HAL
open science

Prise en compte des ressources humaines dans l'ordonnancement conjoint de production et de maintenance

Sabrina Bouzidi

To cite this version:

Sabrina Bouzidi. Prise en compte des ressources humaines dans l'ordonnancement conjoint de production et de maintenance. Informatique [cs]. Ecole nationale Supérieure d'Informatique (ESI)-Alger-Algérie, 2017. Français. NNT : . tel-02474393

HAL Id: tel-02474393

https://theses.hal.science/tel-02474393v1

Submitted on 11 Feb 2020

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

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

Ecole Nationale Supérieur d'Information - ESI- Alger.

THÈSE

Pour l'obtention du diplôme

DOCTORAT en Sciences

Prise en compte des contraintes des ressources humaines dans l'ordonnancement conjoint de production et de maintenance

Présentée et soutenue publiquement par

Sabrina BOUZIDI eps HASSINI

Devant le jury composé de

Karima **BENATCHBA**	Professeur à l'Ecole nationale Supérieure d'Informatique (ESI), Alger, Algérie.	Présidente
Nacer-eddine **ZAROUR**	Professeur à l'Université Constantine 2, Constantine, Algérie.	Examinateur
Abdessamad Reda **Ghomari**	Professeur à l'Ecole nationale Supérieure d'Informatique (ESI), Alger, Algérie.	Examinateur
Dalila **BOUGHACI**	Maître de conférences, Classe A, Université Houari Boumediene, Alger, Algérie.	Examinateur
Fatima **BENBOUZID-SI TAYEB**	Professeur à l'Ecole nationale Supérieure d'Informatique (ESI) Alger, Algérie.	Directrice de Thèse

Année Universitaire 2016-2017

A *Ferhat* et *Malika*
Mes chers parents qui ont beaucoup attendu pour voir ce jour arriver

Remerciements

Le travail présenté dans cette thèse a été effectué au sein du Laboratoire des Méthodes de Conception des Systèmes (LMCS) de l'École nationale Supérieure d'Informatique (ESI) d'Alger. Je tiens donc à adresser mes vifs remerciements à Madame Karima BENATCHBA directrice du LMCS, pour m'avoir faite confiance et permise d'effectuer mon travail sereinement en m'assurant un cadre de travail agréable. Je la remercie également d'avoir accepté de présider le jury ce cette thèse et d'évaluer mon modeste travail.

Je souhaite remercier très vivement ma directrice de Thèse Madame Fatima BENBOUZID-SI TAYEB, Professeur à l'ESI pour m'avoir accueillie au sein de sa jeune équipe, pour sa patience et ses encouragements pour que je puisse terminer ma Thèse à temps. Son côtoiement m'a permise de découvrir une femme exemplaire avec un sérieux et une efficacité au travail remarquables et inimitables. Je la remercie de m'avoir guidée, aidée et supportée tout au long de ces années de Thèse avec bonne humeur et compréhension.

Je remercie Monsieur François MARMIER, Professeur à l'Ecole des mines d'Albi-Carmaux en France pour m'avoir accueillie au sein du Centre de Génie Industriel et d'avoir pris le temps de me suivre et de me guider dans mon travail.

J'adresse ma reconnaissance à mes étudiants que j'ai eu l'occasion d'encadrer et grâce à qui j'ai pu avancer dans mon travail de Thèse : dans le cadre de leur PFE, Messieurs Mouad REBAHI, Youcef SABOUN et Slimane BOURAHLA. Madame Meriem TOUAT dans le cadre de son Magister à qui je souhaite bon courage pour son Doctorat.

Je remercie les honorables membres de jury qui ont accepté d'examiner mon travail et d'assister à sa présentation, particulièrement Monsieur Nacer-eddine ZAROUR qui s'est déplacé depuis Constantine.

Je remercie la Direction des Etudes et la Direction de la Post-Graduation et de la Recherche de l'ESI à leurs têtes respectivement Madame Nacira CHERID et Monsieur Si-Larabi KHELIFATI pour leur facilité, aide et compréhension afin de me permettre d'arriver jusqu'au bout de la réalisation de mon projet de Thèse.

A la fin, je remercie les membres de ma famille d'avoir cru en moi, pour leur soutien, leur encouragement et leur aide précieuse. Je leur remercie pour leur patiente pour avoir supporté tant de stress pendant presque sept années avant de voir naître ce mémoire:

Mon mari pour sa compréhension, ses encouragements et son aide. Sans ces qualités rien n'aurait été possible avec un, deux puis trois enfants pleins d'énergie en charge.

Mes trésors : Mehdi, Selma et Amira qui même s'ils ne comprennent rien de ce que je fais, savent parfaitement m'apaiser et me rendre le sourire dans les moments les plus stressants. Je leur présente mes excuses pour le temps que je leur ai volé pour me consacrer à mes études.

Mes parents et mes frères pour leurs encouragements et leur aide en entourant mes enfants d'amour et de tendresse pendant mes absences.

Résumé

Les solutions proposées dans le domaine des ordonnancements conjoints de production et de maintenance considèrent les deux types d'activités (production et maintenance) de la même façon alors qu'elles n'ont pas les mêmes contraintes. En effet, la planification de la maintenance ne dépend pas seulement de l'état des machines. Elle dépend aussi de la disponibilité, de la compétence et de la performance de la ressource humaine qui va l'exécuter puisque la plupart des activités de maintenance se font manuellement. De ce fait, le temps opératoire d'une activité de maintenance ne peut être fixé que si la ressource humaine qui va l'exécuter est déterminée.

Les ateliers de production sont sujets à l'apparition d'évènements perturbateurs pouvant rendre les données de départ des ordonnancements obsolètes. Les méthodes d'ordonnancements déterministes sont incapables de proposer des solutions applicables à partir du moment qu'ils supposent que les données du problème sont parfaitement connues et inchangeables. Les ordonnancements sous incertitudes répondent à cette insuffisance en étant plus près de la réalité et des besoins des ateliers de production. Ils proposent des solutions qui s'adaptent aux changements de l'environnement étudié. Malheureusement très peu de travaux traitent les ordonnancements conjoints de production et de maintenance avec incertitudes alors que leur but dès le début était de proposer des solutions applicables.

En vue de proposer des ordonnancements conjoints de production et de maintenance réalistes, dans cette thèse, nous présentons des contributions qui répondent aux insuffisances précitées. D'une part, nous considérons les contraintes relatives aux ressources humaines de manière explicite et d'autre part, nous prenons en compte les imprécisions caractérisant les données du problème et les évènements (appelés dans la littérature « *Incertitudes* ») pouvant surgir au cours du processus de production. La plupart des travaux traitant les incertitudes en ordonnancement proposent des ré-ordonnancements totaux pour n'importe quel évènement perturbateur ce qui cause une instabilité dans l'environnement surtout quand les contraintes des ressources humaines sont considérées. Afin de remédier à ce problème, nous proposons des ré-ordonnancements partiels pour chaque évènement survenu. En plus, pour bénéficier des avantages de réactivité, de prise de décision autonome et de collaboration qu'offre la technologie agent, toutes nos contributions s'appuient sur une architecture Multi-agents.

Mots clés

Système de production, ordonnancement conjoint de production et de maintenance, maintenance préventive, contraintes de ressources humaines, incertitudes, systèmes multi-agents.

Table des matières

Introduction générale……1

1. Le contexte scientifique de la thèse…….....2
2. Les problématiques abordées dans la thèse 3
2.1. Problématique 1 : la non considération des contraintes des ressources humaines 3
2.2. Problématique 2 : la non considération des maintenances préventives conditionnelles 3
2.3. Problématique 3 : la non considération des incertitudes liées aux deux activités de production et de maintenance simultanément 4
2.4. Problématique 4 : Absence d'outils de simulation et de tests des performances des solutions d'ordonnancement 4
3. Les contributions de la thèse 4
3.1. Contribution 1 : Proposition d'une approche réactive pour un ordonnancement conjoint de production et de maintenance avec prise en compte des contraintes des ressources humaines.....5
3.2. Contribution 2 : Proposition d'une approche proactive/réactive pour un ordonnancement conjoint de production et de maintenance avec prise en compte des contraintes des ressources humaines.....6
3.3. Contribution 3 : Proposition d'une plateforme multi-agents pour le test des solutions d'ordonnancement conjoint de production et de maintenance.....7
4. Organisation de la thèse.....8

Première Partie : Contexte général et problématique……..11

Chapitre 1 : Ordonnancement de production : entre solutions théoriques et applicabilité……..12

1. Positionnement de l'ordonnancement dans la gestion de production..... 12
1.1. La planification..... 13
1.2. L'ordonnancement..... 13
1.3. Le pilotage..... 14
1.3.1. La conduite..... 15
1.3.2. La commande..... 15
2. Présentation du problème d'ordonnancement de la production..... 15
2.1. Définition 15
2.1.1. Les travaux..... 16
2.1.2. Les ressources 16
2.1.3. Les contraintes 16
2.1.4. Les critères d'optimisation ou les fonctions objectif..... 17
2.2. Typologie des problèmes d'ordonnancement des ateliers de production 17
2.2.1. Problème à machine unique..... 17

2.2.2. Problème à machines parallèles 18
2.2.3. Problème d'ateliers multi-machines 18
2.3. Modélisation et complexité du problème d'ordonnancement de production 20
3. Les Systèmes manufacturiers flexibles 21
3.1. Définition de la flexibilité 21
3.2. Type de flexibilité 22
3.2.1 Etre flexible pour s'adapter aux exigences du marché 22
3.2.2 Etre flexible pour être robuste 23
4. Modélisation des ateliers de production à base d'agents 23
5. Résolution des problèmes d'ordonnancement de production : À la recherche de solutions applicables 25
5.1. Selon l'approche de résolution adoptée : des méthodes exactes aux méthodes approchées25
5.1.1 Les méthodes exactes 26
5.1.2. Les méthodes approchées 26
5.2. De l'ordonnancement de production seule aux ordonnancements conjoints avec d'autres activités 29
5.2.1. Ordonnancement de la production 29
5.2.2. Planification et ordonnancement de production intégrés 31
5.2.3. Ordonnancement de production et de maintenance intégrés 32
5.3. Des ordonnancements déterministes aux ordonnancements sous-incertitudes 33
5.3.1. Ordonnancement déterministe 33
5.3.2. Environnement sous incertitudes 33
5.4. Discussion 34
6. Conclusion 35

Chapitre 2 : Les ordonnancements sous incertitudes : plus proches des attentes des ateliers de production……..……....…….…..36

1. Introduction 36
2. Définitions des incertitudes 37
3. Classification des sources d'incertitudes 38
4. Les incertitudes dans les ateliers de production 38
5. Modélisation de l'incertitude 39
5.1. Les modèles stochastiques 39
5.2. Les modèles par scénarios 39
5.3. Les modèles par intervalles 40
5.4. Les modèles basés sur la logique floue 40
6. Approches de résolution des ordonnancements sous incertitudes 42
6.1. Quand ordonnancer ? 42
6.2. Comment ordonnancer ? 42
6.2.1. Les approches réactives 43
6.2.2. Les approches proactives 44
6.2.3. Les approches hybrides 44
6.3. Discussion 45
7. Conclusion 46

Chapitre 3 : Insuffisances des travaux traitant l'ordonnancement de la production en présence de maintenance……47

1. La maintenance dans les systèmes manufacturiers 47
1.1 Définition de la maintenance 48
1.2 Les politiques de maintenance 48
1.2.1 La maintenance corrective ou réactive 48
1.2.2 La maintenance préventive 49
1.2.3 Discussion 52
1.3 Les ressources du système de maintenance 53
1.3.1 Les données techniques 53
1.3.2 Les bancs ou les équipements d'essai 54
1.3.3 Les pièces de rechange 54
1.3.4 L'outillage 55
1.3.5 Les ressources humaines 55
1.4 Les niveaux de maintenance 55
1.5 Ordonnancement de la maintenance 56
2. Ordonnancement conjoint de production et de maintenance 57
2.1. Définition et classification 58
2.1.1. L'ordonnancement séparé 59
2.1.2. L'ordonnancement séquentiel 59
2.1.3. L'ordonnancement totalement intégré 59
2.2. Synthèse des travaux portant sur l'ordonnancement conjoint de production et de maintenance 59
2.2.1. Les ordonnancements conjoints de production et de maintenance hors-ligne 60
2.2.2. Les ordonnancements conjoints de production et de maintenance en-ligne 61
2.2.3. Discussion 63
3. Vers la prise en compte des contraintes des ressources humaines dans les ordonnancements conjoints de production et de maintenance 63
3.1. Ordonnancement de la ressource humaine 64
3.2. Caractéristiques des ressources humaines 64
3.2.1. Ressource humaine et compétence 64
3.2.2. Ressources humaines et performance 65
3.2.3. Ressources humaines et disponibilité 66
3.3. Synthèse des travaux qui considèrent les contraintes des ressources humaines dans l'ordonnancement des ateliers de production 66
3.3.1. Considération des contraintes des ressources humaines dans l'ordonnancement de production 66
3.3.2. Considération des contraintes des ressources humaines dans l'ordonnancement de la maintenance 67
4. Synthèse 68

Partie 2 : Contributions autours des ordonnancements conjoints de production et de maintenance……..……70

Introduction 70
Principe 1 : prise en compte des contraintes liées aux ressources humaines dans la programmation des activités de maintenance 70
1.1. La compétence 70
1.2. La performance 71

1.3. La disponibilité ... 71
Principe 2 : Une modélisation basée agents pour l'atelier ... 71
Principe 3 : Prise en compte des incertitudes liées aux deux activités de production et de maintenance simultanément ... 72
3.1. Modélisation floue des imprécisions ... 73
3.2. Prise en compte des évènements : ré-ordonnancement partiel plutôt que total ... 76
Principe 4 : Prise en compte de la maintenance conditionnelle (CBM) ... 77
Conclusion ... 77

Chapitre 4 : Une approche réactive pour la prise en compte de la maintenance conditionnelle dans un ordonnancement conjoint de production et de maintenance ... 78

1. Introduction ... 78
2. Formalisation du problème ... 80
2.1. Le problème d'ordonnancement de la production ... 80
2.2. Planification des activités de maintenance préventive avec prise en compte des contraintes liées aux ressources humaines ... 80
2.3. Fonctions objectif ... 81
3. Approche de résolution ... 82
3.2. Le niveau une-machine ... 82
3.2.1. Etape Initialisation ... 82
3.2.2 Etape Analyse ... 83
3.2.3. Etape d'appel à intervention ... 83
3.2.4. Etape Formulation des propositions. ... 83
3.2.5. Etape Réception ... 83
3.2.6. Etape Ordonnancement et évaluation ... 83
3.2.7. Etape Finalisation ... 84
3.2.8. Exemple illustratif ... 86
3.3. Le Niveau Multi-machines ... 90
3.3.1. La négociation en amont ... 91
3.3.2. La négociation en aval ... 92
4. Résultats expérimentaux ... 92
4.1. Le protocole de test ... 92
4.1.1. Génération des données de maintenance ... 93
4.1.2. Les instances des ressources humaines ... 93
4.1.3. Les données floues ... 94
4.1.4. Simuler l'arrivée du signal d'anomalie ... 95
4.2. Résultats des simulations ... 95
4.2.1. La réactivité du système ... 95
4.2.2. Capacité de l'approche à absorber la moyenne du retard de production. ... 97
5. Conclusion ... 97

Chapitre 5 : Une approche proactive-réactive pour la génération d'ordonnancements conjoints de production et de maintenance sous incertitudes ... 99

1. Introduction ... 99
2. Formalisation du problème ... 100

2.1. Le problème d'ordonnancement de la production 100
2.2. Le problème de planification des activités de maintenance avec prise en compte des contraintes des ressources humaines 100
2.3. Critères d'optimisation 101
3. Proposition d'une approche proactive-réactive pour l'ordonnancement conjoint de production et de maintenance 101
3.1. La phase proactive 102
3.1.1. Initialisation du système 102
3.1.2. Exécution de l'algorithme génétique pour la génération d'une population d'ordonnancements conjoints 102
3.1.3. Affectation des ressources humaines aux activités de maintenance 106
3.1.4. Choix du meilleur ordonnancement 107
3.2. La phase réactive: Gestion des événements 108
3.2.1. Scénario 1: Ajout d'une nouvelle tâche de production 108
3.2.2. Scénario 2 : Supprimer une tâche de production 109
3.2.3. Scénario 3: Panne machine 109
3.2.4. Scénario 4: Défection d'une ressource humaine 111
4. Expérimentations 112
4.1. Le protocole de test 112
4.1.1. Génération des Benchmarks de production et de maintenance 112
4.1.2. Génération des Benchmarks pour les données des ressources humaines 113
4.1.3. Les données floues 114
4.2. Résultats des simulations 115
4.2.1. Phase proactive 115
4.2.2. Phase réactive 119
5. Conclusion 122

Chapitre 6 : La plateforme ETOMA. L'Environnement de Test développé pour les Ordonnancements Multi-Agents 123

1. Introduction 123
2. Architecture d'ETOMA 124
2.1. Description de Develop 125
2.1.1. Caractéristiques de l'agent proposé 125
2.1.2. Les services offerts par Develop 126
2.2. Description du module Test 127
2.2.1. Configurer et sauvegarder les solutions d'ordonnancements 127
2.2.2. L'agent Interface 127
2.2.3. Gestion des résultats 128
2.2.4. Génération des benchmarks de la maintenance 128
2.3. Le tableau noir 129
3. Exemple d'exécution 129
4. Conclusion 132

Conclusion Générale 134

1. Bilan et principales contributions 134
2. Perspectives de recherches 135
2.1. Perspectives à court terme 135

2.2. Perspectives à moyen terme : les projets post-thèse 136
3. Les publications de la thèse 136

Références 137

Liste des figures

Figure 0.1. La courbe P-F pour conrôler l'évolution de la panne d'un équipement…….....5
Figure 0.2. Architecture globale de la plateforme ETOMA……8

Figure 1.1. Les activités du système de production……...…….…14
Figure 1.2. Caractéristiques d'une tâche de production……...……..16
Figure 1.3. Atelier à machine unique……...……..18
Figure 1.4. Atelier à machines parallèles……...……18
Figure 1.5. Atelier à cheminement unique ou Flow-shop……...……...19
Figure 1.6. Exemple d'ateliers à cheminement multiples (Job-shop)……...……...19
Figure 1.7. Typologie des ateliers de production [Billaut, 1995]……...……..20
Figure 1.8. Un exemple de modélisation à base d'agents du problème d'ordonnancement……...….24
Figure 1.9. Représentation arborescente des différentes méthodes de résolution d'ordonnancement28
Figure 1.10. Étapes de MASMPLAM……...……....35

Figure 2.1. Éléments caractéristiques d'un ensemble flou: noyau, support, hauteur et α-coupe 41
Figure 2.2. Formes de modélisation floue 41
Figure 2.3. Approches de résolution sous incertitudes selon la phase d'ordonnancement développée [Ourari, 2010] 42
Figure 2.4. Les approches réactives d'ordonnancement de production..... 43
Figure 2.5. Les approches proactives d'ordonnancement sous-incertitudes 44
Figure 2.6. Les approches hybrides d'ordonnancement sous-incertitudes 45

Figure 3.1. Les différentes politiques de maintenance 49
Figure 3.2. Intervalle de tolérance d'une activité de maintenance [Benbouzid-Si Tayeb *et al.*, 2003] . 50
Figure 3.3. La courbe P-F 52
Figure 3.4. Comparaison du coût de maintenance des différentes politiques de maintenance 53
Figure 3.5. Eléments nécessaires pour un ordonnancement de maintenance réalisable..... 57

Figure 4.0.1. Fonction triangulaire modélisant la durée opératoire floue……...74
Figure 4.0.2. Modélisation des fenêtres temporelles des tâches de production et de maintenance…74
Figure 4.0.3. Comparaison de deux valeurs $\widetilde{A}$ et $\widetilde{B}$……....75
Figure 4.0.4. Illustration de la gestion des évènements par la méthode des scénarios……....76

