdot c_{r,k_r,l_r}^{a,W} & \text{Sinon} \end{cases} \quad (V.19)$$

V.3.1.4. Le coût de pénurie

Dans la situation où les demandes dépassent la capacité du donneur d'ordres, un coût de pénurie est généré. Il est exprimé par la formule suivante :

$$SC_i^{o,\overline{w\overline{o}}} = sc_i^o \sum_{k_i=1}^{N_i^o} SL_{i,k_i}^{o,\overline{w\overline{o}}} \quad (V.20)$$

Avec :

$$SL_{i,k_i}^{o,\overline{w\overline{o}}} = \begin{cases} \max \left[0, d_{i,k_i}^o - \left(I_{k_i-1} + (\tau_{k_i} - Tmin_{i,k_i}^o) c_{i,k_i,l_y}^{o,\overline{w\overline{o}}} \right) \right] & \text{Si } \exists T_{i,r}^o \in [\tau_{k_i-1}, \tau_{k_i}] \\ \max \left[0, d_{i,k_i}^o - (I_{k_i-1} + \Delta \tau_{k_i} c_{i,k_i,l_y}^{o,\overline{w\overline{o}}}) \right] & \text{Sinon} \end{cases} \quad (V.21)$$

V.3.1.5. Le coût de maintenance

Les coûts de maintenance dépendent des politiques adoptées. La politique implémentée dans ce problème est résumée en deux points : la MP est implémentée à chaque $T_{r,e}^a$ ($T_{r,e}^a$ dépend de la durée des périodes et du taux de production observé). Une MC (réparation minimale) est effectuée à chaque fois qu'une défaillance survient. Si la MP est effectuée dans une période k_r donnée, le coût de maintenance dans cette période est la somme des coûts de maintenance corrective et préventive (si elle a lieu). Le coût de la maintenance corrective est le nombre moyen de pannes dans la période multiplié par le coût d'une action de maintenance corrective. Ainsi, le coût de maintenance est donné par l'expression suivante :

$$MC_r^{a,W} = CMC_r^a + PMC_r^a \quad (V.22)$$

Le nombre d'actions de MP au cours de l'horizon de planification est déterminé par l'algorithme qui calcul les dates optimales de la maintenance préventive ; il représente la longueur du vecteur de fréquence des maintenances préventives. Le coût total de maintenance préventive est donné par l'expression suivante :

$$PMC_r^a = \sum_{k_r=1}^{N_r^a} e_{k_r} p m c_{r,k_r-1,l_{r-1}}^a + (E - e_{k_r}) p m c_{r,k_r,l_r}^a \quad (V.23)$$

Le coût total de la maintenance corrective est donné par l'expression suivante :

$$CMC_r^a = \sum_{k_r=1}^{N_r^a} CMC_{k_r}^a \quad (V.24)$$

$M(H_r^a)$ est le nombre moyen de pannes durant l'horizon H_r^a de l'acteur r .

$$M(H_r^a) = \sum_{k_r=1}^{N_r^a} M(k_r) = \sum_{k_r=1}^{N_r^a} \int_{\tau_{k_r-1}}^{\tau_{k_r}} \lambda_r^a(t) dt \quad (V.25)$$

Le coût de maintenance corrective par période est donné par l'équation suivante :

$$CMC_{k_r}^a = \begin{cases} \left[cmc_{r,k_r-1,l_r-1}^a \frac{c_{r,k_r-1,l_r-1}^{a,W}}{cmax_r^a} \int_{\tau_{k_r-1}}^{Tmin_{r,k_r}^a} \lambda n_r^a(t) dt \right. \\ \quad \left. + cmc_{r,k_r,l_r}^a \frac{c_{r,k_r,l_r}^{a,W}}{cmax_r^a} \int_{Tmin_{r,k_r}^a}^{\tau_{k_r}} \lambda n_r^a(t) dt \right] & \text{Si } \exists T_{r,e}^a \in [\tau_{k_r-1}, \tau_{k_r}] \\ cmc_{r,k_r,l_r}^a \frac{c_{r,k_r,l_r}^{a,W}}{cmax_r^a} \int_{\tau_{k_r-1}}^{\tau_{k_r}} \lambda n_r^a(t) dt & \text{Si non} \end{cases} \quad (V.26)$$

Avec : $W = \overline{w0}$, $a = o$, et $r = i$.

V.3.2. Modèle de planification intégrée du sous-traitant sans sous-traitance secondaire

La formulation du cas "sous-traitant sans sous-traitance secondaire" permet de déterminer le prix de vente moyen pour les donneurs d'ordres stratégiques. Le profit du sous-traitant est obtenu par la différence entre le revenu brut et le coût agrégé du coût de production, de stock et de maintenance. Il est donné par l'expression suivante :

$$\pi_j^{s,\overline{w0}} = GR_j^{s,\overline{w0}} - (PC_j^{s,\overline{w0}} + IC_j^{s,\overline{w0}} + MC_j^{s,\overline{w0}}) \quad (V.27)$$

V.3.2.1. Le revenu brut

Le revenu brut est le montant de l'ensemble des ventes effectuées au cours de l'horizon de planification ; il est donné par la formule (V.28) :

$$GR_j^{s,\overline{w0}} = \overline{sp}_j^{s,st} \sum_{k_j=1}^{N_j^s} d_{j,k_j}^s \quad (V.28)$$

Telle que d_{j,k_j}^s est la demande des donneurs d'ordres stratégiques adressée au sous-traitant j durant la période k_j .

Le prix de vente moyen du sous-traitant est exprimé par la formule suivante :

$$\overline{sp}_j^{s,st} = \frac{PC_j^{s,\overline{w0}} + IC_j^{s,\overline{w0}} + MC_j^{s,\overline{w0}}}{\sum_{k_j=1}^{N_j^s} d_{j,k_j}^s} (1 + mg_j^s) \quad (V.29)$$

V.3.2.2. Le coût de stockage

Le coût de possession total du stock du sous-traitant $IC_j^{s,\overline{wo}}$ comprend le coût de stock de chaque période. Il est donné par l'expression V.15 et les expressions V.16 et V.17 on remplace W par $\overline{wo}$, a par s , et r par j .

V.3.2.3. Le coût de production

Les systèmes de production des sous-traitants produisent avec des taux de production variables pour chaque période de production. Ainsi, le coût de la production total $PC_j^{s,\overline{wo}}$ est donné par l'expression V.18 et l'expression V.19 on met $W = \overline{wo}$, $a = s$, et $r = j$.

V.3.2.4. Le coût de maintenance

Les coûts de maintenance dépendent des politiques adoptées. Dans la politique proposée, les actions de maintenance préventive sont effectuées à des intervalles de temps non égaux, et les actions de maintenance correctives sont réalisées lorsque des défaillances se reproduisent. Ensuite, nous devons déterminer la durée optimale de la période de maintenance préventive $T_{j,e}^s$. Le coût de maintenance $MC_j^{s,\overline{wo}}$ est donné par l'expression V.23. Ainsi les expressions de PMC_j^s , CMC_j^s et $M(H_j^s)$ sont données respectivement par V.23, V.24 et V.25 on pose $W = \overline{wo}$, $a = s$, et $r = j$.

V.3.3. Modèle de planification intégrée du donneur d'ordres avec sous-traitance

La prise en compte des tâches de sous-traitance nécessite une nouvelle optimisation du plan de production-maintenance, basée sur de nouveaux taux de production. Cette formulation permet de répondre à la question suivante : comment équilibrer entre deux modes : la production en interne et la sous-traitance ? C'est-à-dire, choisir entre sous-traiter, produire en interne ou assumer un coût de pénurie. L'expression du profit du donneur d'ordres avec option de sous-traitance est donnée comme suit :

$$\pi_i^{o,wo} = GR_i^{o,wo} - (PC_i^{o,wo} + IC_i^{o,wo} + SC_i^{o,wo} + OC_i^{o,wo} + MC_i^{o,wo}) \quad (V.30)$$

V.3.3.1. Le revenu brut

Le revenu brut est le montant de l'ensemble des ventes effectuées au cours de l'horizon de planification ; il comprend toutes les ventes, que ce soit la quantité produite par des ressources internes, ou la quantité sous-traitée. Il est donné par la formule (V.31) :

$$GR_i^{o,wo} = \begin{cases} \overline{sp}_i^o \left(\sum_{k_i=1}^{N_i^o} qin_{i,k_i,l_i}^{wo} + \sum_{k_i=1}^{N_i^o} \sum_{j=1}^m \sum_{k_j=1}^{N_j^s} qot_{j,k_i,k_j,l_j} \right) & \text{Si } i = 1 \\ \overline{sp}_i^o \left(\sum_{k_i=1}^{N_i^o} qin_{i,k_i,l_i}^{wo} + \sum_{k_i=T+1}^{T+N_i^o} \sum_{j=1}^m \sum_{k_j=1}^{N_j^s} qot_{j,k_i,k_j,l_j} \right) & \text{Sinon} \end{cases} \quad (V.31)$$

Sachant que, $T = \sum_{t=1}^{i-1} N_t^o$

qin_{i,k_i,l_i}^{wo} est la quantité de production en interne du donneur d'ordres i , dans la période k_i produite avec le taux de production $c_{i,k_i,l_i}^{o,wo}$ et/ou $c_{i,k_{i-1},l_{i-1}}^{o,wo}$, et son niveau de coût correspondant respectivement l_i et/ou l_{i-1} du barème des coûts de production. Elle est exprimée par la formule suivante :

$$qin_{i,k_i,l_i} = \begin{cases} \begin{bmatrix} (Tmin_{i,k_i}^o - \tau_{k_{i-1}})c_{i,k_{i-1},l_{i-1}}^{o,wo} \\ + (\tau_{k_i} - Tmin_{i,k_i}^o)c_{i,k_i,l_i}^{o,wo} \end{bmatrix} & \text{Si } \exists T_{i,e}^o \in [\tau_{k_{i-1}}, \tau_{k_i}] \\ \Delta\tau_{k_i}c_{i,k_i,l_i}^{o,wo} & \text{Sinon} \end{cases} \quad (V.32)$$

V.3.3.2. Le coût de stockage

Le niveau de stock considéré est celui à la fin de chaque sous-période. Le coût de possession total du stock du donneur d'ordres $IC_i^{o,wo}$ avec option de sous-traitance est donné par l'expression V.15 on remplace W par wo , a par o , et r par i .

Pour déterminer le niveau de stock à chaque fin de période, nous distinguons deux cas. Le premier cas où $\exists T_{i,e}^o \in [\tau_{k_{i-1}}, \tau_{k_i}]$:

$$I_{k_i} = \begin{cases} \max \left[0, \left(I_{k_{i-1}} + (Tmin_{i,k_i}^o - \tau_{k_{i-1}})c_{i,k_{i-1},l_{i-1}}^{o,wo} + (\tau_{k_i} - Tmin_{i,k_i}^o)c_{i,k_i,l_i}^{o,wo} + \sum_{k_i=1}^{N_i^o} \sum_{j=1}^m \sum_{k_j=1}^{N_j^s} qot_{j,k_i,k_j,l_j} \right) - d_{i,k_i}^o \right] & \text{Si } i = 1 \\ \max \left[0, \left(I_{k_{i-1}} + (Tmin_{i,k_i}^o - \tau_{k_{i-1}})c_{i,k_{i-1},l_{i-1}}^{o,wo} + (\tau_{k_i} - Tmin_{i,k_i}^o)c_{i,k_i,l_i}^{o,wo} + \sum_{k_i=T+1}^{T+N_i^o} \sum_{j=1}^m \sum_{k_j=1}^{N_j^s} qot_{j,k_i,k_j,l_j} \right) - d_{i,k_i}^o \right] & \text{Si non} \end{cases} \quad (V.33)$$

Le deuxième cas est le cas où $\nexists T_{i,e}^o \in [\tau_{k_{i-1}}, \tau_{k_i}]$:

$$I_{k_i} = \begin{cases} \max \left[0, \left(I_{k_{i-1}} + \Delta\tau_{k_i}c_{i,k_i,l_i}^{o,wo} + \sum_{k_i=1}^{N_i^o} \sum_{j=1}^m \sum_{k_j=1}^{N_j^s} qot_{j,k_i,k_j,l_j} \right) - d_{i,k_i}^o \right] & \text{Si } i = 1 \\ \max \left[0, \left(I_{k_{i-1}} + \Delta\tau_{k_i}c_{i,k_i,l_i}^{o,wo} + \sum_{k_i=T+1}^{T+N_i^o} \sum_{j=1}^m \sum_{k_j=1}^{N_j^s} qot_{j,k_i,k_j,l_j} \right) - d_{i,k_i}^o \right] & \text{Si non} \end{cases} \quad (V.34)$$

V.3.3.3. Le coût de production

Le coût de la production total du donneur d'ordres avec option de sous-traitance $PC_i^{o,wo}$ est donné par l'expression V.18.

Avec $PC_{i,k_i}^{o,wo}$ est donné par l'expression V.19 on met $W = wo$, $a = o$, et $r = i$.

V.3.3.4. Le coût de pénurie

Le coût de pénurie généré par le donneur d'ordres avec option de sous-traitance est donné par l'expression V.20, on pose $w = wo$, $a = o$, et $r = i$.

Où, $SL_{i,k_i}^{o,wo}$ est le niveau de pénurie à la fin de chaque période. Nous distinguons deux cas. Le premier cas où $\exists T_{i,e}^o \in [\tau_{k_i-1}, \tau_{k_i}]$:

$$SL_{i,k_i}^o = \begin{cases} \max \left[0, d_{i,k_i}^o - \left(I_{k_i-1} + (Tmin_{i,k_i}^o - \tau_{k_i-1})c_{i,k_i-1,l_{i-1}}^{o,wo} + (\tau_{k_i} - Tmin_{i,k_i}^o)c_{i,k_i,l_i}^{o,wo} + \sum_{k_i=1}^{N_i^o} \sum_{j=1}^m \sum_{k_j=1}^{N_j^s} qot_{j,k_i,k_j,l_j} \right) \right] & \text{Si } i = 1 \\ \max \left[0, d_{i,k_i}^o - \left(I_{k_i-1} + (Tmin_{i,k_i}^o - \tau_{k_i-1})c_{i,k_i-1,l_{i-1}}^{o,wo} + (\tau_{k_i} - Tmin_{i,k_i}^o)c_{i,k_i,l_i}^{o,wo} + \sum_{k_i=T+1}^{T+N_i^o} \sum_{j=1}^m \sum_{k_j=1}^{N_j^s} qot_{j,k_i,k_j,l_j} \right) \right] & \text{Sinon} \end{cases} \quad (V.35)$$

Le deuxième cas est le cas où $\nexists T_{i,e}^{o*} \in [\tau_{k_i-1}, \tau_{k_i}]$:

$$SL_{i,k_i}^o = \begin{cases} \max \left[0, d_{i,k_i}^o - \left(I_{k_i-1} + \Delta\tau_{k_i}c_{i,k_i,l_i}^{o,wo} + \sum_{k_i=1}^{N_i^o} \sum_{j=1}^m \sum_{k_j=1}^{N_j^s} qot_{j,k_i,k_j,l_j} \right) \right] & \text{Si } i = 1 \\ \max \left[0, d_{i,k_i}^o - \left(I_{k_i-1} + \Delta\tau_{k_i}c_{i,k_i,l_i}^{o,wo} + \sum_{k_i=T+1}^{T+N_i^o} \sum_{j=1}^m \sum_{k_j=1}^{N_j^s} qot_{j,k_i,k_j,l_j} \right) \right] & \text{Sinon} \end{cases} \quad (V.36)$$

V.3.3.5. Le coût de sous-traitance

Le donneur d'ordres est toujours à la recherche de services de sous-traitance avec un coût minimal. Mais une forte relation existe entre les coûts de sous-traitance, la quantité demandée, et le délai de livraison (c'est-à-dire les taux de production sous-traités). Cette interdépendance a été détaillée et expliquée dans la section V.2.3. Le coût total de sous-traitance peut être défini comme suit :

$$OC_i^{o,wo} = \begin{cases} \sum_{k_i=1}^{N_i^o} \sum_{j=1}^m \sum_{k_j=1}^{N_j^s} \overline{sp}_j^{s,sc} qot_{j,k_i,k_j,l_j} & \text{Si } i = 1 \\ \sum_{k_i=T+1}^{T+N_i^o} \sum_{j=1}^m \sum_{k_j=1}^{N_j^s} \overline{sp}_j^{s,sc} qot_{j,k_i,k_j,l_j} & \text{Sinon} \end{cases} \quad (V.37)$$

Sachant que, $T = \sum_{t=1}^{i-1} N_t^o$

V.3.2.4. Le coût de maintenance

Le coût de maintenance total du donneur d'ordres avec option de sous-traitance est donné par l'expression V.22. Ainsi les expressions de PMC_i^o , CMC_i^o et $M(H_i^o)$ sont données respectivement par V.23, V.24 et V.25 on pose $W = wo$, $a = o$, et $r = i$.

V.3.4. Modèle de planification intégrée du sous-traitant avec sous-traitance secondaire

Pour les sous-traitants, l'activité de sous-traitance est un moyen d'augmenter l'exploitation de la capacité de leurs machines et les profits qu'ils peuvent réaliser. La prise en compte des tâches de sous-traitance supplémentaires exige une nouvelle optimisation du plan de production et de maintenance basée sur de nouveaux taux de production.

Le prix de vente pour les donneurs d'ordres stratégiques a été déterminé par les modèles du sous-traitant sans option de sous-traitance secondaire. Dans ce cas, nous déterminons le prix de vente pour les donneurs d'ordres secondaires. L'expression du profit des sous-traitants avec option de sous-traitance supplémentaire est donnée comme suit :

$$\pi_j^{s,wo} = GR_j^{s,wo} - (PC_j^{s,wo} + IC_j^{s,wo} + MC_j^{s,wo}) \quad (V.38)$$

V.3.4.1. Le revenu brut

Le revenu brut est le montant de l'ensemble des ventes effectuées au cours de l'horizon de planification ; il comprend toutes les ventes, que ce soit la quantité produite pour les donneurs d'ordres stratégiques ou secondaires. Il est donné par la formule (V.39) :

$$GR_j^{s,wo} = \begin{cases} \overline{sp}_j^{s,st} \sum_{k_j=1}^{N_{s_j}} d_{j,k_j}^s + \sum_{k_i=1}^{N_i^o} \sum_{j=1}^m \sum_{k_j=1}^{N_j^s} \overline{sp}_j^{s,sc} qot_{j,k_i,k_j,l_j} & \text{Si } i = 1 \\ \overline{sp}_j^{s,st} \sum_{k_j=1}^{N_{s_j}} d_{j,k_j}^s + \sum_{k_i=T+1}^{T+N_i^o} \sum_{j=1}^m \sum_{k_j=1}^{N_j^s} \overline{sp}_j^{s,sc} qot_{j,k_i,k_j,l_j} & \text{Sinon} \end{cases} \quad (V.39)$$

V.3.4.2. Le coût de stockage

Comme pour le donneur d'ordres, la figure V.3 présente un exemple de graphe d'évolution production-stockage pour montrer comment calculer le niveau de stock à la fin de chaque période. Le coût de possession total du stock du sous-traitant avec option de sous-traitance secondaire est donné par l'expression suivante :

$$IC_j^{s,wo} = \sum_{k_j=1}^{N_j^s} hc_{j,k_i}^s \left(\left[I_{k_j-1} \right] (\tau_1^o - \tau_{k_j-1}^o) + \sum_{y=2}^{\tau_1^o - \tau_{k_j-1}^o} (y-1) \left[c_{j,k_j,l_{y-1}}^{o,wo} + I_{y-1} - \left[I_{y-1} \right] \right] + \dots \right. \\ \left. + \left[I_{\tau_{n-1}^o} \right] (\tau_n^o - \tau_{n-1}^o) + \sum_{y=2}^{\tau_n^o - \tau_{n-1}^o} (y-1) \left[c_{j,k_j,l_{y-1}}^{o,wo} + I_{y-1} - \left[I_{y-1} \right] \right] \right. \\ \left. + \dots \left[I_{\tau_n^o} \right] (\tau_{k_j} - \tau_n^o) \sum_{y=2}^{\tau_{k_j} - \tau_n^o} (y-1) \left[c_{j,k_j,l_{y-1}}^{o,wo} + I_{y-1} - \left[I_{y-1} \right] \right] \right) \quad (V.40)$$

$\zeta_j = [\tau_1^o, \dots, \tau_i^o, \dots, \tau_n^o]$ est le vecteur des délais de livraison des donneurs d'ordres ($i = 1, \dots, n$) qui doivent être servis par le sous-traitant j . Sachant que $qot_{i,k_i} \neq 0$ dans la période k_j . Le niveau de stock à chaque fin de période est décrit par les expressions V.16 et V.17 on pose $w = o$, $a = s$, et $r = j$.

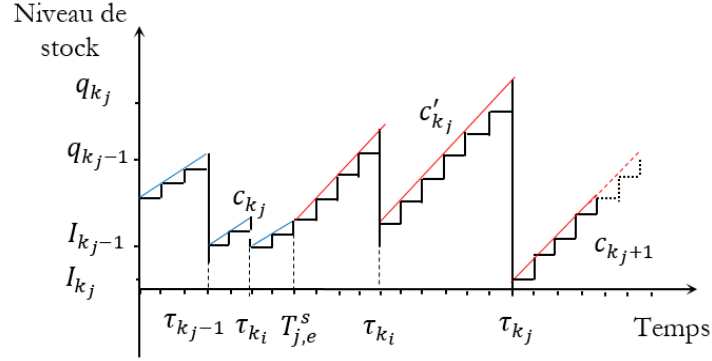


Figure V.3. Le graphe d'évolution production – stockage du sous-traitant.

V.3.4.3. Le coût de production

Le coût de production total du sous-traitant avec option de sous-traitance secondaire est donné par l'expression V.18 et l'expression V.19 on met $W = w$, $a = s$, et $r = j$.

V.3.4.4. Le coût de maintenance

Le coût de maintenance total du sous-traitant avec option de sous-traitance secondaire, est donné par l'expression V.23. Ainsi les expressions de PMC_j^s , CMC_j^s et $M(H_j^s)$ sont données respectivement par V.23, V.24 et V.25 on pose $W = w$, $a = s$, et $r = j$.

V.3.5. Première formulation : optimisation séparée

Dans cette formulation, le critère d'optimisation est la maximisation du profit de chaque acteur de la chaîne logistique séparément. La formulation de la programmation mathématique résultante est donnée par :

La fonction objectif est définie comme suit :

$$\sum_{i=1}^n \max \pi_i^{o, \bar{w}o} + \sum_{j=1}^m \max \pi_j^{s, \bar{w}o} \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}; \forall j \in \{1, \dots, m\} \quad (V.41)$$

Sous les égalités (V.16) et (V.17) et

$$f_{MC} = \frac{CMC_r^a + PMC_r^a}{T} \quad \forall r \in \{i, j\}; \forall a \in \{o, s\} \quad (V.42)$$

$$T^* / \frac{\partial f_{MC}(T)}{\partial T} = 0 \quad (V.43)$$

$$\max \left(\frac{d_{i,k_i}^o - I_{k_{j-1}}}{\tau_{k_j} - \tau_{k_{j-1}}}, 0 \right) \leq c_{i,k_i,l_i}^{o, \bar{w}o} \leq cmax_i^o \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \quad (V.44)$$

$$\max\left(\frac{d_{j,k_j}^s - I_{k_j-1}}{\tau_{k_j} - \tau_{k_j-1}}, 0\right) \leq c_{j,k_j,l_j}^{s,\overline{wo}} \leq cmax_j^s \quad \forall j \in \{1, \dots, m\} \quad (V.45)$$

$$c_{i,k_i,l_i}^{o,\overline{wo}}, c_{j,k_j,l_j}^{s,\overline{wo}}, T_{r,e}^a, Npm_r^a, \overline{sp}_i^o, \overline{sp}_j^{s,sc}, sc_i^o, I_0 \geq 0 \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}; \forall j \in \{1, \dots, m\} \quad (V.46)$$

$$\forall r \in \{i, j\}; \forall a \in \{o, s\}$$

$$c_{i,k_i,l_i}^{o,\overline{wo}}, c_{j,k_j,l_j}^{s,\overline{wo}}, \overline{sp}_i^o, \overline{sp}_j^{s,st}, sc_i^o, CMC_r^a, PMC_r^a, \pi_i^{o,\overline{wo}}, \pi_j^{s,\overline{wo}} \in \mathbb{R}_+ \quad (V.47)$$

$$T_{r,e}^a, e_{k_i}, Npm_r^a, I_{k_r} \in \mathbb{Z}_+ \quad (V.48)$$

$$k_i = 1, \dots, N_i^o, k_j = 1, \dots, N_j^s, l_i = 1, \dots, L_i \text{ et } l_j = 1, \dots, L_j$$

L'expression (V.41) représente la somme du profit total optimal agrégé de chaque acteur de la chaîne logistique dans l'optimisation séparée. Les contraintes d'égalité (V.16) et (V.17) montrent que le niveau du stock à la fin de chaque période est égal au stock agrégé du stock restant de la période de production précédente, la production interne et la sous-traitance en déduisant la demande pour cette période. Cette contrainte signifie que le stock restant de la période précédente sera réintégré dans le stock de la période actuelle. Les égalités (V.42) et (V.43) déterminent les dates de MP optimales, la contrainte d'égalité (V.42) représente la fonction du coût total de la stratégie de maintenance. Les machines des donneurs d'ordres peuvent fonctionner avec des taux de production qui dépendent des options de sous-traitance. Les taux de production des donneurs d'ordres varient entre les limites inférieures et supérieures, ils sont exprimés par la contrainte (V.44). La contrainte (V.45) montrent que les sous-traitants peuvent utiliser leurs machines avec un taux de production compris entre le taux de production minimale et maximale. La contrainte (V.46) représente les contraintes de non-négativité. Enfin, les contraintes (V.47) et (V.48) précisent le type des variables de décision.