Figure 4.1. La courbe P-F et les stratégies de résolution adoptées..... 79
Figure 4.2. Modélisation floue du temps opératoire, du RUL et des fenêtres temporelles des tâches81
Figure 4.3. Le protocole d'interactions multi-agents..... 85
Figure 4.4. Diagramme d'activités multi-agents..... 86
Figure 4.5. L'ordonnancement conjoint des activités de production et de maintenance exécuté sur la MS 87
Figure 4.6. Construction de l'ordonnancement conjoint de production et de maintenance selon la proposition d'ARH_1..... 88

Figure 4.7. Construction de l'ordonnancement conjoint de production et de maintenance selon la proposition de AHR_2 90
Figure 4.8. Diagramme d'activités du traitement du M_Message 91
Figure 4.9. Diagramme d'activités du traitement d'un I_Message 92
Figure 4.10. Type des intervalles de disponibilité considérés 94
Figure 4.11. La largeur "f*bw*" pour une fonction d'appartenance 95

Figure 5.1. Etapes de résolution de la phase proactive 102
Figure 5.2. Codage d'une solution avec 6 tâches de production 104
Figure 5.3. Interaction inter-agents pour l'affectation des ressources humaines aux activités de maintenance 107
Figure 5.4. Les différents scénarios considérés dans la phase réactive 108
Figure 5.5. Interactions inter-agents pour la prise en compte d'une panne machine 110
Figure 5.6. Type des intervalles de disponibilité considérés 114
Figure 5.7. Variation de la largeur de la base floue 114

Figure 6.1. Architecture globale d'ETOMA 124
Figure 6.2. Le comportement de l'Agent Interface 128
Figure 6.3. Illustration des interactions entre les agents 129
Figure 6.4. La fenêtre principale d' ETOMA 130
Figure 6.5. Création des agents utilisateur 130
Figure 6.6. Définir les caractéristiques de l'atelier à étudier 131
Figure 6.7. Création des agents machine selon l'instance du benchmark sélectionnée 131
Figure 6.8. La courbe résultante 132
Figure 6.9. Tableau des statistiques 132

Liste des tableaux

Tableau 0.1. Organisation du manuscrit 9

Tableau 1.1. Les critères d'optimisation 17
Tableau 1.2. Les valeurs possibles des champs α_1, β, γ 21

Tableau 3.1. Les ressources nécessaires pour chaque niveau de maintenance. 56

Tableau 4.0.1. Synthèse des évènements liés à la production et à la maintenance 73

Tableau 4.1. Données relatives à l'ordonnancement initial de la MS 87
Tableau 4.2. Les données relatives à l'ordonnancement construit selon la proposition d'ARH1 88
Tableau 4.3. Données relatives à l'ordonnancement final construit selon la proposition d'HRA1 89
Tableau 4.4. Données relatives à l'ordonnancement généré selon la proposition d'ARH_2 90
Tableau 4.5. Comparaison des propositions des ARHs 90
Tableau 4.6. Influence du nombre de jobs, de machines et de ressources humaines sur le temps de résolution 96
Tableau 4.7. Le retard résultant des résolutions une-machine et multi-machines selon la stratégie de maintenance adoptée et le nombre de ressources humaines dans l'atelier 97

Tableau 5.1. Description des tâches constituant le plan de production 103
Tableau 5.2. Calibrage de l'algorithme génétique: le paramètre Psize 116
Tableau 5.3. Résultats de calcul de l'algorithme génétique 117
Tableau 5.4. Pourcentage de faisabilité du meilleur ordonnancement 118
Tableau 5.5. Faisabilité de la population d'ordonnancement 119
Tableau 5.6. Réaction du système aux différents événements traités 121

Introduction Générale

L'ordonnancement de l'activité de production est une fonction très importante au sein des ateliers des entreprises industrielles car elle a un impact direct sur leur compétitivité. Ces entreprises évoluent dans un contexte concurrentiel et dynamique. De ce fait, leur production doit répondre aux exigences du marché en termes de disponibilité des produits et de respect des délais de réalisation des commandes.

L'ordonnancement de la production est définit comme étant l'allocation des travaux de production aux machines et la planification dans le temps de leur exécution. Cette planification doit respecter des contraintes liées à la nature des travaux (préemptifs ou pas, indépendants ou soumis à des contraintes d'antériorité, disponibles tous à t=0 ou ont des dates de disponibilité différentes, etc.) mais aussi liées aux ressources nécessaires à leur achèvement (disponibles ou pas, renouvelables ou consommables, etc.). L'objectif est d'optimiser un ou plusieurs critères de gestion comme la minimisation des délais d'attente des travaux, la minimisation de la durée totale de production (Cmax), etc.

Le problème d'ordonnancement de la production a été depuis longtemps classé comme étant NP-Difficile [Garey *et al.*, 1979], [Carlier *et al.,* 1988]. Il a été largement étudié dans la littérature et des travaux très intéressants résolvant le problème pour différentes configurations d'ateliers ont été proposés (une-machine [Batun *et al.,* 2009] , flow-shop [Khelifati *et al.,* 2011] [Chaari, 2010], job-shop [Kim *et al.,* 2003] [Liu *et al.,* 2009], machines parallèles [Senthilkumar *et al.*, 2010] [Mirabedini *et al.,* 2013]).

La présence de machines dans l'atelier nécessite forcement l'existence d'un service de maintenance pour leur maintien en bon état de fonctionnement. Deux stratégies de maintenance peuvent être mises en place: la maintenance préventive et la maintenance corrective. La première stratégie vise à programmer des activités de maintenance périodiquement (Maintenance préventive temporelle (TBM pour Time Based Maintenance)) ou suite à la détection d'une anomalie de fonctionnement (Maintenance préventive conditionnelle (CBM pour Case Based Maintenance)) ou encore en se basant sur un pronostic établi à l'avance (Maintenance préventive prévisionnelle (PBM pour Pronostic Based Maintenance)) afin de ramener les machines à leur bon état. La stratégie corrective quant à elle, intervient pour remettre en marche les machines, en cas de pannes soudaines provoquant l'arrêt total du processus de production.

Le caractère multi-objectif de l'ordonnancement est reconnu depuis longtemps, mais il est rarement admis que d'autres fonctions que la production devraient y participer, supposant ainsi la disponibilité infinie des ressources de production. En pratique, des arrêts dus à l'exécution des activités de maintenances sont inévitables. Ces arrêts peuvent être momentanés (exécuter des maintenances préventives) ou plus longs (exécuter des maintenances correctives). C'est alors pour cette raison et dans le but d'offrir des solutions réalistes que les ordonnancements conjoints de production et de maintenance ont vu le jour.

1. Le contexte scientifique de la thèse

Un ordonnancement conjoint de production et de maintenance consiste à établir un plan composé de tâches de production et de maintenance préventives ordonnancées simultanément. L'objectif est de planifier l'exécution des activités de maintenance, en altérant le moins possible le plan de production, et en respectant au mieux la périodicité de maintenance des machines afin d'assurer au maximum leur disponibilité. Les ordonnancements conjoints de production et de maintenance proposent des solutions réalistes d'ordonnancement en prévoyant des arrêts temporaires du processus de production causés par des activités de maintenance. Cette intégration peut se faire de manière *séquentielle* c'est-à-dire, planifier les activités de production (ou de maintenance) puis planifier les activités de maintenance (ou de production) en considérant la planification des activités de production comme une contrainte forte d'indisponibilité. Elle peut aussi être *totale* en planifiant simultanément les deux types d'activités.

L'activité de maintenance est dans la plupart du temps une activité manuelle faisant intervenir des ressources humaines avec différentes qualifications ou savoir-faire. La durée opératoire d'une activité de maintenance dépend du niveau de qualification que possède la ressource humaine qui va l'exécuter et de sa performance. En effet, pour la même activité, une ressource humaine experte prend moins de temps qu'une autre dite débutante. Par voie de conséquence et surtout dans les cas d'urgence, il est important d'affecter l'activité de maintenance à la ressource humaine la plus rapide. Les ressources humaines peuvent avoir des plannings de travail composés de périodes appelées *shifts*. Ces périodes ne sont pas allouées de manière aléatoire aux intervenants mais sont soumises à des contraintes de règlementation, d'équité et de préférences.

Les ordonnancements dits « déterministes » supposent que les données du problème sont bien connues et inchangeables. Cette supposition est loin de la réalité des ateliers de production. En effet, des événements tels l'arrivée imprévue d'un job, une panne machine, ou encore la défection de ressources humaines intervenantes peuvent surgir à tout moment rendant ainsi obsolètes les données de départ et l'ordonnancement initial inapplicable. Les ordonnancements qui prennent en compte les incertitudes sont dits « ordonnancements sous-incertitudes ». Ils proposent des solutions plus intéressantes car elles considèrent les événements perturbateurs en amont de tout ordonnancement (approches proactives) [Beck *et al.,* 2007], réagissent en ligne à ces événements (approches réactives) [Aissani *et al.,* 2011] [Piltan *et al.,* 2011], ou bien les traitent en deux phases : la première génère un ordonnancement déterministe qui sera après mis à jour dans la phase réactive si jamais des perturbations surviennent (approches hybrides) [Petrovic et *al.,* 2011]. Ainsi la décision sera rapidement prise et les événements perturbateurs vite absorbés.

La propriété de réactivité des ateliers de production ne sera assurée que si la prise de décision est décentralisée et donc partagée par tous les acteurs de l'atelier. Les Systèmes Multi Agents (SMA); qui sont une collection d'entités autonomes appelées «Agents»; peuvent être un bon support de modélisation de ces ateliers. Ces agents qui peuvent modéliser n'importe quel acteur (jobs, machines, ressources humaines, etc.) interagissent avec le reste des acteurs afin de trouver l'ordonnancement qui satisfait au mieux les contraintes du problème et optimise les objectifs visés. Leurs propriétés de réactivité, de collaboration, de communication, de négociation, de raisonnement et surtout d'autonomie ont incité plusieurs chercheurs à les utiliser pour proposer des solutions d'ordonnancement très intéressantes [Kouiss *et al.,* 1997] [TehraniNikNejad *et al.,* 2008] [Sabar *et al.,* 2009] [Khelifati *et al.,* 2011].

2. Les problématiques abordées dans la thèse

D'après notre revue de la littérature, nous avons constaté que malgré l'existence de travaux abondants et intéressants en ordonnancement conjoint de production et de maintenance, des verrous scientifiques peuvent être rapidement soulevés. Nous les décrivons à travers les quatre problématiques abordés dans cette thèse:

2.1. Problématique 1 : la non considération des contraintes des ressources humaines

Lors de la génération des ordonnancements conjoints de production et de maintenance, la plupart des solutions proposées cherchent à trouver l'agencement optimal des deux types de tâches (de production et de maintenance) sans se soucier des contraintes qui leur sont propres car les activités de production et de maintenance ne sont pas de même nature et ne possèdent pas les mêmes contraintes. En conséquence, elles ne peuvent pas être planifiées de la même façon.

En effet, 90% des activités de maintenance (si ce n'est pas plus) sont manuelles. Elles font donc intervenir des ressources humaines avec différentes compétences et disponibilités. Les ressources humaines peuvent intervenir dans les activités de production [Sabar *et al.,* 2005] [Guillaume *et al.*, 2014]. Cependant, leurs interventions ne dépassent pas généralement le simple contrôle du déroulement du processus de production pour assurer sa continuité.

La disponibilité, la compétence et la performance sont les principales contraintes caractérisant les ressources humaines : (1) *La contrainte de disponibilité* a un impact direct sur l'applicabilité des ordonnancements générés. Un ordonnancement est dit *applicable* si les ressources matérielles et humaines nécessaires à l'exécution des tâches qui le composent sont disponibles dans les fenêtres temporelles qui leur sont allouées ; (2) *La contrainte de compétence* se caractérise par l'aptitude des ressources humaines à réaliser une tâche de maintenance donnée ; (3) Quant à *la contrainte de performance*, son impact est visible sur la valeur de la fonction objectif. En effet, le temps opératoire des activités de maintenance ne peut pas être constant car il dépend du savoir-faire de l'intervenant et aussi de sa performance. Cette dernière résulte de la forme physique de l'intervenant et de sa charge de travail. Ainsi, le temps opératoire ne peut être fixé que si l'activité en question est allouée à une ressource humaine disponible et apte à l'exécuter.

2.2. Problématique 2 : la non considération des maintenances préventives conditionnelles

La deuxième insuffisance qui peut être recensée dans le domaine des ordonnancements conjoints de production et de maintenance est le fait que les solutions existantes dans leur majorité, traitent seulement la maintenance périodique (TBM) alors que la maintenance conditionnelle (CBM) est de loin la plus intéressante. En effet, elle a l'avantage d'être moins coûteuse que la première du moment que les activités de maintenance sont planifiées seulement après la détection d'une anomalie de fonctionnement.

La plupart des travaux portant sur la CBM répondent à la question « quand est-ce qu'une maintenance conditionnelle doit être planifiée ? ». Ils essayent de trouver les indicateurs significatifs de dysfonctionnement qui peuvent annoncer une éventuelle panne. Cependant, ils ne se soucient pas de sa planification. En effet, la différence entre une CBM et une maintenance corrective est que dans la

première, les machines sont toujours opérationnelles donc l'urgence n'est pas élevée. L'objectif reste alors, de trouver le bon moment pour la programmer ainsi que la ressource humaine apte et disponible pour l'exécuter. Par contre, une maintenance corrective est exécutée après un arrêt total de la machine.

2.3. Problématique 3 : la non considération des incertitudes liées aux deux activités de production et de maintenance simultanément

En ce qui concerne les travaux portant sur les ordonnancements sous-incertitudes. Nous avons constaté qu'ils traitent les activités de production et de maintenance séparément malgré que les données et les événements de ces deux activités soient étroitement liés. Il serait donc intéressant de proposer un ordonnancement conjoint de production et de maintenance qui prend en compte les incertitudes liées aux deux activités distinctement.

La majorité des approches hybrides proposées en ordonnancement sous incertitudes procèdent par ré-ordonnancement total des tâches pour n'importe quel événement dans la phase réactive. Le ré-ordonnancement total après chaque apparition d'évènements n'est pas une solution adéquate surtout pour les activités de maintenance car elles ont été planifiées en prenant en compte la disponibilité de l'outillage et des ressources humaines. Ces dernières verront alors leurs plannings modifiés à chaque apparition d'événements. Pour répondre à ce problème, il convient donc, de proposer des traitements différents pour chaque type d'événements dans la phase réactive.

2.4. Problématique 4 : Absence d'outils de simulation et de tests des performances des solutions d'ordonnancement

La phase d'implémentation et de test d'une solution d'ordonnancement est très importante. Plusieurs expérimentations doivent être réalisées consistant à faire varier les données du problème d'ordonnancement (le nombre de tâches, leur durées opératoires, le nombre de machines, etc.) en utilisant des benchmarks existants ou non. Puis d'évaluer les critères de performances en les comparant avec ceux des résultats des benchmarks de références.

Afin de faciliter et d'accélérer le développement et le test des solutions d'ordonnancement multi-agents, une plateforme multi-agents est nécessaire en vue d'offrir les services de création, de communication, et de tests des solutions théoriques.

D'après notre revue de la littérature, il n'existe pas de plateformes dédiées à ce genre de test. Les outils proposés dans le domaine de l'ordonnancement ; comme la plateforme Masc [Masc, 2010]; sont utilisés pour la simulation du processus de production. Ils décrivent seulement le passage des tâches de production entre les différentes machines de l'atelier et n'offre aucune fonctionnalité permettant le traitement (exécution et comparaison des résultats) de plusieurs benchmarks.

3. Les contributions de la thèse

Depuis 2010, l'objectif de nos travaux de recherche a toujours été la proposition de contributions originales pour des problématiques autour du contexte de l'ordonnancement conjoint de production et de maintenance.

Pour répondre aux problématiques citées précédemment, nous avons proposé trois contributions principales qui ont été validées dans des conférences et des revues internationales honorables. Nous avons adopté une modélisation multi-agents pour notre atelier pour bénéficier des avantages de cette technologie dans la résolution du problème d'ordonnancement.

Avant de détailler nos propositions dans les chapitres 4, 5 et 6, nous donnons ci-après une brève description de chacune d'elles.

3.1. Contribution 1 : Proposition d'une approche réactive pour un ordonnancement conjoint de production et de maintenance avec prise en compte des contraintes des ressources humaines

Dans cette approche, nous proposons un ordonnancement conjoint de production et de maintenance Nous considérons les deux stratégies de maintenance préventive: *périodique* et *conditionnelle*. Nous sommes partis du principe qu'il ne faut pas visée qu'une seule stratégie de maintenance dans les ateliers de production. En effet, le choix de la stratégie dépend du coût de la maintenance. Pour les maintenances de bas niveau (1 ou 2) (chapitre 3, section 1.4) dont le coût est faible voir négligeable, la stratégie périodique peut être appliquée. Tandis que pour des maintenances plus coûteuses en temps et en argent (à partir du niveau 3), la stratégie intelligente peut être envisagée.

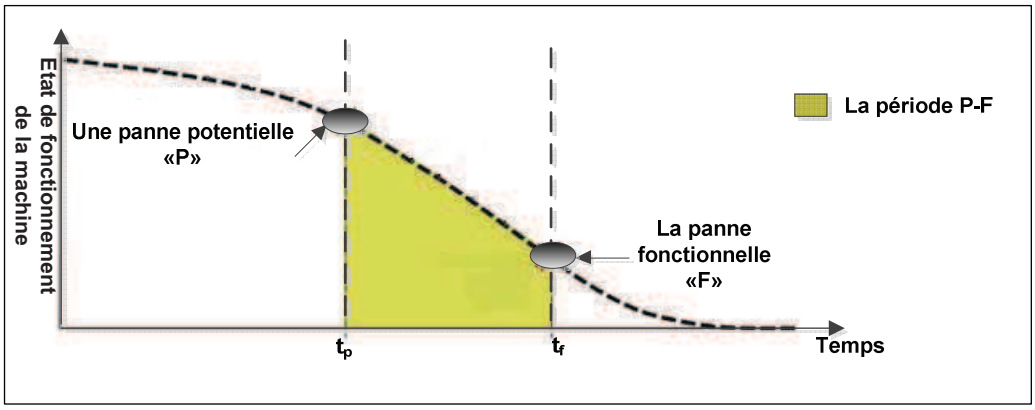

Figure 0.1. La courbe P-F pour conrôler l'évolution de la panne d'un équipement

Nous proposons une approche d'ordonnancement dans le cas d'insertion d'une nouvelle CBM dans un ordonnancement encours d'exécution. C'est une approche réactive car elle réagit à un signal indiquant un dysfonctionnement ou ce qui est connu sous le nom de détection d'une panne potentielle (le point P - figure 0.1). La machine qui subira l'intervention appelée « la machine sujet » (MS) doit être maintenue avant que la panne fonctionnelle survienne (le point F - figure 0.1). La courbe P-F (figure 0.1) et un outil permettant de suivre l'évolution de la panne au fil du temps pour chaque équipement. Elle est utile pour les décideurs en maintenance afin de déterminer le moment idéal d'intervention.

Pour répondre à l'évènement d'insertion de la CBM et afin d'offrir plus de flexibilité aux décideurs, nous avons proposé deux stratégies de résolution:

– *Une Stratégie Orientée Maintenance (S.O.M) ou stratégie « zéro risque ».* Dans cette stratégie, la CBM doit être programmée le plutôt possible afin de ne pas courir le risque d'apparition de la panne.

– *Une Stratégie Orientée Production (S.O.P).* Cette stratégie favorise la stabilité du plan de production. Un risque de panne peut être pris afin de perturber le moins possible les tâches de production.

Nous proposons une résolution sur deux niveaux :

- *Le niveau une-machine :* dans ce niveau de résolution, la MS modifie localement son ordonnancement pour essayer d'insérer la CBM. L'objectif est de minimiser le retard de production et de maintenance. L'estimation du temps opératoire de la CBM est floue tandis que les autres activités de maintenance existantes dans l'ordonnancement de base; qui sont de type TBM ; resteront inchangées car elles ont été planifiées en prenant en compte des contraintes liées à l'outillage et aux ressources humaines.

- *Le niveau multi-machines :* après la résolution locale de la MS, les ordonnancements locaux de ses machines voisines peuvent être affectés. La résolution multi-machines est lancée si une inconsistance[1] est détectée. Dans ce cas, la MS lance une négociation en amont pour tenter d'absorber le retard qui peut être causé. Si ceci n'est pas possible, elle informe les machines en aval du nouvel ordonnancement. A leurs tours, elles vont mettre à jour leurs ordonnancements locaux.

Nous avons implémenté la solution proposée en utilisant la plateforme multi-agents ETOMA qui sera présentée ultérieurement. Afin de mesurer les performances de la méthode proposée, nous avons effectué plusieurs séries de tests. Les résultats ont montré que la résolution adoptée dans le niveau une-machine a pu absorber l'évènement et minimiser le retard global de tous les jobs de production. Par ailleurs, la stratégie SOM offre de meilleurs résultats par rapport à la stratégie SOP en termes de retards de production et de maintenance.

3.2. Contribution 2 : Proposition d'une approche proactive/réactive pour un ordonnancement conjoint de production et de maintenance avec prise en compte des contraintes des ressources humaines

Dans cette proposition, nous visons à construire un ordonnancement conjoint de production et de maintenance *sous incertitudes* pour un atelier à une machine. L'estimation des temps opératoires des tâches de production et de maintenance est floue. Nous prenons en compte les contraintes de *compétence*, de *disponibilité* et *de performance* des ressources humaines pour le choix final de la solution d'ordonnancement.

Comme l'indique le titre, le traitement des incertitudes se fait sur deux étapes : (1) dans *la phase proactive*, un ordonnancement conjoint de production et de maintenance robuste est généré à l'aide d'un algorithme génétique flou ; (2) dans *la phase réactive* la méthode par scénario est adoptée afin d'éviter le ré-ordonnancement total en cas d'apparition d'évènements perturbateurs. Son principe est d'appliquer une résolution différente selon l'évènement qui arrive afin d'ajuster partiellement l'ordonnancement en cours d'exécution.

Dans *la phase proactive*, les agents modélisant l'atelier construisent une solution d'ordonnancement conjoint de production et de maintenance. La programmation des activités de maintenance se fait de manière séquentielle. C'est-à-dire que tout d'abord, les fenêtres temporelles de ces activités sont proposées ensuite elles sont ajustées en leur allouant les ressources humaines aptes et disponibles pour leur réalisation. Pour ce faire, (1) une population d'ordonnancements dite *de bonne qualité* est générée à l'aide d'un algorithme génétique flou, (2) classée par ordre décroissant de l'optimalité de la fonction objectif, et enfin, (3) un processus de recherche d'intervenants (aptes à réaliser les activités de maintenance et disponibles dans les fenêtres temporelles spécifiées dans les ordonnancements conjoints candidats) est lancée.

[1] Inconsistance : si la date de disponibilité d'une tâche i sur une machine j d_{ij} dépasse sa date de début d'exécution t_{ij}

Dans *la phase réactive*, l'ordonnancement proactif choisi est mis en exécution et les évènements pouvant survenir dans l'atelier sont gérés par l'approche par scénarios. Cette approche est basée sur le traitement d'un ensemble d'évènements avec des scénarios de résolution différents. Nous nous proposons de traiter quatre événements : deux liés à l'activité de production (l'ajout et la suppression d'une tâche de production) et deux liés à celle de maintenance (une panne machine et une défection d'une ressource humaine).

Les résultats expérimentaux ont montré que notre algorithme génétique flou génère des ordonnancements de bonne qualité. Ils ont montré également que la prise en compte des ressources humaines dans la phase proactive permet de proposer des ordonnancements réalistes donc applicables. La proposition d'une population d'ordonnancements semi-optimaux de taille importante permet de tester toutes les possibilités d'ordonnancement et donc trouver au moins un qui vérifie la contrainte de disponibilité des ressources humaines.

L'utilisation de la logique floue pour exprimer des estimations approximatives a permis au système de prévoir les incertitudes et donc proposer des ordonnancements robustes. Les stratégies de résolution suivies dans la phase réactive ont permis aussi, d'assurer plus de stabilité dans l'atelier en proposant des réajustements partiels au lieu de ré-ordonnancements totaux.

3.3. Contribution 3 : Proposition d'une plateforme multi-agents pour le test des solutions d'ordonnancement conjoint de production et de maintenance

Afin de faciliter l'implémentation des solutions d'ordonnancement et leurs tests de performance, nous avons développé un outil appelé ETOMA pour **E**nvironnement de **T**est des solutions d'**O**rdonnancement **M**ulti-**A**gents. Il offre les fonctionnalités suivantes:

- Créer les composants de l'atelier à étudier (les différents agents et ressources utilisés).
- Sauvegarder et récupérer les solutions d'ordonnancement.
- Lancer les tests des solutions en utilisant les benchmarks de Taillard [Taillard, 1993] pour les ateliers de type job-shops et flow-shops.
- Générer des graphes, des tableaux de statistiques et des rapports de tests pour mesurer les performances d'une solution établie. A la fin des tests, notre plateforme génère un rapport complet de test, et dessine un graphe de l'évolution de la fonction objectif choisie par l'utilisateur en fonction des tests.

La figure 0.2 illustre l'architecture globale de la plateforme. Elle est composée de deux grands modules *Develop* et *Test* qui communiquent entre eux à l'aide d'un *Tableau noir* pour déposer et récupérer les informations nécessaires à leurs échanges.

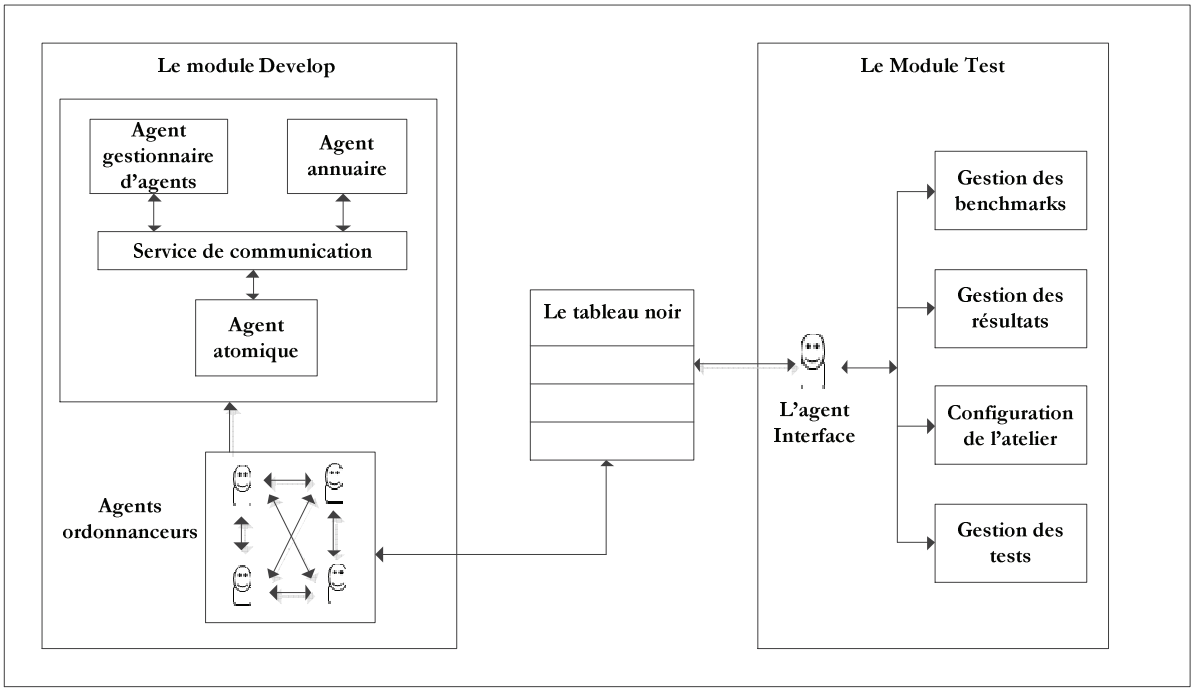

Figure 0.2. Architecture globale de la plateforme ETOMA

- *Le Module « Develop» de configuration des solutions d'ordonnancement* comprend les fonctions nécessaires pour le bon fonctionnement d'un système multi-agents à savoir la création et la suppression des agents, la gestion du cycle de vie de ces derniers, la communication inter-agents et l'ajout ou la suppression de leurs compétences.

Puisqu'il n'existe pas de modèles génériques de solutions d'ordonnancement multi-agents, nous ne pouvons pas fixer une architecture dédiée au problème d'ordonnancement. Par conséquent, nous avons laissé le libre choix aux utilisateurs de créer les agents qui vont intervenir dans la génération de la solution.

- *Le tableau noir* est une structure de données très importante au sein de notre plateforme, elle permet une communication indirecte entre le module Develop et Test. En effet, la solution de l'utilisateur (définie dans le module Develop) a besoin des données en provenance du module Test pour son fonctionnement. De l'autre côté, le module Test a besoin aussi des résultats issus de chaque exécution afin de les afficher. Ainsi, Cette structure nous a permis de réaliser les deux tâches sans connaître de manière précise l'agent responsable du calcul de la fonction objectif. Il comporte trois structures de données, une pour le dépôt et le retrait des *benchmarks*, une autre pour le dépôt et le retrait des résultats des tests et une dernière pour le dépôt et le retrait des données de maintenance.

- *Le module « Test » des solutions d'ordonnancement* est caractérisé principalement par un agent appelé *Agent Interface* jouant le rôle d'intermédiaire entre l'utilisateur, le module Develop et le module Test. Sa mission est (1) d'identifier un ou plusieurs scénarios de test selon la configuration de l'atelier, (2) de les déposer dans le tableau noir puis (3) retirer les résultats issus de la solution pour analyse et affichage.

4. Organisation de la thèse

Le présent manuscrit est composé de deux parties (tableau 0.1).

Tableau 0.1. Organisation du manuscrit

Partie	**Partie 1 : Contexte Général et Problématiques**			**Partie 2 : Contributions**		
Chapitres	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Titres	Ordo. de production: entre solutions théoriques et applicabilité	Ordo. sous incertitudes: plus près des attentes des ateliers	Insuffisances des travaux traitant le problème d'ordo. de production en présence de maintenance	Une approche réactive pour la prise en compte de la maintenance conditionnelle dans les ordo. conjoints de production et de maintenance	Une approche proactive-réactive pour la génération des ordo. conjoints de production et de maintenance	La plateforme ETOMA, l'environnement de test développé pour les ordo. multi-agents

La première partie spécifie le contexte général et expose la problématique traitée dans notre travail. Elle est composée de trois chapitres:

– A travers **le premier chapitre**, nous présentons la problématique de l'ordonnancement dans le contexte des ateliers de production. Nous illustrons le passage des solutions d'ordonnancement d'un cadre théorique vers des solutions de plus en plus réalistes donc applicables.

– Dans **le deuxième chapitre,** nous présentons les ordonnancements sous incertitudes qui prennent en compte les imperfections des données traitées dans les ateliers et les évènements qui peuvent surgir au cours du processus de production.

– **Le troisième chapitre** établie une synthèse des travaux sur l'ordonnancement conjoint de production et de maintenance. Nous énumérons les insuffisances recensées dans ces travaux à travers nos différentes discussions

Nos contributions sont présentées dans **la deuxième partie** du manuscrit. A travers trois chapitres, nous présentons nos propositions pour remédier aux insuffisances recensées dans le domaine des ordonnancements conjoints de production et de maintenance :

– Dans **le quatrième chapitre**, nous présentons une approche réactive d'ordonnancement conjoint de production et de maintenance. Nous traitons le cas d'insertion d'une maintenance conditionnelle dans un ordonnancement conjoint en cours d'exécution.

– Nous proposons dans **le cinquième chapitre**, une approche proactive-réactive pour la génération d'ordonnancements conjoint de production et de maintenance. Nous prenons en compte à travers les deux étapes (proactive et réactive) un certain nombre d'incertitudes relatives aux ateliers de production.

– Nous clôturons nos contributions par la présentation dans **le sixième chapitre** d'une plateforme multi-agents pour le développement et le test des solutions d'ordonnancement. Cette plateforme est utile pour accélérer et faciliter les tests de performance que nous devons effectuer sur n'importe quelle solution proposée.

Nous terminons cette thèse par une conclusion générale sur le travail effectué ainsi que nos perspectives de recherche. A la fin de ce document, nous retrouvons une bibliographie contenant les principales références que nous avons utilisées.

Première partie

Contexte Général & Problématiques

Bien évidemment les premiers chapitres de n'importe quelle thèse doivent être dédiés au contexte de l'étude afin de permettre d'un côté à l'auteur de positionner son travail et de l'autre côté permettre aux lecteurs de comprendre les concepts qui seront manipulés plus loin dans les contributions proposées.

Le domaine de l'ordonnancement conjoint de production et de maintenance est un domaine assez complexe car il considère simultanément les deux activités de production et de maintenance avec toutes leurs contraintes. Malheureusement la plupart des solutions proposées jusqu'à présent ne font que simplifier le problème et proposent de ce fait, des solutions irréalistes et malheureusement souvent inapplicables.

A travers cette première partie, nous avons essayé de recenser les insuffisances existantes dans les travaux proposés et cela après avoir étudié chacune des activités de production et de maintenance séparément. Par voie de conséquence, nous présenterons dans cette partie trois chapitres. Le premier chapitre est dédié à l'ordonnancement de la production de manière générale, le second est dédié aux ordonnancements de production sous incertitudes. Quant au troisième chapitre, il traitera l'activité de maintenance et les ordonnancements conjoints de production et de maintenance. Ce dernier chapitre se terminera par une discussion générale des points de vue soumis.

Dans le premier chapitre, nous positionnons l'activité d'ordonnancement de production au sein des entreprises manufacturières et nous présentons les approches de résolutions proposées jusqu'ici pour la résoudre. En effet, l'ordonnancement de production n'est pas isolé, il influence et est influencé par les activités qui lui sont adjacentes. Pour proposer des solutions intéressantes, réalistes et applicables, les concepteurs de solutions doivent tenir compte des données provenant des différentes activités adjacentes. Dans cet objectif, deux types de jointures existent dans la littérature: (1) l'ordonnancement et la planification de production intégrés et (2) l'ordonnancement conjoint de production et de maintenance.

En ce qui concerne les approches de résolution proposées, nous avons remarqué que leur évolution est guidée par une recherche permanente de solutions de plus en plus applicables s'éloignant de la sorte des solutions théoriques simplistes. A notre avis, ces approches ont évolué selon trois axes : (1) Elles sont passées d'un côté des méthodes d'optimisation exactes; recommandées pour des problèmes de petites tailles; aux méthodes d'optimisation approchées applicables pour des ateliers multi-machines ; (2) D'un deuxième côté, elles sont passées de l'ordonnancement seul de la production à des ordonnancement intégrant d'autres activités adjacentes ; (3) Enfin, elles sont passées des ordonnancements déterministes supposant des données parfaitement connues, stables et exactes aux ordonnancements sous-incertitudes prenant en compte les imperfections des données et les évènements imprévus.

Le deuxième chapitre sera dédié aux travaux portant sur les ordonnancements sous-incertitudes. Ces derniers proposent des solutions permettant de cerner les différentes imperfections et changements

des données du problème d'ordonnancement. Ils proposent de prendre en compte les incertitudes des données dans deux phases : (1) la phase proactive (hors-ligne) avant le lancement de l'ordonnancement et/ou (2) la phase réactive (en-ligne) durant l'exécution du plan d'ordonnancement établi.

Le troisième chapitre traitera en détail la fonction *Maintenance*. Notre objectif est de pouvoir proposer des ordonnancements conjoints de production et de maintenance les plus près possible de la réalité des ateliers de production.

Malheureusement, les activités de maintenance se font dans leur grande majorité manuellement faisant intervenir des opérateurs humains avec différentes compétences et performances. L'affectation des opérateurs aux activités de maintenance influe directement sur les durées opératoires de ces dernières. Par voie de conséquence, les temps opératoires ne peuvent pas être ni fixés ni connus sans affectation des ressources humaines. De plus, la planification des activités de maintenance doit prendre en compte la disponibilité des ressources humaines qui vont les exécuter. Ainsi, afin de proposer des ordonnancements de maintenance réalisables, il faut que toutes les ressources nécessaires à l'exécution des activités de maintenance (les opérateurs, l'outillage, les documents, les pièces de rechange) soient prêtes au moment prévu.

Cependant, force est de constater que les ordonnancements conjoints de production et de maintenance tels qu'ils sont proposés actuellement ne considèrent que les fenêtres temporelles des activités de maintenance comme variables de décision. Ils ne se soucient pas de leur faisabilité. Ils agencent les tâches de production et de maintenance afin d'optimiser un ou plusieurs objectifs mais ne prennent pas en compte explicitement les contraintes liées aux ressources humaines qui vont les exécuter.

Une autre insuffisance réside dans le fait que les incertitudes ne sont pas traitées dans les ordonnancements conjoints de production et de maintenance alors que le but de ces derniers dès le début était de proposer des ordonnancements proches de la réalité des ateliers de production. Les incertitudes des deux activités doivent être simultanément et impérativement prises en compte.

Tous nos points de vue seront expliqués et justifiés dans les trois chapitres composant cette première partie.

Chapitre 1

Ordonnancement de production : Entre solutions théoriques et recherche d'applicabilité

L'ordonnancement est une activité très importante au sein des ateliers de production vue qu'elle a un impact direct sur la compétitivité des entreprises manufacturières. Ces dernières doivent répondre aux exigences du marché en termes de délais de réalisation, qualité et diversité de produits. L'environnement économique et manufacturier étant très dynamique, ces entreprises doivent être dotées de systèmes de gestion réactif et donc flexible afin d'assurer une souplesse dans la prise de décision aussi bien au niveau stratégique, tactique qu'opérationnel. Cette propriété de flexibilité a fait naître ce qui est connu sous le nom de Systèmes Manufacturiers Flexibles (FMS). Un FMS représente toute entreprise de production capable de réagir aux évènements de son environnement avec un minimum d'effort et de coût toute en restant performante.

Le caractère multi-objectif de l'ordonnancement est reconnu depuis longtemps, mais il est rarement admis que d'autres fonctions que la production devrait y participer malgré l'existence d'activités qui lui sont adjacentes telles que la planification et la maintenance. Ces dernières lui sont intimement liées et influent sur ses données et donc sur ses résultats. Beaucoup de travaux proposent des solutions intégrées notamment ordonnancement-planification de production et ordonnancement de production et de maintenance. En effet, ces ordonnancements intégrés permettent la proposition de solutions réalistes et donc applicables ce qui a poussé un grand nombre de chercheurs à s'investir dans cet axe de recherche et de proposer des solutions intégrées intéressantes.

Dans ce chapitre et en premier lieu, nous positionnons l'activité d'ordonnancement dans le système de gestion de production afin de déterminer ses liens avec les autres activités. Nous présenterons aussi les FMS qui constituent une mutation nécessaire des systèmes manufacturiers en réponse au dynamisme de l'environnement. En deuxième lieu, nous présenterons l'évolution des solutions d'ordonnancement selon trois axes : *approche de résolution*, *intégration d'activités adjacentes* et *incertitudes des données*.

1. Positionnement de l'ordonnancement dans la gestion de production

Un système de production est une organisation de personnes, de machines, d'outils et de tout autre composant, qui servent à transformer des matières premières en produits finis, destinés à la consommation de clients finaux [GomezUrruta, 2014].

La gestion de production regroupe un ensemble de décisions qui permettent une organisation efficace des moyens de production dans une entreprise. Elles peuvent être:

– *Stratégiques* introduisant des orientations durables de l'entreprise sur un horizon long terme. Cette catégorie regroupe, par exemple, les décisions concernant l'implantation de nouvelles unités de production, la conception d'une nouvelle ligne de production, les décisions portant sur de nouvelles orientations en termes de produits ou de marchés.