V.3.6. Deuxième formulation : optimisation intégrée

Dans cette approche intégrée, le critère d'optimisation est également la maximisation du profit réalisé mais par l'ensemble des acteurs de la chaîne logistique. Les demandes envoyées par les donneurs d'ordres secondaires sont partagées entre les sous-traitants, en respectant la règle du prix de vente minimal des sous-traitants, le délai de livraison imposé par les donneurs d'ordres, dans le but de trouver les meilleures quantités à sous-traiter. Dans le cas où plusieurs demandes arrivent simultanément, une répartition proportionnelle à la quantité de sous-traitance demandée doit être respectée "répartition équitable". La formulation de la programmation mathématique résultante est donnée par :

La fonction objectif est définie comme suit :

$$\max(\sum_{i=1}^n \pi_i^{o,wo} + \sum_{j=1}^m \pi_j^{s,wo}) \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}; \forall j \in \{1, \dots, m\} \quad (V.49)$$

Sous les contraintes d'égalités (V.16), (V.17), (V.33) et (V.34) en plus des contraintes suivantes :

$$\pi_i^{o,wo} \geq \pi_i^{o,\overline{wo}} \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \quad (V.50)$$

$$\overline{sp}_j^{s,sc} \leq sc_i^o \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}; \forall j \in \{1, \dots, m\} \quad (V.51)$$

$$f_{MC} = \frac{CMC_r^a + PMC_r^a}{T} \quad \forall r \in \{i, j\}; \forall a \in \{o, s\} \quad (V.52)$$

$$T^* / \frac{\partial f_{MC}(T)}{\partial T} = 0 \quad (V.53)$$

$$0 \leq c_{i,k_i,l_i}^{o,wo} \leq cmax_i^o \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \quad (V.54)$$

$$\max\left(\frac{d_{j,k_j}^s - l_{k_j-1}}{\tau_{k_j} - \tau_{k_j-1}}, 0\right) \leq c_{j,k_j,l_j}^{s,wo} \leq cmax_j^s \quad \forall j \in \{1, \dots, m\} \quad (V.55)$$

$$\begin{aligned} qin_{i,k_i,l_i}^{wo}, qot_{i,k_i}, qot_{j,k_i,k_j,l_j}, c_{i,k_i,l_i}^{o,wo}, c_{j,k_j,l_j}^{s,wo}, T_{r,e}^a, Npm_r^a, \overline{sp}_i^o, \overline{sp}_j^{s,st}, \overline{sp}_j^{s,sc}, sc_i^o, I_0 \geq 0 \\ \forall i \in \{1, \dots, n\}; \forall j \in \{1, \dots, m\} \\ \forall r \in \{i, j\}; \forall a \in \{o, s\} \end{aligned} \quad (V.56)$$

$$qin_{i,k_i,l_i}^{wo}, c_{i,k_i,l_i}^{o,wo}, c_{j,k_j,l_j}^{s,wo}, \overline{sp}_i^o, \overline{sp}_j^{s,st}, \overline{sp}_j^{s,sc}, sc_i^o, CMC_r^a, PMC_r^a, \pi_i^{o,wo}, \pi_j^{s,wo} \in \mathbb{R}_+ \quad (V.57)$$

$$\begin{aligned} qot_{i,k_i}, qot_{j,k_i,k_j,l_j}, T_{r,e}^a, e_{k_i}, Npm_r^a, I_{k_r} \in \mathbb{Z}_+ \\ k_i = 1, \dots, N_i^o, k_j = 1, \dots, N_j^s, l_i = 1, \dots, L_i \text{ et } l_j = 1, \dots, L_j \end{aligned} \quad (V.58)$$

L'expression (V.49) représente le maximum du profit total agrégé de chaque acteur de la chaîne dans l'optimisation intégrée. La contrainte d'inégalité (V.50) assure que le profit réalisé par chaque donneur d'ordres avec option de sous-traitance est supérieur ou égal au profit réalisé par ce donneur d'ordres sans sous-traitance. La contrainte (V.51) assure que chaque donneur d'ordres n'établit de contrat de sous-traitance avec un sous-traitant uniquement si le prix de vente proposé par ce dernier est plus petit ou égal au coût de pénurie qui peut être généré si la demande n'est pas satisfaite par le donneur d'ordres. Les contraintes d'égalité (V.16), (V.17), (V.33) et (V.34) montrent que le niveau de stock à la fin de chaque période est égal au stock agrégé du stock restant de la période de production précédente, la production interne et la sous-traitance en déduisant la demande pour cette période. Les contraintes de maintenance sont exprimées par les égalités (V.52) et (V.53). La première représente le coût total de la stratégie de maintenance de la machine, tandis que la deuxième a pour objectif de déterminer les dates optimales de la maintenance préventive. La politique de maintenance prend en compte des RM et des MP non cycliques ; ces derniers dépendent de la cadence de production observée au cours des périodes. Sous l'hypothèse que les augmentations des taux de défaillance de la machine augmentent avec le temps et le taux de production. La production à cadence élevée accélère la dégradation de la machine, ce qui à son tour conduit à une augmentation du risque de défaillance, par conséquent, le nombre et le coût total des réparations minimales augmente. Les machines des donneurs d'ordres peuvent fonctionner avec des taux de production qui dépendent des options de sous-traitance. Les taux de production des donneurs d'ordres sont compris entre les limites inférieures et supérieures, ils sont exprimés par la contrainte (V.54). La contrainte (V.55) montre que les sous-traitants peuvent utiliser leurs machines avec un taux de production compris entre le taux de production minimale et maximale. La contrainte (V.56) représente les contraintes de non-négativité. Enfin, les contraintes (V.57) et (V.58) fournissent le type de variables de décision.

V.4. Procédures de résolution

V.4.1. Optimisation séparée

Dans l'optimisation séparée, chacune des parties de la chaîne logistique élabore ses plans indépendamment de l'autre. Pour les sous-traitants, chacun élabore son plan stratégique intégré de production/maintenance. Les donneurs d'ordres élaborent le plan intégré de production interne/maintenance. Nous avons utilisé une approche heuristique pour déterminer l'ensemble de ces plans. Cette approche est basée sur l'utilisation de l'heuristique HOMPR (*Heuristic for Obtaining the Minimum Production Rate*) et l'algorithme 2OPMD (*Obtaining the Optimal Preventive Maintenance Date*) ; l'heuristique HOMPR est dédiée au calcul du taux de production

minimale pour chaque période pour les donneurs d'ordres ou les sous-traitants. L'algorithme 2OPMD est utilisé pour déterminer la date optimale de la maintenance préventive pour chaque partie.

Le sous-problème : "date de maintenance préventive optimale"

Dans ce sous problème, la date de maintenance préventive non cyclique optimale est calculée. Ce cycle dépend de la cadence de production observée, et la durée des périodes de production. Nous avons implémenté un algorithme pour calculer la période de maintenance préventive optimale et tous les coûts décrits auparavant, incluant le calcul du coût total de la maintenance dans un horizon fini. L'algorithme est présenté comme suit :

Algorithme V.1. Obtaining the Optimal Preventive Maintenance Date $T_{r,e}^a$ (2OPMD)
 Obtention de la date de maintenance préventive optimale $T_{r,e}^a$

Initialisation

Paramètres de la distribution de défaillance de la machine $(\alpha_r^a, \beta_{r,l_r}^a)$;

Le taux de production maximal et le taux de production utilisé $(c_{r,k_r,l_r}^a, cmax_r^a)$;

Instants de début et de fin de la période (t_s, t_e) ;

Les coûts unitaires de maintenance préventive et corrective $(pmc_{r,k_r,l_r}^a, cmc_{r,k_r,l_r}^a)$;

Programme principal

Trouver le minimum de la fonction $f_{MC}(T)$: l'optimisation du coût de maintenance est basée sur le résultat suivant :

$$\frac{\partial f_{MC}(T)}{\partial T} = 0, \text{ où } f_{MC}(T) = \frac{CMC_r^a + PMC_r^a}{T} ;$$

$f_{MC}(T)$ fonction représentant le coût total prévu de la stratégie de maintenance du système par unité de temps T . Elle est définie sur l'intervalle $[t_s, t_e]$;

Sortie : les résultats optimaux $T_{r,e}^a, MC_r^{a,wo}$ et $MC_r^{a,\overline{wo}}$;

Le sous-problème : "taux de production minimal"

L'heuristique pour obtenir le taux de production minimal est expliquée comme suit :

Algorithm V.2. Heuristic for Obtaining the Minimum Production Rate (HOMPR)
 Heuristique pour obtenir le taux de production minimal

Initialisation

Paramètres de la distribution de défaillance de la machine $(\alpha_r^a, \beta_{r,l_r}^a)$;

Le taux de production maximal et le taux de production utilisé $(c_{r,k_r,l_r}^a, cmax_r^a)$;

Instants de début et de fin de la période (t_s, t_e) ;

Les coûts de maintenance préventive et corrective $(pmc_{r,k_r,l_r}^a, cmc_{r,k_r,l_r}^a)$;

La quantité produite depuis $\tau_{k_r}^a$ jusqu'à la dernière $T_{r,last}^a$ dans la période k_r (Q_s);

Initialiser d^a, τ_r^a ;

Programme principal

$Q_s = 0$;

Pour la période en cours k_r

 Calculer Q_s ;

$$c_{mini}(r, k_r) = \frac{d^a(r, k_r) - Q_s}{\tau_{r,k_r}^a - T_{r,last}^a};$$

Si $c_{mini}(r, k_r) > cmax_r^a$ **Alors**

$$c_{mini}(r, k_r) = cmax_r^a;$$

Fi Si

$k_r = k_r + 1$;

Pour le reste des périodes k_r jusqu'à N_r^a

$$c_{mini}(r, k_r) = \frac{d^a(r, k_r)}{\tau_{r,k_r}^a - \tau_{r,k_r-1}^a};$$

Si $c_{mini}(r, k_r) > cmax_r^a$ **Alors**

$$c_{mini}(r, k_r) = cmax_r^a;$$

Fi Si

Fi Pour

$$c_{minimum} = \max_{k_r}(c_{mini}(r, k_r)) ;$$

L'algorithme V.3 représente l'heuristique pour obtenir le taux de production minimal pondéré :

Algorithme V.3. Heuristic for Obtaining the Weighted Minimum Production Rate (HOWMPR)
Heuristique pour l'obtention du taux de production minimal pondéré

Initialisation

NbrProdRatePerPeriod Vecteur contenant le nombre de taux de production adoptés au cours de chaque période ;
IndProdRatePeriod Vecteur contenant les instants de début et de fin des sous-périodes correspondant à des taux de production utilisés au cours de chaque période ;
ProdRate Vecteur dynamique contenant les taux de production au cours de chaque période ;
ProdSum Variable contenant la quantité de production cumulée ;
WeightedProdRate Vecteur contenant les taux de production pondérés adoptés au cours de chaque période ;
 $jj = 2$;

Programme principal

Pour $k_r = 1$ jusqu'à N_r^a

ProdSum = 0;

Tant que $j \leq \text{NbrProdRatePerPeriod}(k_r)$ Faire

$\text{ProdSum} = \text{ProdSum} + (\text{IndProdRatePeriod}(jj) - \text{IndProdRatePeriod}(jj - 1)) \times \text{ProdRate}(j)$;

$jj = jj + 1$;

$j = j + 1$;

Fin Tant que

$\text{WeightedProdRate}(k_r) = \frac{\text{ProdSum}}{(\text{IndProdRatePeriod}(jj-1) - \text{IndProdRatePeriod}(jj - \text{NbrProdRatePerPeriod}(k_r) + 1))}$;

Fin Pour

L'organigramme de la figure V.4 montre clairement la démarche de l'algorithme de l'optimisation séparée. Plus précisément, comment nous avons utilisé l'heuristique HOMPR et l'algorithme 2OPMD.

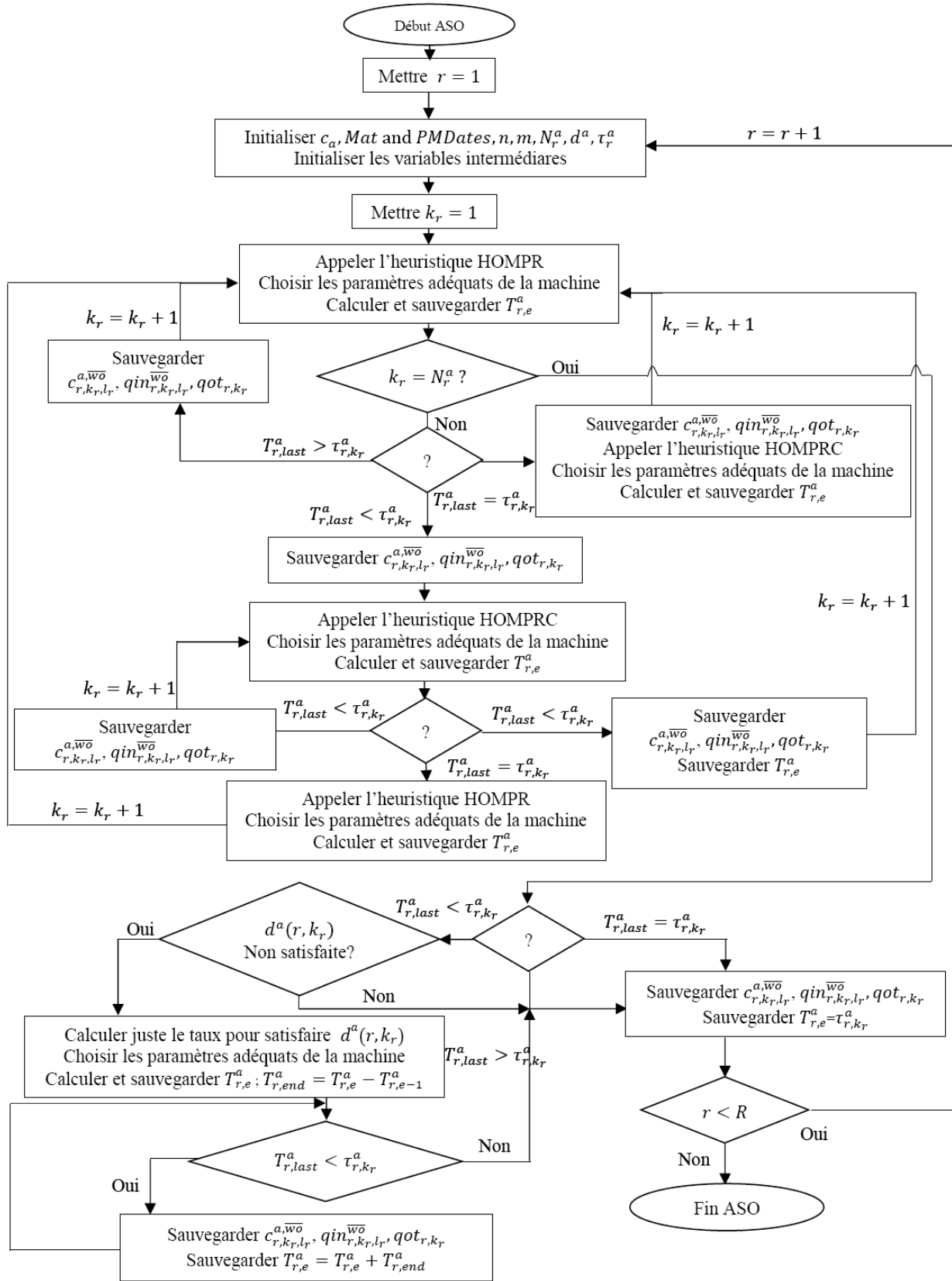


Figure V.4. Organigramme ASO.

V.4.2. Optimisation intégrée – Procédure de calcul à base d'algorithmes génétiques

V.4.2.1. Motivation pour une approche à base d'algorithmes génétiques

Dans (Cui, 2014), l'auteur a traité le problème de l'optimisation conjointe de la planification de la production et de la sélection des sous-traitants, avec prise en compte de la flexibilité à la clientèle. L'auteur a examiné un seul donneur d'ordres qui produit multiples produits. Cependant, l'auteur n'a pas pris en compte l'aspect fiabilité et maintenance, le problème a été formulé comme un modèle de programmation en nombres entiers, et prouvé NP-difficile. Dans Schutz et al. (2011), les auteurs ont déterminé conjointement un plan de production et de maintenance d'un système soumis à des défaillances aléatoires, avec une loi de défaillance dynamique. Le système doit effectuer une série de missions sur un horizon de planification finie. Ils ont fait référence aux travaux du Nakagawa (2005) pour prouver que le problème est NP-difficile.

Notre problème est plus complexe que les problèmes mentionnés ci-avant. Les modèles mathématiques sont formulés comme un modèle de programmation mixte en nombres entiers, pour aider multiple donneurs d'ordres à déterminer les plans mixtes production interne – sous-traitance, et d'aider multiple sous-traitants à déterminer des plans de production en tenant compte des contraintes de fiabilité et maintenance, et le choix des partenaires. Comme mentionné par Nakagawa (2005) et Nakagawa et Mizutani (2009), il est impossible de déterminer analytiquement les instants de maintenance préventive pour des horizons de temps finis avec distribution de défaillance fixe dans le temps. Dans notre problème, l'aspect de fiabilité et maintenance considère que la loi de défaillance des machines est dynamique (c'est-à-dire avec des paramètres qui dépendent du taux de production adopté). Ainsi, les instants de maintenance préventive dépendent des taux de production observés dans les périodes précédentes. Certaines contraintes du problème sont des contraintes non linéaires ; la complexité augmente également lorsque le nombre d'acteurs de la chaîne, leurs périodes et les niveaux dans le barème de coûts augmentent. Par conséquent, il est impossible de résoudre les modèles mentionnés dans le § V.3 en utilisant des méthodes d'optimisation exactes. Dans une telle situation, les algorithmes évolutionnaires ont été largement utilisés par de nombreux chercheurs comme un moyen efficace pour trouver l'équilibre entre l'optimum global et la complexité de calcul (Dellaert et al. 2000 ; Xie Dong, 2002 ; Liu et al, 2008 ; Sinha et Sarmah, 2010).

V.4.2.2. L'approche métaheuristique "Algorithmes Génétiques"

Nous présentons une procédure d'optimisation basée sur les AGs pour résoudre les modèles formulés dans la section V.3. Nous avons expliqué les six éléments qui composent cette approche ; à savoir : le schéma de codage de la solution, le mécanisme de génération de la population initiale, la fonction objectif, les opérateurs génétiques, les critères d'arrêt et les paramètres de dimensionnement.

- **Schéma de codage de l'élément de la population**

A partir des modèles proposés dans la section V.3, nous remarquons que toutes les variables de décision dépendent de la variable $c_{r,k_r,l_r}^{a,wo}$. Par conséquent, nous codons seulement $c_{r,k_r,l_r}^{a,wo}$ comme chromosomes, c'est-à-dire l'ensemble : $\{c_{1,1,l_1}^{o,wo}, \dots, c_{1,k_1,l_1}^{o,wo}, \dots, c_{n,1,l_n}^{o,wo}, \dots, c_{n,k_n,l_n}^{o,wo}, c_{1,1,l_1}^{s,wo}, \dots, c_{1,k_1,l_1}^{s,wo}, \dots, c_{m,k_1,l_1}^{s,wo}, \dots, c_{m,k_m,l_m}^{s,wo}\}$.

La figure V.5 illustre la structure du chromosome. Le chromosome est composé d'une ligne et $\sum_{i=1}^{N_i^o} k_i + \sum_{j=1}^{N_j^s} k_j$ colonnes.

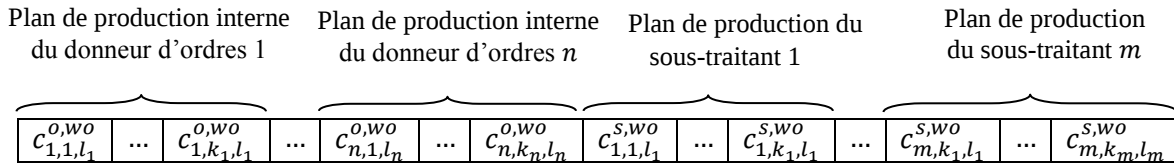


Figure V.5. Structure du chromosome.

Tous les $c_{r,k_r,l_r}^{a,wo}$ sont des nombres réels, leurs génération pour chaque partie du chromosome est décrite de la manière suivante :

Pour la partie des donneurs d'ordres, nous générons aléatoirement un nombre réel entre 0 et 1 ; ce codage est interprété comme suit : si on multiplie ce nombre par le taux de production maximal, on obtient le pourcentage du taux de production maximal à adopter pour le plan de production interne dans la période k_i . De la même façon, pour les sous-traitants, nous générons aléatoirement un nombre réel entre 0 et 1 ; après avoir multiplié ce nombre par le taux de production maximal, on obtient le pourcentage supplémentaire du taux de production maximal à allouer pour la sous-traitance pour les donneurs d'ordres secondaires.

Le choix de ce type de codage a pour but d'éviter les corrections après les opérateurs génétiques. Pour les sous-traitants, la satisfaction du donneur d'ordres stratégique est assurée par le plan de sous-traitance stratégique, c'est-à-dire, par l'heuristique qui calcul le taux de production minimal (approche d'optimisation séparée). Cependant, les donneurs d'ordres secondaires sont satisfaits par le plan de sous-traitance supplémentaire, c'est-à-dire, le pourcentage supplémentaire du taux de production maximal et le reste du plan de sous-traitance stratégique.

- **Mécanisme pour la génération de la population initiale**

Pour la génération de la population initiale, nous avons utilisé un schéma de codage tel que mentionné précédemment. Tous les individus initialement générés ou obtenus après l'application des opérations génétiques nécessitent la vérification de faisabilité. Les conditions de faisabilité assurent que le profit réalisé par chaque sous-traitant j avec option de sous-traitance secondaire est supérieur ou égal au profit réalisé avec sous-traitance stratégique. En outre, les conditions de faisabilité assurent que chaque donneur d'ordres i n'accepte les termes du contrat de sous-traitance avec un sous-traitant j , uniquement si le prix de vente proposé par ce dernier est plus petit ou égal au coût de pénurie généré si la demande n'est pas satisfaite.

- **Fonction objectif**

Pour le problème considéré, nous cherchons à optimiser le profit total de l'ensemble de la chaîne logistique.

- **Opérateurs génétiques**

Les opérateurs génétiques de la procédure sont expliqués brièvement comme suit :

La sélection : la méthode adoptée pour la sélection des individus à utiliser en tant que parents pour générer la progéniture pour la prochaine génération est la méthode de la roulette. Cette technique tend à promouvoir la diversité de la population pour éviter une convergence prématurée de l'AG (Liu et al. 2008).

Le croisement : le croisement à deux points est implémenté, les points de coupe sont générés aléatoirement. Pour deux parents, leurs enfants sont obtenus par permutation des différentes parties du chromosome, dès que l'opération de découpage est terminée, les gènes des deux chromosomes présents dans les deux points de croisement sont inter-changés. Les gènes avant le premier point de croisement et les gènes après le second point de croisement restent inchangés même après l'opération de croisement.

Mutation : l'opérateur de mutation fournit la propriété d'ergodicité pour l'algorithme génétique. Cette propriété indique que l'algorithme peut être susceptible d'atteindre toutes les parties de l'espace d'état, sans déplacer tout dans le processus de résolution. Pour notre procédure, nous avons adopté la mutation par permutation, où deux positions sont choisies au hasard et les gènes qu'ils contiennent sont permutés.

Remplacement : Ce mécanisme permet le mixage entre les nouveaux individus créés et ceux qui sont actuellement dans la population. Plusieurs stratégies alternatives existent dans la littérature (Gen et Cheng, 1997), tel que : l'élitisme, le remplacement complet, le remplacement partiel et le remplacement aléatoire. L'élitisme consiste à garder les solutions ayant les meilleurs résultats en se basant sur l'évaluation de la fonction objectif. Dans notre procédure, nous avons opté pour un remplacement hybride, à savoir élitiste et aléatoire à la fois.

- **Dimensionnement des paramètres**

Plusieurs expériences ont été effectuées pour définir les paramètres de l'algorithme génétique. Ainsi le taux de croisement, le taux de mutation, le nombre d'élites et le remplacement aléatoire sont fixés respectivement à 0.65, 0.05, 0.15 et 0.15. Le critère d'arrêt est basé sur le nombre maximum de générations et générations de décrochage. Durant les expériences numériques chaque problème est lancé 20 fois.