- *Tactiques,* concernent la mise en œuvre et l'adaptation des décisions prises au niveau stratégique sur une période plus courte. Elles concernent particulièrement la planification mensuelle des flux matières tout au long de la chaîne logistique (approvisionnements, production, stockage, distribution) et la gestion des ressources en hommes et équipements.
- *Opérationnelles* qui mettent en application le plan d'actions prévu par le niveau tactique. Ce sont les décisions qui concernent les actions à court terme.

Nous nous intéressons dans notre travail aux décisions opérationnelles et nous traitons principalement l'activité d'ordonnancement. Cette activité n'est pas isolée, elle fait partie des cinq activités ou phases essentielles de réalisation des produits qui sont la planification, la programmation, l'ordonnancement, et le pilotage (Figure 1.1).

Les activités de planification, de programmation et d'ordonnancement génèrent ce qui est appelé le plan prévisionnel. C'est-à-dire un plan hors-ligne avant la phase d'exécution des ordres de fabrication (OF). Quant à l'activité de pilotage (conduite et commande) son rôle est d'exécuter les OFs tout en gérant les évènements qui peuvent surgir au cours du processus de production.

1.1. La planification

La planification de la production se décline sur les trois niveaux de décision. Au niveau opérationnel, elle établit le plan directeur de production (PDP) qui consiste à spécifier les ressources et les opérations requises pour la réalisation des travaux de production. La sortie de cette activité est l'identification des types de machines et des outils nécessaires pour l'exécution de chaque job et le séquencement des opérations qui le composent. Le séquencement consiste à déterminer l'ordre dans lequel les différentes sous-tâches ou les différents produits passeront sur une ressource ou un groupe de ressources.

Elle établit un programme prévisionnel de production atelier par atelier, à capacité infinie ou suivant une charge globale admissible par l'atelier. Ce programme prend en compte les besoins dépendants et indépendants et calcule des besoins nets en fonction des stocks, des encours, des tailles des lots de fabrication et des taux de rebut.

Les approches les plus classiques de planification sont le MRP (Material Requirements Planning) [Orlicky, 1975] et le MRPII (Manufacturing Resource Planning) [Vob *et al.*, 2006]. Le MRP permet de calculer les besoins en composants sans capacité tandis que le MRPII intègre un système ajustant les niveaux de capacité. Cependant, les logiciels basés sur ces deux pproches ne permettaient pas une gestion efficace lorsque l'organisation dispose de multiples unités de production dispersées. La gestion de la chaîne logistique implique de pouvoir intégrer l'ensemble des informations nécessaires à une planification globale. Plusieurs inconvénients de ces systèmes ont été résolus par la mise en place des ERP (Enterprise Resource Planning ou encore PGI pour Progiciels de Gestion Intégrée) [Monk, 2005]. Ces logiciels intègrent les principales fonctions nécessaires à la gestion des flux et des procédures de l'entreprise (comptabilité, finances, ressources humaines, etc.). Ils se substituent aux systèmes de GPAO (systèmes de gestion de production assistée par ordinateur) en répondant à la problématique d'intégrité et de synchronisation des informations de l'entreprise. L'inconvénient de tels systèmes réside dans la prise en compte séquentielle des besoins puis des capacités des ressources.

1.2. L'ordonnancement

Ordonnancer, c'est programmer dans le temps l'exécution des tâches à réaliser sur une ressource particulière (une machine) ou un groupe de ressources. L'ordonnancement fournit donc un calendrier

d'organisation du travail pour l'atelier fixant les dates de début et de fin de chaque tâche. L'objectif est de réaliser les ordres de fabrication (OF) du programme prévisionnel tout en cherchant à optimiser l'utilisation des moyens de production en termes de charge, d'encours, etc. Nous présenterons cette activité plus en détail dans la section 2 puisque c'est le cœur de notre travail.

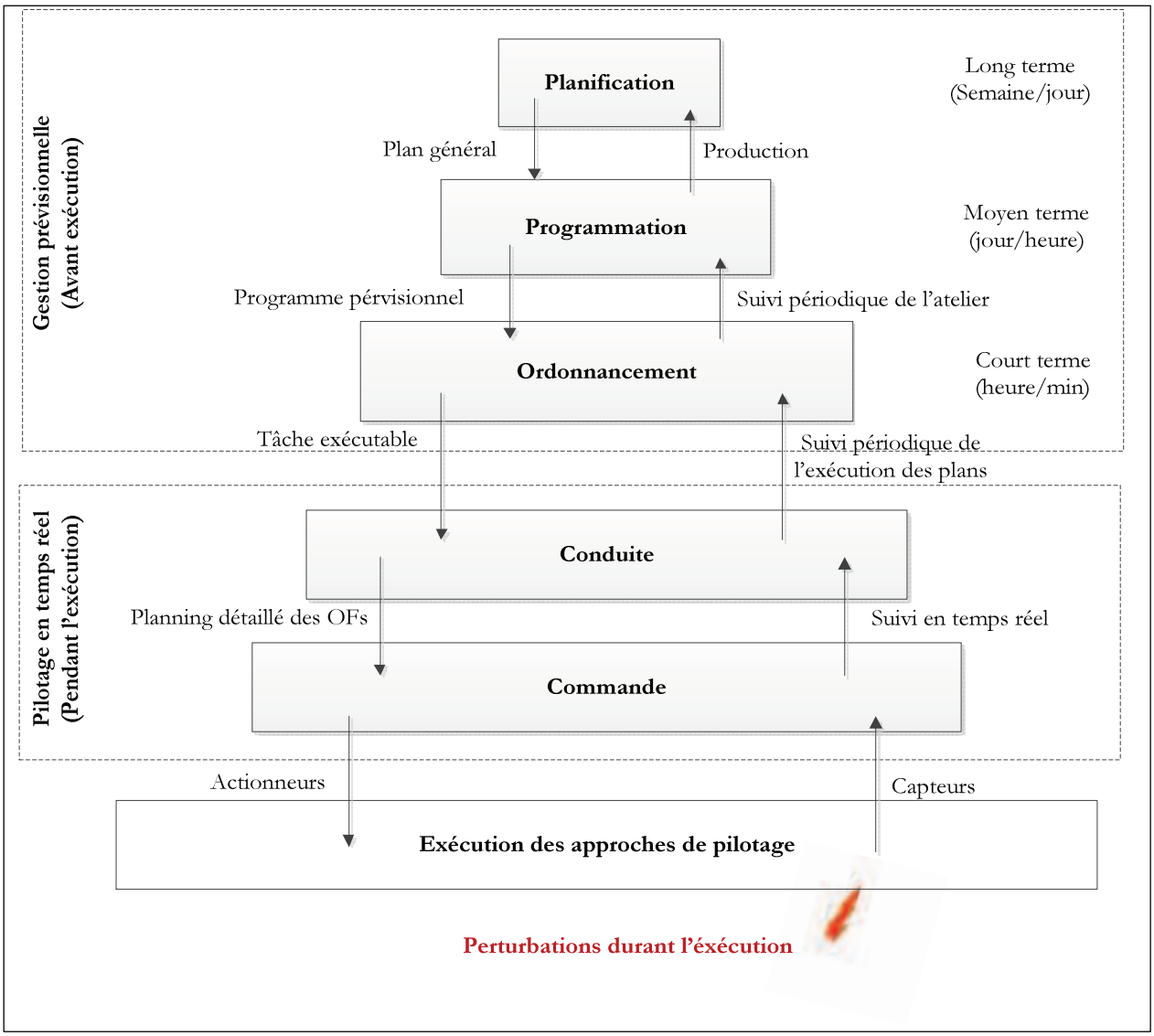

Figure 1.1. Les activités du système de production

1.3. Le pilotage

[Trentesaux, 1996] définit le pilotage comme « la structure de décision et d'information associée à la gestion en temps réel ». Ce pilotage comprend deux sous-fonctions liées par une boucle rétroactive :

(i) *la conduite*, la fonction décisionnelle qui donne les ordres ;

(ii) *la commande qui* exécute les ordres décidés par la conduite et lui retourne les données de suivi.

Le pilotage constitue la fonction charnière entre la gestion prévisionnelle et la gestion temps réel du système de production. Le paramètre temps et la rapidité de réponse sont primordiaux dans cette phase.

Lorsque le système n'est pas perturbé, les phases s'enchaînent les unes après les autres. En cas de perturbation interne ou externe, la réponse aux événements va dépendre de l'amplitude de cette perturbation. Le système est dit *réactif* s'il peut traiter les événements perturbateurs dans les dernières phases (conduite et commande).

1.3.1. La conduite

La phase de conduite est chargée de réaliser les tâches de production prévues par l'ordonnancement. Dans la plupart du temps, l'activité d'ordonnancement fournit une solution qui n'est pas toujours «réalisable » au niveau du pilotage. Une des raisons de cet écart réside dans la supposition du déterminisme des données manipulées. Malheureusement, les ateliers sont loin de la supposition de « zéro perturbations ». Des évènements peuvent rendre les données de départ obsolètes et rendre de ce fait l'ordonnancement généré inapplicable.

Cette phase doit régler tous les problèmes non résolus par le niveau prévisionnel. Elle doit aussi prendre en compte l'ensemble des contraintes de fabrication (contrôles de qualité, arrêts liés à la maintenance, etc.), les problèmes posés par les opérateurs (niveau de qualification, compétences, défection, etc.) et réagir aux aléas pour que la production prévue soit possible. De ce fait, l'état réel du système productif n'est parfaitement connu qu'à l'instant du lancement réel des tâches.

1.3.2. La commande

Ce niveau, directement en relation avec le système de production, a un rôle d'interface et d'interpréteur. Sa tâche essentielle est de traduire un ordre en une séquence d'instructions compréhensibles par la partie opérative. Il est concrétisé soit par un opérateur pilotant une machine et assurant le suivi de réalisation, soit par un automatisme capable d'interpréter un ordre et de renseigner la conduite sur l'état d'avancement de celui-ci.

2. Présentation du problème d'ordonnancement de la production

Dans cette section, nous présentons le problème d'ordonnancement de la production, ses typologies, sa modélisation et sa complexité.

2.1. Définition

D'après notre revue de la littérature, nous avons recensé plusieurs définitions données au problème d'ordonnancement. Selon que les auteurs considèrent que l'ordonnancement ne définit que les fenêtres temporelles des tâches comme dans [Pinedo, 1995] [Briand *et al.*, 2010] [Carlier *et al.*, 1988], i.e, la date de début et de fin de chacune d'elles. Ou bien, en plus de ces intervalles, y intégrer l'activité de programmation c'est-à-dire l'allocation des tâches aux ressources matérielles comme dans [BenHmida-Sakli, 2009] qui l'appelle *ordonnancement flexible*.

Dans notre travail, nous adoptons la définition classique de [Pinedo, 1995] qui considère que l'ordonnancement est le fait d'organiser dans le temps la réalisation d'un ensemble de tâches, compte tenu de contraintes temporelles (délais, contraintes d'enchaînement, etc.) et de contraintes portant sur l'utilisation et la disponibilité des ressources requises par les tâches.

Résoudre un problème d'ordonnancement, revient donc à choisir pour chaque tâche une date de début et de fin, de telle sorte que les contraintes du problème soient respectées. La solution est alors

dite *admissible*. Si un ou plusieurs critères donnés sont optimisés, la solution est alors dite *optimale*. Un ordonnancement[2] est la solution au problème d'ordonnancement.

2.1.1. Les travaux

Chaque travail T_i est caractérisée par (figure 1.2): sa date de disponibilité r_i, sa date de début d'exécution t_i, sa durée opératoire p_i, sa date de fin d'exécution effective c_i et sa date d'échéance (date limite de fin d'exécution) d_i.

Pour son exécution, chaque travail a besoin d'une ressource matérielle ou humaine.

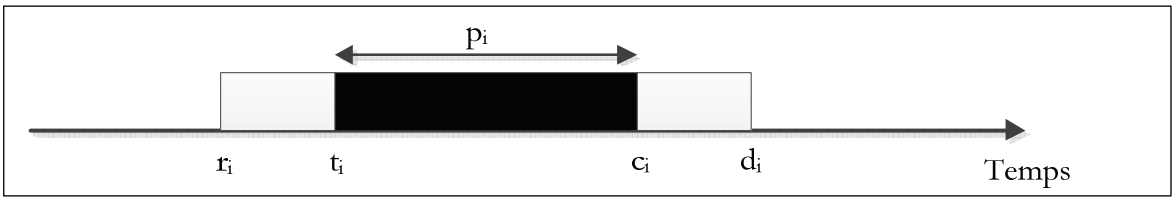

Figure 1.2. Caractéristiques d'une tâche de production

2.1.2. Les ressources

Une ressource est tout moyen *humain* ou *matériel* nécessaire à la réalisation des tâches.

- *Les ressources matérielles* représentent tout bien, élément, composant, système, dispositif ou unité fonctionnelle que nous pouvons considérer individuellement. Une ressource matérielle peut être décrite selon trois principaux états [AFNOR, 2002] :

– *État de disponibilité*. La ressource est apte à accomplir la fonction requise sans être en fonctionnement.

– *Etat de panne*. Etat caractérisé par une inaptitude de l'équipement à accomplir cette fonction.

– *État de fonctionnement*. Etat au cours duquel l'équipement accomplit la fonction requise.

Suivant le nombre et l'agencement des ressources matérielles, différents types d'ateliers peuvent être identifiés (figure 1.7). La section 2.2 présente la typologie des ateliers existants et les problèmes d'ordonnancement auxquels ils sont liés.

- Au cœur de n'importe quelle organisation, il y a le *Capital humain*. *Les ressources humaines* ont pour objectif d'apporter à l'entreprise le personnel nécessaire à son bon fonctionnement. Ceci implique donc, de lui assurer le nombre suffisant, mais aussi compétent et motivé pour une organisation efficace. La présence des ressources humaines dans les ateliers de production est indispensable. En effet, même si les tâches de production sont dans la plupart des cas automatisées, leur présence est nécessaire pour le contrôle et la continuité du processus de production. En revanche, elles interviennent beaucoup plus pour l'exécution des activités de maintenance. Assurément, ces dernières sont dans la plupart des cas manuelles et impossibles à automatiser. Le chapitre 3 consacre toute la section 3 à l'étude de l'importance de la présence des ressources humaines dans les ateliers de production.

2.1.3. Les contraintes

Une contrainte exprime des restrictions sur les valeurs que peuvent prendre conjointement les variables représentant les relations reliant les tâches et les ressources. Nous distinguons les contraintes liées aux tâches qui sont essentiellement temporelles et les contraintes liées aux ressources.

- **Les contraintes liées aux tâches** intègrent

– *Les contraintes d'antériorité.* Dans la plupart du temps, les tâches de production ne sont pas indépendantes. Elles sont liées et leurs liens définissent ce qui est appelé *« les contraintes de précédence »*. Elles décrivent le positionnement relatif de certaines tâches par rapport à d'autres.

– *Les contraintes d'exécution* intègrent les contraintes de temps alloué, issues généralement d'impératifs de gestion et relatives aux dates limites des tâches (délais de livraison, disponibilité des approvisionnements), ou encore les contraintes de calendrier liées au respect des horaires du travail.

- **Les contraintes liées aux ressources** traduisent le fait que les ressources sont disponibles en quantité limitée. Une ressource *disjonctive* ne peut être utilisée que par une tâche à la fois. Par contre avec une ressource *cumulative* plusieurs tâches peuvent être exécutées simultanément.

2.1.4. Les critères d'optimisation ou les fonctions objectif

Les critères utilisés pour mesurer la qualité d'une solution d'ordonnancement peuvent être nombreux et parfois même contradictoires. Les critères purement économiques (coût, profit) ne sont pas adaptés dans le cas du très court terme. Par conséquent, ce sont les critères d'efficacité organisationnelle (respect des délais, quantité d'encours, etc.) qui sont plutôt utilisés pour l'optimisation des problèmes d'ordonnancement [Kacem *et al.*, 2002][Xia *et al.,* 2005].

Le tableau 1.1 présente les critères les plus répandus. Ces critères sont utilisés pour pouvoir différencier entre les multiples solutions d'ordonnancement proposées. Un ordonnancement est dit optimal s'il optimise un ou plusieurs critères. Une résolution est dite *mono-objectif* si elle ne cherche à optimiser qu'un seul critère, elle est *multi-objectifs* sinon.

Tableau 1.1. Les critères d'optimisation

Critères	La mesure	Maximum	Moyenne	Somme Pondérée
La fin du traitement	C_i	$C_{max} = \max_{i=1,n} C_i$	$C' = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} C_i$	$C'_w = \sum_{i=1}^{n} w_i C_i$
Le retard algébrique	$L_i = C_i - d_i$	$L_{max} = \max_{i=1,n} L_i$	$L' = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} L_i$	$L'_w = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} w_i L_i$
Le retard absolu	$T_i = \max(0, C_i - d_i)$	$T_{max} = \max_{i=1,n} T_i$	$T' = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} T_i$	$T'_w = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} w_i T_i$
L'avance	$E_i = \max(0, C_i - d_i)$	$E_{max} = \max_{i=1,n} E_i$	$E' = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} E_i$	$E'_w = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} w_i E_i$
La durée de séjour	$F_i = C_i - r_i$	$F_{max} = \max_{i=1,n} F_i$	$F' = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} F_i$	$F'_w = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} w_i F_i$
La pénalité unitaire de retard	$U_i = 0$ si $C_i \leq d_i$, $U_i = 1$ sinon		$U' = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} U_i$	$U'_w = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} w_i U_i$

2.2. Typologie des problèmes d'ordonnancement des ateliers de production

Les différents problèmes rencontrés en ordonnancement dépendent principalement du nombre de machines, leur types et de l'enchaînement des tâches.

2.2.1. Problème à machine unique

Dans ce cas, l'ensemble des travaux à réaliser est exécuté par une seule machine. Ces travaux sont composés d'une seule tâche qui nécessite l'utilisation de la même machine (figure 1.3).

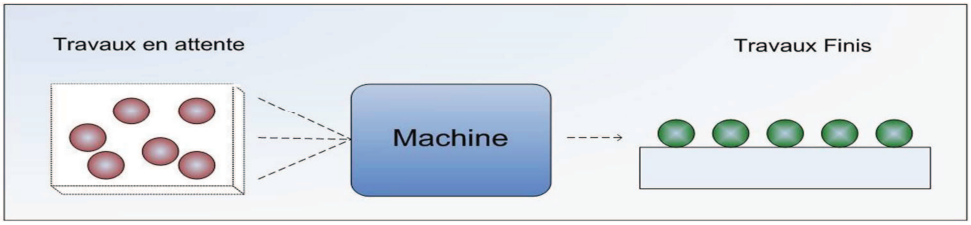

Figure 1.3. Atelier à machine unique

La machine ne peut désormais exercer le traitement que d'un travail à un instant donné. Ainsi, le problème consiste à déterminer la séquence optimale de passage de *n* travaux sur la machine afin d'obtenir des résultats au regard d'un critère donné.

Malgré que ce type de problème soit toujours considéré comme peu fréquent vu que c'est rare de trouver une seule machine dans l'atelier. En pratique, les problèmes sont souvent complexes et peuvent suivant le cas être simplifiés par une décomposition en problèmes à une machine. Dans ce cas, la résolution des problèmes est proposée par rapport à la machine la plus critique (présentant un goulet d'étranglement par exemple). Les résultats ainsi obtenus pourront servir de base à la construction d'ordonnancements complets faisant intervenir toutes les machines.

2.2.2. Problème à machines parallèles

Il s'agit de la généralisation du problème à machine unique. L'atelier est composé de machines parallèles où chaque travail peut être exécuté sur une machine à sélectionner dans l'ensemble des machines considérées (figure 1.4).