La taille de la population a été fixée à 80, une population de 60 donne de mauvaises performances, tandis qu'une population de 120 ou 150 ne fournit aucune amélioration par rapport au taux de convergence. En outre, comme le temps de calcul augmente linéairement avec la taille de la population, il n'est pas bénéfique d'augmenter la taille de la population (Rubin et Ragatz, 1995). Le nombre de générations est fixé à 150 et la génération de décrochage à 50.

- **Critères d'arrêt**

L'algorithme s'arrête si un ou les deux critères suivants sont atteints :

- Le nombre de générations est supérieur à un nombre maximum prédéfini de générations.
- La meilleure solution n'est pas améliorée au cours d'un nombre prédéfini de générations.

Nous utilisons l'algorithme 2OPMD (Algorithme V.1) pour calculer la date de maintenance préventive non-cyclique optimale et tous les coûts associés.

Le sous -problème : "Calcul de la matrice d'allocation"

Dans cette heuristique, les donneurs d'ordres acceptent ou rejettent les plans de sous-traitance proposés par la plate-forme après une étude comparative entre les coûts de production en interne, les coûts de pénurie, et les plans mixtes de production interne/sous-traitance. Seuls les plans de sous-traitance qui sont mieux que les plans de production internes avec des pénuries sont autorisés. L'heuristique de calcul de la matrice d'allocation doit respecter les trois règles d'allocation qui sont :

- *Règle 1* : Afin de minimiser le coût de stockage des sous-traitants, chacun doit satisfaire le donneur d'ordres qui a la date de livraison la plus proche.

- Règle 2 : Si deux donneurs d'ordres ont la même date de livraison, le sous-traitant fait une distribution proportionnelle à la quantité de sous-traitance demandée.
- Règle 3 : Afin de minimiser leurs coûts de stockage, chaque donneur d'ordres doit sous-traiter chez le sous-traitant, avec qui, il ne paie pas des coûts de stockage supplémentaires.

Algorithme V.4. Allocation Heuristic (AH) (Heuristique d'allocation)

Initialisation

Initialiser $n, m, N_i^o, N_j^s, \overline{sp}_j^{s,sc}, sc_{ind}^o$;

La liste dynamique contenant les indices des donneurs d'ordre ind ;

Le nombre des donneurs d'ordres qui doivent être satisfaits en même temps N_{idem} ;

La liste dynamique contenant les indices des périodes dans $DelivTimeVect$ (S_{min});

Le vecteur des délais de livraisons de tous les donneurs d'ordres $DelivTimeVect$;

La quantité restante de l'allocation aux donneurs d'ordres stratégiques Q_r ;

La demande de sous-traitance des donneurs d'ordres Q_s ;

Programme principal

$Limrepeat = \sum_{j=1}^m N_j^s$;

Tant que $irepeat \leq Limrepeat$ **Faire**

$Min = +\infty$

Trouver un donneur d'ordres qui a besoin de la sous-traitance, qui possède un délai de livraison le plus proche au délai de livraison du sous-traitant

$S_{min} = []$; $N_{idem} = 0$; $Limk = \sum_{i=1}^n N_i^o$;

Pour $k_i=1$ **jusqu'à** $Limk$

Si $DelivTimeVect(k_i) \leq Min$ **Alors**

Si $DelivTimeVect(k_i) < Min$ **Alors**

$Min = DelivTimeVect(k_i)$;

Sauvegarder les indices k_i dans la liste S_{min} ;

Sauvegarder l'indice du donneur d'ordres ind ;

$N_{idem} = N_{idem} + 1$;

Si non

Sauvegarder les indices k_i dans la liste S_{min} ;

Sauvegarder l'indice du donneur d'ordres ind ;

$N_{idem} = N_{idem} + 1$;

Fin Si

Fin Si

Fin Si

Allouer la quantité restante de l'allocation aux donneurs d'ordres stratégiques aux donneurs d'ordres secondaires.

Si $N_{idem} = 1$ **Alors**

Pour $j=1$ **jusqu'à** m

Si $\overline{sp}_j^{s,sc} \leq sc_{ind}^o$ **Alors**

Pour chaque période k_j du sous-traitant j

Si $Q_r(j, k_j) \neq 0$ $\&$ $Min \leq \tau_{j,k_j}^s$ $\&$ $Q_s(ind) \neq 0$ **Alors**

Allouer la quantité au donneur d'ordres ind et mettre à jour Q_r et Q_s ;

Mettre $DelivTimeVect(k_j) = H^s + 1$;

Fin Si

Fin Pour

Fin Si

Fin Pour

Si non

Pour $j=1$ **jusqu'à** m

Retirer de la liste ind les donneurs d'ordres qui refusent le contrat de sous-traitance avec le sous-traitant j ;

Pour chaque période k_j du sous-traitant j

Si $Q_r(j, k_j) \neq 0$ $\&$ $Min \leq \tau_{j,k_j}^s$ $\&$ $Q_s(ind) \neq 0$ **Alors**

Faire une répartition équitable de la quantité entre les donneurs d'ordres de la liste mis à jour ind et

```
mettre à jour  $Q_r$  et  $Q_s$ ;  
Mettre  $DelivTimeVect(k_j) = H^s + 1$ ;  
Fin Si  
Fin Pour  
Fin Pour  
Fin Si  
 $irepeat = irepeat + 1$ ;  
Fin Tant que
```

L'organigramme suivant (*Algorithm for Decoding of Chromosomes in Integrated Optimization "ADCIO"*), est un algorithme de décodage des chromosomes dans notre approche d'optimisation intégrée. Il montre comment nous utilisons les différentes heuristiques et algorithmes pour décoder les chromosomes. Pour la partie des donneurs d'ordres, nous générons des taux de production basés sur le décodage du chromosome. Cependant, dans la partie des sous-traitants, nous générons des taux de production basés sur l'heuristique HOWMPR et le décodage du chromosome.

V.5. Le design expérimental et l'analyse des résultats

Dans cette sous-section, nous fournissons et discutons une étude numérique que nous avons effectuée en résolvant la formulation donnée dans la section V.3. Pour montrer la robustesse de l'approche proposée, un modèle expérimental est développé, en se basant sur un nombre de paramètres de planification critiques supposés susceptibles d'avoir un impact significatif sur les solutions. L'analyse de sensibilité tient compte de trois paramètres clés : le nombre de donneurs d'ordres et sous-traitants, la structure des coûts et la structure de la demande. Nous nous sommes principalement intéressés aux effets du nombre de partenaires, de différents niveaux de coûts de pénurie et de la variation de la demande des sous-traitants sur le pourcentage d'adhésion à la plate-forme/demande et de ses profits réalisés pour la formulation (par exemple sur les décisions optimales et la performance globale du système).

V.5.1. Les données du problème

Le design expérimental est structuré et inspiré de (Aghezzaf et al, 2007) ; (Aghezzaf et Najid, 2008) ; (Najid et al, 2011) et (Fitouhi et Nourelfath, 2012). Les dimensions du problème sont représentées par le nombre de donneurs d'ordres et sous-traitants, respectivement n et m , le nombre de niveaux dans les problèmes de coûts de pénurie et la fluctuation de la demande. Nous utilisons neuf combinaisons différentes pour les donneurs d'ordres et les sous-traitants :

$$(n, m) \in \{(5,5); (5,10); (5,15); (10,5); (10,10); (10,15); (15,5); (15,10); (15,15)\}.$$

Le taux de production maximal est le premier paramètre clé défini pour chaque unité de production à chaque instance. En effet, il constitue la base pour la génération des autres paramètres tels que la cadence de production adoptée et son coût de production associé, le coût de stockage et la demande.

Pour chaque unité de production du donneur d'ordres, nous fixons $cmax_i^o$ pour trois groupes de problèmes de test. $cmax_i^o$ est choisi aléatoirement à partir de $[40,75]$.

La distribution de défaillance de chaque unité de production des acteurs de la chaîne (donneur d'ordres ou sous-traitants) suit une loi de Weibull de paramètre de forme fixé à 3. Le paramètre d'échelle est fixé à 17 pour les problèmes à faibles coûts, 16 pour des problèmes à moyens coûts, 15 pour des problèmes à coûts élevés et 14 pour des problèmes à coût plus élevés. Les taux de production maximaux de chaque machine des donneurs d'ordres et des sous-traitants sont donnés dans le tableau V.1.

Machine (r)	1	2	3	4	5
$cmax_r^o$	40	64	74	57	49
$cmax_r^s$	67	114	51	91	73

Tableau V.1. Les taux de production maximaux.

La structure des coûts est supposée avoir les caractéristiques suivantes : le coût de pénurie est défini par $sc_i^o = \overline{sp}_i^o (1 + \theta\%)$. Pour chaque donneur d'ordres θ est choisi aléatoirement à partir de trois intervalles différents $[15,18]$ pour les problèmes ayant des coûts de pénurie faibles, $[25,28]$ pour des problèmes ayant des coûts de pénurie moyens et $[35,38]$ pour des problèmes avec coûts de pénurie élevés. Les coûts de production pc_{i,k_i}^o dépendent du taux de production adopté durant chaque période k_i ; ce taux est généré de façon aléatoire par les algorithmes génétiques ; le barème des coûts de production est le paramètre introduit pour définir le taux de production/niveau de barème (*cadence tightness*). Les quatre niveaux correspondent respectivement à des situations relâché, assez relâché, serré et sur-serré du taux de production (*loose, moderately loose, tight and over tight*).

Tels que :

$$\text{Si } c_{i,k_i,l_i}^{o,W} \in \begin{cases}]0, 0.5cmax_i^o] & \text{relâché} \\]0.5cmax_i^o, 0.75cmax_i^o] & \text{assez relâché} \\]0.75cmax_i^o, 0.9cmax_i^o] & \text{serré} \\]0.9cmax_i^o, cmax_i^o] & \text{Sur – serré} \end{cases}$$

Donc, $pc_{i,k_i,l_i}^{o,W}$ est choisi aléatoirement à partir des quatre situations.

$$\text{Avec : } pc_{i,k_i,l_i}^{o,W} \in \begin{cases} [2, 3.5[& \text{Si relâché} \\ [3.75, 4.5[& \text{Si assez relâché} \\ [4.75, 6.75[& \text{Si serré} \\ [7, 8[& \text{Si sur-serré} \end{cases}$$

Les coûts des actions de maintenance préventive pour tous les acteurs (donneurs d'ordres et sous-traitants) sont générés aléatoirement comme suit : à partir de l'intervalle [10,14] pour des problèmes avec des coûts de maintenance préventive faibles, [16,20] pour des problèmes avec des coûts de maintenance préventive moyens, [22,26] pour des problèmes avec des coûts de maintenance préventive élevés, et [28,32] pour des problèmes avec coûts de maintenance préventive plus élevés. Les coûts des réparations minimales en cas de défaillances sont générés aléatoirement à partir des intervalles [18,23], [25,30], [32,37] et [39,44], respectivement pour des coûts faibles, moyens, élevés et plus élevés de réparation minimale.

Comme défini dans (Aghezzaf et Najid, 2008), le coût de stockage est écrit comme suit :

$$hc_{r,k_r}^a = \rho_a \% \max(pc_{r,k_r,l_r}^{a,W})$$

ρ_o est répartie uniformément entre 5 et 20, et ρ_s entre 4 et 12.

$$pc_{i,k_i,l_i}^{o,W} = \begin{cases} \overline{c_{i,k_i,l_i}^{o,W}} & \text{Si } \exists T_{i,e}^o \in [\tau_{k_i-1}, \tau_{k_i}] \\ c_{i,k_i,l_i}^{o,W} & \text{Sinon} \end{cases}$$

Pour tous les donneurs d'ordres et les sous-traitants, l'horizon de planification est fixé à 180 jours. Les données des demandes de chaque donneur d'ordres et sous-traitants sont créées comme suit : le nombre de périodes est généré de façon aléatoire à partir de l'intervalle [6,12]. Les délais de livraison sont générés aléatoirement à partir de l'intervalle [1,180]. Les demandes des donneurs d'ordres sont uniformément réparties entre 1 et $\Delta\tau_{k_i}cmax_i^o(1 + \delta_i\%)$. Toutefois, les demandes des sous-traitants sont réparties uniformément entre 1 et $\Delta\tau_{k_j}cmax_j^s(1 - \delta_j\%)$, où δ_r est répartie uniformément entre 25 et 50. Pour chaque donneur d'ordres, les demandes périodiques sont présentées dans le tableau V.2. Les tableaux V.3, V.4 et V.5 présentent trois niveaux de fluctuations de la demande pour chaque sous-traitant. Enfin, les taux de profit pour les donneurs d'ordres sont répartis uniformément entre [35,40], et échantillonnés aléatoirement dans l'ensemble {15, ..., 20} pour les sous-traitants. Le stock initial de chaque donneur d'ordres est échantillonné au hasard dans l'ensemble {0, ..., 10} et {0, ..., 20} pour les sous-traitants. Le coût de sous-traitance du stock initial est généré aléatoirement entre [50,90].

Période/acteur	1	2	3	4	5
1	{3154,79}	{615,11}	{4393,46}	{1861,24}	{1962,31}
2	{763,99}	{1326,29}	{504,52}	{874,40}	{1002,49}
3	{473,110}	{1768,61}	{2557,86}	{2221,70}	{196,53}
4	{439,120}	{409,68}	{137,88}	{961,82}	{495,61}
5	{1746,155}	{3105,109}	{99,89}	{1426,102}	{2698,119}
6	{932,180}	{2669,147}	{3790,126}	{958,117}	{736,130}
7	-	{1990,175}	{1419,140}	{1545,136}	{2406,180}
8	-	{396,180}	{1162,153}	{427,143}	-
9	-	-	{543,161}	{2278,180}	-
10	-	-	{874,174}	-	-
11	-	-	{357,179}	-	-
12	-	-	{65,180}	-	-

Tableau V.2. Demandes périodiques des donneurs d'ordres.

Période/acteur	Demandes élevées				
	1	2	3	4	5
1	{4519,76}	{87,1}	{1278,29}	{1036,13}	{135,2}
2	{421,84}	{5537,63}	{775,45}	{1970,40}	{141,4}
3	{2777,136}	{4057,103}	{389,54}	{921,52}	{2650,42}
4	{280,141}	{5887,169}	{230,59}	{3983,107}	{197,45}
5	{2056,173}	{765,176}	{120,62}	{139,109}	{1906,75}
6	{386,180}	{363,180}	{39,63}	{1844,136}	{1399,100}
7	-	-	{1784,100}	{165,138}	{1309,119}
8	-	-	{1008,120}	{981,152}	{1262,138}
9	-	-	{114,123}	{839,162}	{197,141}
10	-	-	{781,142}	{454,167}	{1011,156}
11	-	-	{15,180}	{1021,180}	{1626,180}

Tableau V.3. Demandes périodiques des sous-traitants – Demandes élevées –

Période/acteur	Demandes moyennes				
	1	2	3	4	5
1	{2697,76}	{61,1}	{762,29}	{645,13}	{77,2}
2	{276,84}	{3830,63}	{438,45}	{1301,40}	{79,4}
3	{1806,136}	{2287,103}	{240,54}	{579,52}	{1451,42}
4	{184,141}	{3904,169}	{135,59}	{2632,107}	{113,45}
5	{1132,173}	{429,176}	{81,62}	{94,109}	{1185,75}
6	{245,180}	{240,180}	{26,63}	{1234,136}	{987,100}
7	-	-	{985,100}	{93,138}	{714,119}
8	-	-	{548,120}	{675,152}	{754,138}
9	-	-	{82,123}	{499,162}	{109,141}
10	-	-	{233,142}	{197,167}	{588,156}
11	-	-	{615,180}	{307,180}	{915,180}

Tableau V.4. Demandes périodiques des sous-traitants – Demandes moyennes –

Période/acteur	Demandes faibles				
	1	2	3	4	5
1	{2002,76}	{61,1}	{762,29}	{621,13}	{19,2}
2	{135,84}	{3830,63}	{438,45}	{1301,40}	{61,4}
3	{711,136}	{2287,103}	{240,54}	{579,52}	{1406,42}
4	{184,141}	{3904,169}	{135,59}	{2051,107}	{71,45}
5	{1132,173}	{95,176}	{81,62}	{67,109}	{1185,75}
6	{3,180}	{237,180}	{3,63}	{557,136}	{809,100}
7	-	-	{826,100}	{81,138}	{604,119}
8	-	-	{327,120}	{339,152}	{754,138}
9	-	-	{20,123}	{418,162}	{109,141}
10	-	-	{130,142}	{197,167}	{588,156}
11	-	-	{615,180}	{307,180}	{915,180}

Tableau V.5. Demandes périodiques des sous-traitants – Demandes faibles –

Comme pour les donneurs d'ordres, le taux de production maximal pour chaque unité de production des sous-traitants est fixé pour les trois groupes de problèmes d'essai. $cmax_j^s$ est choisi aléatoirement à partir de $[50,120]$. Dans chaque période, le taux de production est généré aléatoirement par les algorithmes génétiques. Comme mentionné précédemment, le taux moyen de production constitue la base pour la génération des autres paramètres, nous introduisons et nous définissons différents niveaux de capacité (*Capacity tightness*). Nous considérons quatre niveaux de barème des coûts de production ; chaque niveau correspond respectivement à des situations avec un taux de production relâché, assez relâché, serré, et sur-serré :

$$\text{Si } c_{j,k,l_j}^{s,w} \in \begin{cases}]0,0.5cmax_j^s] & \text{relâché} \\]0.5cmax_j^s, 0.75cmax_j^s] & \text{assez relâché} \\]0.75cmax_j^s, 0.9cmax_j^s] & \text{serré} \\]0.9cmax_j^s, cmax_j^s] & \text{sur-serré} \end{cases}$$

Donc, $c_{j,k,l_j}^{s,w}$ est choisi aléatoirement à partir des quatre situations.

$$pc_{j,k,l_j}^{s,w} \in \begin{cases} [0.25,0.75[& \text{Si relâché} \\ [0.8,1[& \text{Si assez relâché} \\ [1.1,1.6[& \text{Si serré} \\ [1.8,2.6[& \text{sur-serré} \end{cases}$$

Les coûts de production unitaires sélectionnés sont classés en quatre catégories différentes : $[0.25,0.75[$ pour des problèmes de coûts de production faibles, $[0.8,1[$ pour des problèmes de coûts de production moyens, $[1.1,1.6[$ pour des problèmes de coûts de production élevés et $[1.8,2.6[$ pour des problèmes de coûts de production très élevés.

Les paramètres de fiabilité et de maintenance des sous-traitants sont fixés comme suit : les coûts des actions de maintenance préventive sont générés aléatoirement à partir de l'intervalle $[10,14]$ pour des problèmes à faible coût de maintenance préventive, $[16,20]$ pour ceux à moyen coût, $[22,26]$ pour ceux à coûts élevés, et $[28,32]$ pour des coûts très élevés. Les coûts des réparations minimales en cas de défaillances sont générés aléatoirement à partir des intervalles $[18,23]$, $[25,30]$, $[32,37]$ et $[39,44]$, respectivement pour les problèmes avec des coûts de réparation minimale : faible, moyen, élevé et très élevé.

V.5.2. Résultats et discussions

Dans cette sous-section, nous discutons les résultats des expériences réalisées dans la précédente section. Les tests visent à comparer notre modèle intégré avec le modèle séparé. Nous montrons que l'intégration de la production interne, la sous-traitance, et la maintenance augmente le profit total pour les donneurs d'ordres et les sous-traitants. La valeur de l'étude de "mixture" production en interne – sous-traitance sous contraintes de maintenance intégrée sera ensuite illustrée.

Nous avons utilisé le langage et l'environnement interactif MATLAB® pour coder la génération des instances et les algorithmes sur une machine Pentium 4 avec processeur Intel Core 2 Duo CPU (2.93 GHz) et 2 Go de RAM.

Pour optimiser les performances de la chaîne logistique, les gestionnaires utilisent des indicateurs et des variables de décision. Beamon (1998) a proposé une liste non-exhaustive d'indicateurs et de variables de décision généralement utilisés dans la gestion de la chaîne logistique. Dans notre analyse, nous avons utilisé le nombre d'acteurs que comprend la chaîne ; le pourcentage d'acteurs qui adhèrent à la plate-forme, les plans de production (c'est-à-dire les quantités à produire ou à livrer), les niveaux de stocks, et les périodicités de maintenance ... Le design expérimental réalisé est divisé en trois parties.

V.5.2.1. Variation du nombre de donneurs d'ordres et de sous-traitants

Pour la première partie, 9 essais sont effectués où chaque essai est obtenu avec la variation du nombre de sous-traitants et de donneurs d'ordres. Il est à noter que toutes les instances sont résolues dans l'approche séparées (SP) et intégrés (IP). Les résultats optimaux, qui sont le profit total de la chaîne et le temps d'exécution moyen de tous les tests sont présentés dans le tableau V.6.

Les résultats montrent que le nombre de partenaires n'affecte pas le profit total de la chaîne. Ce sont plutôt les structures de coûts qui déterminent le degré de partenariat. Aussi, presque tous les problèmes relatifs à la question de gestion de la chaîne logistique sont élaborés autour de la réduction des coûts dans les différents niveaux de la chaîne. La réduction des coûts totaux réduit le prix des produits et permet d'acquérir des parts de marché, et par conséquent, génère des profits pour les investissements futurs. Par exemple, dans l'approche intégrée avec des coûts de pénurie bas ou élevés, le cas $(n, m) \in (10, 5)$ réalise un profit total plus grand que les profits réalisés par les cas $\{(10, 10); (10, 15)\}$. De plus et d'après le tableau V.6, le temps de calcul varie de 0.0044 secondes à 0.0142 secondes pour des problèmes séparés et variant de 40 secondes à 145 secondes pour des problèmes intégrés.

n	m	π_T^{sc}	Coût de pénurie			
			faible		élevé	
			Meilleure solution	$\bar{te}$	Meilleure solution	$\bar{te}$
5	5	SP	723242.44	0.0045	743059.58	0.0044
		IP	1171942.12	40.18	1994420.16	40.59
5	10	SP	1157008.91	0.0080	1190781.46	0.0065
		IP	1643186.01	62.76	1820840.45	65.57
5	15	SP	1113785.00	0.0120	1145116.40	0.0114
		IP	9172333.70	61.91	705765858.70	63.42
10	5	SP	1600168.53	0.0076	1633790.16	0.0063
		IP	3360067.65	79.18	3577950.71	79.64
10	10	SP	2185909.69	0.0092	2250898.68	0.0106
		IP	2779519.13	85.65	2988817.84	88.64
10	15	SP	2044358.46	0.0092	2094003.73	0.094
		IP	2953329.28	112.14	3196442.06	111.80
15	5	SP	2201441.31	0.0095	2245788.11	0.0098
		IP	3029536.05	101.67	34806698.79	99.67
15	10	SP	2371929.34	0.0112	2431586.96	0.0015
		IP	2856302.71	139.16	3074381.55	145.58
15	15	SP	2895273.18	0.0120	2974964.81	0.0142
		IP	3600852.34	160.34	3889671.18	173.65

Tableau V.6. Résumé des solutions avec des coûts de pénurie faibles et élevés.

V.5.2.2. Influence du coût de production des donneurs d'ordres

Pour la deuxième partie du design expérimental, nous prenons l'instance (5,5). Trois essais sont réalisés ayant un coût de production faible, moyen ou élevé. Pour chaque essai, deux niveaux de coût de pénurie sont considérés. Afin d'évaluer les résultats obtenus, pour chaque essai, nous définissons pour les donneurs d'ordres le pourcentage de réduction des coûts et pour les sous-traitants le pourcentage d'augmentation des coûts. Le pourcentage du profit supplémentaire généré des sous-traitants et donneurs d'ordres est également défini. Cela est dû à l'intégration de la production en interne et de la stratégie de sous-traitance pour les donneurs d'ordres, et la stratégie de contrat de sous-traitance secondaire pour les sous-traitants.

Les tableaux V.7, V.8 et V.9 montrent le pourcentage des profits générés pour les deux parties de la chaîne (individuels et toute la chaîne), le pourcentage de réduction des coûts avec le signe négatif, et le pourcentage d'augmentation des coûts avec le signe positif pour des coûts de production faibles, moyens et élevés. La dernière ligne indique le pourcentage d'acteurs qui augmentent leurs profits, et réduisent ou augmentent leurs coûts.

r	l	Donneur d'ordres						Sous-traitant					
		$\pi_r^{o,wo}$	π_T^o	$\overline{pc}$	$\overline{hc}$	$\overline{mc}$	$\overline{sc}$	$\pi_r^{s,wo}$	π_T^s	$\overline{pc}$	$\overline{mc}$	$\overline{hc}$	π_T^{sc}
1	L	52.93		- 3.53	- 1.11	- 31.23	81.20	6.37		107.99	25.99	292.72	
	H	18.51		- 35.02	- 32.64	- 39.34	- 1550.57	0		0	0	0	
2	L	58.15		- 12.03	- 1.40	- 87.72	23.47	137.73		95.66	65.24	142.61	
	H	65.61		- 8.29	- 5.56	14.27	- 185.81	0		0	0	0	
3	L	27.02		- 7.74	- 8.56	- 48.16	98.69	411.54		96.41	38.91	461.73	
	H	17.88	44.34	- 30.41	- 73.40	4.85	- 32.81	0	149.42	0	0	0	49.86
4	L	41.41		- 77.04	- 41.25	7.32	81.89	271.36		135.46	168.61	335.82	
	H	69.49		- 24.11	- 21.35	3.98	- 33.48	666.18		138.58	172.79	314.15	
5	L	51.76		- 3.28	- 6.88	- 39.57	- 74.64	364.92		50.03	- 0.59	242.52	
	H	64.02		- 17.12	- 6.16	- 46.06	- 177.44	55.15		64.29	145.33	314.91	
		100		100	100	60	60	70		70	60	70	

Table V.7. Pourcentage du profit réalisé, de réduction ou d'augmentation des coûts – coûts de production faibles des donneurs d'ordres –

Nous observons que, si les coûts de production sont plus faibles, le donneur d'ordres préfère la production interne que de sous-traiter. Le profit réalisé par les donneurs d'ordres a augmenté de 44.34% par rapport à l'approche séparée. Les sous-traitants ont réalisé une augmentation du profit de 149.42%. Le profit total de la chaîne a augmenté de 49.86%.

Pour des coûts de production moyens, les pourcentages d'augmentation des profits sont de 63.83%, 147.99% et 68.28%, respectivement pour les donneurs d'ordres, les sous-traitants et pour la chaîne logistique. De même, si les coûts sont plus élevés, l'augmentation est de 92.09%, 214.63%, et presque de 100%, respectivement pour les donneurs d'ordres, les sous-traitants et toute la chaîne.

Si nous analysons le degré de partenariat, on observe que dans chaque cas presque tous les partenaires adhèrent à la plate-forme (tous les donneurs d'ordres et la plupart des sous-traitants (70%, 100% ou 100%)). Cependant, il y a une divergence significative dans les pourcentages d'augmentation des profits et des pourcentages de réduction des coûts. Cela confirme que les performances des chaînes logistique s'améliorent en améliorant la performance globale de la chaîne, en conséquence, chaque entreprise peut améliorer sa propre performance (l'inverse n'est pas toujours vrai), mais cela suppose que l'entreprise coordonne efficacement avec les partenaires.

r	l	Donneur d'ordres						Sous-traitant					
		$\pi_r^{o,wo}$	π_T^o	$\overline{pc}$	$\overline{hc}$	$\overline{mc}$	$\overline{sc}$	$\pi_r^{s,wo}$	π_T^s	$\overline{pc}$	$\overline{mc}$	$\overline{hc}$	π_T^{sc}
1	L	71.15		- 7.54	- 12.79	- 2.68	93.21	372.47		105.20	- 2.31	200.85	
	H	36.95		- 66.06	- 116.53	- 70.53	- 4244.04	48.27		269.93	123.06	501.34	
2	L	106.37		0	- 0.61	0.20	30.47	61.56		289.25	62.17	388.63	
	H	46.89		- 60.11	- 71.44	- 19.68	- 848.62	61.56		280.03	85.06	310.97	
3	L	37.28		- 16.55	2.28	- 144.23	- 103.84	96.66		322.09	140.83	1202.10	
	H	69.09	63.83	- 13.30	1.68	- 52.00	- 115.88	96.66	147.99	331.54	38.97	1315.91	68.28
4	L	2.15		- 114.16	- 104.41	- 80.37	- 308.67	112.51		510.76	137.23	1445.74	
	H	106.96		- 11.50	- 11.21	- 2.01	4.10	37.79		377.24	172.86	742.25	
5	L	60.17		- 10.08	- 4.31	16.25	- 26.22	234.13		202.00	31.48	884.84	
	H	122.63		0.47	- 1.02	1.90	6.90	594.11		198.76	31.41	829.74	
		100		80	80	70	60	100		100	90	100	

Table V.8. Pourcentage du profit réalisé, de réduction ou d'augmentation des coûts – coûts de production moyens des donneurs d'ordres –

r	l	Donneur d'ordres						Sous-traitant					
		$\pi_r^{o,wo}$	π_T^o	$\bar{p}c$	$\bar{h}c$	$\bar{m}c$	$\bar{s}c$	$\pi_r^{s,wo}$	π_T^s	$\bar{p}c$	$\bar{m}c$	$\bar{h}c$	π_T^{sc}
1	L	79.55		0.45	- 0.05	0.46	- 23.74	96.55		399.10	37.31	734.33	
	H	119.21		0.56	0.61	- 0.71	32.35	96.55		400.55	30.30	795.05	
2	L	78.53		- 7.03	- 6.98	- 40.02	- 103.00	524.94		302.70	12.94	278.87	
	H	110.71		- 13.09	- 15.82	- 2.19	59.89	123.43		661.26	71.39	826.54	
3	L	77.77	92.09	- 1.72	2.27	- 36.74	20.37	65.43	214.63	368.31	141.28	1282.13	99.12
	H	71.76		- 13.32	8.65	- 90.95	- 72.21	543.36		238.81	71.59	564.26	
4	L	19.20		- 39.36	- 36.83	- 117.70	17.19	73.73		671.12	36.75	1683.70	
	H	54.40		- 24.29	- 19.27	3.30	- 51.72	73.73		814.57	139.33	2143.50	
5	L	44.95		- 23.90	- 12.63	11.14	40.85	74.49		411.72	137.97	1558.40	
	H	91.89		- 0.48	2.59	- 7.36	- 369.51	272.56		348.33	0.23	1228.22	
		100		80	60	70	50	100		100	100	100	

Table V.9. Pourcentage du profit réalisé, de réduction ou d'augmentation des coûts – coûts de production élevés des donneurs d'ordres –

Pour illustrer les valeurs de l'étude de "mixture" de la production en interne et la sous-traitance sous une maintenance intégrée, nous analysons les résultats des expériences présentés dans les tableaux V.7, V.8 et V.9. Notons que presque tous les donneurs d'ordres ont réduit leurs coûts en appelant les services de sous-traitance, à l'exception d'un nombre réduit qui n'ont pas réduit certains coûts. Cependant, ces coûts non réduits n'ont pas une grande influence sur les profits.

Les réductions des coûts sont dues à la réduction des fréquences d'exploitation en internes des machines. De même, il est évident que les sous-traitants ne s'engagent dans un contrat uniquement s'il est rentable.

V.5.2.3. Influence du coût de pénurie des donneurs d'ordres

Dans tous les cas, lorsque le coût de pénurie du donneur d'ordres est supérieur au prix de vente des sous-traitants pour les donneurs d'ordres secondaires, le problème intégré fournit les mêmes résultats que le problème séparé. Dans le cas contraire, le problème intégré donne de meilleurs résultats (tableau V.6).

Pour la deuxième partie du design expérimental, deux essais sont réalisés avec deux niveaux de fluctuation de la demande.

V.5.2.4. Influence de la variation des demandes

La variation de la demande des sous-traitants influe sur le coût total des sous-traitants et des donneurs d'ordres. Pour les sous-traitants, l'adhésion à la plate-forme de sous-traitance peut aider à obtenir un meilleur accord en vue de réduire les coûts totaux. Aussi, elle permet d'augmenter le profit total des sous-traitants, et cela même dans le cas où les coûts augmentent en raison de l'utilisation du système avec une capacité maximale.

Si on varie la demande des donneurs d'ordres et on suit le même raisonnement de la variation des demandes des sous-traitants, la variation de la demande des donneurs d'ordres influe sur le coût total des sous-traitants et des donneurs d'ordres.

Dans la même logique de la deuxième partie du design expérimental, les tableaux V.10 et V.11 détaillent le pourcentage du profit généré des deux parties de la chaîne, le pourcentage de réduction des coûts avec le signe négatif, et le pourcentage d'augmentation des coûts avec le signe positif pour des demandes faibles et élevées. La dernière ligne indique le pourcentage d'acteurs qui augmentent leurs profits et réduisent ou augmentent leurs coûts. Il est évident que les sous-traitants qui n'améliorent pas leurs profits utilisent le plan

séparés. Pour une demande plus faible des sous-traitants, nous avons obtenu les résultats présentés dans les tableaux suivants :

r	l	Donneur d'ordres						Sous-traitant					
		$\pi_r^{o,wo}$	π_T^o	$\overline{pc}$	$\overline{hc}$	$\overline{mc}$	$\overline{sc}$	$\pi_r^{s,wo}$	π_T^s	$\overline{pc}$	$\overline{mc}$	$\overline{hc}$	π_T^{sc}
1	L	18.53		- 25.22	- 45.61	- 35.53	- 13.62	0		0	0	0	
	H	5.18		- 69.80	- 41.36	- 249.28	- 159.15	0		0	0	0	
2	L	74.94		- 11.48	- 3.60	- 91.44	- 80.80	0		0	0	0	
	H	90.32		- 9.67	- 0.41	- 124.50	- 593.18	0		0	0	0	
3	L	69.62		- 2.02	0.50	- 34.75	16.43	0		0	0	0	
	H	9.35	67.1	- 82.48	- 57.54	- 259.16	- 186.84	0	609.39	0	0	0	115.94
4	L	52.85		- 3.43	- 1.53	19.52	59.78	187.58		17.15	17.18	17.19	
	H	226.31		- 6.52	- 9.66	- 42.28	- 516.82	0		0	0	0	
5	L	63.79		- 5.98	2.85	- 1.48	- 22.50	0		0	0	0	
	H	66.40		- 16.26	- 6.27	- 40.81	91.57	80.21		4.85	5.62	16.49	
		100		100	80	90	70	20		20	20	20	

Table V.10. Pourcentage du profit réalisé, réduction ou augmentation des coûts – demandes faibles des sous-traitants

r	l	Donneur d'ordres						Sous-traitant					
		$\pi_r^{o,wo}$	π_T^o	$\overline{pc}$	$\overline{hc}$	$\overline{mc}$	$\overline{sc}$	$\pi_r^{s,wo}$	π_T^s	$\overline{pc}$	$\overline{mc}$	$\overline{hc}$	π_T^{sc}
1	L	52.96		- 23.40	- 9.57	- 113.37	- 1014.04	44.16		72.47	105.23	89.16	
	H	51.82		- 112.83	- 187.73	- 161.49	- 9073.13	6234.65		28.22	40.08	47.51	
2	L	273.41		- 30.20	- 48.13	- 77.81	- 693.05	0		0	0	0	
	H	77.95		- 26.04	- 38.82	- 44.88	- 237.32	0		0	0	0	
3	L	3.54		- 60.89	- 99.06	- 68.45	- 172.10	96.25		22.11	12.29	75.92	
	H	64.72	77.03	- 12.27	- 20.31	9.99	9.74	0	20.8	0	0	0	62.18
4	L	90.57		0	- 0.67	2.42	33.44	1173.48		161.16	142.76	411.97	
	H	77.64		- 23.61	- 13.28	- 26.14	- 145.08	313.15		283.63	317.34	676.86	
5	L	48.68		- 26.55	- 16.68	7.40	- 277.04	0		0	0	0	
	H	94.97		- 8.84	- 3.44	- 77.30	- 213.67	0		0	0	0	
		100		90	100	70	80	50		50	50	50	

Table V.11. Pourcentage du profit réalisé, réduction ou augmentation des coûts – demandes élevées des sous-traitants –

A partir des tableaux V.10 et V.11, on constate que, si les demandes des donneurs d'ordres stratégiques adressées aux sous-traitants sont faibles par rapport à la capacité maximale de chaque sous-traitant. Les sous-traitants réservent la capacité restante aux donneurs d'ordres secondaires. Ils ont réalisé une augmentation du profit de plus de six fois de l'approche non intégrée. Les sous-traitants ont augmenté leur profit total de 67.1%; Toutefois, le profit de la chaîne logistique a augmenté de 115.94%. Contrairement, si les demandes des donneurs d'ordres stratégiques sont plus élevées, le pourcentage d'augmentation du profit de la chaîne diminue jusqu'à 62.18% (ce qui représente presque la moitié du profit réalisé dans le cas des demandes plus faibles).

V.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé une plate-forme de sous-traitance dans un environnement de chaînes logistiques, et sous une approche de planification de la maintenance intégrée. Le système étudié est une chaîne logistique de deux échelons composée de multiples donneurs d'ordres et multiple sous-traitants ; chacun possède une seule machine réparable, sujette à des défaillances aléatoires et produisant un seul type de produit. Les sous-traitants sont en relation avec deux types d'acteurs, les donneurs d'ordres stratégiques et secondaires. Les donneurs d'ordres stratégiques sont satisfaits sans passer par la plate-forme (clients directs). Cependant, les donneurs d'ordres secondaires cherchent à équilibrer entre la production en interne et la sous-traitance ; ils doivent passer par la plate-forme de sous-traitance.

Notre objectif à travers ces modèles est de développer une chaîne logistique collaborative de sous-traitance grâce à une sélection bidirectionnelle entre de multiples donneurs d'ordres et multiples sous-traitants. Le but est de maximiser le profit réalisé par la chaîne logistique, en donnant le maximum de commandes pour le sous-traitant qui peut gagner le maximum du profit. Sachant que tous les donneurs d'ordres sont d'accord avec les plans de sous-traitance proposés par la plate-forme, seul les plans de sous-traitance qui sont meilleurs que ceux des plans de production internes avec des pénuries sont autorisés.

Des modèles mathématiques et deux procédures de résolution ont été développés. La première procédure est un algorithme exact basé sur des heuristiques pour la résolution du problème sans intégration de l'option de sous-traitance. La deuxième est une procédure d'optimisation basée sur les algorithmes génétiques. Cette dernière a pour but de déterminer simultanément les plans optimaux intégrés de production interne – sous-traitance et de maintenance pour chaque donneur d'ordres, et les plans intégrés de sous-traitance secondaires – stratégiques et de maintenance pour chaque sous-traitant. La solution optimale comprend les taux de production, les périodes non-cycliques de maintenance préventive, la sélection des fournisseurs de sous-traitance appropriés et les quantités de sous-traitance à accorder.

Les problèmes sont résolus en comparant les résultats de plusieurs essais. La valeur de l'étude de la sous-traitance dans une approche combinée de contrôle de la production et de gestion de la maintenance ; plus particulièrement, l'utilisation de la maintenance préventive non cyclique lorsque la demande varie d'une période à l'autre sont illustrées à travers des exemples numériques et validées par un design expérimental. Ce dernier a montré que l'optimisation de la sous-traitance, qui prend en compte l'intégration de la maintenance et de la planification de la production peut réduire le coût total. La suppression de la contrainte de périodicité est directement affectée par la fluctuation de la demande et peut également réduire les coûts totaux de la maintenance et de la production.

Chapitre VI

**Optimisation intégrée production/sous-traitance sous
contraintes de fiabilité, maintenance et qualité**

VI.1. Introduction

Notre motivation à travers le présent chapitre est de proposer une extension aux travaux des chapitres 3 et 4. En effet, dans la deuxième section du chapitre 3, nous avons proposé des stratégies de partage entre plusieurs sous-traitants, sous des contraintes de fiabilités et maintenance. L'objectif était de trouver la quantité à solliciter de la part de chaque sous-traitant et les meilleures périodes de sous-traitance.

Dans la première section du chapitre 4, nous avons examiné la planification dans des périodes de production multiples et non homogène. Nous avons proposé une optimisation intégrée de la production en interne et de la sous-traitance sous des contraintes de fiabilité et de maintenance.

Dans ce cadre, le présent chapitre tente à étendre ces modèles pour des modèles plus complets par rapport aux périodicités et aux contraintes d'intégration. Le but de ce chapitre est d'étudier le problème de balancement entre la production en interne et la sous-traitance dans une chaîne logistique en deux échelons sous des contraintes de fiabilité, de maintenance et en plus la prise en considération de l'aspect de qualité. Nous nous concentrons sur le problème de sélection des fournisseurs de la sous-traitance et des quantités qui leurs sont associées.

Les caractéristiques du donneur d'ordres restent les mêmes à savoir : représenté par une seule machine réparable, sujette à des défaillances aléatoires et produisant un seul type de produit. Cependant dans ce chapitre on considère que ce dernier doit satisfaire les demandes du marché en périodicités de livraison non homogènes, tel que le report ou l'accumulation de retards des quantités de pénurie sont autorisés et génèrent une pénalité. Le donneur d'ordres est en relation avec n sous-traitants indépendants. Nous considérons que les coûts de sous-traitance dépendent du taux de produits non conformes. Aussi, nous considérons une dépendance entre le taux de défaillance et le taux de production.

Le but de ce chapitre est de sélectionner les sous-traitants appropriés et déterminer les quantités associées à chaque période, et cela en maximisant le profit total pour le donneur d'ordres. Nous proposons un modèle mathématique et nous développons une procédure d'optimisation basée sur les algorithmes génétiques pour résoudre le modèle proposé. Des expériences sont menées et discutées pour étudier les perspectives de gestion de la stratégie développée.

Le chapitre est organisé comme suit : dans la section suivante, nous décrivons le système considéré et nous présentons les notations et les hypothèses de travail. La section 3 présente le modèle mathématique développé, tandis que la procédure d'optimisation est discutée dans la section 4. La section 5 présente un exemple numérique. Enfin, une conclusion est présentée dans la section 6.

VI.2. Description du problème

Dans ce chapitre, le contexte du problème concerne un donneur d'ordres produisant un seul type de produit, pour des demandes déterministes. Il est composé d'une seule machine réparable, sujette à des défaillances aléatoires. Il doit répondre aux demandes d_k de ses clients avec des taux de production c_k , durant des périodicités de livraison non homogènes k ($k = 1, \dots, N$). Afin de satisfaire les demandes du marché avec une possibilité de report et accumulation de retard des quantités de pénurie, le donneur d'ordres cherche une façon d'allouer les quantités de sous-traitance à n sous-traitants indépendants. Cela se fait, dans ce cas, avec différents niveaux de qualités et de coûts de sorte que le profit total du donneur d'ordres est maximisé. La figure VI.1 montre la structure de la chaîne logistique considérée dans cette étude.

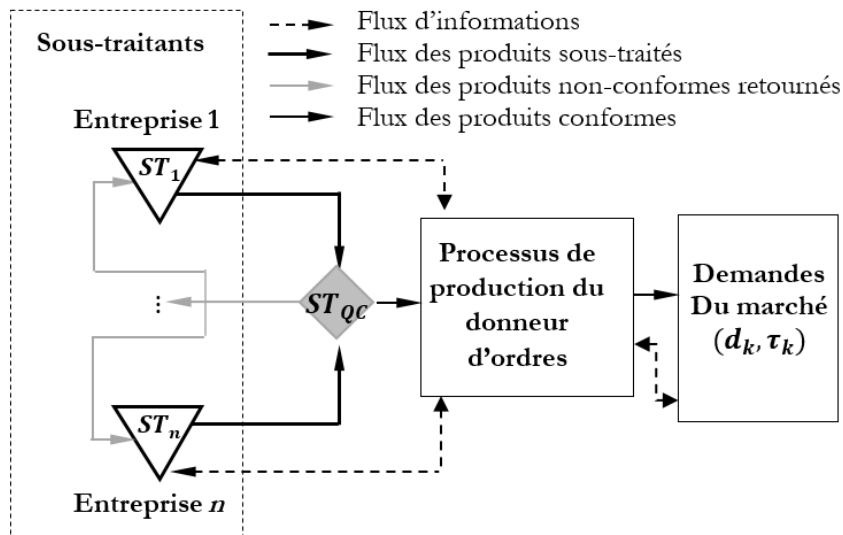


Figure VI.1. La chaîne logistique considérée dans ce problème.

Dans la littérature, le problème de contrôle de qualité des activités sous-traitées est généralement considéré sous deux aspects relatifs à la partie accomplissant le contrôle de qualité et la refabrication des produits, à savoir le donneur d'ordres ou le sous-traitant. Dans notre travail, le donneur d'ordres met en place des dispositifs pour le contrôle de la qualité des produits sous-traités. Ainsi, le problème revient à trouver les réponses aux questions liées à la sélection des sous-traitants appropriés et à la manière de couvrir le manque engendré par les quantités de produits non conformes.

Le processus d'inspection de la qualité est considéré imparfait, en raison de la détérioration du processus ou à cause d'autres facteurs (par exemple, un mauvais réglage de la machine d'inspection de la qualité) et peut générer de façon aléatoire un pourcentage $X_{1,i,k}$ de produits non-conformes. De même, un certain pourcentage $X_{2,i,k}$ des produits non-conformes peut être généré de façon aléatoire à cause de problèmes non liés au processus de contrôle de qualité (par exemple des dommages liés au transport ...). Tous les produits non-conformes sont retournés aux sous-traitants, et aucune refabrication n'est réalisée.

VI.2.1. Hypothèses

Pour développer le modèle proposé les hypothèses suivantes sont prises en compte :

1. Chaque sous-traitant possède un plan de production qui ne dépend pas des autres sous-traitants.
2. Le processus de production du donneur d'ordres est considéré comme parfait et produit des produits parfaits.
3. Les produits sont périssables avec le temps.
4. Les demandes arrivent au début de l'horizon de planification.
5. La demande non satisfaite est reportée ou retardée et génère un coût de pénalité.
6. Le sous-traitant fournit la quantité de sous-traitance au donneur d'ordres à la fin de chaque période.
7. Le plan de production peut commencer avec un niveau de stock non nul : ($I_0 \geq 0$).
8. Le temps nécessaire pour la phase de contrôle qualité est supposé négligeable.
9. Les coûts liés au contrôle de la qualité sont supposés négligeables.
10. Le temps de transport des produits n'est pas considéré.
11. Les défaillances sont détectées instantanément.
12. La durée des réparations minimales et de la maintenance préventive est négligeable.
13. Les actions de maintenance préventive sont considérées comme parfaitement exécutées. Chaque action restaure la machine à la configuration "As Good As New".
14. La maintenance de la machine est effectuée par leur propriétaire. La loi de dégradation de la machine est de type Weibull, dont le taux de défaillance est croissant avec l'usage. La machine est sous contrôle du point de vue de la maintenance.

15. La machine est soumise à une politique de maintenance préventive dont le but est de réduire l'occurrence des pannes. Les périodes d'indisponibilité de la machine suite à des arrêts de maintenance sont supposées négligeables (hypothèse 12), et par conséquent, n'engendrent pas une perte de la demande.

VI.2.2. Notations

Dans le but de faciliter la lecture et la compréhension de ce chapitre, nous résumons l'ensemble des notations utilisées comme suit :

Indices

i	Indice des sous-traitants, $i = 1, 2, \dots, n$; n est le nombre des sous-traitants.
k	Indice des périodes, $k = 1, \dots, N$; N est le nombre des périodes.
r	Indice de non-conformité, $r = 1$ la non-conformité est liée au processus d'inspection de la qualité et $r = 2$ la non-conformité est liée à d'autres facteurs.

Variables de décision

$q_{i,k}^{real}$	Quantité réelle à envoyer au sous-traitant i durant la période k .
q_k^{real}	Quantité totale réelle à sous-traiter durant la période k .
$q_{i,k}^{sur}$	Quantité surestimée (augmentée) à envoyer au sous-traitant i durant la période k .
q_k^{sur}	Quantité totale surestimée (augmentée) à sous-traiter durant la période k .
$q_{i,k}^{conf}$	Quantité des produits conformes reçus du sous-traitant i durant la période k .
q_k^{conf}	Quantité totale des produits conformes reçus des sous-traitants durant la période k .
q_k^{cov}	Quantité couverte par la production en interne dans la période k .
I_k	Niveau de stock (stock restant) du donneur d'ordres à la fin de la période k .
PrC_k, PrC	Coût total de production du donneur d'ordres durant la période k et l'horizon de planification.
IC_k, IC	Coût total de stockage du donneur d'ordres durant la période k et l'horizon de planification.
MC	Coût total de maintenance du donneur d'ordres.
M_k	Nombre moyen de défaillance durant la période k .
OC	Coût total de sous-traitance du donneur d'ordres.
PnC_k, PnC	Coût total de pénalité du donneur d'ordres durant la période k et l'horizon de planification.
GR_k, GR	Revenu brut du donneur d'ordres durant la période k et l'horizon de planification.
$E[.]$	Désigne l'opérateur de l'espérance mathématique d'une variable.
$nc_{1,i,k}$	Pourcentage moyen des produits non-conformes délivrés par le sous-traitant i , générés par le fait que le processus d'inspection de la qualité est imparfait.
$nc_{2,i,k}$	Pourcentage moyen des produits non-conformes délivrés par le sous-traitant i , générés par des facteurs, autre que le processus d'inspection.
$X_{1,i,k}$	Pourcentage des produits non-conformes délivrés par le sous-traitant i , générés par le processus d'inspection de la qualité, qui est imparfait (une variable aléatoire).
$X_{2,i,k}$	Pourcentage des produits non-conformes délivrés par le sous-traitant i , générés par des facteurs, hors le processus d'inspection (une variable aléatoire).
$f_r(X)$	Fonction de densité de probabilité de la variable X .
$\theta_{1,i,k}$	Nombre des produits retournés à cause du processus d'inspection.
$\theta_{2,i,k}$	Nombre des produits retournés en raison d'autres facteurs (hors le processus d'inspection).