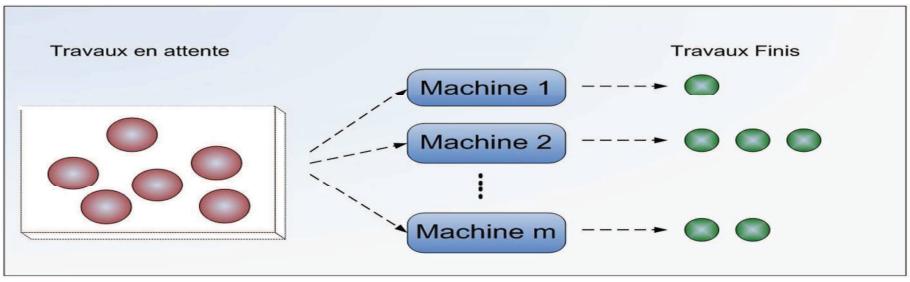

Figure 1.4. Atelier à machines parallèles

Les machines parallèles peuvent être identiques, uniformes ou indépendantes:

- *elles sont identiques* si elles ont les mêmes vitesses d'exécution des travaux.
- *les machines uniformes* ont des vitesses constantes (elles ne dépendent pas de la tâche à réaliser). Si la durée opératoire d'un travail est p_i alors le temps demandé sur la machine j est p_i/S_j où S_j est la vitesse de traitement de la machine j.
- les vitesses des *machines indépendantes* dépendent du travail à réaliser et sont différentes.

2.2.3. Problème d'ateliers multi-machines

Dans les ateliers vus précédemment, les tâches ne sont composées que d'une seule opération. Toutefois, en pratique, les tâches peuvent requérir une succession d'étapes de traitement sur différentes machines. Nous parlons dans ce cas de problèmes d'atelier multi-machines.

Les ateliers considérés ici sont composés d'un ensemble de *m* machines sur lesquelles doivent être réalisés des travaux. Chacun de ces travaux peut être décomposé en sous-tâches. Ce sont les

opérations réalisées successivement sur les différentes machines. Chaque machine à une spécificité, et ne peut donc, à elle seule, réaliser l'ensemble des opérations.

Suivant les secteurs d'activités et le type de produits réalisés, les ateliers multi-machines peuvent être organisés de différentes manières (figure. 1.7):

- *Atelier flow-shop:* Il assure une production en ligne (figure 1.5). Dans ce genre d'ateliers, un seul type, ou très peu de types d'articles sont produits. Tous les produits suivent un chemin précis et visitent les mêmes machines. C'est le cas des produits alimentaires par exemple.

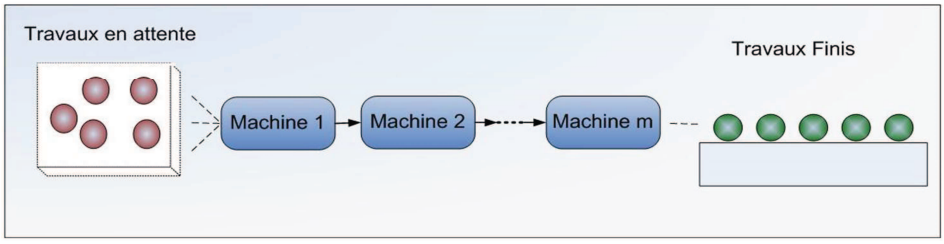

Figure 1.5. Atelier à cheminement unique ou Flow-shop

- *Atelier job-shop:* A l'inverse, un job-shop se caractérise souvent par une grande variété de produits (adaptés aux exigences spécifiques de chaque client). L'atelier est divisé en départements, chacun de ces derniers réalise une fonction précise (ex: soudage, fraisage, etc.) (figure 1.6).

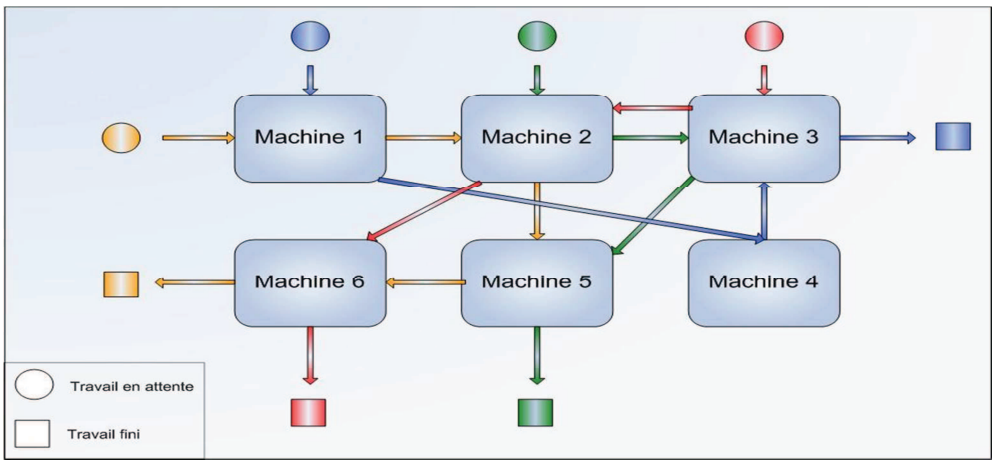

Figure 1.6. Exemple d'ateliers à cheminement multiples (Job-shop)

- *Atelier open shop*: Ces ateliers n'ont pas une stratégie d'organisation définie.

- *Fixed site*: Dans ce type d'ateliers comme le cas de l'industrie aéronautique, le produit est fixé dans un endroit et ce sont les équipements qui le visitent.

La figure 1.7 [Billault, 1999] illustre les différents problèmes d'ordonnancement des ateliers de production et les différents liens qui existent entre eux.

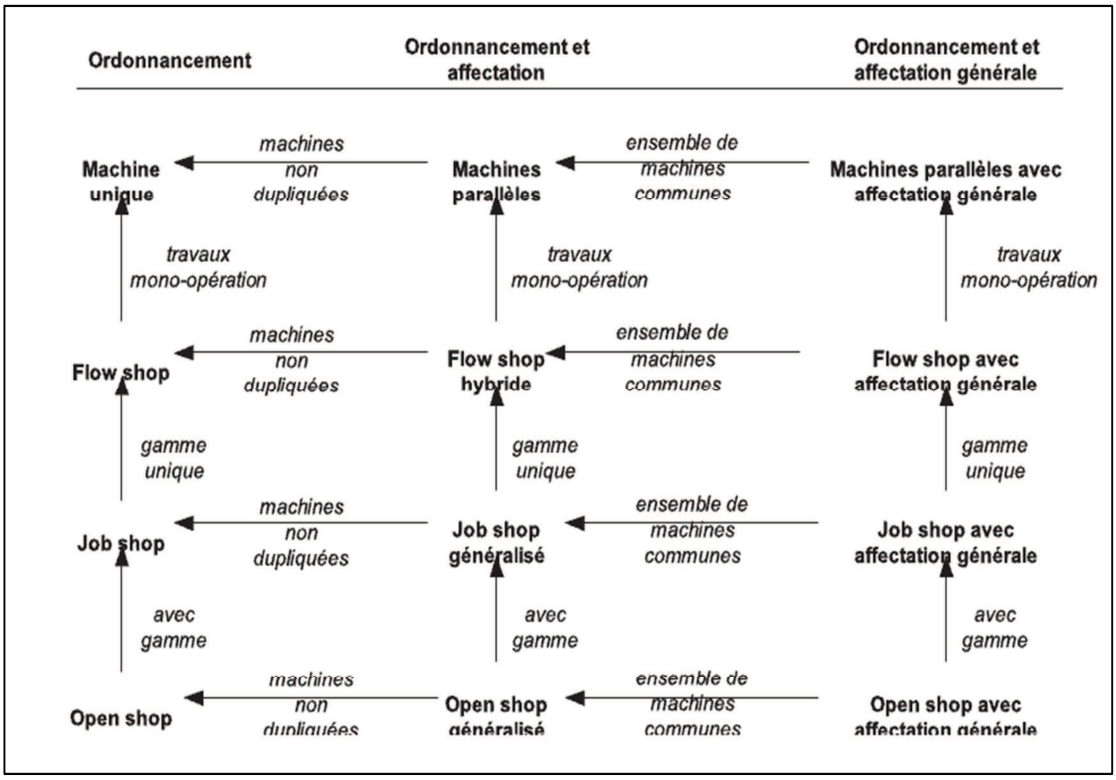

Figure 1.7. Typologie des ateliers de production [Billaut, 1999]

2.3. Modélisation et complexité du problème d'ordonnancement de production

La modélisation d'un problème d'ordonnancement passe par la spécification des travaux et leurs caractéristiques, des ressources et des critères à optimiser. Toutes ces données peuvent être représentées par la notation à trois champs $\alpha/\beta/\gamma$ introduite par [Graham *et al.*, 1979] et reprise par [Blazewicz *et al.*, 1996]. Quelques extensions ont été introduites, dont celle donnée pour les problèmes d'ordonnancement multi-critères [T'Kindt, 1999]. Les principales valeurs des champs α, β, γ sont décrites dans le tableau 1.2.

- *Le champ a* se divise en deux sous champs concaténés α_1 et α_2. Le champ α_2 ; optionnel ; indique le nombre de machines dans le problème. Si ce champ est vide, le nombre de machines est une variable du problème. Le champ α_1 donne une catégorie du problème en fonction du type de l'atelier étudié.
- *Le champ β* permet de décrire les contraintes du problème. Il est constitué d'une suite de sous champs séparés par des virgules.
- *Le champ γ* décrit l'objectif à optimiser.

Tableau 1.2: Les valeurs possibles des champs α_1, β, γ

Champ	Valeur	Descriptif
α_1	Φ	Machine unique, la valeur du champ est alors « 1 »
	P	Machines parallèles identiques
	Q	Machines parallèles uniformes
	R	Machines parallèles indépendantes (non reliées)
	F	Les machines dédiées fonctionnent en flow-shop
	J	Les machines dédiées fonctionnent en job-shop
	O	Les machines dédiées fonctionnent en open shop
	FH	Flow-shop hybride
β	Pmtn	Autorisation de préemption des travaux
	Prec	Existence de contraintes de précédence entre les travaux
	r_i	Une date de disponibilité est associée à chaque travail T_i
	d_i	Une date d'échéance est associée à chaque travail T_i
	$\tilde{d}_i$	Les opérations ont des dates de fin impératives
γ	Cmax	La date de fin de traitement (makespan)
	Tmax	Le retard absolu

La complexité des problèmes d'ordonnancement est définie suivant la complexité des méthodes de résolution et celle des algorithmes utilisés [Garey *et al.*, 1979][Carlier, 1984][Carlier *et al.*, 1988][Charon *et al.*, 1996]. Certains problèmes d'ordonnancement de taille relativement importante peuvent avoir un niveau de complexité si important que leur résolution devient très difficile. Il a été démontré que la plupart des problèmes d'ordonnancement sont difficiles [Lopez *et al.*, 2001].

3. Les Systèmes manufacturiers flexibles

Le monde hautement concurrentiel d'aujourd'hui exige des niveaux élevés de productivité et une capacité d'adaptation aux changements. Par conséquent, les entreprises augmentent les niveaux de flexibilité dans leurs systèmes de production. Les systèmes de production possédant la propriété de flexibilité sont appelés *les systèmes de fabrication flexibles* (FMS pour Flexible Manufacturing Systems).

3.1. Définition de la flexibilité

La flexibilité dans la production est définie comme « la capacité de changer ou de réagir avec peu d'effort et de coût tout en restant performant » [Upton, 1994]. Plus le système manufacturier est flexible, faible est l'impact des changements de l'environnement sur son organisation. Cette définition est multidimensionnelle et peut recouvrir trois éléments économiquement pertinents : l'ensemble de choix offert à la l'entreprise, la vitesse de réaction de l'entreprise à un changement dans son environnement et le faible coût d'une modification de ses choix initiaux. Ces trois dimensions participent conjointement à la définition de la flexibilité sans être réductibles l'une par rapport à l'autre [Armel, 2003].

Pour être flexible, un système de production doit posséder les trois propriétés suivantes :

- L'identification rapide des unités de production aptes à réaliser correctement une opération donnée.

- Le passage rapide d'un mode de production basé sur les instructions à une production contrôlée par ordinateur.
- La Modification rapide des configurations des appareils, des outils et des autres unités de travail.

Ces capacités sont souvent difficiles à concevoir dans les systèmes de production basée sur un contrôle manuel des ressources de production. Ainsi, un système automatisé de contrôle est nécessaire. Il est constitué de capteurs placés sur les machines afin d'avoir un contrôle instantané de leurs états et aussi permettre l'envoi des instructions de production en temps réel. De ce fait, le terme système flexible de fabrication, ou FMS, se réfère à une cellule de machines hautement automatisée, composée de machine-outils à commande numérique (MOCN, ou implement CN). Lorsque la commande numérique est assurée par un ordinateur, elles sont appelées machines CNC (pour *computer numerical control).*

Par analogie, *la flexibilité de l'ordonnancement* est définie dans [Gotha, 2002] comme la liberté dont on dispose durant la phase de mise en œuvre de l'ordonnancement. Elle est vue comme l'existence de modifications possibles au sein d'un ordonnancement statique (calculé hors-ligne) entraînant des pertes de performances restant acceptables ou nulles. Elle peut aussi être associée à l'existence d'une famille d'ordonnancements pouvant être acceptés à l'exécution, sans privilégier un ordonnancement en particulier.

En résumé, nous qualifions un ordonnancement comme *flexible*, s'il peut être modifié avant d'être exécuté ou au moment de son exécution de façon à prendre en compte les changements pouvant surgir dans l'environnement. Le but est de générer des solutions réalistes. Ces solutions sont appliquées à des données interprétant le réel état de l'environnement (disponibilité des machines, nombre de tâches, leur durées opératoires, etc.).

3.2. Type de flexibilité

Au cours de notre revue de la littérature, nous avons rencontré plusieurs classifications de la flexibilité. Nous considérons dans notre travail deux types selon le but de l'entreprise :

3.2.1. Etre flexible pour s'adapter aux exigences du marché

Cette catégorie concerne la flexibilité de la production. [Armel, 2003] distingue deux types de flexibilité de production:

– *La flexibilité du volume de production*, c'est-à-dire la capacité des entreprises à modifier rapidement le niveau de leur production en réponse aux fluctuations de la demande.

– *La flexibilité de la gamme de production*, c'est-à-dire la possibilité de changer rapidement le design des biens produits.

[Li *et al.,* 2010] identifient trois types de flexibilité de production :

– *la flexibilité des tâches:* la possibilité de réaliser une tâche par plusieurs machines,

– *la flexibilité de séquencement:* la possibilité de changer le séquencement des tâches,

– *la flexibilité de réalisation:* la possibilité de réalisation d'un produit de différentes manières en utilisant différentes machines ou différentes séquences de tâches.

3.2.2. Etre flexible pour être robuste

Dans cette catégorie, les FMS visent à assurer la propriété de *robustesse*. Cette caractéristique fournit au système l'aptitude à produire conformément aux résultats attendus. Cela suppose la garantie de l'obtention des performances souhaitées en présence d'imprévus dans le système.

Les concepts de flexibilité et de robustesse sont utilisés en ordonnancement de production pour mesurer la performance d'une solution par rapport à une autre. Un équipement n'est jamais fiable sur tout l'horizon de planification. Il s'agit dans ce cas de trouver un ordonnancement qui non seulement donne la meilleure performance à l'avance mais qui reste robuste et flexible à être modifié en cas d'arrivée de pannes par exemple.

Selon [Bertsimas *et al.*, 2004], le paradigme classique en programmation mathématique est de développer un modèle qui suppose que les données d'entrée sont connues et égales à leur valeur nominale. Cependant, cette approche ne prend pas en compte l'effet des incertitudes sur ces données ce qui influe sur la qualité et la faisabilité du modèle. Il est en effet possible que les valeurs des données diffèrent de leur valeur nominale, induisant ainsi le viol de plusieurs contraintes, et rendant la solution optimale trouvée à partir des valeurs nominales, de mauvaise qualité, voire infaisable. Cette constatation montre l'intérêt de concevoir des approches de résolution qui soient insensibles aux incertitudes, c'est-à-dire robustes.

[Hall *et al.,* 2004] définissent la robustesse d'une solution comme étant son insensibilité aux changements des paramètres.

En conclusion, la *robustesse* est définie comme étant la capacité d'une solution à rester optimale dans n'importe quel scénario et la *flexibilité* comme étant sa capacité à être modifiée le plus rapidement possible pour rester optimale après l'arrivée d'un événement incertain.

4. Modélisation des ateliers de production à base d'agents

Les agents sont des entités logicielles dotées suffisamment d'autonomie décisionnelle pour effectuer des tâches spécifiques avec peu ou pas de surveillance humaine [Galuszewska *et al.*, 2003]. Le paradigme multi-agents repose sur la répartition des connaissances et des capacités de raisonnement. Il permet la multiplicité des points de vue et des compétences dans des cadres distribués, coopératifs et évolutifs tels que les systèmes industriels.

La technologie agent répond aux différents besoins des systèmes manufacturiers et peut représenter un bon support pour leur modélisation. Dans un tel système, un agent définit un élément dans l'entreprise et assure le contrôle et la responsabilité sur des activités bien identifiées. Il peut être un agent artificiel (application, programme, automate, etc.), un acteur (machine, opérateur), un groupe d'acteurs (groupe de travail interne ou inter-entreprises, équipe de projet) ou une entité organisationnelle (service, division, direction, département, filiale, etc.).

Chaque agent joue un rôle dans l'entreprise. Ce rôle définit la fonction et la responsabilité assignée à l'agent pour l'exécution d'une tâche ou une activité. Le rôle de chaque agent nécessite des qualifications, des compétences et l'utilisation de ressources [Boughzala, 2001].

Les agents peuvent coopérer pour réaliser un but commun, coordonner leurs tâches pour assurer la cohérence de la totalité du système et enfin négocier pour avoir un accord commun qui respecte l'autonomie de chacun d'eux. Tous ces concepts sont assurés au moyen de la communication qui peut être directe (envoi de messages) ou indirecte (utilisation d'un tableau noir).

Plusieurs travaux ont été réalisés dans le contexte de la modélisation des systèmes manufacturiers. Ils proposent des architectures basées agents allant de la modélisation d'une ou deux activités de l'entreprise (ex: production, pilotage, service commercial,..) [Kouiss *et al.,* 1997] jusqu'à une architecture totale de l'entreprise basée agent [Aknine *et al.,* 2008]. Les concepts de co-tâche, coordination et de négociation offerts par les systèmes multi-agents (SMA) permettent aux agents d'agir en synergie tout en respectant l'autonomie de chacun d'eux. En conséquence, ils permettent d'avoir un comportement cohérent pour le système modélisé.

Beaucoup d'événements peuvent perturber le bon fonctionnement de l'atelier. Ils peuvent être internes, dû aux pannes machines ou aux exigences de refaire une ou plusieurs tâches. Comme ils peuvent être externes suite à un ordre supérieur de la gestion. Pour répondre rapidement à ces événements, les systèmes de pilotage des ateliers doivent être dotés d'outils d'aide à la décision. Ces derniers vont pouvoir trouver des solutions aux disfonctionnements engendrés par les événements sans avoir recours à l'intervention de la hiérarchie. Les SMA présentent un très bon support de modélisation pour ces systèmes d'aide à la décision. Leur réactivité et leur interactivité permettent à tout le système de trouver des solutions rapides et efficaces.

Dans [Briand et *al.,* 2010], les auteurs proposent un modèle de négociation pour déterminer les intervalles de réalisation des tâches (date au plutôt et date au plus tard) dans un job shop. Chaque agent est responsable de la réalisation d'un ensemble de tâches sur un ensemble de machines. Selon l'exemple de la figure 1.8, l'agent A_1 est responsable de la réalisation des tâches 1 et 3 tandis qu'A_3 est responsable de la réalisation des tâches 5, 7 et 8. Les tâches 3 et 5 sont dites frontières puisqu'elles sont liées par une relation de précédence (tâche 3<tâche5) et sont affectées à des agents différents (agent A_1 et agent A_3). C'est le cas aussi des tâches (3 et 6), (4 et 5) et (6 et 8). Les tâches 0 et 9 sont dites fictives, car elles annoncent respectivement le début et la fin de la production.