Paramètres

d_k	Demande de la période k .
q_k	Quantité produite par les ressources de production internes pendant la période k .

c_k	Taux de production du donneur d'ordres pendant la période k .
$cmax$	Taux de production maximal du donneur d'ordres.
τ_k	Délai de livraison du demande de la période k .
ΔD_k	Durée de retard du demande de la période précédant la période k .
Z_k	Surface générée par l'évolution du niveau de stock durant la période k .
pmc	Coût unitaire de la maintenance préventive du donneur d'ordres.
cmc	Coût unitaire de la maintenance corrective du donneur d'ordres.
prc	Coût unitaire de production du donneur d'ordres.
hc	Coût unitaire de stockage du donneur d'ordres.
opi	Prix unitaire de sous-traitance du sous-traitant i .
pnc	Coût unitaire de pénalité du donneur d'ordres.
sp	Prix de vente unitaire du donneur d'ordres.

VI.3. Modèle mathématique

Afin de répondre à la demande des clients, le donneur d'ordres est confronté à deux situations possibles :

Situation 1 :

Le taux de production en interne est supérieur ou égal à la demande. Dans ce cas, le donneur d'ordres utilise sa machine avec le taux c_k , tel que :

$$c_k = \begin{cases} \frac{(d_k - I_{k-1})}{\tau_k - \tau_{k-1}} & \text{Si } q_{k-1}^{cov} = 0 \text{ et } \forall I_{k-1}; \text{ Situation 1.1} \\ \frac{(d_k + q_{k-1}^{cov})}{\tau_k - \tau_{k-1}} & \text{Si } q_{k-1}^{cov} > 0; \text{ Situation 1.2} \end{cases} \quad (VI.1)$$

Situation 2 :

Le taux de production interne est inférieur à la demande ; dans ce cas, le donneur d'ordres utilise sa machine avec le taux de production maximal. Donc, la sous-traitance est nécessaire pour améliorer la capacité de production interne. De plus, le donneur d'ordres surestime (augmente) la quantité à sous-traiter en ajoutant une quantité "prévisible" pour couvrir les incertitudes de la qualité des produits sous-traités. Ainsi, la demande augmentée est calculée comme suite :

$$q_{i,k}^{sur} = q_{i,k}^{real} (1 + \%nc_{1,i,k} + \%nc_{2,i,k}) \quad (VI.2)$$

$$\text{Avec } q_{c,k}^{sur} = \sum_{i=1}^n q_{i,k}^{sur}$$

La quantité réelle envoyée aux sous-traitants dans la période k est exprimée par la formule suivante :

$$q_k^{real} = \sum_{i=1}^n q_{i,k}^{real} = (d_k + q_{k-1}^{cov}) - [cmax(\tau_k - \tau_{k-1}) + I_{k-1}] \quad (VI.3)$$

$$\text{Avec } 0 \leq q_{i,k}^{real} \leq q_k^{real}$$

Le profit net du donneur d'ordres est donné par l'expression suivante :

$$\pi_M = GR - (P_r C + IC + MC + OC + P_n C) \quad (VI.4)$$

VI.3.1. Le revenu brut

Le revenu brut est le montant de l'ensemble des ventes effectuées au cours de l'horizon de planification. Il est donné par la formule (VI.5) :

$$GR = sp \sum_{k=1}^N GR_k$$

Ainsi :

$$GR_k = \begin{cases} (d_k - I_{k-1}) & \text{Si situation 1.1} \\ (d_k + q_{k-1}^{cov}) & \text{Si situation 1.2} \\ (\tau_k - \tau_{k-1})cmax + \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^n q_{i,k}^{conf} & \text{Si situation 2} \end{cases} \quad (VI.5)$$

La quantité des produits conformes reçus du sous-traitant i dans la période k est donnée par la formule suivante :

$$q_{i,k}^{conf} = q_{i,k}^{sur} - (\theta_{1,i,k} + \theta_{2,i,k}) \quad (VI.6)$$

La quantité de produits retournés $\theta_{r,i,k}$ peut être exprimée par : $\theta_{r,i,k} = q_{i,k}^{sur} \cdot \frac{E[X_{r,i,k}]}{100}$; $r = 1,2$.

$X_{r,i,k}$ prend des valeurs comprises entre 0 et 100%. De plus, pour chaque produit, il n'y a que deux possibilités : soit il est conforme ou défectueux. La probabilité qu'un produit est défectueux est $\frac{nc_{r,i,k}}{100}$.

Par conséquent, il est conforme avec une probabilité de $1 - \left(\frac{nc_{r,i,k}}{100}\right)$. C'est une situation typique, où $X_{r,i,k}$ suit une loi binomiale $B(n, p)$. Avec $n = q_{i,k}^{sur}$ et $p = \frac{nc_{r,i,k}}{100}$.

Dans le cas où la quantité surestimée (augmentée) ne couvre pas la quantité réelle envoyée pour chaque sous-traitant, le donneur d'ordres récupère le manque avec ses propres moyens durant la période $k + 1$. Cette quantité est donnée par les expressions suivantes :

$$q_k^{cov} = \begin{cases} \sum_{i=1}^n (q_{i,k}^{real} - q_k^{conf}) & \text{Si } q_k^{real} - q_k^{conf} \geq 0 & \text{situation 2.1} \\ 0 & \text{Si } q_k^{real} - q_k^{conf} < 0 & \text{situation 2.2} \end{cases} \quad (VI.7)$$

VI.3.2. Le coût de production

L'objectif du donneur d'ordres est d'exploiter de façon optimale sa capacité, et de réduire la quantité à sous-traiter. Ainsi, le coût de production total est donné par l'expression suivante :

$$P_r C = \sum_{k=1}^N P_r C_k$$

Ainsi :

$$P_r C_k = \begin{cases} prc \sum_{k=1}^N (d_k - I_{k-1}) & \text{Si situation 1.1} \\ prc \sum_{k=1}^N (d_k + q_{k-1}^{cov}) & \text{Si situation 1.2} \\ prc \left(\sum_{k=1}^N (\tau_k - \tau_{k-1})cmax + \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^n q_{i,k}^{conf} \right) & \text{Si situation 2} \end{cases} \quad (VI.8)$$

VI.3.3. Le coût de stockage

Le coût total de stockage comprend le coût des stocks de chaque période. Il est donné par l'expression suivante :

$$IC = \sum_{k=1}^N IC_k = hc \sum_{k=1}^N Z_k \quad (VI.9)$$

Z_k est la surface générée par l'évolution du niveau de stock au cours de la période k , exprimée comme suit :

$$Z_k = \begin{cases} (\tau_k - \tau_{k-1})I_{k-1} + c_k(\tau_k - \tau_{k-1})^2/2 & \text{Si situation 1 } (q_{k-1}^{cov} = 0) \\ \left[\begin{array}{l} q_{k-1}^{cov}\Delta D_k + \\ c_k((\tau_k - \tau_{k-1}) - \Delta D_k)^2 \end{array} \right] / 2 & \text{Si situation 1 } (q_{k-1}^{cov} > 0) \\ (\tau_k - \tau_{k-1})I_{k-1} + c_{max}(\tau_k - \tau_{k-1})^2/2 & \text{Si situation 2 } (q_{k-1}^{cov} = 0) \\ \left[\begin{array}{l} q_{k-1}^{cov}\Delta D_k + \\ c_{max}((\tau_k - \tau_{k-1}) - \Delta D_k)^2 \end{array} \right] / 2 & \text{Si situation 2 } (q_{k-1}^{cov} > 0) \end{cases} \quad (VI.10)$$

Avec,

$$\Delta D_k = \begin{cases} \frac{q_{k-1}^{cov}}{c_{max}} & \text{Si } q_k^{real} - q_k^{conf} \geq 0 \\ 0 & \text{Si } q_k^{real} - q_k^{conf} < 0 \end{cases} \quad (VI.11)$$

Le stock restant peut être exprimé par la formule suivante :

$$I_k = \begin{cases} |q_k^{real} - q_k^{conf}| & \text{Si } q_k^{real} - q_k^{conf} < 0 \text{ situation 2 - 2} \\ 0 & \text{Si } q_k^{real} - q_k^{conf} \geq 0 \text{ situation 2 - 1} \end{cases} \quad (VI.12)$$

VI.3.4. Le coût de sous-traitance

Le donneur d'ordres vise toujours à sous-traiter avec un coût minimal, mais une forte relation existe entre les coûts de sous-traitance et la qualité des produits sous-traités. Nous considérons plusieurs options de sous-traitance : le sous-traitant peut offrir une qualité inférieure à un prix bas. Mais s'il offre une qualité supérieure, le prix sera donc très élevé. Le coût total de la sous-traitance peut être écrit comme suit :

$$OC = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^n op_i q_{i,k}^{conf} \quad (VI.13)$$

VI.3.5. Le coût de maintenance

Les coûts de maintenance dépendent des politiques adoptées. Ici, la maintenance préventive est effectuée au début de chaque période de production. En plus, lorsqu'une défaillance se produit une maintenance corrective est effectuée. Le coût de maintenance est donné par l'expression suivante :

$$MC = C_r M(H) + N.C_m \quad (VI.14)$$

Le nombre moyen des défaillances au cours de l'horizon de planification H est donné par la formule suivante :

$$M(H) = \sum_{k=1}^N M(k) \quad (VI.15)$$

Pour chaque période, le nombre moyen de défaillance est donné par la formule suivante :

$$M(k) = \begin{cases} \frac{c_k}{cmax} \int_{\tau_{k-1}}^{\tau_k} \lambda n(t) dt & \text{Si situation 1} \\ \int_{\tau_{k-1}}^{\tau_k} \lambda n(t) dt & \text{Si situation 2} \end{cases} \quad (VI.16)$$

VI.3.6. Le coût de pénalité

Si une pénurie a eu lieu à la fin de la période k , une pénalité doit être assumée pour rattraper la quantité de pénurie dans la période suivante $k + 1$. Le coût de pénalité est calculé en fonction de la durée ΔD_k requise pour produire la quantité manquée à la fin de chaque période. Il est donné par la formule suivante :

$$P_n C_k = pnc \Delta D_k \cdot q_{k-1}^{cov} \quad (VI.17)$$

$$\text{Avec } P_n C = \sum_{k=1}^N P_n C_k$$

Remplaçons l'équation ΔD_k par son expression donnée par (VI.11) et ajoutons le coût de stockage et le coût de maintenance qui correspondent à l'intervalle supplémentaire, nécessaire à couvrir la pénurie générée au cours de la dernière période. Ainsi, la formule du coût de pénalité est la suivante :

$$P_n C_k = \begin{cases} pmc + cmc \int_0^{\Delta D_{N+1}} \lambda n(t) dt + hc \frac{(q_{k-1}^{cov})^2}{2q_{k-1}^{cov}} + pnc \frac{(q_{k-1}^{cov})^2}{cmax} & \text{Si } q_k^{real} - q_k^{conf} \geq 0 \\ 0 & \text{Si } q_k^{real} - q_k^{conf} < 0 \end{cases} \quad (VI.18)$$

Le problème de planification intégrée résultant est modélisé comme un programme en nombres entiers avec des contraintes non linéaires. Le profit total du donneur d'ordres peut être formulé par l'expression suivante :

$$\max \pi_M = \max [GR - (P_r C + IC + MC + OC + P_n C)] \quad (VI.19)$$

VI.4. Procédure de résolution à base d'algorithmes génétiques

Rappelons que notre objectif est de déterminer pour chaque période, la meilleure quantité de sous-traitance à solliciter de chaque sous-traitant i , permettant de maximiser le profit total du donneur d'ordres.

Vu la complexité du problème qui augmente nous avons eu recours à une approche de résolution basée sur les algorithmes génétiques pour résoudre efficacement le modèle proposé.

Le tableau VI.1 illustre la structure bidimensionnelle du chromosome. Il est composé de n lignes et N colonnes. Chaque gène est codé avec un nombre entier qui représente la quantité $q_{i,k}^{real}$ à allouer pour le sous-traitant i dans la période k .

$q_{1,1}^{real}$	$q_{1,2}^{real}$	...	$q_{1,k}^{real}$	...	$q_{1,N}^{real}$
$\vdots$	$\vdots$	...	$\vdots$	...	$\vdots$
$q_{i,1}^{real}$	$q_{i,2}^{real}$	...	$q_{i,k}^{real}$	...	$q_{i,N}^{real}$
$\vdots$	$\vdots$	...	$\vdots$	...	$\vdots$
$q_{n,1}^{real}$	$q_{n,2}^{real}$	...	$q_{n,k}^{real}$	...	$q_{n,N}^{real}$

Tableau VI.1. La structure du chromosome.

Les caractéristiques de notre procédure d'optimisation sont décrites à travers les étapes suivantes :

Étape 1 : Génération de la population initiale

Pour chaque chromosome, si le taux de production interne est inférieur à la demande ; le donneur d'ordres produit avec la capacité de production maximal c_{max} , et fait appel aux services de la sous-traitance pour améliorer sa capacité de production. Des valeurs entières sont générées aléatoirement entre 0 et q_k^{real} ; ces valeurs sont décodées en utilisant les formules VI.2 et VI.3. C'est-à-dire, le donneur d'ordres augmente sa quantité à sous-traiter en ajoutant une quantité prévisible pour couvrir les incertitudes de la qualité des produits sous-traités.

Dans le cas contraire, le taux de production en interne est supérieure ou égale à la demande (la formule VI.1), aucune valeur n'est générée, elle est interprétée par un 0 dans le gène associé. Notez que ce schéma de codage des solutions génère des solutions faisables.

Ensuite, pour chaque solution possible, calculer la valeur de la fonction objectif qui correspond à chaque chromosome. Enregistrer la meilleure solution et mettre $I = 1$.

Étape 2 : Vérification si les critères d'arrêt sont atteints

Dans le cas échéant, passer aux prochaines étapes. Sinon, mettre fin à la procédure et afficher la solution obtenue. La procédure se termine si l'un des deux critères déjà utilisés dans les précédents chapitres est vérifié à savoir :

- Le nombre de générations est supérieur à un nombre maximum prédéfini de générations.
- La meilleure solution ne s'améliore pas au cours d'un nombre prédéfini de générations.

Étape 3 : Création d'une nouvelle population

Dans cette étape, la nouvelle population est générée par le biais de quatre sous-étapes (croisement, mutation, élitisme, et remplacement aléatoire) ; avec une vérification de la faisabilité des solutions générées (pour les deux premières sous-étapes).

Notons que les opérateurs de croisement et de mutation ont été définis en fonction des propriétés et caractéristiques du problème et du schéma de codage.

- *Croisement* : il consiste à coupler deux individus pour construire d'autres individus. Dans notre cas, nous utilisons le même type de croisement utilisé dans le deuxième problème du chapitre 4. Il s'agit du croisement horizontal et vertical en deux points. Pour plus de détails, le lecteur est invité à consulter le chapitre 4 (§ IV.3.3).
- *Mutation* : la mutation est la modification aléatoire d'un paramètre (gène) du dispositif (par exemple, l'inversion des données dans le chromosome). De la même façon que le croisement, dans notre métaheuristique, nous adoptons le même type de mutation du problème 2 du chapitre 4, il s'agit de la mutation par permutation. Pour plus de détail sur la manière d'effectuer cette opération, le lecteur pourra consulter le chapitre 4 (§ IV.3.3).
Par contre après les opérateurs génétiques, des solutions infaisables peuvent apparaître. Un processus de correction des solutions infaisables est adopté. Ensuite, une évaluation des solutions générées est faite.
- *Élitisme* : Pour une nouvelle génération, nous prenons un pourcentage des meilleurs individus de la génération précédente.
- *Remplacement aléatoire* : il consiste à générer de manière aléatoire un pourcentage d'individus comme dans la génération de la population initiale.

Étape 4 : Evaluation de la fonction objectif.

Cette étape consiste à évaluer la fonction objectif de la nouvelle population, puis d'enregistrer la meilleure solution. Mettre $I = I + 1$ et retourne à l'étape 2.

Des expériences numériques ont été effectuées pour déterminer les paramètres de l'algorithme génétique. Le taux de croisement, le taux de mutation, le nombre d'élites et le taux de remplacement aléatoire sont fixés respectivement à : 0.6, 0.1, 0.1 et 0.2. Le critère d'arrêt est basé sur le nombre maximum de générations et des générations de décrochage. Le nombre de générations est fixé à 200. La génération de décrochage est fixée à 25. La taille de la population est fixée à 100. La méthode de sélection adoptée dans notre problème est celui de la roulette. La probabilité de sélection d'un individu est proportionnelle à la fonction objectif.

VI.5. Exemple numérique – résultats et discussions –

Dans cette sous-section, nous présentons un exemple numérique pour illustrer notre approche. Nous considérons une chaîne logistique composée d'un seul donneur d'ordres et cinq sous-traitants. Le tableau VI.2 présente les données de la demande du donneur d'ordres :

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d_k	180	110	30	50	95	75	135	30	110	125
τ_k	15	22	32	40	60	65	80	90	104	120

Tableau VI.2. Données de la demande du donneur d'ordres.

En outre, la fonction de densité de probabilité de défaillance nominale de la machine du donneur d'ordres est $f(t) = Weibull(2, 100)$, lorsque la machine fonctionne avec la cadence de production maximale $cmax = 3$ unités/u.t. Le reste des paramètres représentent les coûts unitaires du donneur d'ordres où : $sp = 7$ u.m/unité; $prc = 2$ u.m/unité; $hc = 0.18$ u.m/unité/u.t; $pmc = 22$ u.mm; $cmc = 40$ u.m; $pnc = 12$ u.m/unité/u.t.

Le tableau VI.3 présente l'ensemble des données pour chaque sous-traitant à savoir : les prix de vente et les pourcentages moyens des produits non-conformes qui peuvent être délivrés par chaque sous-traitant, générés par le fait que le processus d'inspection de la qualité est imparfait ou par des facteurs, autre que le processus d'inspection.

Paramètres\Sous-traitants	ST_1	ST_2	ST_3	ST_4	ST_5
op_i	5.2	6.5	4	7.3	5.95
$nc_{1,i,k}$	3%	3%	4%	1%	5%
$nc_{2,i,k}$	3%	2%	4%	2.3%	1.5%

Tableau VI.3. Données des sous-traitants.

En se basant sur ces données nous obtenons les résultats présentés dans le tableau VI.4. Le premier ensemble qui se compose de cinq lignes représente les quantités optimales surestimées à allouer à chaque sous-traitant dans chaque période (ST). Le second représente le nombre de produits défectueux livrés par les sous-traitants en raison du processus d'inspection de la qualité imparfait et d'autres facteurs.

La première ligne du troisième groupe contient les taux de production en interne optimaux du donneur d'ordres (DO), la seconde, représente le pourcentage d'utilisation de la capacité. Nous observons que durant toutes les périodes, le donneur d'ordres utilise son système avec la capacité maximale, sauf la troisième période, il utilise 80 % de sa capacité. Cela dépend des données d'entrées (demandes, capacité maximale, ...). La troisième ligne représente le stock restant. La dernière ligne de ce tableau contient les quantités recouvrées par le donneur d'ordres pour chaque période.

		k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	% de retour	% de sous-traitance
ST	$q_{i,k}^{sur}$	C_1	64	58	0	8	13	18	3	4	2	30	7.5	31.60
		C_2	11	6	0	1	12	8	9	4	1	4	1.79	8.85
		C_3	48	13	0	11	3	28	15	8	68	38	6.9	36.65
		C_4	3	11	0	2	1	6	17	6	2	5	9.43	8.37
		C_5	19	2	0	5	10	4	44	2	1	5	7.61	14.53
	$(\theta_{1,i,k}, \theta_{2,i,k})$	C_1	(0,2)	(4,3)	(0,0)	(0,0)	(0,2)	(2,1)	(0,0)	(0,0)	(0,0)	(1,0)	(3.5,4)	
		C_2	(0,0)	(0,0)	(0,0)	(0,0)	(1,0)	(0,0)	(0,0)	(0,0)	(0,0)	(0,0)	(1.79,0)	
		C_3	(2,2)	(0,0)	(0,0)	(1,0)	(0,0)	(1,1)	(1,1)	(1,0)	(3,2)	(1,0)	(4.31,2.59)	
		C_4	(1,0)	(0,1)	(0,0)	(0,1)	(0,0)	(0,1)	(0,1)	(0,0)	(0,0)	(0,0)	(1.89,7.55)	
		C_5	(0,0)	(0,0)	(0,0)	(0,0)	(1,0)	(0,0)	(5,0)	(0,1)	(0,0)	(0,0)	(6.52,1.09)	
	DO	c_k	3	3	2.4	3	3	3	3	3	3	3		
		% In	100	100	80	100	100	100	100	100	100	100		
		I_k	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3		
		q_k^{cov}	0	4	0	1	1	3	3	1	0	0		

Tableau VI.4. Résumé des résultats.

L'avant dernière colonne, contient les pourcentages partiels et totaux des produits non-conformes. Enfin, la dernière colonne présente la fréquence d'appel aux différents sous-traitants. Nous observons que le donneur d'ordres sous-traite 36.65 % de ses requêtes de sous-traitance auprès du troisième sous-traitant à un prix de 4 u.m et un pourcentage de retour total de 6.9 %, puis chez le premier sous-traitant avec un pourcentage de 31.6 % à un prix de 5.2 u.m et un pourcentage de retour de 7.5 %. Suivi par les sous-traitants 5, 2 et 4, dont il sous-traite respectivement 14.53 %, 8.85 % et 8.37 avec des prix 5.95 u.m, 6.5 u.m et 7.3 u.m, et des pourcentages de retour de 5.61 %, 1.79 % et 9.43 %.

VI.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la problématique de planification de la production avec l'utilisation de deux modes de production ; la production qui s'appuie sur les ressources internes et le recours aux services de la sous-traitance. Le problème est étudié sous des contraintes de fiabilité, de maintenance et de qualité. L'étude menée considère un seul donneur d'ordres en relation avec plusieurs sous-traitants indépendants. Chaque sous-traitant est caractérisé par une capacité de production spécifique, un niveau de qualité, et un prix associé. Le processus de production et de contrôle de la qualité du donneur d'ordres est considéré comme parfait. Par contre, le processus d'inspection de la qualité pour les entreprises prestataires de la sous-traitance est considéré comme imparfait. En outre, nous avons considéré que les coûts de sous-traitance dépendent du taux de produits non conformes, et que le taux de défaillance dépend du taux de production. Un modèle mathématique a été développé. Une procédure de résolution basée sur les algorithmes génétiques a été implémentée, afin de déterminer les entreprises fournisseurs de la sous-traitance appropriées et les quantités associées, afin de maximiser le profit total du donneur d'ordres.

Conclusions et perspectives de recherche

Conclusions et perspectives de recherche

1. Conclusions

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse concernent la planification tactique et conjointe des activités de production, de sous-traitance sous contraintes de fiabilité, de maintenance et de contrôle de qualité. Les approches de management intégré permettent la gestion de plusieurs domaines différents (production, sous-traitance, maintenance et qualité ...) au sein d'une organisation. Ce type d'approche combine les exigences et les objectifs des différentes fonctions afin que l'organisation puisse être plus efficace pour atteindre les objectifs visés. Elle permet une vision globale de l'entreprise en prenant en compte les interactions entre les différentes fonctions de management.

Dans ces conditions, le développement de nouvelles approches intégrant la planification de la production, la sous-traitance, la maintenance et la qualité est aujourd'hui un problème préoccupant dans le domaine de l'optimisation des systèmes de production et des chaînes logistiques.

Motivés par cet aspect, nous avons abordé dans cette thèse des problématiques liées à la planification mixte de la production et des capacités, de la sous-traitance, de la maintenance et de la qualité :

Dans le premier chapitre, une présentation des notions liées au thème abordé dans cette thèse a été effectuée. A chaque partie, nous faisons référence aux différents travaux traitant les concepts abordés. Un positionnement dans le vaste domaine de recherche sur le management des chaînes logistiques a été effectué.

Dans le deuxième chapitre, nous avons effectué une revue de littérature sur les modèles mathématiques qui prennent en compte l'association entre la production, la sous-traitance, la maintenance et la qualité. De plus, nous avons proposé une nouvelle taxonomie pour exposer ces différents modèles. En fonction des manques ou lacunes rencontrés dans cette revue, nous avons mis en évidence notre contribution autrement dit nous nous sommes positionnés par rapport à l'existant.

Un problème d'optimisation de l'intégration des activités de sous-traitance pour le cas de période unique a été abordé dans le chapitre III. Nous avons développé un modèle mathématique et des algorithmes pour définir un intervalle de profitabilité pour qu'un donneur d'ordres et un sous-traitant soient gagnants. Une extension de ce problème en un problème de sous-traitance coopérative entre un donneur d'ordres et multiple sous-traitants a été réalisée. Des modèles mathématiques mettant en œuvre plusieurs stratégies de sous-traitance ont été proposés. Ainsi, nous avons développé des procédures d'optimisation basées sur les algorithmes génétiques, une étude comparative entre ces stratégies a été effectuée selon différents critères.

Dans le quatrième chapitre, nous avons étudié un problème de balancement entre deux modes de production ; la production en interne et le recours aux services de la sous-traitance, dans une approche combinée de production et maintenance et dans un contexte multi-période. Le chapitre a été entamé par l'étude du problème sous des contraintes de fiabilité et de maintenance simples. Puis une extension a été réalisée sous une politique de maintenance intégrée. Des modèles mathématiques ont été proposés, des procédures d'optimisation à base d'algorithmes génétiques ont été implémentées pour déterminer simultanément les plans de production interne, de maintenance préventive, et de sous-traitance pour un donneur d'ordres qui est en relation avec un sous-traitant.

Dans le chapitre V, nous avons développé une plate-forme de sous-traitance coopérative sous une approche de planification de la maintenance intégrée, et dans un environnement de chaînes logistiques composée de multiples donneurs d'ordres et multiple sous-traitants. Nous avons proposé un algorithme exact basé sur des heuristiques pour la résolution du problème sans intégration de la sous-traitance. Une procédure d'optimisation basée sur la métaheuristique algorithmes génétiques a été implémentée. Cette dernière, a pour objectif de déterminer les plans optimaux avec prise en compte de la coordination entre les membres de la chaîne.

Dans le dernier chapitre, nous avons étudié la problématique de planification de la production par l'utilisation de deux modes de production ; la production par l'utilisation des ressources internes et l'appel aux services de sous-traitance sous des contraintes de fiabilité, de maintenance, et de qualité. L'étude menée

considère un seul donneur d'ordres et multiple sous-traitants. Elle vise à intégrer et à analyser le problème de la qualité de la production dans la relation de sous-traitance. Un modèle mathématique et une procédure de résolution basée sur les algorithmes génétiques ont été développés.

Des expériences numériques ont été réalisées pour montrer l'applicabilité, l'efficacité et la robustesse de toutes les approches proposées.

Le travail de recherche de cette thèse a donné lieu à une publication dans une revue internationale (*Journal of Intelligent Manufacturing*) et six papiers de conférences internationales (CIE 41, IFAC-INCOM 2012, CIE 42, IFAC-IMS 2013, IEEE-ETFA 2013 et IEEE-SMC 2013).

Haoues, M., Dahane, M., Mouss, N. K., and Rezg, N. (2011). Optimization of outsourcing activity under a win-win single outsourcer – single subcontractor relationship, *Proceedings of the 41st International Conference on computers & Industrial Engineering*, 343-348.

Haoues, M., Dahane, M., Mouss, N.K., & Rezg, N. (2012). Optimization of cooperative outsourcing between single-outsourcer multiple-subcontractors : a genetic algorithm based approach. *The 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, 14(1), 975–980.
et *IFAC Proceedings Volumes*, Volume 45, Issue 6, 23–25 May 2012, Pages 975-980.

Haoues, M., Dahane, M., Mouss, N.K., & Rezg, N. (2012). Integrated Maintenance Problem in Two-Stage Supply Chain Coordination With an Outsourcing Option. In *Proceedings of the 42st International Conference on computers & Industrial Engineering (Cie42)*, Cie & Saïe, Cape Town, South Africa, 16-18 July, 937 – 951.

Haoues, M., Dahane, M., Mouss, N.K., & Rezg, N. (2013). Integrated Optimisation of In-House Production and Outsourcing Strategy : Genetic Algorithm Based Approach. *The 11th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems*, 11(1), 420–425.
et *IFAC Proceedings Volumes*, Volume 46, Issue 7, May 2013, Pages 420-425.

Haoues, M., Dahane, M., Mouss, N.K., & Rezg, N. (2013). Production Planning in Integrated Maintenance Context for Multi-Period Multi-Product Failure-Prone Single-Machine, in the 18th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'13), Cagliari, Italy, 10-13 September 2013. 1 – 8.

Haoues, M., Dahane, M., Mouss, N.K., & Rezg, N. (2013). Optimization of Single-Manufacturer Multiple-Contractors Outsourcing Relationship in Integrated Approach of Production, Maintenance and Quality, in the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC'13), Manchester, UK, October 13-16, 2013. 935 – 940.

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*, DOI 10.1007/s10845-016-1273-3. 1– 25.

2. Perspectives de recherche

Les travaux de cette thèse ouvrent plusieurs pistes de recherche futures :

- *Configurations multi-produits* : l'ensemble de nos travaux sont focalisés sur le cadre mono-produit. Ainsi, il serait intéressant que les travaux futurs pour résoudre les problèmes dans le contexte multi-produits.
- *Cas industriels* : afin de refléter un contexte économique réel, nous voulons valider et approuver nos approches par des applications industrielles. A travers ces applications nous pouvons tester nos algorithmes dans des applications réelles. Le contexte industriel algérien nous sera très favorable, et notamment avec l'émergence de l'industrie automobile, accompagnée de la volonté du gouvernement algérien d'atteindre des taux d'intégration de la sous-traitance de 40%.
- *Dépendance entre la capacité de production et la maintenance préventive* : les systèmes que nous avons étudiés, c'est-à-dire "des systèmes à capacité nominale", nous pouvons étendre l'étude en considérant que chaque action de maintenance diminue avec un certain pourcentage la capacité du système correspondant. De plus, nous pouvons considérer la question de retour des produits non conformes, qui consomment de leurs parts un certain pourcentage de la capacité du système.
- *L'intégration dans le système opérant* : une des questions qui nous intéresse est l'intégration de l'ordonnancement de la production, de la sous-traitance, et de la planification de la maintenance. Un travail est en cours de finalisation qui fera l'objet d'une publication.
- *Types de relations donneurs d'ordres – sous-traitants* : en effet, des politiques de compensation, de partage des revenus peuvent être prises en compte dans les travaux futurs, comme extension à celles étudiées dans cette thèse, à savoir les travaux du chapitre III.
- *Multi-objectif* : du point de vue résolution, il serait intéressant d'étendre les problèmes du chapitre III et V à des problèmes de décisions multi-objectif.
- *Contraintes environnementales* : les contraintes environnementales peuvent être intégrées pour étendre nos modèles, car elles sont liées à plusieurs composantes de notre étude, comme le type des machines, leurs niveaux de fiabilité, le transport entre donneurs d'ordres et les sous-traitants. peuvent influencer le choix et la sélection des sous-traitants.

Annexe

Détail des résultats de calcul du chapitre V

Cette annexe présente le détail des résultats de calcul du chapitre V :

r	l	p	Donneurs d'ordres							Sous-traitants					
			Profit	$\overline{pc}$	$\overline{oc}$	$\overline{hc}$	$\overline{mc}$	$\overline{sc}$	$\overline{sp}$	Profit	$\overline{pc}$	$\overline{mc}$	$\overline{hc}$	$\overline{sp_{st}}$	$\overline{sp_{sc}}$
1	L	SP	117257.17	6.03	-	21.62	12.64	3.27		62828.77	5.40	6.77	19.51	37.70	-
	IP		179357.05	4.89	35.69	19.73	5.92	36.40		62828.77	5.89	7.43	21.38	37.70	74.52
	H	SP	118760.48	6.03	-	21.62	12.64	3.83	55.20	62828.77	5.40	6.77	19.51	37.70	-
	IP		180299.37	2.84	0.00	7.52	4.83	350.93		62828.77	5.89	7.46	21.55	37.70	74.12
2	L	SP	141418.95	7.10	-	17.13	7.61	3.22		86863.99	5.97	3.97	17.44	32.59	-
	IP		528076.60	5.45	155.83	11.57	4.28	25.53		86863.99	6.85	4.55	21.06	32.59	71.26
	H	SP	143904.04	7.10	-	17.13	7.61	3.84	42.97	86863.99	5.97	3.97	17.44	32.59	-
	IP		256079.88	5.63	40.13	12.34	5.25	12.94		86863.99	6.85	4.56	20.90	32.59	70.49
3	L	SP	185041.52	6.40	-	14.70	6.15	8.87		24497.20	5.27	6.83	5.82	20.97	-
	IP		191598.48	3.98	35.69	7.39	3.65	24.13		24497.20	6.05	9.79	7.23	20.97	65.46
	H	SP	192872.23	6.40	-	14.70	6.15	10.40	37.62	24497.20	5.27	6.83	5.82	20.97	-
	IP		317706.91	5.70	40.13	12.22	6.83	9.38		24497.20	6.06	9.75	7.33	20.97	67.24
4	L	SP	128264.64	7.87	-	7.25	8.50	8.42		41470.92	5.95	4.62	6.69	20.36	-
	IP		244431.58	7.87	35.69	7.20	8.71	5.60		119261.59	6.97	5.41	7.84	20.36	42.15
	H	SP	134708.98	7.87	-	7.25	8.50	10.03	32.84	41470.92	5.95	4.62	6.69	20.36	-
	IP		239300.65	6.37	40.13	6.40	6.74	24.57		41470.92	6.97	5.41	7.84	20.36	42.15
5	L	SP	85233.16	6.33	-	7.64	10.37	3.11		30863.98	4.15	6.51	5.65	18.91	-
	IP		126728.48	5.00	35.69	6.55	11.20	11.72		30863.98	4.35	6.94	6.08	18.91	35.69
	H	SP	86786.86	6.33	-	7.64	10.37	3.61	32.86	30863.98	4.15	6.51	5.65	18.91	-
	IP		169205.98	5.82	40.13	7.39	5.85	11.32		55620.04	4.35	6.87	6.58	18.91	40.13

Tableau A.II.1. Résultats du design expérimental pour différentes valeurs de fluctuation de la demande – demandes plus élevées des sous-traitants –

r	l	p	Donneurs d'ordres							Sous-traitants					
			Profit	$\overline{p\bar{c}}$	$\overline{o\bar{c}}$	$\overline{h\bar{c}}$	$\overline{m\bar{c}}$	$\overline{s\bar{c}}$	$\overline{sp}$	Profit	$\overline{p\bar{c}}$	$\overline{m\bar{c}}$	$\overline{h\bar{c}}$	$\overline{sp_{st}}$	$\overline{sp_{sc}}$
1	L	SP	117257.17	6.03	-	21.62	12.64	3.27		11553.89	1.82	2.35	10.42	17.37	-
	IP		138982.17	4.82	43.66	14.85	9.32	3.71		16655.83	3.15	4.82	19.72	17.37	62.53
	H	SP	118760.48	6.03	-	21.62	12.64	3.83	55.20	11553.89	1.82	2.35	10.42	17.37	-
	IP		124907.00	3.55	52.06	15.30	3.62	9.91		731898.77	2.34	3.29	15.38	17.37	40.36
2	L	SP	141418.95	7.10	-	17.13	7.61	3.22		29474.49	2.64	2.56	9.70	17.73	-
	IP		247400.76	6.36	43.57	16.54	3.97	5.82		29474.49	5.09	4.78	19.16	17.73	80.60
	H	SP	143904.04	7.10	-	17.13	7.61	3.84	42.97	29474.49	2.64	2.56	9.70	17.73	-
	IP		273880.00	6.47	40.36	17.06	3.39	26.59		29474.49	5.07	4.79	20.23	17.73	81.02
3	L	SP	185041.52	6.40	-	14.70	6.15	8.87		11532.70	3.52	7.93	7.52	22.19	-
	IP		313860.41	6.28	36.51	14.78	4.57	7.41		22633.03	4.29	8.90	13.23	22.19	44.99
	H	SP	192872.23	6.40	-	14.70	6.15	10.40	37.62	11532.70	3.52	7.93	7.52	22.19	-
	IP		210915.33	3.51	40.36	9.33	1.71	29.82		11532.70	5.55	8.90	17.69	22.19	61.57
4	L	SP	128264.64	7.87	-	7.25	8.50	8.42		4586.23	1.31	1.35	1.25	4.61	-
	IP		196047.00	7.61	36.51	7.14	10.57	3.38		58404.89	3.42	3.29	6.38	4.61	36.51
	H	SP	134708.98	7.87	-	7.25	8.50	10.03	32.84	4586.23	1.31	1.35	1.25	4.61	-
	IP		439574.71	7.39	40.36	6.61	5.98	61.84		18947.97	5.02	5.65	9.68	4.61	60.04
5	L	SP	85233.16	6.33	-	7.64	10.37	3.11		8879.68	2.24	2.59	3.68	9.87	-
	IP		139603.86	5.98	36.51	7.86	10.22	3.81		8879.68	4.16	6.37	15.03	9.87	71.18
	H	SP	86786.86	6.33	-	7.64	10.37	3.61	32.86	8879.68	2.24	2.59	3.68	9.87	-
	IP		144409.51	5.45	40.36	7.19	7.36	0.30		8879.68	4.15	6.46	14.67	9.87	70.08

Tableau A.II.2. Résultats du design expérimental pour différentes valeurs de fluctuation de la demande – demandes faibles des sous-traitants –

r	l	p	Donneurs d'ordres							Sous-traitants					
			Profit	$\overline{pc}$	$\overline{oc}$	$\overline{hc}$	$\overline{mc}$	$\overline{sc}$	$\overline{sp}$	Profit	$\overline{pc}$	$\overline{mc}$	$\overline{hc}$	$\overline{sp}_{st}$	$\overline{sp}_{sc}$
1	L	SP	117257.17	6.03	-	21.62	12.64	3.27		8111.26	0.78	3.45	2.51	8.01	-
	IP		179318.14	5.83	35.21	21.38	9.63	0.61		8628.11	1.61	4.35	9.85	8.01	46.91
	H	SP	118760.48	6.03	-	21.62	12.64	3.83	55.20	8111.26	0.78	3.45	2.51	8.01	-
	IP		140748.12	4.47	0.00	16.30	9.07	63.14		8111.26	1.45	7.89	7.07	8.01	49.17
2	L	SP	141418.95	7.10	-	17.13	7.61	3.22		13883.12	0.89	2.62	3.28	8.09	-
	IP		223657.09	6.33	35.57	16.90	4.05	2.46		33004.49	1.75	4.33	7.96	8.09	36.27
	H	SP	143904.04	7.10	-	17.13	7.61	3.84	42.97	13883.12	0.89	2.62	3.28	8.09	-
	IP		238318.64	6.55	33.58	16.23	8.87	10.96		13883.12	1.74	4.20	8.05	8.09	36.72
3	L	SP	185041.52	6.40	-	14.70	6.15	8.87		4582.30	0.92	3.85	0.84	6.57	-
	IP		235031.75	5.94	29.85	13.54	4.15	0.12		23440.19	1.81	5.35	4.72	6.57	32.75
	H	SP	192872.23	6.40	-	14.70	6.15	10.40	37.62	4582.30	0.92	3.85	0.84	6.57	-
	IP		227356.29	4.91	33.65	8.48	6.46	13.81		4582.30	1.92	9.44	5.35	6.57	45.28
4	L	SP	128264.64	7.87	-	7.25	8.50	8.42		5461.25	0.75	2.20	0.58	4.16	-
	IP		81375.53	4.45	28.20	5.13	9.18	1.52		20281.12	1.75	5.92	2.53	4.16	33.27
	H	SP	134708.98	7.87	-	7.25	8.50	10.03	32.84	5461.25	0.75	2.20	0.58	4.16	-
	IP		228324.76	6.34	33.58	5.97	8.86	13.38		41843.20	1.78	6.01	2.40	4.16	33.58
5	L	SP	85233.16	6.33	-	7.64	10.37	3.11		4986.77	0.81	2.75	0.91	5.19	-
	IP		129346.33	6.13	27.41	7.15	7.43	5.43		23184.39	1.21	2.74	3.11	5.19	22.24
	H	SP	86786.86	6.33	-	7.64	10.37	3.61	32.86	4986.77	0.81	2.75	0.91	5.19	-
	IP		142343.91	5.41	33.75	7.20	7.10	10.01		7736.81	1.33	6.76	3.76	5.19	34.43

Tableau A.II.3. Résultats du design expérimental pour différents niveaux de coûts de production
– coûts de production faibles des donneurs d'ordres –

r	l	p	Donneurs d'ordres							Sous-traitants					
			Profit	$\overline{pc}$	$\overline{oc}$	$\overline{hc}$	$\overline{mc}$	$\overline{sc}$	$\overline{sp}$	Profit	$\overline{pc}$	$\overline{mc}$	$\overline{hc}$	$\overline{sp_{st}}$	$\overline{sp_{sc}}$
1	L	SP	117257.17	6.03	-	21.62	12.64	3.27		8111.26	0.78	3.45	2.51	8.01	
	IP	200688.92	5.61	48.72	19.17	12.31	0.22			38323.64	1.59	3.37	7.54		28.92
	H	SP	118760.48	6.03	-	21.62	12.64	3.83	55.20	8111.26	0.78	3.45	2.51	8.01	
	IP	162646.76	3.63	0.00	9.99	7.41	166.19			12026.60	2.87	7.70	15.08		77.07
2	L	SP	141418.95	7.10	-	17.13	7.61	3.22		13883.12	0.89	2.62	3.28	8.09	
	IP	291851.85	7.10	38.90	17.03	7.62	2.24			22429.08	3.48	4.25	16.02		63.53
	H	SP	143904.04	7.10	-	17.13	7.61	3.84	42.97	13883.12	0.89	2.62	3.28	8.09	
	IP	211383.99	4.43	42.50	9.99	6.35	36.39			22429.08	3.40	4.85	13.48		58.47
3	L	SP	185041.52	6.40	-	14.70	6.15	8.87		4582.30	0.92	3.85	0.84	6.57	
	IP	254017.06	5.49	33.47	15.05	2.52	18.07			9011.37	3.90	9.27	10.95		60.04
	H	SP	192872.23	6.40	-	14.70	6.15	10.40	37.62	4582.30	0.92	3.85	0.84	6.57	
	IP	326125.95	5.65	42.50	14.96	4.05	22.44			9011.37	3.99	5.35	11.90		52.20
4	L	SP	128264.64	7.87	-	7.25	8.50	8.42		5461.25	0.75	2.20	0.58	4.16	
	IP	131026.25	3.68	28.92	3.55	4.71	34.39			11605.72	4.55	5.22	8.97		56.56
	H	SP	134708.98	7.87	-	7.25	8.50	10.03	32.84	5461.25	0.75	2.20	0.58	4.16	
	IP	278799.44	7.06	42.50	6.52	8.34	9.61			7524.97	3.56	6.01	4.89		47.50
5	L	SP	85233.16	6.33	-	7.64	10.37	3.11		4986.77	0.81	2.75	0.91	5.19	
	IP	136517.51	5.75	28.92	7.32	12.38	3.92			16662.25	2.44	3.62	8.93		43.42
	H	SP	86786.86	6.33	-	7.64	10.37	3.61	32.86	4986.77	0.81	2.75	0.91	5.19	
	IP	193211.64	6.36	42.50	7.56	10.57	3.36			34613.87	2.42	3.62	8.43		42.50

Tableau A.II.4. Résultats du design expérimental pour différents niveaux de coûts de production
– coûts de production moyens des donneurs d'ordres –

r	l	p	Donneurs d'ordres							Sous-traitants					
			Profit	$\overline{p\bar{c}}$	$\overline{o\bar{c}}$	$\overline{h\bar{c}}$	$\overline{m\bar{c}}$	$\overline{s\bar{c}}$	$\overline{sp}$	Profit	$\overline{p\bar{c}}$	$\overline{m\bar{c}}$	$\overline{h\bar{c}}$	$\overline{sp_{st}}$	$\overline{sp_{sc}}$
1	L	SP	117257.17	6.03	-	21.62	12.64	3.27		8111.26	0.78	3.45	2.51	8.01	-
	IP	210538.82	6.06	36.87	21.61	12.70	4.04			15943.00	3.87	4.74	20.92	8.01	87.10
	H	SP	118760.48	6.03	-	21.62	12.64	3.83	55.20	8111.26	0.78	3.45	2.51	8.01	-
	IP	260330.56	6.07	56.12	21.76	12.55	2.59			15943.00	3.88	4.50	22.44	8.01	92.38
2	L	SP	141418.95	7.10	-	17.13	7.61	3.22		13883.12	0.89	2.62	3.28	8.09	-
	IP	252471.02	6.63	36.87	16.01	5.43	6.54			86760.87	3.60	2.96	12.42	8.09	36.87
	H	SP	143904.04	7.10	-	17.13	7.61	3.84	42.97	13883.12	0.89	2.62	3.28	8.09	-
	IP	303217.96	6.27	51.79	14.79	7.44	1.54			31019.52	6.81	4.50	30.38	8.09	117.41
3	L	SP	185041.52	6.40	-	14.70	6.15	8.87		4582.30	0.92	3.85	0.84	6.57	-
	IP	328951.36	6.30	36.87	15.05	4.50	7.06			7580.55	4.33	9.29	11.62	6.57	74.04
	H	SP	192872.23	6.40	-	14.70	6.15	10.40	37.62	4582.30	0.92	3.85	0.84	6.57	-
	IP	331284.19	5.65	36.98	16.10	3.22	17.90			29480.46	3.13	6.61	5.58	6.57	36.98
4	L	SP	128264.64	7.87	-	7.25	8.50	8.42		5461.25	0.75	2.20	0.58	4.16	-
	IP	152896.65	5.65	36.87	5.30	3.91	6.97			9487.95	5.75	3.01	10.35	4.16	65.37
	H	SP	134708.98	7.87	-	7.25	8.50	10.03	32.84	5461.25	0.75	2.20	0.58	4.16	-
	IP	207985.93	6.34	36.98	6.08	8.79	15.21			9487.95	6.82	5.27	13.02	4.16	78.03
5	L	SP	85233.16	6.33	-	7.64	10.37	3.11		4986.77	0.81	2.75	0.91	5.19	-
	IP	123545.82	5.11	36.87	6.78	11.67	1.84			8701.24	4.14	6.55	15.04	5.19	75.38
	H	SP	86786.86	6.33	-	7.64	10.37	3.61	32.86	4986.77	0.81	2.75	0.91	5.19	-
	IP	166531.63	6.30	36.98	7.84	9.66	16.94			18578.89	3.63	2.76	12.04	5.19	56.12

Tableau A.II.5. Résultats du design expérimental pour différents niveaux de coûts de production
– coûts de production élevés des donneurs d'ordres –

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abdel-Malek, L., Kullpattaranirun, T., & Nanthavanij, S. (2005). A framework for comparing outsourcing strategies in multilayered supply chains. *International Journal of Production Economics*, 97(3), 318–328.
- Afnor. (1987). www.afnor.org
- Afnor. (2001). www.afnor.org
- Aghezzaf, E.H., Jamali, M. A., & Ait-Kadi, D. (2007). An integrated production and preventive maintenance planning model. *European Journal of Operational Research*, 181(2), 679–685.
- Aghezzaf, E.H., & Najid, N.M. (2008). Integrated production planning and preventive maintenance in deteriorating production systems. *Information Sciences*, 178(17), 3382–3392.
- Aghezzaf, E.H., Khatab, A., & Tam, P.L. (2016). Optimizing production and imperfect preventive maintenance planning's integration in failure-prone manufacturing systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 145(January 2016), 190–198.
- Ahmed, S., & Garcia, R. (2003). Dynamic Capacity Acquisition and Assignment under Uncertainty. *Annals of Operations Research*, 124(1-4), 267–383.
- Alfares, H.K., Khurshed, S.N., & Noman, S.M. (2005). Integrating quality and maintenance decisions in a production-inventory model for deteriorating items. *International Journal of Production Research*, 43(5), 899–911.
- Al-Salamah, M. (2016). Economic production quantity in batch manufacturing with imperfect quality, imperfect inspection, and destructive and non-destructive acceptance sampling in a two-tier market. *Computers & Industrial Engineering*, 93(March 2016), 275–285.
- Ameknassi, L., Ait-Kadi, D., & Rezg, N. (2016). Integration of logistics outsourcing decisions in a green supply chain design : A stochastic multi-objective multi-period multi-product programming model. *International Journal of Production Economics*, 182(December 2016), 165–184.
- Amelian, S., Sajadi, S.M., & Alinaghian, M. (2015). Optimal production and preventive maintenance rate in a failure-prone manufacturing system using discrete event simulation. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 20(4), 483–496.
- Amesse, F., Dragoste, L., Nollet, J., & Ponce, S. (2001). Issues on partnering : evidences from subcontracting in aeronautics. *Technovation*, 21(9), 559–569.
- Andersen, P.H. (1999). Organizing international technological collaboration in subcontractor relationships: an investigation of the knowledge- stickiness problem. *Research Policy*, 28(6), 625–642.
- Andersen, P.H., & Christensen, P.R. (2000). Inter-partner learning in global supply chains: lessons from NOVO Nordisk. *European Journal of Purchasing & Supply Management*, 6(2), 105–116.
- Angelus, A., & Porteus, E. (2002). Simultaneous Capacity and Production Management of Short-Life-Cycle, Produce-to-Stock Goods under Stochastic Demand. *Management Science*, 48(3), 399–413.
- Arshinder, K., Kanda, A., & Deshmukh, S.G. (2011). A Review on Supply Chain Coordination: Coordination Mechanisms, Managing Uncertainty and Research Directions. Choi, T.M. and Cheng, T.C.E. (eds.), *Supply Chain Coordination under Uncertainty*, 39–82. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Assid, M., Gharbi, A., & Hajji, A. (2015). Joint production, setup and preventive maintenance policies of unreliable two-product manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 53(15), 4668–4683.
- Ayed, A. (2011). Contribution au développement des stratégies de gestion de maintenance intégrée faisant appel à la sous-traitance. Thèse de doctorat. Université Paul Verlaine – Metz, France.
- Ayed, S., Hajej, Z., Turki, S., & Rezg. (2016). FPA method for optimal production planning under availability/degradation machine and subcontracting constraint. *International Journal of Production Research*, DOI: 10.1080/00207543.2016.1165879. 1–14.
- Bard, J. (1989). Assembly line balancing with parallel workstations and dead time. *International Journal of Production Research*, 27(6), 1005–1018.
- Barlow, R.E., & Hunter, L.C. (1960). Optimum preventive maintenance policies. *Operations Research*, 8(1), 90–100.
- Barlow, R.E., & Proschan, F. (1965). *Mathematical Theory of Reliability*. John Wiley and Sons, New York, 108–117.