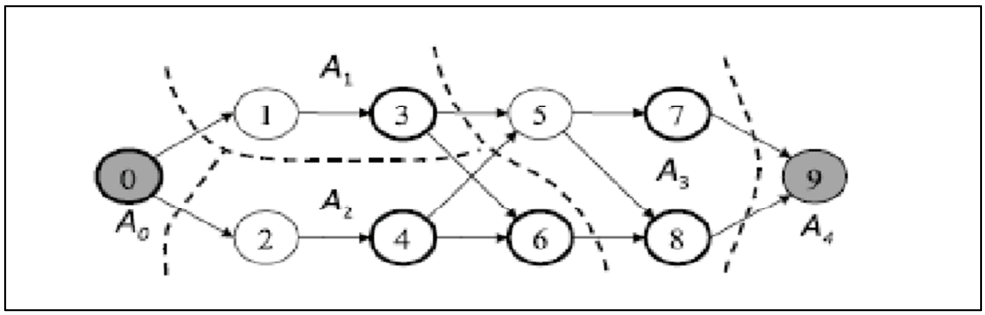

Figure 1.8. Un exemple de modélisation à base d'agents du problème d'ordonnancement

[Owliya *et al.,* 2010] proposent des modèles de négociation pour différents types d'ateliers basés agents. Chaque agent modélise une machine. La typologie des ateliers est fonction de l'organisation des agents ressources. Les auteurs adoptent à chaque fois le Contract Net Protocol (CNP) [Smith, 1980] au model du réseau inter-agents considéré : *Le model star, Le modèle peer-to-peer, le modèle anneau et le modèle anneau modifié.* Dans les ateliers considérés, les ressources sont en compétition sur les tâches à réaliser.

Afin d'avoir des solutions d'ordonnancement pour tout type d'ateliers et pour chaque état du système, [Li *et al.,* 2009] proposent de doter le système d'une bibliothèque ou seront sauvegardés des algorithmes d'ordonnancement. Une fois un ordonnancement est demandé, l'état du système ainsi que le problème d'ordonnancement sont formalisés. Après une recherche dans la bibliothèque, si une solution au problème est déjà prête, le système va l'utiliser. Sinon, il déduit un nouvel algorithme à partir des algorithmes existants qui sont plus proches de la configuration courante du système. Il l'intègre ensuite dans la bibliothèque pour d'éventuelles utilisations. L'architecture du système est

basée agent. Les auteurs définissent les différents agents utilisés et leurs rôles. Ils utilisent : (1) un *agent manager* pour la coordination inter-agents, gérer les conflits entre eux et garder trace des résultats intermédiaires. (2) Un *agent d'ordonnancement* qui construit la solution d'ordonnancement. (3) Un *agent cible* qui décrit les objectifs que l'ordonnancement doit optimiser. (4) Un *agent processus* qui fixe le temps d'exécution de l'ordonnancement en se basant sur les informations fournies par le service planification, enfin (5) *l'agent ressource* qui possède la description de l'état des ressources de l'atelier.

Dans [Lim *et al.,* 2009], Les auteurs proposent un modèle de négociation itératif basé agent pour résoudre le problème d'ordonnancement. Chaque travail est modélisé par un *agent_job* qui peut allouer les différentes opérations aux machines modélisées à leur tour par des *agents_machines*. L'agent job utilise une mesure appelée *Monnaie* pour inciter les agents machines à coopérer. C'est un paramètre de contrôle du processus de négociation affecté aléatoirement (Є[0, coût Max]) à chaque opération. Le coût maximum est fixé en se basant sur les expériences passées. Cependant la *Monnaie* ne représente rien dans l'algorithme. Ce sont des valeurs aléatoires représentant un coût de production et leur impact sur la convergence vers une solution n'est pas démontré.

Dans [Kouiss *et al.,* 1997], les auteurs traitent le problème d'allocation des travaux aux ressources (machines). Dans la pratique, cette allocation dépend de l'état de l'atelier (état des machines et leur disponibilité) et des objectifs de la production à optimiser. La solution la plus adaptée était d'utiliser les règles de priorité (section 5.1.2.a) comme : le plus court travail ou celui qui a la plus proche date de livraison. Les auteurs proposent une solution multi-agents au problème. L'idée est de ne pas avoir une seule règle de priorité pour l'ordonnancement de tous les travaux mais plutôt le choix de la règle de priorité dépend du travail et de l'état de l'atelier. L'agent superviseur contrôle et gère le système. Les autres agents gèrent les travaux au sein des Stations de Travail (ST) et peuvent communiquer entre eux (informations de type a) ou avec l'environnement (informations de type b). Une station de travail peut être composée d'une ou plusieurs machines. Chaque agent est libre de choisir la DR qui convient le plus à ses travaux. Ses critères de choix sont liés aux objectifs ciblés, à l'état de la station de travail (la taille de la file d'attente et la disponibilité des machines) et aux informations reçues des autres agents.

5. Résolution des problèmes d'ordonnancement de production : À la recherche de solutions applicables

Après avoir revu les travaux dans le domaine d'ordonnancement de la production, nous avons constaté que les approches proposées ont évolué selon plusieurs axes de recherche en vue d'obtenir des solutions qui répondent aux besoins réels des ateliers de production. Nous présenterons dans cette section trois principaux axes : (1) selon les méthodes de résolution adoptées (*exactes* ou *approchées*), (2) selon l'intégration ou non d'autres activités dans l'ordonnancement de production et (3) selon les caractéristiques de l'environnement étudié (*statique* ou *dynamique)*.

5.1. Selon l'approche de résolution adoptée : des méthodes exactes aux méthodes approchées

Les méthodes de résolution classiques se répartissent en deux grandes catégories : les méthodes exactes et les méthodes approchées (figure 1.9). Au vu du nombre important des travaux existants, nous nous focaliserons uniquement sur les grandes orientations de ces travaux sans les détailler.

5.1.1. Les méthodes exactes

Ces méthodes sont généralement utilisées pour résoudre des problèmes de petite taille où le nombre de combinaisons est suffisamment faible pour pouvoir explorer exhaustivement l'espace des solutions en un temps raisonnable. Ces méthodes assurent toujours l'optimalité de la solution trouvée. Elles garantissent donc la complétude de la résolution mais à coût élevé. Leur inconvénient majeur est le temps exponentiel de résolution qui croît en fonction de la taille du problème.

Parmi ces méthodes nous pouvons distinguer *les procédures par séparation et évaluation*, *la programmation linéaire* et *la programmation dynamique*.

Plusieurs travaux ont été réalisés en utilisant *les procédures par séparation et évaluation* [Lawler *et al.*, 1966]. Ces procédures se basent sur l'énumération de l'ensemble des solutions possibles pour un problème d'ordonnancement donné et déterminent quelle est la solution la plus optimale selon un certain critère. Il faut noter que l'analyse des propriétés du problème permet d'éviter l'énumération des classes considérées comme mauvaises solutions. Un bon algorithme de séparation et évaluation, énumère donc seulement les solutions potentiellement intéressantes. [Briand *et al.,* 2003] ont proposé une procédure par séparation et évaluation progressive (PSEP) pour l'ordonnancement robuste de problèmes à une machine.

La programmation linéaire [Dantzig, 1963] permet de modéliser les problèmes d'optimisation dans lesquels critères et contraintes sont des fonctions linéaires des variables. Les deux types d'algorithmes les plus importants pour traiter un programme linéaire à variables continues sont *la méthode du Simplex* [Dhand *et al.,* 2016] et *la méthode des points intérieurs* [Nesterov *et al.,*1995]. Leur inconvénient majeur réside dans le nombre important de variables et de contraintes nécessaires.

La programmation dynamique, proposée par [Bellmann, 1957], est un processus de décisions séquentiel qui permet d'établir une règle de prise de décisions telle que, pour chaque situation possible (état du système), elle détermine quelle décision (ou action) prendre dans le but d'optimiser une fonction objectif globale. Ceci permet de déduire la solution optimale d'un problème à partir d'une solution optimale d'un sous problème.

5.1.2. Les méthodes approchées

Contrairement aux méthodes exactes, les méthodes de résolution dites approchées ont pour objectif de déterminer une solution satisfaisante plutôt qu'optimale. La solution ainsi déterminée doit satisfaire un certain nombre de caractéristiques avec un coût calculatoire satisfaisant par rapport au cas d'application. Parmi ces approches, il existe les méthodes constructives, itératives et évolutives.

a. Les méthodes constructives : Dans le cadre des méthodes constructives, plusieurs classifications ont été présentées dans la littérature. Nous présentons ci-dessous la classification la plus rencontrée [Kaabi-Harrath, 2004]. Cette classification est construite autour des règles de priorité, des algorithmes gloutons, des méthodes de recherche locale et les méthodes de recherche arborescente tronquée.

Les règles de priorité sont généralement utilisées pour des classes réduites de problèmes d'ordonnancement [Trung, 2005]. Ces méthodes s'appuient entre autres sur les règles suivantes :

- SPT (Shortest Processing Time). Cette règle consiste à trier les tâches par rapport à leur durée opératoire croissante.
- WSPT (Weighted Shortest Processing Time). Cette règle consiste à trier les tâches par rapport à leur priorité croissante.

- EDD (Earliest Due Date). Cette règle consiste à trier les tâches par rapport à leur date de fin croissante.

Les algorithmes gloutons permettent de construire progressivement une solution en utilisant des règles de priorités simples (SPT, WSPT,..)[Levasseur *et al.*, 2007].

Les méthodes de recherche locale sont des méthodes qui visent à explorer un voisinage de solutions pour améliorer une solution initiale. Lors du déroulement de ces méthodes, il est possible que des solutions moins pertinentes soient admises afin d'obtenir de meilleures par la suite.

Les méthodes de recherche arborescente tronquée sont proches des Procédures de Séparation et d'Evaluation à la différence que l'arbre de recherche est volontairement réduit, même si cela peut faire passer à côté de solutions optimales dans un souci de rapidité [Levasseur *et al.,* 2008].

b. Les méthodes de trajectoire ou **de recherche par voisinage** sont **des algorithmes itératifs** qui explorent l'espace des solutions X en se déplaçant pas à pas d'une solution à une autre. Une méthode de ce type débute à partir d'une solution $s_0 \in X$ choisie arbitrairement ou obtenue par le biais d'une méthode constructive. Le passage d'une solution admissible à une autre se fait sur la base d'un ensemble de modifications élémentaires qu'il s'agit de définir de cas en cas. Le voisinage N(s) d'une solution $s \in X$ est défini comme l'ensemble des solutions admissibles atteignables depuis s en effectuant des modifications élémentaires. Les passages successifs d'une solution à une solution voisine définissent un chemin au travers de l'espace des solutions admissibles. Le processus d'exploration est interrompu lorsqu' un ou plusieurs critères d'arrêt sont satisfaits.

Les méthodes itératives ou de recherche locale diffèrent essentiellement par le système de voisinage utilisé et la stratégie de parcours du système de voisinage. Parmi les méthodes qui ont prouvé leur efficacité dans la résolution de problème d'optimisation combinatoire, nous pouvons citer les *méthodes ascendantes* et *descendantes* [Papadimitrou *et al.*, 1982], *le recuit simulé* [VanLaarhoven *et al.,* 1992] et *la recherche tabou* [Glover, 1986].

Le recuit simulé (SA - Simulated Annealing) a été introduit par [Kirkpatrik *et al.*, 1983] comme une méthode de recherche locale normale, utilisant une stratégie pour éviter les minima locaux. Il a été utilisé en ordonnancement de production dans plusieurs travaux [VanLaarhoven *et al.,* 1992][Dong *et al.,* 2015]. Le principe du recuit simulé est de parcourir de manière itérative l'espace des solutions. Partons d'une solution notée s_0 initialement générée de manière aléatoire dont correspondent une énergie initiale E_0, et une température initiale T_0 généralement élevée. A chaque itération de l'algorithme, un changement élémentaire est effectué sur la solution, cette modification fait varier l'énergie du système. Si cette variation est négative (la nouvelle solution améliore la fonction objectif, et permet de diminuer l'énergie du système), elle est acceptée. Si la solution trouvée est moins bonne que la précédente alors elle sera acceptée avec une probabilité P.

La recherche tabou (TS- Tabu Search) est une méthode de recherche locale combinée avec un ensemble de techniques permettant d'éviter d'être piégé dans un minimum local ou la répétition d'un cycle. Elle a été introduite par Glover [Glover, 1986] et a été utilisée depuis longtemps pour la résolution du problème d'ordonnancement [Hertz *et al.,* 1996][Nowicki *et al.,* 1996]. La recherche tabou a montré une grande efficacité pour la résolution des problèmes d'optimisation difficiles. En effet, à partir d'une solution initiale *s* dans un ensemble de solutions locales *S*, des sous-ensembles de solution *N(s)* appartenant au voisinage *S* sont générés. Par l'intermédiaire de la fonction d'évaluation, nous retenons la solution qui améliore la valeur de *f*, choisie parmi l'ensemble de solutions voisines N(s).

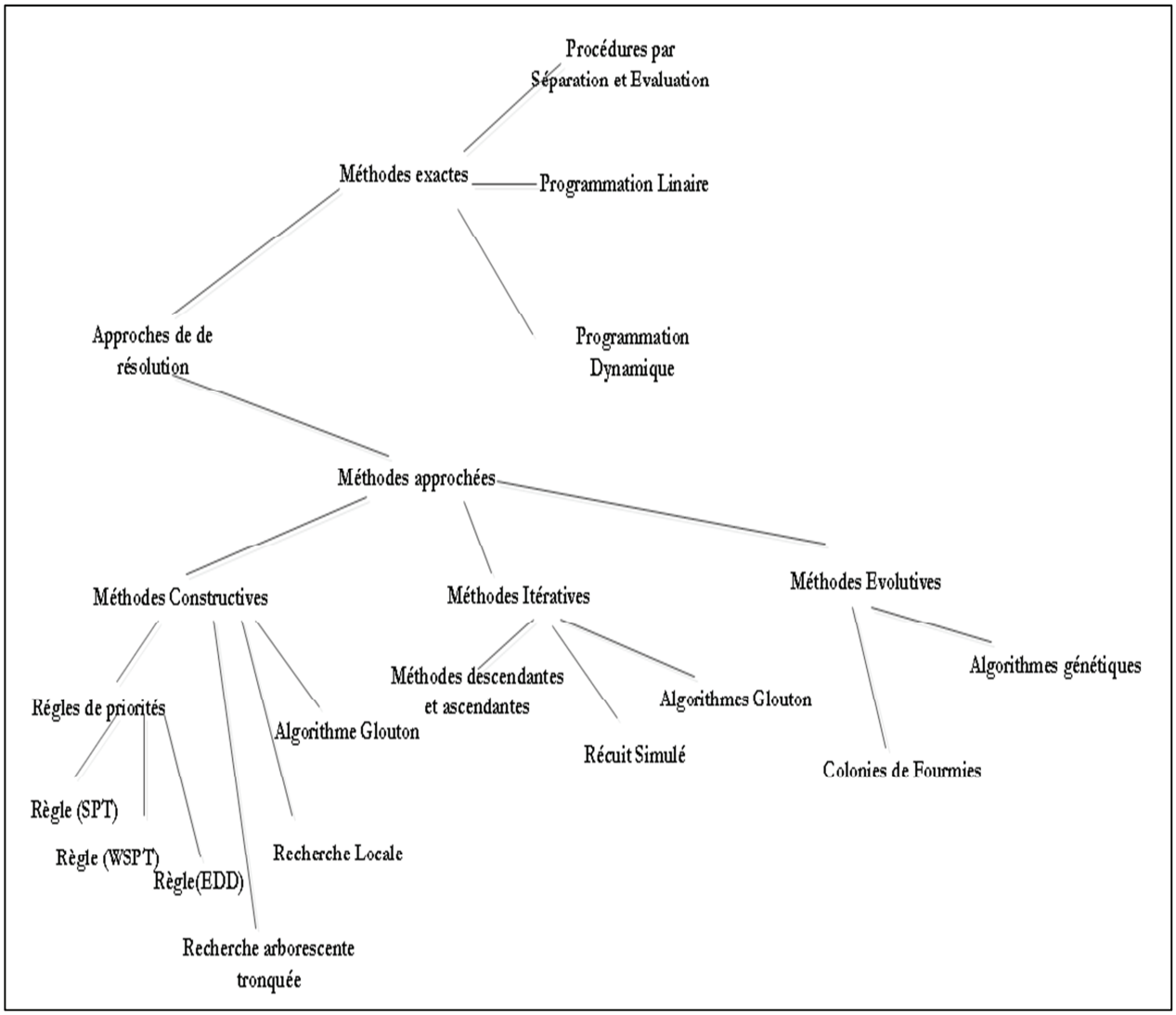

Figure 1.9. Représentation arborescente des différentes méthodes de résolution d'ordonnancement

c. Dans **les méthodes évolutives**, nous pouvons rencontrer *les méta-heuristiques* qui sont des méthodes de résolution applicables à un large ensemble de problèmes d'optimisation combinatoire. Parmi ces méthodes, nous pouvons citer *les colonies de fourmis* et *les algorithmes génétiques*.

Les algorithmes de colonies de fourmis ont été proposés par [Colorni *et al.,* 1992] et appliqués la première fois au problème du voyageur de commerce. Ce sont des algorithmes itératifs à population où tous les individus partagent un savoir commun qui leur permet d'orienter leurs futurs choix et d'indiquer aux autres individus des choix à suivre ou à éviter. Le principe de cette méta-heuristique repose sur le comportement particulier des fourmis, elles utilisent pour communiquer une substance chimique volatile particulière appelée *phéromone* grâce à une glande située dans leur abdomen. En quittant leur nid pour explorer leur environnement à la recherche de la nourriture, les fourmis arrivent à élaborer des chemins qui s'avèrent fréquemment être les plus courts pour aller du nid vers une source de nourriture. Chaque fourmi dépose alors une quantité de phéromones sur ces pistes qui deviendront un moyen de communication avec leurs congénères, les fourmis choisissent ainsi avec une probabilité élevée les chemins contenant les plus fortes concentrations de phéromones à l'aide des récepteurs situés dans leurs antennes.

Les algorithmes génétiques (AG) sont des algorithmes d'optimisations stochastiques fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Ils ont été adaptés à l'optimisation par John

Holland [Holland, 1975], puis les travaux de Goldberg ont largement contribué à les enrichir [Goldberg, 1989]. Le vocabulaire utilisé est le même que celui de la théorie de l'évolution et de la génétique: *individu* (solution potentielle), *population* (ensemble de solutions), *génotype* (une représentation de la solution), *gène* (une partie du génotype), *parent*, *enfant*, *reproduction*, *croisement*, *mutation*, *génération*, etc. Leur fonctionnement est extrêmement simple, nous partons d'une population de solutions potentielles (chromosomes) initiales, arbitrairement choisies. Nous évaluons leur performance (*Fitness*) relative. Sur la base de ces performances est créée une nouvelle population de solutions potentielles en utilisant des opérateurs évolutionnaires simples : la sélection, le croisement et la mutation. Quelques individus se reproduisent, d'autres disparaissent et seuls les individus les mieux adaptés sont supposés survivre. Ce cycle réitère jusqu'à ce qu'on trouve une solution satisfaisante.

5.2. De l'ordonnancement de production seule aux ordonnancements conjoints avec d'autres activités

L'activité d'ordonnancement n'est pas isolée, elle fait partie des cinq activités du système de production. Les activités qui lui sont adjacentes influent de manière directe sur les données du problème et de ce fait affectent les résultats de l'ordonnancement.

Dans le but de proposer des solutions applicables, des travaux portant sur l'intégration de l'activité d'ordonnancement de production avec les activités de planification et d'ordonnancement de la maintenance ont été proposés. Dans les sections suivantes, nous présentons une synthèse des solutions proposées en *(1) ordonnancement de production seule,* en (2) *ordonnancement et planification intégrés* et finalement (3) en *ordonnancement conjoint de production et de maintenance*.

5.2.1. Ordonnancement de la production

Les travaux dans cette catégorie ne considèrent que les contraintes relatives à la production. Le problème d'ordonnancement de production étant NP-difficile, le temps nécessaire pour trouver une solution optimale augmente exponentiellement avec la taille du problème. De ce fait, une solution donnée d'ordonnancement pourrait être classée en fonction de la façon dont elle représente et traite cette complexité. Empiriquement, Chaque environnement de production est unique, la pertinence d'une approche d'ordonnancement pourrait être évaluée selon la manière dont ses hypothèses sont en corrélation avec les caractéristiques importantes de l'environnement de production cible.

Il existe dans la littérature des centaines de contributions traitant ce problème ce qui rend leur synthèse très difficile. De nombreux états de l'art sont aussi proposés [Rodammer *et al.,* 1988][Allahverdi *et al.,* 2008]. L'étude bibliographique qu'ils présentent peut être orientée selon le type d'ateliers considéré ou selon les contraintes prises en compte.

a. Selon le type d'ateliers : le cheminement des jobs sur les différentes machines de l'atelier influence de manière directe sur la résolution du problème. Dans la littérature, tous les types d'ateliers ont eu leur part d'intérêt dans le problème d'ordonnancement de production et plusieurs travaux présentent des états de l'art pour chacun des types.

Pour *les ateliers à une machine*, les jobs peuvent être indépendants ou dépendants. Si le temps de préparation des jobs est indépendant de leur ordre d'exécution, le problème est nommé *problème d'ordonnancement à une machine avec jobs indépendants*; sinon, il est appelé *problème d'ordonnancement à une machine avec jobs dépendants*. Les différentes mesures de performance du problème sont généralement et pas seulement: la minimisation du maximum du retard [Nowicki *et al.*, 1986], la minimisation de la moyenne du retard [Cheng *et al.,* 2005] et la minimisation du nombre de jobs en retard [Briand *et al.,* 2013]. [Abdul-Razak *et al.,* 1990] et [Huegler *et al.,* 1997] présentent des états de l'art sur respectivement les travaux visant la minimisation de la moyenne des retards et les heuristiques utilisées

pour leur résolution. [Ronconi *et al.,* 2010] et [Mohamad *et al.*, 2011] cherchent quant à eux à optimiser la somme des avances et des retards des jobs. En effet, l'avance des jobs peut dans certains ateliers causer des pertes de produits.

[Senthilkumar *et al.,* 2010] présentent une étude du problème d'ordonnancement *des machines parallèles uniformes*. Le problème se compose de *n* travaux, chacun avec une seule opération devant être exécutés sur *m* machines parallèles indépendantes. Etant donné que ce problème d'ordonnancement est un problème combinatoire, l'utilisation d'une heuristique est inévitable pour obtenir une solution en un temps polynomial. Les auteurs différencient entre les ordonnancements hors-ligne et ceux en ligne. Dans le premier type d'ordonnancement, toutes les données du problème sont connues à l'avance (date d'échéance, temps opératoires, etc.). Pour celui en ligne, les jobs disponibles sont triés dans une liste par ordre d'exécution. Ensuite, chacun des jobs est affecté à une machine parallèle uniforme pour un intervalle de temps, un par un avant l'arrivée des prochains jobs. Si le job ne peut pas être exécuté dans l'intervalle spécifié, il sera rejeté. Les problèmes d'ordonnancement des machines parallèles sont souvent résolus en utilisant des algorithmes et heuristiques à base de règles de priorité [Kaabi *et al.,* 2014] présente une revue des travaux traitant les machines parallèles avec considération de la contrainte de disponibilité des machines. Les auteurs les classent selon que les machines soient identiques, uniformes ou indépendantes. Par ailleurs, les travaux sont généralement considérés comme non-préemptifs. En ce qui concerne les contraintes de disponibilité de la machine, tous les problèmes étudiés supposent que les périodes pendant lesquelles les machines ne sont pas disponibles sont fixées dans le temps et le nombre. En effet, les machines sont sujettes à des pannes aléatoires. Ce qui rend les solutions proposées peu réalistes donc non applicables.

[Bagchi *et al.,* 2006] présentent une revue des travaux sur les *Ateliers flow-shop*. Il modélise le problème comme un problème du voyageur de commerce (TSP). Il est connu que dans ce dernier, un vendeur à partir de sa ville natale va visiter exactement une fois chaque ville sur une liste donnée et à la fin il doit revenir à sa ville de départ de telle sorte que la distance totale parcourue soit minimale. C'est exactement le cas des flow-shops, où toutes les tâches suivent le même chemin et chacun doit passer une seule fois sur chaque machine. Dans ce travail, les auteurs montrent que les algorithmes de résolution utilisés dans le TPS ou dans sa version généralisés (GTPS) sont efficaces pour résoudre l'ordonnancement des flow-shops.

Le flow-shop de groupes se base sur la répartition des ressources de production en groupes appelés cellules de production dans lesquelles un certain type de produit est exclusivement manufacturé. L'avantage de cette configuration est la diminution du temps d'installation ou de préparation des produits et la réduction de la charge des contrôleurs de production en ayant un ensemble fini de perturbations à gérer au cours du processus de production ce qui mènera à l'amélioration de leur expérience. [Neufeld *et al.,* 2016] présentent une revue exhaustive des travaux portant sur le flow-shop de groupes. Ils classent ces travaux sur la base de la nature de l'environnement (dynamique ou statique (cet aspect sera traité dans la section 5.3), le nombre de machines parallèles à chaque étage (flow-shop simple ou flow-shop hybride[1]), le nombre considéré de cellules de fabrication (une seule ou plusieurs cellules) ainsi que des machines (deux ou plus de deux machines) et enfin le type de temps d'installation (séquence-indépendant ou séquence-dépendant (voir section suivante)).

De nombreuses approches comme l'intelligence artificielle, les heuristiques, les approches mathématiques ont été proposées pour résoudre le problème d'*ordonnancement des ateliers job-shop*. La plupart des travaux le traitent par les Algorithmes génétiques (AG). [Bhatt *et al.,* 2015] présentent une revue de la littérature des travaux proposant des AG pour la résolution de ce problème. Les configurations examinées varient des *job-shops* simples aux *job-shop* généralisés (plusieurs machines pour

[1] Dans un flow-shop hybride, chaque travail passe par un ensemble d'étages dans le même ordre. Chaque étage est constitué de machines parallèles.

chaque opération à effectuer). Dans [Jain *et al.,* 1999] les auteurs présentent un aperçu de toutes les méthodes proposées pour résoudre le problème, approchées et exactes.

En ce qui concerne les ateliers de type *Open shop*, le nombre de travaux qui les traitent est très petit par rapport à ceux dédiés aux autres types d'ateliers. Une configuration d'atelier en *open-shop* peut être rencontrée dans un environnement de service, comme un réseau d'un laboratoire d'analyses médicales dans un hôpital où les patients passent dans un ordre arbitraire [Matta, 2009]. [Anand *et al.,* 2015] présentent une étude bibliographique assez complète sur les méthodes de résolution proposées pour *les ateliers open shop*. Le problème est classé selon les différentes mesures de performance : minimisation du makespan, minimisation de la moyenne du makespan de tous les jobs, minimisation du retard de tous les jobs, minimisation de la moyenne du retard de tous les jobs, etc. Dans chaque catégorie, ils présentent les solutions proposées selon l'approche de résolution adoptée (exacte ou approchée).

b. Selon les contraintes prises en compte. D'autres auteurs regroupent dans leurs synthèses les travaux d'ordonnancement qui prennent en compte les mêmes contraintes ou qui cherchent à optimiser les mêmes critères quel que soit le type d'ateliers.

[Allahverdi *et al.,* 2008] proposent une étude exhaustive et approfondie sur les travaux portant sur les ordonnancements de production *avec prise en compte du temps d'installation*. Ils classent ce type de problèmes selon la considération ou non des lots de travaux. Un lot de travaux est une famille ou type de travaux qui seront traités de la même façon ce qui veut dire que le temps d'installation entre deux travaux du même lot est nul. Le temps d'installation des lots peut être *machine-dépendant* ou *séquence-dépendant*. Il est *séquence-dépendant* si sa durée dépend du lot qui le précédait dans la machine. Il est *machine-dépendent* si sa durée dépend de la configuration de la machine qui va le traiter. Ils catégorisent en outre la littérature selon les types d'ateliers : machine unique, machines parallèles, flow-shop, job shop et open shop.

Dans [Allahverdi, 2016], l'auteur synthétise les travaux qui traitent le problème d'ordonnancement dans les ateliers qui ne tolèrent pas de temps d'attente. Ceci peut apparaitre dans l'industrie plastique, chimique et pharmaceutique. L'article classe les problèmes d'ordonnancement de ce genre selon : (1) les types d'ateliers (*flow-shop*, *job-shop*, ou *open-shop*), et (2) selon les critères à optimiser (minimisation du makespan et minimisation de la somme des temps de traitement, minimisation du décalage maximum et minimisation de la moyenne des retards).

5.2.2. Planification et ordonnancement de production intégrés

De manière générale , la réalisation d'un travail de production consiste à sélectionner un cheminement pour les opérations composant le travail à réaliser, désigner les ressources nécessaires à l'exécution de chaque opération, et enfin attribuer des fenêtres temporelles aux différentes opérations. Ces fenêtres temporelles spécifient la date de début et de fin de chaque opération. Le cheminement et l'affectation des ressources aux opérations sont générés par l'activité de planification. Quant à l'activité d'ordonnancement, elle se charge de la désignation des fenêtres temporelles pour chaque opération.

La procédure hiérarchisée de décision planification-ordonnancement n'est souvent pas cohérente. En effet la planification et l'ordonnancement sont deux modules traités indépendamment l'un de l'autre. Les modèles de planification tiennent compte des contraintes de capacité de façon trop agrégée et ne garantissent pas que le plan de production proposé soit réalisable lorsqu'il est transmis au niveau inférieur. Les contraintes de capacité modélisées dans le plan ne représentent pas la réalité en termes de disponibilité des ressources dans les ateliers. Par conséquent, le niveau ordonnancement ne peut pas simplement être considéré comme un niveau inférieur au niveau planification. La qualité de la politique d'ordonnancement est tout aussi importante dans la capacité de production que la vitesse ou la disponibilité des ressources [Wolosewicz, 2008].

En exploitant la propriété de flexibilité de production (section 3.1), les travaux peuvent avoir plusieurs plans et le choix d'un bon plan influe sur la qualité de l'ordonnancement recherché. Par conséquent, la coopération de la planification et de l'ordonnancement peut donner des résultats meilleurs que l'ordonnancement seul. Cette approche de résolution est appelée *la planification et l'ordonnancement intégrés* (IPPS en anglais pour Integration of planning process and scheduling). Les chercheurs se sont intéressés, il y a une vingtaine d'années, à ce genre d'intégration et plusieurs travaux sont proposés.

[Shao *et al.,* 2009] classe la planification et l'ordonnancement intégrés en deux 3 catégories:

- *La planification non-linéaire (NLPP):* le principe du NLPP est de prévoir tous les plans possibles pour chaque travail à réaliser. Le plan qui possède la plus haute priorité est toujours prêt à être exécuté si un job est demandé. Dans le cas où le plan prioritaire n'est pas adapté à l'état actuel de l'atelier, le plan de priorité inférieur est examiné.
- *La planification à boucle fermée (CLPP):* la méthode CLPP s'appuie sur un processus de planification dynamique avec une rétroaction en provenance de la fonction d'ordonnancement. Elle génère en temps réel des plans en ayant comme entrée l'état des machines dans le système (les ressources disponibles).
- *La planification distribuée (DPP):* la méthode DPP consiste à réaliser les deux fonctions de planification et d'ordonnancement simultanément sur deux phases: (1) dans une première phase, un plan préliminaire pour le job en cours est généré en prenant en compte les caractéristique du produit à réaliser ; (2) dans la deuxième phase, le plan est ajusté de façon à prendre en compte l'état actuel de l'atelier. Les versions finales du plan et de son ordonnancement sont obtenues simultanément.

Dans [Seker *et al.,* 2013], les auteurs proposent un système intégré de planification et d'ordonnancement. Ils utilisent un modèle heuristique hybride combinant à la fois un algorithme génétique (AF) et un réseau de neurones flou (FNN). Les données fournies par l'AG sont utilisées dans la construction du FNN. Ce dernier produit ensuite instantanément de nouvelles fenêtres temporelles relatives aux nouveaux changements de l'environnement.

[Cho *et al.,* 1998] proposent une méthode de type DPP pour la planification et l'ordonnancement intégrés de l'assemblage des blocs dans la construction navale. Le système proposé est constitué de 4 modules : (1) *le module de planification, (2) le module d'ordonnancement (3) le module de sélection du goulot d'étranglement et (4) le module de re-planification.* Dans l'approche proposée, un plan initial d'assemblage est généré en déterminant les unités d'assemblage optimales et leurs séquences d'assemblage nécessitant le minimum d'heures de travail. Ensuite, ce plan est modifié et amélioré en réitérant le cycle «planification - sélection du bloc de goulot d'étranglement - re-planification» jusqu'à ce que les charges de travail sont suffisamment équilibrées.

[Li *et al.,* 2010] proposent une solution multi-agents de type DPP. Trois types d'agents sont considérés: *agents jobs*, *agents machines* et *agent optimisation*. Les agents jobs collaborent avec les agents machines pour dégager un plan de production. Après la création des agents job, les agents machines leur communiquent toutes les informations qui concernent les tâches constituant chaque job. A partir de tous les plans possibles, l'agent optimisation applique un algorithme génétique pour choisir le plan optimal.

5.2.3. Ordonnancement de production et de maintenance intégrés

Les activités de production et de maintenance ont des objectifs contradictoires. La première vise à optimiser l'exploitation des machines afin de satisfaire le plan de production prévu. Quant à la deuxième, elle vise à maintenir les machines en bon état de fonctionnement en programmant des maintenances préventives ce qui est nuisible au processus de production puisqu'il sera interrompu.

L'exécution des maintenances préventives périodiques permet d'éviter les pannes soudaines des machines et donc diminuer la fréquence de cet événement de l'ensemble des aléas qui perturbent le fonctionnement de l'atelier.

L'ordonnancement conjoint de production et de maintenance est constitué de tâches de production et de maintenance ordonnancés sur l'horizon de production. Son avantage est de proposer des solutions réalistes en prévoyant les arrêts temporaires causés par les interventions du service de maintenance. Le chapitre 3 sera consacré en entier à cet axe de recherche. Une synthèse des travaux existants sera également présentée.

5.3. Des ordonnancements déterministes aux ordonnancements sous-incertitudes

Quand les données du problème sont certaines (pas de perturbations) l'environnement est dit *statique*. Dans le cas contraire c.à.d. lorsque les données sont incertaines (temps d'exécution des tâches, état des machines, arrivée des travaux) l'environnement est dit *dynamique*.

La tendance actuelle de la recherche en ordonnancement de production est de proposer des solutions applicables éloignées des solutions théoriques qui rendent l'activité de pilotage (section 1.3) très difficile puisque les opérateurs vont se retrouver confrontés à des contraintes non considérées lors de l'établissement du plan prévisionnel de production. Un ordonnancement est applicable si les ressources matérielles et humaines qui lui sont allouées sont disponibles dans les fenêtres temporelles qu'il spécifie.

5.3.1. Ordonnancement déterministe

L'environnement déterministe ou statique est caractérisé par la stabilité interne (pas de pannes machines, pas d'absences de personnel, données inchangeables,...) ou externe (pas de commandes urgentes, ni retard d'approvisionnement, ...). Donc tout est calibré selon selon un mode de fonctionnement «zéro perturbations». Les solutions proposées sont appelées des ordonnancements déterministes. La majorité des travaux décrits dans les sections précédentes supposent des environnements stables donc les données sont fixes et invariables. En réalité, ces suppositions sont contradictoires avec ce qui se passe réellement dans les ateliers de production. Elles sont plutôt simplistes du problème afin de ne pas trop le compliquer du moment qu'il est déjà NP-difficile.

5.3.2. Environnement sous incertitudes

En pratique, les ateliers sont des environnements pas tout à fait statiques. Souvent, les données numériques exactes ne sont pas connues à l'avance, et les difficultés surgissent lorsque certaines données changent en raison de perturbations telles que les pannes machine ou l'arrivée de nouvelles tâches imprévues. En effet, en plus des événements pouvant surgir, les durées opératoires des machines utilisées ne sont qu'approchées.

Les ordonnancements déterministes sont de ce fait incapables de modéliser des situations réelles et de réagir face aux différents changements survenus dans l'atelier de production. Ces changements sont connus dans la littérature par le terme *incertitudes*, et l'ordonnancement sous ces conditions est appelé *ordonnancement sous incertitudes*. Dans cette classe de solutions, les chercheurs essayent de proposer des solutions prenant en compte tout ce qui peut perturber le plan de production. Vu l'importance de cette classe d'ordonnancements, nous lui avons consacré le chapitre 2 qui revient de manière détaillée sur ce type de solutions.

5.4. Discussion

Les catégories présentées ci-dessus ne sont pas disjonctives c'est-à-dire qu'une solution d'ordonnancement peut appartenir aux trois catégories. Par exemple, une solution *approchée* d'un ordonnancement de *production sous incertitudes* peut être proposée comme celle de [Petrovic *et al.*, 2011]. Les recherches actuelles essayent de proposer des solutions plus proches de la réalité et dont la probabilité d'être appliquée est élevée loin des solutions théoriques qui ne font que des suppositions irréalistes.

En ce qui concerne les méthodes de résolution, les méthodes exactes sont les plus utilisées pour des problèmes de petites tailles. Leur complexité est plus importante que celle des méthodes approchées. Ces dernières sont le plus souvent utilisées dans le cas de problèmes de grandes tailles.

L'intégration d'autres activités avec l'ordonnancement de production a été introduite pour proposer toujours des solutions adaptées à la réalité des ateliers de production. D'une part, l'activité de planification consiste à fixer les machines qui vont intervenir dans l'exécution d'un travail donné ainsi que les tâches à être exécutées. En pratique, plusieurs machines identiques ou compatibles existent dans les ateliers et le fait d'attribuer telle ou telle machine à une tâche peut donner des résultats d'ordonnancement différents. D'autre part, l'intégration de l'activité de maintenance avec celle de production permet de diminuer la probabilité d'apparition de l'événement de pannes machine et aussi, elle génère des ordonnancements réalistes en prenant en compte les durées opératoires des tâches de maintenance.

Finalement, pour la stabilité des environnements, les ordonnancements sous incertitudes permettent de prendre en considération les événements qui peuvent perturber le bon déroulement de la production. Les travaux dans ce volet diffèrent selon l'événement pris en compte et selon la modélisation du problème. Nous verrons de plus près ces travaux dans le chapitre suivant.

Nous avons remarqué que dans les travaux traitant la planification et la production intégrée, les chercheurs ne prévoient pas des temps d'arrêts pour la maintenance préventive. Ils supposent que les machines sont tout le temps disponibles ce qui est loin d'être correct. Pour bénéficier des deux familles d'intégration (planification-production et production-maintenance), nous avons proposé dans [Bouzidi-Hassini *et al.,* 2012] une méthode d'ordonnancement multi-agents baptisée «MASMPLAM » pour Multi Agent Scheduling Méthode based on integrated PLAnning and Maintenance. Elle est basée sur l'intégration de la planification et de la maintenance pour la génération du meilleur ordonnancement. D'une part, elle permet d'éviter d'établir des plans irréalistes du moment que les états des machines sont connus à l'avance. Et d'autre part, elle absorbe les aléas dus aux pannes puisque la maintenance sera aussi ordonnancée.

MASMPLAM est une méthode d'ordonnancement manipulant des agents dotés d'une certaine autonomie et rationalité car ils représentent des machines et veulent les garder en bon état. ces caractéristiques sont prises en compte afin de concevoir un modèle de négociation qui convient au maximum au contexte des ateliers de production.

La méthode est composée de deux grandes étapes (figure 1.10). La première étape est *la génération de tous les plans possibles* et la deuxième étape présente un modèle de négociation inter-agents pour *la construction de la solution d'ordonnancement*. Il faut signaler que trois types d'agents sont considérés : l'agent job, l'agent plan et l'agent machine. Le modèle de négociation est cyclique et à son tour est composé de plusieurs étapes. Les agents négocient pour trouver le bon ordonnancement. Notant que le meilleur ordonnancement est celui qui minimise le Cmax.