- Bautista, J., & Cano, A. (2011). Solving mixed model sequencing problem in assembly lines with serial workstations with work overload minimisation and interruption rules. *European Journal of Operational Research*, 210(3), 495–513.
- Beamon, B.M. (1998). Supply chain design and analysis: Models and methods. *International Journal of Production Economics*, 55(3), 281–294.
- Behnamian, J., Fatemi Ghomi, S.M.T. (2016). A survey of multi-factory scheduling. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 27(1), 231–249.
- Beit, M. (2004). Planification de la production et des stratégies de maintenance des systèmes de production. Mémoire de maîtrise en génie mécanique, Ecole de Technologie Supérieure, Université du Québec – Montréal.
- Bellaouar, A., & Beleulmi, A. (2014). Cours : Fiabilité, maintenabilité et disponibilité. Université de Constantine 1, 1–106.
- Ben-Daya, M., & Makhdoum, M. (1998). Integrated Production and Quality Model Under Various Preventive Maintenance Policies. *Journal of the Operational Research Society*, 49(8), 840–853.
- Ben-Daya, M. (1999). Integrated production maintenance and quality model for imperfect processes. *IIE Transactions*, 31(6), 491–501.
- Ben-Daya, M., & Rahim, M.A. (2001). Integrated Production, Quality & Maintenance Models : An Overview”, Book, *Integrated Models in Production Planning, Inventory, Quality, and Maintenance*, by M.A. Rahim and M. Ben-Daya, Chapter 1, Paperback, 3–28.
- Berry, A. (1997). SME competitiveness : the power of networking and subcontracting. Washington D.C. January 1997--No. IFM - 105 : Inter-American Development Bank. 1 – 37.
- Bertrand, J. W., & Sridharan, V. (2001). A study of simple rules for subcontracting in make-to-order manufacturing. *European Journal of Operational Research*, 128(3), 509–531.
- Botta-Genoulaz, V. (2005). Principes et Méthodes pour l’Intégration et l’Optimisation du pilotage des Systèmes de Production et des Chaînes Logistiques. Mémoire d’Habilitation à Diriger des Recherches, tome 1, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon et l’Université Claude Bernard de Lyon 1, France.
- Boulaksil, Y., & Fransoo, J. C. (2009). Order release strategies to control outsourced operations in a supply chain. *International Journal of Production Economics*, 119(1), 149–160.
- Boulaksil, Y., Grunow, M., & Fransoo, J. C. (2011). Capacity flexibility allocation in an outsourced supply chain with reservation. *International Journal of Production Economics*, 129(1), 111–118.
- Boulaksil, Y., Fransoo, J.C. & Tan, T. (2009). Capacity reservation and utilization for a manufacturer with uncertain capacity and demand. *Journal of School of Industrial Engineering*, Eindhoven University of Technology, Netherlands. 1–17.
- Boukas, E., & Haurie, A. (1990). Manufacturing flow control and preventive maintenance: A stochastic control approach. *IEEE Transactions in Automation Control*, 35(9), 1024–1031.
- Bouslah, B., Gharbi, A., & Pellerin, R. (2014). Joint production and quality control of unreliable batch manufacturing systems with rectifying inspection. *International Journal of Production Research*, 52(14), 4103–4117.
- Bouslah, B., Gharbi, A., & Pellerin, R. (2016). Integrated production, sampling quality control and maintenance of deteriorating production systems with AOQL constraint. *Omega*, 61(June 2016), 110–126.
- Bradley, J.R. (2004). A Brownian Approximation of a Production-Inventory System with a Manufacturer That Subcontracts. *Operations Research*, 52(5), 765–784.
- Brown, M. & Proschan, F. (1983). Imperfect repair. *Journal of Applied Probability*, 20(4), 851–859.
- Budai-Balke, G. (2009). *Operations Research Models for Scheduling Railway Infrastructure Maintenance*. Thèse de doctorat. Erasmus University Rotterdam.
- Budai-Balke, G., Dekker, R., & Nicolai, R. P. (2008). A Review of Planning Models for Maintenance and Production. *Complex System Maintenance Handbook*, Springer Series in Reliability Engineering, 321–344.
- Bukhari, F.A., & El-Gohary, A. (2012). Optimal control of a production-maintenance system with deteriorating items. *Journal of King Saud University - Science*, 24(4), 351–357.
- Cachon, G.P., & Harker, P. T. (2002). Competition and outsourcing with scale economies. *Management Science*, 48(10), 1314–1333.

- Cagliano, R., Spina, G. (2002). A comparison of practice-performance models between small manufacturers and subcontractors. *International Journal of Operations & Production Management*, 22(12), 1367–1388.
- Camalot, J.P. (2000). Aide à la décision et à la coopération en gestion du temps et des ressources. Thèse de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse – France.
- Cassady, C.R., & Kutanoglu, E. (2005). Integrating Preventive Maintenance Planning and Production Scheduling for a Single Machine. *IEEE Transactions on Reliability*, 54(2), 304–309.
- Chan, J.K., & Shaw, L. (1993). Modeling repairable systems with failure rates that depend on age and maintenance. *IEEE Transactions on Reliability*, 42(4), 566–571.
- Cheung, K.L., & Hausmann, W. H., (1997). Joint optimization of preventive maintenance and safety stock in an unreliable production environment. *Naval Research Logistics*, 44(3), 257–272.
- Choi, T.M. and Cheng, T.C.E. (2011). *Supply Chain Coordination under Uncertainty*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Chelbi, A., & Ait-Kadi, D. (2004). Analysis of a production/inventory system with randomly failing production unit submitted to regular preventive maintenance. *European Journal of Operational Research*, 156(3), 712–718.
- Chen, Y-Y., Chen, T-L., Liou, C-D. (2013). Medium-term multi-plant capacity planning problems considering auxiliary tools for the semiconductor foundry. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64(9), 1213–1230.
- Chen, Z.L., & Li, C.L. (2008). Scheduling with subcontracting options. *IIE Transactions*, 40(12), 1171–1184.
- Cheng, G.Q., Zhou, B.H., & Li, L. (2016). Joint optimisation of production rate and preventive maintenance in machining systems. *International Journal of Production Research*, 54(21), 6378–6394.
- Chiao, H.E., Wee, H.M., & Padilan, M.V. (2012). A model to outsource deteriorating items using two outsourcers with different deteriorating rates and costs. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 25(6), 536–549.
- Chung, C-H., & Krajewski, L.J. (1984). Planning horizons for master production scheduling. *Journal of Operations Management*, 4(4), 389–406.
- Colledani, M., Horvath, A., & Angius, A. (2015). Production quality performance in manufacturing systems processing deteriorating products. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 64(1), 431–434.
- 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*, 61(1), 455–458.
- Coman, A., & Ronen, B. (2000). Production outsourcing: a linear programming model for the Theory-Of-Constraints. *International Journal of Production Research*, 38(3), 1631–1639.
- Conway, R., Maxwell, W., McClain, J.O., & Thomas, L.J. (1988). The Role of Work-in-Process Inventory in Serial Production Lines. *Operations Research*, 36(2), 229–241.
- Courtois, A., Martin-Bonnefous, C., & Pillet, M. (1995). *Gestion de production*. Éditions d'Organisation.
- Cox, D. (1972). Regression Models and Life-Tables. *Journal of the Royal Statistical Society*, 34(2), 187–220.
- Cui, L.X. (2014). Joint optimization of production planning and supplier selection incorporating customer flexibility : an improved genetic approach. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 27(5), 1017–1035.
- David, G.L., & Y., Ye. (2008). *Linear and Nonlinear Programming*. Third Edition, International Series in Operations Research & Management Science, Frederick S. Hillier, Series Editor, Stanford University, Springer Science Business Media, LLC.
- D'Alfonso, T.H., & Ventura, J.A. (1995). Assignment of tools to machines in a flexible manufacturing system. *European Journal of Operational Research*, 81(1), 115–133.
- Dahane, M. (2007). Couplage de la gestion de la maintenance et la gestion de la production sous contrainte de sous-traitance. Thèse de doctorat. Université Paul Verlaine – Metz – France.
- Dahane, M., Clementz, C., & Rezg, N. (2008). Analysis of joint maintenance and production policies under a subcontracting constraint. *International Journal of Production Research*, 46(19), 5393–5416.
- Dahane, M., Dellagi, S., Clementz, C., & Rezg, N. (2011). Development of joint maintenance and production strategies in a subcontracting environment. *International Journal of Production Research*, 49(23), 1–25.
- Dahane, M., & Rezg, N. (2010). Integration of subcontracting activity in a production planning for randomly failing manufacturing system: Feasibility and profitability conditions. *IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Toronto, Canada, 21-24 Aug. 2010, 100–105.

- Dahane, M., & Rezg, N. (2011). Economic model of outsourcing for a subcontractor manufacturing system in a single subcontractor - multi-outsourcers relationship. *IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Trieste, Italy, 24-27 Aug. 2011, 450–455.
- Dahane, M., Rezg, N., & Chelbi, A. (2012). Optimal production plan for a multi-products manufacturing system with production rate dependent failure rate. *International Journal of Production Research*, 50(13), 3517–3528.
- Deavers, K.L. (1997). Outsourcing: a corporate competitiveness strategy, not a search for low wages. *Journal of Labor Research* 18(4), 503–519.
- Dellaert, N., Jeunet, J., & Jonard, N. (2000). A genetic algorithm to solve the general multi-level lot-sizing problem with time varying costs. *International Journal of Production Economics*, 68(3), 241–257.
- Dellagi, S. (2006). Développement de stratégies de maintenance dans un contexte de sous-traitance partielle de production. Thèse de doctorat, Université Paul Verlaine – Metz – France.
- 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*, 5(4), 261–267.
- De Wolf, D. (2003). Gestion de la Production, cours, Université Charles de gaulle - Lille 3, France.
- Dhouib, K., Gharbi, A., & Ben Aziza, M.N. (2012). Joint optimal production control/preventive maintenance policy for imperfect process manufacturing cell. *International Journal of Production Economics*, 137(1), 126–136.
- Dolgui, A., & Proth, J. M. (2013). Outsourcing: definitions and analysis. *International Journal of Production Research*, 51(23–24), 6769–6777.
- Dominguez, H., & Lashkari, R.S. (2004). Model for integrating the supply chain of an appliance company: a value of information approach. *International Journal of Production Research*, 42(11), 2113–2140.
- Doumeings, G., Vallespir, B., & Chen, D. (1998). Decisional Modelling GRAI grid. *International Handbook on information systems*, Ed. Bernus, P., Mertins, K. & Schmidt, G. Springer Verlag. Heidelberg, Chapitre 14, 313–337.
- Doyen, L., & Gaudoin, O. (2004). Modélisation de l'efficacité de la maintenance des systèmes réparables – Synthèse bibliographique. Rapport du contrat T50L47/F00555/0 entre EDF et le LMC. Institut National Polytechnique de Grenoble – France.
- Dudek, G., & Stadtler, H. (2005). Negotiation-based collaborative planning between supply chains partners. *European Journal of Operational Research*, 163(3), 668–687.
- Dugardin, F., Yalaoui, F., & Amodeo, L. (2010). New multi-objective method to solve reentrant hybrid flow shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 203(1), 22–31.
- El Ghazi, S. (2009). Cours de démarche qualité. <http://sarraelghazi.e-monsite.com/>
- Feng, B., Fan, Z., & Li, Y. (2011). A decision method for supplier selection in multi-service outsourcing. *International Journal of Production Economics*, 132(2), 240–250.
- Fitouhi, M.C., & Nourelfath, M. (2012). Integrating noncyclical preventive maintenance scheduling and production planning for a single machine. *International Journal of Production Economics*, 136(2), 344–351.
- Fitouhi, M.C., & Nourelfath, M. (2014). Integrating noncyclical preventive maintenance scheduling and production planning for multi-state systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 121(January 2014), 175–186.
- Francois, J.F. (2007). Planification des chaînes logistiques : modélisation du système décisionnel et performance. Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1-Bordeaux – France.
- Ganeshan, R., Jack, E. Magazine, M.J., & Stephens, P. (1999). A taxonomic review of supply-chain management research. In *Quantitative Models for Supply Chain Management*. International Series in Operations Research & Management Science, 17, 839–879.
- Gen, M., & Cheng, R. (1997). *Genetic Algorithms and Engineering Design*. Wiley-Interscience.
- Geng, N., & Jiang, Z. (2009). A review on strategic capacity planning for the semiconductor manufacturing industry. *International Journal of Production Research*, 47(13), 3639–3655.
- Génin, P. (2003). Planification tactique robuste avec usage d'un A.P.S – Proposition d'un mode de gestion par plan de référence. Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris – France.
- Gertsbakh, I.B. (1977). Models of preventive maintenance. *Studies in mathematical and managerial economics*, North-Holland Publishing Co.

- Geunes, J., & Chang, B. (2001). Operations research models for supply chain management and design. *Encyclopedia of Optimization*, C.A. Floudas and P.M. Pardalos Eds, Kluwer Academic Publishers, 4, 133–145.
- Gharbi, A., & Kenné, J.P. (2000). Production and preventive maintenance rates control for a manufacturing system: An experimental design approach. *International Journal of Production Economics*, 65(3), 275–287.
- Giard, V. (2003). *Gestion de la production et des flux*. Editions Economica.
- Groover, M.P. (2000). *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*. Prentice Hall PTR.
- Grossman, Helpman, (2005). Outsourcing in a global economy. *Review of Economic Studies*, 72, 135–159.
- Guan, J., & Liu, Q. (2011). Study on Outsourcing Based Collaborative Production Planning within Supply Chain Environment. *Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA)* Shangshai, China, 6-7 Jan. 2011, 499 – 502.
- Gunasekaran, A., Irani, Z., Choy, K-L., Filippi, L., & Papadopoulos, T. (2015). Performance measures and metrics in outsourcing decisions: A review for research and applications. *International Journal of Production Economics*, 161(March 2015), 153–166.
- Haehling von Lanzanauer, C., & Pilz-Globbik, K. (2002). Coordination supply chain decisions : an optimization model. *Operations Research Spectrum*, 24(1), 59–78.
- Hajej, Zied., Dellagi S., & Rezg N. (2011). Optimal integrated maintenance/production policy for randomly failing systems with variable failure rate. *International Journal of Production Research*, 49(19), 5695–5712.
- Hajej, Z., Rezg, N., & Gharbi, A. (2014). Forecasting and maintenance problem under subcontracting constraint with transportation delay. *International Journal of Production Research*, 52(22), 6695–6716.
- Hammami, A. (2003). *Modélisation technico-économique d'une chaîne logistique dans une entreprise réseau*. Thèse à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne et l'Université Laval.
- Haoues, M. (2006). *Cours de gestion et organisation des entreprises*. Département de Génie Electrique à l'Université de Mostaganem. 1–15.
- Haoues, M. (2010). *Cours d'économie d'entreprise*. Département Génie Industriel à l'Université de Batna. 1–23.
- Haoues, M., Dahane, M., Mouss, N.K., & Rezg, N. (2011). Optimization of outsourcing activity under a win-win single outsourcer – single subcontractor relationship. *Proceedings of the 41st International Conference on computers & Industrial Engineering*, 343–348.
- Haoues, M., Dahane, M., Mouss, N.K., & Rezg, N. (2012-a). Optimization of cooperative outsourcing between single-outsourcer multiple-subcontractors: a genetic algorithm based approach. *The 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, 14(1), 975–980.
- Haoues, M., Dahane, M., Mouss, N.K., & Rezg, N. (2012-b). Integrated Maintenance Problem in Two-Stage Supply Chain Coordination With an Outsourcing Option. In *Proceedings of the 42nd International Conference on computers & Industrial Engineering (Cie42)*, Cie & Saïe, Cape Town, South Africa, 16-18 July, 937 – 951.
- Haoues, M., Dahane, M., Mouss, N.K., & Rezg, N. (2013-a). Integrated Optimisation of In-House Production and Outsourcing Strategy: Genetic Algorithm Based Approach. *The 11th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems*, 11(1), 420–425.
- Haoues, M., Dahane, M., Mouss, N.K., & Rezg, N. (2013-b). Optimization of Single-Manufacturer Multiple-Contractors Outsourcing Relationship in Integrated Approach of Production, Maintenance and Quality, in the *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC'13)*, Manchester, UK, October 13-16, 2013. 935 – 940.
- Haoues, M., Dahane, M., Mouss, N.K., & Rezg, N. (2013-c). Production Planning in Integrated Maintenance Context for Multi-Period Multi-Product Failure-Prone Single-Machine. In the *18th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'13)*, Cagliari, Italy, 10-13 September 2013. 1 – 8.
- 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*, DOI 10.1007/s10845-016-1273-3. 1–25.
- Higle, J.L., & Sen, S. (1996). Duality and statistical tests of optimality for two stage stochastic programs. *Mathematical Programming*, 75(2), 257–275.

- Hlioui, R., Gharbi, A., & Hajji, A. (2015). Replenishment, production and quality control strategies in three-stage supply chain. *International Journal of Production Economics*, 166(August 2015), 90–102.
- Hsu, L.F. (1991). Classification : With failure rate & deteriorate stochastically Optimal preventive maintenance policies in a serial production system. *International Journal of Production Research*, 29(12), 2543–2555.
- Huguet, M.J. (1994). Approche par contraintes pour l'aide à la décision et à la coopération en gestion de production. Thèse de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse – France.
- Huh, W.T., Roundy, R.O., & Çakanyildirim, M. (2006). A General Strategic Capacity Planning Model Under Demand Uncertainty. *Naval Research Logistics*, 53(2), 137–150.
- Huiskonen, J., & Pirttilä, T. (2002). Lateral coordination in a logistics outsourcing relationship. *International Journal of Production Economics*, 78(2), 177–185.
- Iravani, S.M.R. & Duenyas, I. (2002). Integrated maintenance and production control of a deteriorating production system. *IIE Transactions*, 34(5), 423–435.
- Iso. (2016). <http://www.iso.org>
- Jafari, L., & Makis, V. (2015). Joint optimal lot sizing and preventive maintenance policy for a production facility subject to condition monitoring. *International Journal of Production Economics*, 169(November 2015), 156–168.
- Jafari, L., & Makis, V. (2016). Optimal lot-sizing and maintenance policy for a partially observable production system. *Computers & Industrial Engineering*, 93(March 2016), 88–98.
- Jain, V., Kundu, A., T.S. Chan, F., & Patel, M. (2015). A chaotic bee colony approach for supplier selection-order allocation with different discounting policies in a cooperative multi-echelon supply chain. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 26(6), 1131–1144.
- Jayaraman, V., & Pirkul, H. (2001). Planning and coordination of production and distribution facilities for multiples commodities. *European Journal of Operational Research*, 133(2), 394–408.
- Johnson, S.M. (1954). Optimal two- and three-stage production schedules with setup times included. *Naval Research Logistics Quarterly*, 1(1), 61–68.
- Juran, (1993). Building a learning organization. *Harvard Business Review*, 71(July–August), 78–91.
- Kalir, A.A., & Sarin, S.C. (2009). A method for reducing inter-departure time variability in serial production lines. *International Journal of Production Economics*, 120 (2), 340–347.
- Kaya, O., Bagci, F., & Turkay, M. (2014). Planning of capacity, production and inventory decisions in a generic reverse supply chain under uncertain demand and returns. *International Journal of Production Research*, 52(1), 270–282.
- Kenné, J.P., & Gharbi, A. (2004). Stochastic optimal production control problem with corrective maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 46(4), 865–875.
- Kijima, M. (1989). Some results for repairable systems with general repair. *Journal of Applied Probability*, 26(1), 89–102.
- Kijima, M., Morimura, H., & Suzuki, Y. (1988). Periodical replacement problem without assuming minimal repair. *European Journal of Operational Research*, 37(2), 194–203.
- Kim, B., (2003). Dynamic outsourcing to contract manufacturers with different capabilities of reducing the supply cost. *International Journal of Production Economics*, 86(1), 63–80.
- Kim, Y.K., Park K., & Ko, J. (2003). A symbiotic evolutionary algorithm for the integration of process planning and job shop scheduling. *Computers & Operations Research*, 30(8), 1151–1171.
- 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*, 171(3), 336–349.
- Klein, R., & Scholl, A. (1996). Maximizing the production rate in simple assembly line balancing – A branch and bound procedure. *European Journal of Operational Research*, 91(2), 367–385.
- Kushner, H.J. (1979). Jump-diffusion approximations for ordinary differential equations with wideband random right hand sides. *SIAM Journal on control optimization*, 17(6), 729–744.
- Larousse, (2016) <http://www.larousse.fr>
- Le Digabel, S. (2016). Cours : Introduction à la fiabilité, Ecole Polytechnique de Montréal. 1–30.
- Lee, K., & Choi, B.C. (2011). Two-stage production scheduling with an outsourcing option. *European Journal of Operational Research*, 213(3), 489–497.
- Lee, I.S., & Sung, C.S. (2008-a). Minimizing due date related measures for a single machine scheduling problem with outsourcing allowed. *European Journal of Operational Research*, 186(3), 931–952.

- Lee, I.S., & Sung, C. S. (2008-b). Single machine scheduling with outsourcing allowed. *International Journal of Production Economics*, 111(2), 623–634.
- Lee, S., & Lan, S. (2013). Production lot sizing with a secondary outsourcing facility. *International Journal of Production Economics*, 141(1), 414–424.
- Lehoux, N., D'Amours, S., & Langevin, A. (2010). A win-win collaboration approach for a two-echelon supply chain: a case study in the pulp and paper industry. *European Journal of Industrial Engineering*, 4(4), 493–514.
- Lei, D., & Guo, X. (2015). An effective neighborhood search for scheduling in dual-resource constrained interval job shop with environmental objective. *International Journal of Production Economics*, 159(January 2015), 296–303.
- Li, S. (2014). Optimal control of production-maintenance system with deteriorating items, emission tax and pollution R&D investment. *International Journal of Production Research*, 52(6), 1787–1807.
- Li, X., Xing, K., Wu, Y., Wang, X., & Luo, J. (2016). Total Energy Consumption Optimization via Genetic Algorithm in Flexible Manufacturing Systems. *Computers & Industrial Engineering*, 104(February 2017), 188–200.
- Li, Z., Tang, Q., & Zhang, L.P. (2017). Two-sided assembly line balancing problem of type I: improvements, a simple algorithm and a comprehensive study. *Computers & Operations Research*, 79(March 2017), 78–93.
- Liao, G-L. (2012). Optimum policy for a production system with major repair and preventive maintenance. *Applied Mathematical Modelling*, 36(11), 5408–5417.
- Liao, G-L., & Sheu, S-H. (2011). Economic production quantity model for randomly failing production process with minimal repair and imperfect maintenance. *International Journal of Production Economics*, 130(1), 118–124.
- Lin, C-Y. (2004). Optimization of maintenance, production and inspection strategies while considering preventative maintenance error. *Journal of Information and Optimization Sciences*, 25(3), 543–555.
- Lin, Y-H., Chen, Y-C., & Wang, W-Y. (2016). Optimal production model for imperfect process with imperfect maintenance, minimal repair and rework. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, DOI: 10.1080/23302674.2016.1160452. 1–12
- Liou, J.H., & Chuang, Y.T. (2010). Developing a hybrid multi-criteria model for selection of outsourcing providers. *Expert Systems with Applications*, 37(5), 3755–3761.
- Liu, S.Q., & Kozan, E. (2016). Parallel-identical-machine job-shop scheduling with different stage-dependent buffering requirements. *Computers & Operations Research*, 74 (October 2016), 31–41.
- Liu, X., Tu, Y.L., Zhang, J., & Watson, L.G. (2008). A genetic algorithm heuristic approach to general outsourcing capacitated production planning problems. *International Journal of Production Research*, 46(18), 5059–5074.
- Llerena, D. (2003). Evolution des relations inter-entreprises – Coordination de la Supply Chain et efficacité : une approche économique. Ecole d'été d'automatique – Gestion de la Chaîne Logistique. Session 24, Grenoble – France.
- Ly, F., Simeu-Abazi, Z., & Leger, J-B. (2016). Terminologie Maintenance : bilan. Groupe de Recherche Système de Production et Sécurité de Fonctionnement : Groupe de travail Maintenance. 1–24.
- Mahmoudi, J., Lamothe, J., & Thierry, C. (2006). Un modèle de simulation pour coopérer au sein de la chaîne logistique des télécoms. Conférence Internationale Francophone d'Automatique. 30 mai – 1er Juin 2006, Bordeaux – France.
- Maria, A. (1997). Introduction to modeling and simulation. *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*. IEEE Xplore Digital Library, 7–13 December 1997. DOI: 10.1109/WSC.1997.640371.
- McKay, K.N., Safayeni, F.R., & Buzacott, J.A. (1988). Job-Shop Scheduling Theory: What Is Relevant? *Interfaces*, 18(4), 84–90.
- Michalewicz, Z. (1996). *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Third ed. Springer-Verlag : Berlin.
- Min, H., & Zhou, G. (2002). Supply chain modeling : past, present and future. *Computers & Industrial Engineering*, 43(1-2), 231–249.
- Monchy, F. (2000). *Maintenance. Méthodes et organisations*. Technique et ingénierie, Dunod.
- Monsarrat-Despontin, E., Briand, C., & Esquirol, P. (2005). Aide à la décision pour une coopération inter-entreprises : une approche par contraintes. *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, 39(7), 799– 818.

- Monteiro, T. (2001). Conduite distribuée d'une coopération entre entreprises le cas de la relation donneurs d'ordres – fournisseurs. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble – France.
- Morcos, J.-L. (2003). International subcontracting versus delocalisation ? A survey of the literature and case studies from the SPX network, United Nations Industrial Development Organization UNIDO. Industrial Subcontracting and Supply Chain Management.
- Naderi, B., & Azab, A. (2015). Modeling and scheduling a flexible manufacturing cell with parallel processing capability. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 11(November 2015), 18–27.
- Nagali, V., Hwang, J., Sanghera, D., Gaskins, M., Pridgen, M., Thurston, T., Mackenroth, P., Scholler, P., & Shoemaker G. (2008). Procurement Risk Management (PRM) at Hewlett-Packard Company. *Interfaces*, 38(1), 51–60.
- Najid, N.M., & Alaoui-Selsouli, M. (2011). An integrated production and maintenance planning model with time windows and shortage cost. *International Journal of Production Research*, 49(8), 37–41.
- Nakagawa, T. (1979). Optimum policies when preventive maintenance is imperfect. *IEEE Transactions on Reliability*, 28(4), 331–332.
- Nakagawa, T. (1981). Generalized models for determining optimal number of minimal repairs before replacement. *Journal of Operations Research Jpn*, 24(1), 325–337.
- Nakagawa, T. (1986). Periodic and Sequential Preventive Maintenance Policies. *Journal of Applied Probability*, 23(2), 536–542.
- Nakagawa, T. (1988). Sequential Imperfect Preventive Maintenance Policies. *IEEE Transactions on Reliability*, 37(3), 295–298.
- Nakagawa, T. (2005). *Maintenance Theory of Reliability*. Springer, London.
- Nakagawa, T. (2008). *Advanced Reliability Models and Maintenance Policies*. Springer Series in Reliability Engineering, Springer-Verlag London.
- Nakagawa, T., & Mizutani, S. (2009). A summary of maintenance policies for a finite interval. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(1), 89–96.
- Nakamura, S., & Nakagawa, T. (2010). *Stochastic Reliability Modeling, Optimization and Applications*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Ni, D., Li, K. W., & Tang, X. (2009). Production costs, scope economies, and multi-client outsourcing under quantity competition. *International Journal of Production Economics*, 121(1), 130–140.
- Ni, J., Gu, X., & Jin, X. (2015). Preventive maintenance opportunities for large production systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 64(1), 447–450.
- Njike, A.N., Pellerin, R., & Kenné, J.P. (2012). Simultaneous control of maintenance and production rates of a manufacturing system with defective products. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(2), 323–332.
- Nourelfath, M., Nahas, N., & Ben-Daya, M. (2016). Integrated preventive maintenance and production decisions for imperfect processes. *Reliability Engineering & System Safety*, 148(April 2016), 21–31.
- Nwokocha, V.C., & Madu, I.A. (2015). Influence of subcontracting constraints on the performance of manufacturing industries in Nigeria. *Production & Manufacturing Research : An Open Access Journal*, 3(1), 343–354.
- Ogier, M., Chan, F.T.S., Chung, S.H., Cung, V-D., & Boissière, J. (2015). Decentralised capacitated planning with minimal-information sharing in a 2-echelon supply chain. *International Journal of Production Research*, 53(16), 4927–4950.
- Ouali, M.S., Rezg, N., & Xie, X. (2002). Maintenance préventive et optimisation des flux d'un système de production. *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, 36(1), 97–116.
- Pai, P. F., Chang, P.T., Wang, S.S., & Lin, K.P. (2004). A fuzzy logic-based approach in capacity-planning problems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 23(11), 806–811.
- Panagiotidou, S., & Tagaras, G. (2008). Evaluation of maintenance policies for equipment subject to quality shifts and failures. *International Journal of Production Research*, 46(20), 5761–5779.
- Peng, H., & Houtum, G.-J.V. (2016). Joint optimization of condition-based maintenance and production lot-sizing. *European Journal of Operational Research*, 253(1), 94–107.
- Pinto, P.A., Dannenbring, D.G., & Khumawala, B.M. (1981). Branch and bound and heuristic procedures for assembly line balancing with paralleling of stations. *International Journal of Production Research*, 19(5), 565–576.
- Qi, X. (2011). Outsourcing and production scheduling for a two-stage flow shop. *International Journal of Production Economics*, 129(1), 43–50.

- Radhoui, M. (2008). Analyse des performances de systems de production sujets à des défaillances aléatoires et pouvant engendrer des produits non conformes dans un environnement incertain. Thèse de doctorat, Université Paul Verlaine – Metz – France.
- Radhoui, M., Rezg, N., & Chelbi, A. (2009). Integrated model of preventive maintenance, quality control and buffer sizing for unreliable and imperfect production systems. *International Journal of Production Research*, 47(2), 389–402.
- Rahim, M.A., & Ben-Daya, M. (2001). *Integrated Models in Production Planning, Inventory, Quality, and Maintenance*, Book, by M.A. Rahim and M. Ben-Daya, Springer US, DOI: 10.1007/978-1-4615-1635-4.
- Renna, P. (2015). Coordination strategies to support distributed production planning in production networks. *European Journal of Industrial Engineering*, 9(3), 366–394.
- Rezg, N., Xie X., & Mati Y. (2004). Joint optimisation of preventive maintenance and inventory control in a production line using simulation. *International Journal of Production Research*, 44(10), 2029–2046.
- Rivera-Gómez, H., Gharbi, A., & Kenné, J.P. (2013-a). Joint control of production, overhaul, and preventive maintenance for a production system subject to quality and reliability deteriorations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(9), 2111–2130.
- Rivera-Gómez, H., Gharbi, A., & Kenné, J.P. (2013-b). Production and quality control policies for deteriorating manufacturing system. *International Journal of Production Research*, 51(11), 3443–3462.
- Rivera-Gómez, H., Gharbi, A., & Kenné, J. P. (2013-c). Joint production and major maintenance planning policy of a manufacturing system with deteriorating quality. *International Journal of Production Economics*, 146(2), 575–587.
- Rivera-Gómez, H., Gharbi, A., Kenné, J-P., Montañó-Arango, O., & Hernandez-Gress, E.S. (2016). Production control problem integrating overhaul and subcontracting strategies for a quality deteriorating manufacturing system. *International Journal of Production Economics*, 171(1), 134–150.
- Rosenblatt, M.J., & Lee, H.L. (1986). Economic production cycle with imperfect production processes. *IIE Transitions*, 18(1), 48 – 55.
- Rossi, T., Pozzi, R., Pero, M., & Cigolini, R. (2017). Improving production planning through finite-capacity MRP. *International Journal of Production Research*, 55(2), 377– 391.
- Roque, M. (2005). Contribution à la définition d'un langage générique de modélisation d'entreprise. Thèse de doctorat de l'Université Bordeaux – France.
- 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*, 143(1), 3 –12.
- Rubin, P.A., & Ragatz, G.L. (1995). Scheduling in a sequence dependent setup environment with genetic search. *Computers and Operations Research*, 22(1), 85–99.
- Ruiz-Torres, A.J., Ho, J.C., & López, F.J. (2006). Generating Pareto schedules with outsource and internal parallel resources. *International Journal of Production Economics*, 103(2), 810 – 825.
- Saharidis, G.K.D., Kouikoglou, V.S., & Dallery, Y. (2009). Centralized and decentralized control polices for a two-stage stochastic supply chain with subcontracting. *International Journal of Production Economics*, 117(1), 117–126.
- Sarkar, B., & Moon, I. (2014). Improved quality, setup cost reduction, and variable backorder costs in an imperfect production process. *International Journal of Production Economics*, 155(September 2014), 204–213.
- Scholl, A., & Becker, C. (2005). A note on “An exact method for cost-oriented assembly line balancing”. *International Journal of Production Economics*, 97(3), 343–352.
- Schutz, J. (2009). Contribution à l'optimisation des plans d'exploitation et de maintenance, selon une approche basée sur le pronostic : Application au domaine naval. Thèse de doctorat, Université Paul Verlaine – Metz – France.
- Schutz, J., Rezg, N., & Léger, J.-B. (2011). Periodic and sequential preventive maintenance policies over a finite planning horizon with a dynamic failure law. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 22(4), 523–532.
- Schutz, J., Rezg, N., & Léger, J.-B. (2013). An integrated strategy for efficient business plan and maintenance plan for systems with a dynamic failure distribution. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 24(1), 87–97.
- Sepulveda, J.P., & Frein, Y. (2005). Influence de la coordination et du partage d'information sur les temps de retard des tâches dans une chaîne logistique. Journées Doctorales et Nationales du Groupe de

- Recherche Modélisation, Analyse et Conduite des Systèmes dynamiques (JD-JNMACS), 5-7 Septembre 2005, Lyon – France.
- Sessi, (2006). La sous-traitance industrielle en chiffres, métaux, plastiques, caoutchouc, électronique. Production industrielle, hors-série. Service des Etudes et des Statistiques, Industrielles. Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, Ministère délégué à l'Industrie. Édition 2006, France.
- Shapiro, J.F. (1999). Bottom-Up vs. Top-Down approaches to supply chain modeling, in Quantitative models for supply chain management, Sridhar Tayur, Ram Ganeshan, Michael Magazine. Chapitre 23, Operations Research Management Science. Kluwer's International Series. 737-759.
- Sherif, Smith, (1981). Optimal maintenance models for systems subject to failure—A Review. Naval research logistics, 28(1), 47–74.
- Siarry, P., Dréo, J., Pétrowski, A. & Taillard, É. (2005). Métaheuristiques pour l'optimisation difficile. Edition Eyrolles.
- Sinha, S., & Sarmah, S.P., 2007. Supply-chain coordination model with insufficient production capacity and option for outsourcing. Mathematical and Computer Modelling, 46(11-12), 1442–1452.
- Sinha, S., & Sarmah, S.P. (2010). Single-vendor multi-buyer discount pricing model under stochastic demand environment. Computers & Industrial Engineering, 59(4), 945–953.
- Souquet C. (2003). La sous-traitance industrielle en 2001 : en hausse malgré une croissance en repli. 175, Les 4 pages du SESSI, avril 2003.
- Spena, P.R, Holzner, P., Rauch, E., Vidoni, R., & Matt, D. (2016). Requirements for the design of flexible and changeable manufacturing and assembly systems: A SME-survey. Procedia CIRP, 41(2016), 207–212.
- Srinivasan, M., & Lee, H. (1996). Production-inventory systems with preventive maintenance. IIE Transactions, 28(11), 879–890.
- Sung, C-K. (2005). Development of optimal production, inspection and maintenance strategies with positive inspection time and preventive maintenance error. Journal of Statistics and Management Systems, 8(3), 545–558.
- Sung, C-K., & Lin, C-Y. (2006). Optimizing an integrated production and quality strategy considering inspection and preventive maintenance errors. Journal of Information and Optimization Sciences, 27(3), 577–593.
- Suri, R., & Diehl, G.W. (1986). A Variable Buffer-Size Model and Its Use in Analyzing Closed Queueing Networks with Blocking. Management Science, 32(2), 206-224.
- Tagawa, S. (1996). A new concept of job scheduling – hierarchical decision model. International Journal of Production Economics, 44(1-2), 17–26.
- Talavage, J., & Hannam, R.G. (1988). Flexible Manufacturing Systems in Practice: Applications, Design, and Simulation. Marcel Dekker Inc, New York.
- Tan, K.C. (2001). A framework of supply chain management literature. European Journal of Purchasing and Supply Management, 7(1), 39–48.
- Tavares Neto, R.F., Godinho Filho, M., & Molina da Silva, F. (2015). An ant colony optimization approach for the parallel machine scheduling problem with outsourcing allowed, Journal of Intelligent Manufacturing, 26(3), 527–538.
- Tech-ing. (2016). www.techniques-ingenieur.fr
- Thie, P.R., & Keough, G.E. (2008). An Introduction to Linear Programming and Game Theory. Third Edition, Wiley, a John Wiley & Sons, Inc., Publication, Published by John Wiley.
- Thomas, A. (2003). Impact du concept de chaîne logistique sur les systèmes de gestion de production – Le nouveau rôle de la planification tactique et les nouveaux outils. Ecole d'été d'automatique – Gestion de la Chaîne Logistique. Session 24, Septembre 2003, Grenoble – France.
- Thomas, D.J., & Griffin, P.J. (1996). Coordinated supply chain management. European Journal of Operational Research, 94(1), 1–15.
- Tserng, H.P., & Lin, P.H. (2002). An accelerated subcontracting and procuring model for construction projects. Automation in Construction, 11(1), 105–125.
- Tsao, Y-C. (2013). Combined production-maintenance decisions in situations with process deterioration. International Journal of Systems Science, 44(9), 1692–1700.
- Valdez-Flores, Feldman, (1989). A survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single-unit systems. Naval research logistics, 36(4), 419–446.
- Van Mieghem, & J.A. (1999). Coordinating Investment, Production, and Subcontracting. Management Science, 45(7), 954–971.

- Van Mieghem, J.A. (2003). Capacity Management, Investment, and Hedging : Review and Recent Developments. *Manufacturing & Service Operations Management*, 5(4), 269–302.
- Vaxevanou, A., & Konstantopoulos, N. (2015). Basic Principles the Philosophy of Outsourcing. *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, 175(12 February 2015), 567–571.
- Volling, T., Matzke, A., Grunewald, M., & Spengler, T.S. (2013). Planning of capacities and orders in build-to-order automobile production : A review. *European Journal of Operational Research*, 224(2), 240–260.
- Wadhwa, V., & Ravindran, A.R. (2007). Vendor selection in outsourcing. *Computers & Operations Research*, 34(12), 3725–3737.
- Wang, H. (2002). A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European journal of operational research*, 139(3), 469–489.
- Wang, L-C., Wang, A., Chueh, C-Y. (2016). Development of a capacity analysis and planning simulation model for semiconductor fabrication. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, DOI: 10.1007/s00170-016-9089-z, 1–16.
- Wang, W., Chen, Y., & Huang, J. (2009). Heterogeneous preferences, decision-making capacity, and phase transitions in a complex adaptive system. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United of America*. 106(21), 8423–8428.
- Wedel, M., Hacht, M.V., Hieber, R., Mettemich, J., & Abele, E. (2015). Real-time bottleneck detection and prediction to prioritize fault repair in interlinked production lines. *Procedia CIRP*, 37(2015), 140–145.
- Wee, H-M., & Wang, W-T. (2013). Supply chain coordination for short-life-cycle products with option contract and partial backorders. *European Journal of Industrial Engineering*, 7(1), 78–99.
- Weidenbaum, M. (2005). Outsourcing : Pros and cons. *Business Horizons*, 48(4), 311–315.
- Weinstein, L., & Chung, C. (1999). Integrating maintenance and production decisions in a hierarchical production planning environment. *Computers & Operations Research*, 26(10), 1059–1074.
- Wen, D., Ershun, P., Ying, W., Wenzhu, L. (2016). An economic production quantity model for a deteriorating system integrated with predictive maintenance strategy. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 27(6), 1323–1333.
- Xie, J.X. & Dong, J.F. (2002). Heuristic genetic algorithms for general capacitated lot-sizing problems. *Computer & Mathematics with Applications*, 44(1-2), 263–276.
- Xiong, H., Fan, H., Jiang, G., & Li, G. (2017). A simulation-based study of dispatching rules in a dynamic job shop scheduling problem with batch release and extended technical precedence constraints. *European Journal of Operational Research*, 257(1), 13–24.
- Xu, X., Cheng, X., Sun, Y. (2015). Coordination contracts for outsourcing supply chain with financial constraint. *International Journal of Production Economics*, 162(April 2015), 134–142.
- Yalaoui, A., Chaabi, K., & Yalaoui, F. (2014). Integrated production planning and preventive maintenance in deteriorating production systems. *Information Sciences*, 278(17), 841–861.
- Yang, J., Qi, X., & Xia, X. (2005). A Production-Inventory System with Markovian Capacity and Outsourcing Option. *Operations Research*, 53(2), 328 – 349.
- Yang, X-S. (2008). *Introduction to Mathematical Optimization: From Linear Programming to Metaheuristics*. University of Cambridge, United Kingdom, Cambridge International Science Publishing.
- Yoo, S.H., Kim, D.S., & Park, M-S. (2012). Lot sizing and quality investment with quality cost analyses for imperfect production and inspection processes with commercial return. *International Journal of Production Economics*, 140(2), 922–933.
- Zabihi, F., & Bafruei, M.K. (2016). Supply chain coordination using revenue sharing contract with price discount and stochastic demand dependent on time and price. *International Journal of Integrated Supply Management*, 10(2), 132–150.
- Zhang, F., Roundy, R., Çakanyildirim, M., Tim Huh, M. (2004). Optimal capacity expansion for multi-product, multi-machine manufacturing systems with stochastic demand. *IIE Transactions*, 36(1), 23–36.
- Zhen, L. (2012). Analytical study on multi-product production planning with outsourcing. *Computers & Operations Research*, 39(9), 2100–2110.

Production scientifique

PRODUCTION SCIENTIFIQUE

Publications dans des conférences internationales

Haoues, M., Dahane, M., Mouss, N. K., and Rezg, N. (2011). Optimization of outsourcing activity under a win-win single outsourcer – single subcontractor relationship, Proceedings of the 41st International Conference on computers & Industrial Engineering, 343–348.

<http://www.usc.edu/dept/ise/caie/Checked%20Papers%20%5bruhi%2012th%20sept%5d/word%20format%20papers/REGISTRATION%20PAID%20PAPERS%20FOR%20PROCEEDINGS/pdf/110%2017%20OPTIMISATION%20OF%20OUTSOURCING%20ACTIVITY.pdf>

Haoues, M., Dahane, M., Mouss, N.K., & Rezg, N. (2012). Optimization of cooperative outsourcing between single-outsourcer multiple-subcontractors : a genetic algorithm based approach. The 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, 14(1), 975–980.

<http://www.ifac-papersonline.net/Detailed/53819.html>

IFAC Proceedings Volumes, Volume 45, Issue 6, 23–25 May 2012, Pages 975–980.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016332773>

Haoues, M., Dahane, M., Mouss, N.K., & Rezg, N. (2012). Integrated Maintenance Problem in Two-Stage Supply Chain Coordination With an Outsourcing Option. In Proceedings of the 42nd International Conference on computers & Industrial Engineering (Cie42), Cie & Saiic, Cape Town, South Africa, 16-18 July, 937–951.

http://conferences.sun.ac.za/public/conferences/3/schedConfs/3/program-en_US.pdf

Haoues, M., Dahane, M., Mouss, N.K., & Rezg, N. (2013). Integrated Optimisation of In-House Production and Outsourcing Strategy : Genetic Algorithm Based Approach. The 11th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, 11(1), 420–425.

<http://www.ifac-papersonline.net/Detailed/59327.html>

IFAC Proceedings Volumes, Volume 46, Issue 7, May 2013, Pages 420–425.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667015357116>

Haoues, M., Dahane, M., Mouss, N.K., & Rezg, N. (2013). Production Planning in Integrated Maintenance Context for Multi-Period Multi-Product Failure-Prone Single-Machine, in the 18th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'13), Cagliari, Italy, 10-13 September 2013. 1–8.

<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=6647980&queryText%3Dhaoues+m>

Haoues, M., Dahane, M., Mouss, N.K., & Rezg, N. (2013). Optimization of Single-Manufacturer Multiple-Contractors Outsourcing Relationship in Integrated Approach of Production, Maintenance and Quality, in the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC'13), Manchester, UK, October 13-16, 2013. 935 – 940.

<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=6721917&queryText%3Dhaoues+m>

Publication dans des journaux internationaux

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, DOI 10.1007/s10845-016-1273-3. 1 – 25.

<http://link.springer.com/article/10.1007/s10845-016-1273-3>

Contribution à l'évaluation des performances de la sous-traitance sous contraintes de la maintenance et de la sûreté de fonctionnement des systèmes de production complexes

Résumé

Ces travaux de thèse abordent la planification intégrée des activités de production, de sous-traitance, de maintenance et de qualité. Nous proposons de nouveaux modèles mathématiques et outils pour aider les acteurs de la chaîne logistique (donneurs d'ordres et sous-traitants) à prendre des décisions complexes relatives aux problèmes de planification de la capacité d'une manière globale et efficace. Ainsi, ces problèmes sont étudiés dans le cas de période unique ou multi-périodes, et aussi bien, selon un point de vue donneur d'ordres, sous-traitant ou les deux à la fois.

Nous avons développé des algorithmes d'optimisation pratiques pour répondre aux questions, relatives à la sélection des partenaires pour chaque fabricant, le plan interne et la capacité qu'il faut réserver, et les paramètres des contrats liants les différentes parties de la chaîne.

Nous avons comparé les performances qui apportent numériquement les différentes formulations et stratégies proposées, prenant en compte les aléas de production (pannes machines, non-qualité, ...), les différentes politiques de production, de sous-traitance, de maintenance et de qualité, et les divers degrés de collaboration entre les acteurs.

Mots clés

Planification intégrée, production, sous-traitance, maintenance, qualité, optimisation, outils d'aide à la décision.

Contribution to the performance evaluation of outsourcing under constraints of maintenance and safety of complex production systems

Abstract

This dissertation deals with the integrated planning of production, outsourcing, maintenance and quality activities. We propose new mathematical models and tools, to help supply chain actors (outsourcers and subcontractors) to make complex decisions regarding to capacity planning problems, in a comprehensive and efficient manner. Thus, these problems are studied for the case of single period or multi-periods. In addition, they are treated from several view points, namely, outsourcer, subcontractor or both simultaneously.

We have developed practical optimization algorithms to answer questions about vendor selection for each manufacturer, in-house plan and the capacity that to reserve, and the parameters of contracts binding the different parts of the chain.

We have compared the performances provided numerically by different formulations and strategies, taking into account uncertainties of production (machine failures, non-quality, etc.), different production, outsourcing, maintenance and quality policies, and different degrees of collaboration among actors.

Keywords

Integrated planning, production, outsourcing, maintenance, quality, optimization, decision-making tools.

ملخص

مساهمة في تقييم أداء التعاقد الخارجي في ظل قيود الصيانة وأمن التشغيل لأنظمة الإنتاج المعقدة

تتناول أعمال هذه الأطروحة التخطيط المتكامل للإنتاج، التعاقد الخارجي، الصيانة والجودة. لقد اقترحنا نماذج رياضية وأدوات جديدة لمساعدة مختلف أطراف السلسلة الإمدادية (المؤسسة المانحة للأوامر أو المؤسسة المتعاقدة المستقبلية للأوامر) من أجل اتخاذ القرارات المعقدة المتعلقة بالتخطيط لطاقة الإنتاج بطريقة شاملة وفعالة. وهكذا، تمت دراسة هذه الإشكاليات لفترة زمنية وحيدة أو لفترات متعددة. بالإضافة إلى ذلك، تمت معالجة من وجهة نظر الجهات المانحة للأوامر، الجهات المتعاقدة أو كليهما.

لقد قمنا باقتراح خوارزميات تجويد عملية للإجابة على أسئلة تتعلق باختيار الموردين لكل مصنع، المخطط الداخلي والطاقة اللازمة حجزها، وبنود العقود التي تربط مختلف أطراف السلسلة.

لقد قمنا بتجريبها بمقارنة أداء مختلف الصيغ والاستراتيجيات التي تعكس مخاطر الإنتاج (أعطال الآلات، الأنوعية ...)، مختلف سياسات الإنتاج، التعاقد الخارجي، الصيانة والجودة، ومختلف مستويات التعاون بين أطراف السلسلة.

كلمات مفتاحية

التخطيط المتكامل، الإنتاج، التعاقد الخارجي، الصيانة، الجودة، التجويد، أدوات دعم واتخاذ القرار.