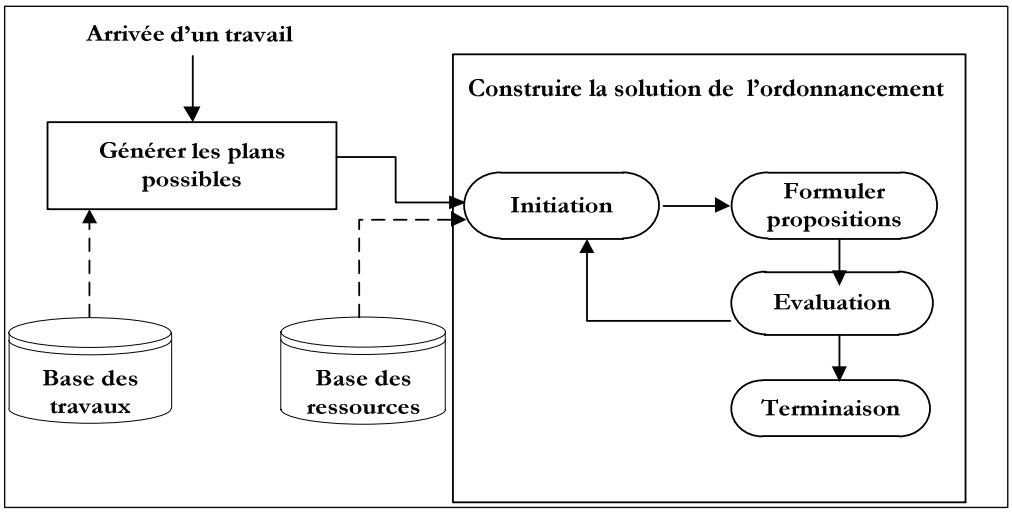

Figure 1.10. Étapes de MASMPLAM

6. Conclusion

L'activité d'ordonnancement de la production est très importante au sein des entreprises manufacturières qui visent à avoir une présence permanente et compétitive sur le marché. Dans ce chapitre, nous avons essayé d'aborder tous les points qui nous semblent importants pour introduire l'activité d'ordonnancement de production.

Nombreuses sont les approches proposées pour la résolution du problème d'ordonnancement. Nous avons pu constater que leur évolution est guidée par une volonté des chercheurs de proposer des solutions plus réalistes loin des solutions théoriques. Cette recherche d'applicabilité doit passer obligatoirement par une modélisation fidèle des données du problème. C'est dans cette perspective que les ordonnancements sous-incertitudes sont apparus. Ils prennent en compte les imperfections des données et les évènements pouvant surgir au moment de l'exécution des ordonnancements. Pratiquement, les ateliers de production sont loin des suppositions : « zéro évènements », « zéro défauts », « zéro erreurs », etc. Les temps opératoires des activités de production ne peuvent être déterminés de manière exacte car ceci dépend de la matière première utilisée et aussi de l'état des machines et de leur fiabilité. De plus, même si des activités de maintenance préventives sont programmées pour maintenir les machines en bon état, des pannes et des anomalies de fonctionnement peuvent surgir à tout moment nécessitant ainsi la programmation de nouvelles activités de maintenance. Ceci causera évidemment l'arrêt du processus de production et rendra de ce fait, l'ordonnancement en cours d'exécution obsolète.

Le chapitre suivant présente les ordonnancements sous incertitudes qui constituent depuis une quinzaine d'années un axe de recherche très actif dans le domaine de l'ordonnancement de production.

Chapitre 2

Ordonnancement sous incertitudes: plus près des attentes des ateliers de production

Comme nous venons de l'avancer dans le chapitre précédent, *les ordonnancements sous incertitudes* ou en présence d'incertitudes font référence à toute solution d'ordonnancement qui tient compte des imperfections des données du problème et des évènements qui peuvent surgir à tout moment au cours du processus d'ordonnancement. Ces incertitudes peuvent être prises en compte en amont du lancement de la production et/ou dans la phase de pilotage en réaction aux évènements perturbateurs. Tout au long du présent chapitre, nous présentons ce type de solutions. Nous commençons par la définition des incertitudes, les classer et les énumérer au sein des ateliers. Ensuite, nous présentons les modélisations proposées dans la littérature pour la représentation des incertitudes. Nous terminons par une synthèse des travaux traitant les incertitudes dans le domaine des ordonnancements de production.

1. Introduction

Le problème d'ordonnancement de la production consiste à trouver le meilleur agencement dans le temps des tâches de production tout en satisfaisant des contraintes afin d'optimiser des objectifs. Lors de la résolution de ce problème, il convient de soigneusement distinguer le temps de résolution et le temps d'exécution [Sanvanille, 2005]. Dans l'approche classique, déterministe, cette distinction est implicite mais très nette. En effet, elle ne s'intéresse qu'à la résolution. Celle-ci peut commencer dès que les données sont connues, et sa durée n'est à priori pas limitée. Lorsqu'elle se termine, elle produit une solution, *un ordonnancement*. L'exécution peut alors commencer, elle n'entraîne aucune modification de la solution proposée.

Ces hypothèses sont beaucoup trop fortes dans bien des cas, car les données du problème ne sont pas parfaitement connues à l'avance. En plus, dans de nombreux cas, les conditions changent, parfois pendant l'exécution, parfois même avant l'exécution [Sanvanille, 2005]. Par conséquent, et du fait que l'objectif est de proposer des solutions adaptées aux problèmes étudiés, il est impératif d'avoir une résolution différée qui s'étale jusqu'à la phase d'exécution.

La prise en compte des changements que les données de l'ordonnancement peuvent subir implique tout d'abord qu'il faille les cerner en identifiant leurs sources. Par la suite, il faudra savoir comment les prendre en compte. Dans la littérature, tout changement ou imperfection de données est appelé « Incertitude ». Dans ce qui suit, nous présentons une définition des incertitudes et nous énumérerons celles relatives à l'activité de production.

2. Définitions des incertitudes

Selon [Esswein, 2003] et [Pinot, 2008]: « *les incertitudes désignent les modifications potentielles des données d'un problème d'ordonnancement. Ces modifications peuvent intervenir entre le calcul d'un ordonnancement et la fin de son exécution sur les machines* ».

Les incertitudes correspondent donc à la différence entre les prévisions faites durant la phase de résolution (avant l'exécution de l'ordonnancement) et les données réelles obtenues (après l'exécution du plan de production).

Plusieurs classifications des types des incertitudes sont proposées dans la littérature. [Artigues *et al.,* 2002] classent les incertitudes en fonction de leur niveau de connaissance. Les auteurs identifient trois types d'incertitudes dans les environnements manufacturiers :

- *Les incertitudes complètement inconnues* qui sont des évènements imprévus pour lesquels aucune information n'est disponible à l'avance (par exemple, une grève, un accident dans le lieu de travail ou une absence d'un opérateur) ;
- *Les suspicions du futur* qui sont issues de l'intuition et de l'expérience des décideurs, mais difficilement modélisables (par exemple l'arrivée aléatoire des commandes de production);
- *Les incertitudes connues ou partiellement connues*, pour lesquelles un modèle d'information est disponible (par exemple, la prévision de l'arrivée d'une panne).

[Sanvanille, 2005] introduit trois types de changements, caractérisés par trois termes clés: *incertitude*, *aléa*, *variation*.

- Une donnée est soumise à *une incertitude* si sa valeur exacte ne peut être déterminée avant l'exécution, et plus précisément au moment exact où cette donnée intervient (par exemple, la durée opératoire d'une tâche, quand celle-ci commence son exécution).
- *Les aléa*s sont les événements qui peuvent modifier les valeurs des données (typiquement : panne machine, retard de livraison, nouvelle tâche prioritaire, etc.).
- Une donnée est soumise à *des variations* si sa valeur change durant le temps d'exécution. Sont concernées en particulier les données relatives aux ressources, comme la quantité disponible d'une ressource.

Quant à [Dubois *et al.,* 1985], ils supposent que les incertitudes peuvent être caractérisées par des *imprécisions* et des *incertitudes*.

– *L'imprécision* concerne le contenu de l'information. Une donnée est dite imprécise si sa valeur ne peut être donnée de manière exacte (Ex: le temps d'exécution d'une tâche varie entre 8 à 10 minutes).

– *L'incertitude* est un doute qui concerne le degré de vérité d'une donnée ou d'une hypothèse. Elle est causée par la possibilité d'apparition d'un événement interne ou externe (Ex: une machine est en fonctionnement s'il n'y a aucune perturbation et si aucune tâche d'entretien n'est prévue).

Nous adoptons cette dernière classification car elle nous semble plus convaincante et plus proche de la nature des données manipulées en ordonnancement.

3. Classification des sources d'incertitudes

Les incertitudes peuvent avoir plusieurs sources. Nous proposons une taxonomie sur la nature des incertitudes inspirée de celle exposée par [Haimes, 1998]:

- *Méthodologique :* L'incertitude de ce type est liée aux limites des méthodes employées. La simplification des modèles est parfois une nécessité pour leur permettre d'être manipulable en pratique. Il arrive aussi que des hypothèses favorables soient utilisées en dehors des situations où elles sont justifiées. Exemple : modèle de communication ou d'exécution imparfait.
- *Épistémique :* Celle-ci se rapporte à l'ignorance portée sur les mécanismes en jeu dans un système donné. En d'autres termes, elle provient de notre inaptitude à connaître les interactions ayant lieu. Il peut s'agir d'une connaissance qui est incomplète et/ou inexacte. L'incertitude de ce type peut toucher des aspects connus et délimités ou bien être totale. Dans tous les cas, cela signifie que la modélisation parfaite d'un système est hors de portée.
- *Aléatoire :* L'incertitude de ce type concerne la variabilité aléatoire qui est inhérente aux phénomènes physiques. Bien que l'ensemble des paramètres soit déterminé par des probabilités, il est dans ce cas impossible de prédire précisément le résultat d'une expérience donnée. Exemple : panne matérielle.

Enfin, nous classons les problématiques posées en fonction de l'origine de l'incertitude :

- *Matérielle :* Les caractéristiques de la plateforme ne lui permettent pas de garantir tous les aspects de son mode de fonctionnement.
- *Logicielle :* La nature des applications complique la prédictibilité du système. Exemple : erreur logicielle entraînant l'échec d'un calcul donné.
- *Humaine :* Des individus malveillants, malhonnêtes ou imprévisibles sont présents sur une plateforme donnée.

4. Les incertitudes dans les ateliers de production

- En production, les incertitudes peuvent généralement être diverses. Nous pouvons citer par exemple [Davenport *et al.,* 2000][Herroelen *et al.,* 2005][La, 2005][Pinot, 2008]:
- L'arrivée en retard de la matière première, le manque de cette matière ou d'outils. Ces problèmes peuvent être rencontrés dans les ateliers ne disposant pas de stock ou de livraison régulière.
- La variation de la durée opératoire d'une tâche relativement à celle estimée. Ceci est une conséquence directe de la fiabilité des machines. En effet ces dernières peuvent provoquer un ralentissement de l'exécution des tâches si elles ne sont pas dans un bon état.
- La panne ou l'indisponibilité d'une ou plusieurs machines ou des outils.
- L'insertion ou la suppression d'une tâche. Cela arrive fréquemment, généralement sous la forme d'une commande urgente à traiter ou une annulation tardive d'une commande.
- La différence entre le modèle et la réalité. Par exemple, considérer les temps de transport entre ressources nuls alors que dans la réalité, ce temps n'est pas négligeable.

– Changements des informations données par les fournisseurs et les sous-traitants participants indirectement à sa mise en œuvre.

5. Modélisation de l'incertitude

Selon notre revue de la littérature, la prise en compte des incertitudes lors de la construction d'un ordonnancement peut être faite avec un modèle de données ou non. Le modèle est le reflet de la réalité de l'atelier, donc nous devons savoir qu'est ce qui change et comment qu'il change [Sanvanille, 2005]. En d'autre termes, il faut recueillir le maximum d'informations quantitatives sur les incertitudes (ex: les valeurs possibles de la durée opératoire d'une tâche). Le choix du modèle dépend du niveau de connaissance de l'incertitude: connue, partiellement connue ou inconnue [Ourari, 2010].

[Billaut *et al.,* 2004] proposent quatre types de modèles: les modèles stochastiques, les modèles flous, les modèles par intervalles et les modèles par scénarios. Ces modèles peuvent être classés en deux catégories, selon la nature de l'incertitude qu'ils modélisent. Les modèles stochastiques et par scénarios pour modéliser les données incertaines et les modèles flous et les modèles par intervalles pour modéliser les données imprécises.

5.1. Les modèles stochastiques

Les données sont principalement prises en compte dans la littérature par des modèles stochastiques ou probabilistes [Sanvanille, 2005]. Ces modèles représentent le cadre trivial de la modélisation des incertitudes. Un modèle stochastique [Shakhlevich *et al.*, 2005] peut être utilisé lorsque l'on dispose d'informations concernant l'amplitude, la fréquence ou plus généralement l'impact des perturbations sur les données du problème. Ces informations sont issues d'analyses statistiques appliquées à l'historique d'une organisation. Dans ce modèle, toutes les données sont modélisées grâce à des variables aléatoires. L'incertitude peut être représentée par une distribution de probabilité continue ou discrète.

A partir de ce modèle stochastique, il est en théorie possible de calculer à priori les ordonnancements les plus performants ou plutôt (en cas d'apparition d'événements), les politiques, c'est à dire les décisions, les plus performantes.

5.2. Les modèles par scénarios

Cette approche nécessite la construction d'un ensemble de scénarios (appelés aussi instances ou jeux de données) qui reflètent des hypothèses traitant l'incertain.

Généralement, un modèle par scénarios utilise un arbre de décision dont la racine désigne l'état normal du fonctionnement du système et les arêtes désignent les différents événements pouvant surgir [Rossi, 2003] [Aloulou *et al.*, 2008]. Des probabilités peuvent être assignées aux différents scénarios pour interpréter l'incertitude vis-à-vis de l'apparition de l'événement en question. Pour chaque scénario possible, des traitements peuvent être proposés et là aussi des alternatives peuvent être proposées pour interpréter l'incertitude envers la décision à prendre. Cette approche peut être appliquée dans le cas où les événements pouvant surgir sont connus à l'avance. Elle présente l'avantage de proposer des résolutions pour chaque scénario attendu contrairement aux autres solutions qui proposent le même traitement pour les événements prévus. Elle présente aussi l'avantage d'imposer un processus rigoureux qui passe par la définition d'un scénario de base et de

scénarios alternatifs, la description de leur déroulement et l'évaluation de leur impact sur les performances du système. La transparence qui en découle crée, à juste titre, un sentiment de contrôle et de maîtrise, même si le scénario qui va se réaliser est totalement inconnu.

5.3. Les modèles par intervalles

Un modèle par intervalles [Matsveichuk *et al.*, 2009] peut être vu comme un cas particulier des modèles précédents puisque chaque paramètre peut prendre sa valeur, selon une densité de probabilité uniforme, dans un intervalle de valeurs. Il est utilisé dans le cas où les données sont imprécises mais que l'information est tellement pauvre que l'on ne peut même pas donner de fonction d'appartenance. Dans ce modèle, on ne peut définir qu'une valeur minimale et une valeur maximale pour le paramètre à estimer, les paramètres du problème prennent leur valeur dans l'ensemble continu de valeurs possibles entre ces deux valeurs. Les paramètres auxquels est associé ce modèle sont généralement les dates de disponibilité, les dates d'échéance et les durées opératoires.

5.4. Les modèles basés sur la logique floue

Les incertitudes ne sont pas toujours de nature aléatoire. La théorie des sous-ensembles flous se présente comme un outil privilégié pour la modélisation des situations présentant des imprécisions [Zadeh, 1965]. C'est le modèle qui nous permet de représenter des connaissances imprécises, telles que des valeurs approximatives dues à des difficultés de mesure ou des descriptions non chiffrées. Ces variations sont présentées par des fonctions d'appartenance.

Etant donné un ensemble de référence X ou univers, il est possible d'indiquer les éléments de X qui appartiennent à une certaine classe A et ceux qui n'y appartiennent pas. Si l'appartenance de certains éléments de X à A n'est pas absolue (nous ne sommes pas certains que ces éléments appartiennent à cette classe), nous pouvons indiquer avec quel degré chaque élément appartient à A. Un sous-ensemble flou de A est défini par une fonction d'appartenance $\mu_{\tilde{A}}$ qui associe à chaque élément x Є X, le degré d'appartenance $\mu_{\tilde{A}}(x)$, compris entre 0 et 1, avec lequel x appartient à A :

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) \mid x \in X\} \qquad (1)$$

$$\mu_{\tilde{A}}(x) : X \rightarrow [0,1]$$

[Bouchon-Meunier *et al.*, 2003] affirment que les notions suivantes sont couramment utilisées dans la théorie des ensembles flous (figure 2.2).

- *Le noyau* d'un ensemble flou $\tilde{A}$ de X, noté n($\tilde{A}$)ou noy($\tilde{A}$) est l'ensemble de tous les éléments qui appartiennent totalement ou de façon certaine à $\tilde{A}$, c'est-à-dire dont le degré d'appartenance à $\tilde{A}$ vaut 1 (eq.2).

$$n(\tilde{A}) = \{x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) = 1\} \qquad (2)$$

- *Le support* d'un sous-ensemble flou $\tilde{A}$ de X, noté supp$(\widetilde{A})$ est l'ensemble des éléments appartenant, même très peu, à $\tilde{A}$ c'est-à-dire dont le degré d'appartenance à $\tilde{A}$ est supérieur à 0 (eq.3).

$$supp(\tilde{A}) = \{x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) \neq 0\} \qquad (3)$$

- *La hauteur* d'un sous-ensemble flou $\tilde{A}$ de X, noté h($\tilde{A}$) est le plus fort degré avec lequel un élément de X appartient à $\tilde{A}$ (eq.4). Si h($\tilde{A}$)=1, l'ensemble flou est dit *normalisé.*

$$h(\tilde{A}) = Max\{\mu_{\tilde{A}}(x) \mid x \in X\} \qquad (4)$$

- *Une a-coupe* d'un sous-ensemble flou $\tilde{A}$ ou ensemble de niveau α de $\tilde{A}$, noté A_α est le sous-ensemble (au sens de la théorie des ensembles classiques) des éléments ayant un degré d'appartenance supérieur ou égal à α (eq.5).

$$\alpha - coupe(\tilde{A}) = \{x \in X | \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\} \quad (5)$$

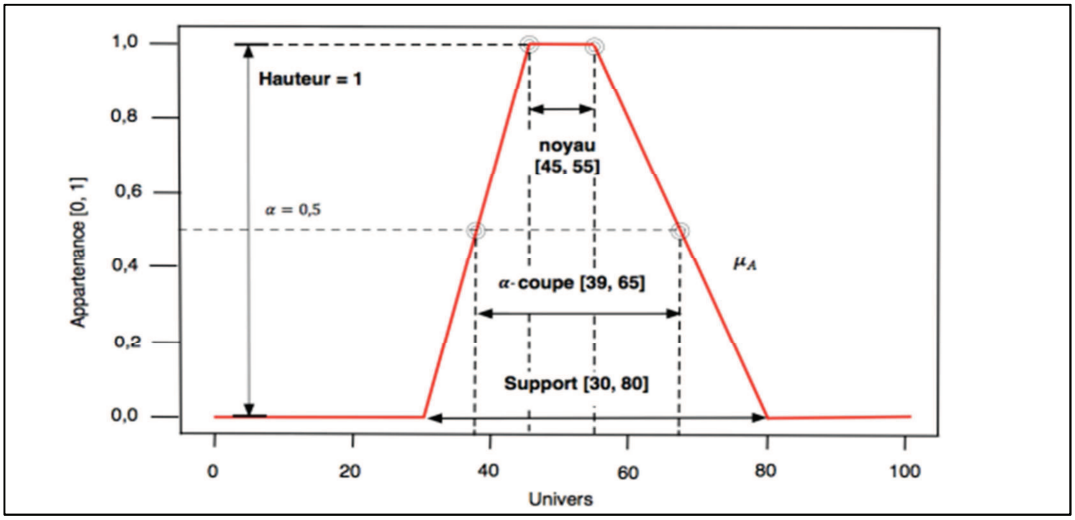

Figure 2.1. Éléments caractéristiques d'un ensemble flou: noyau, support, hauteur et α-coupe

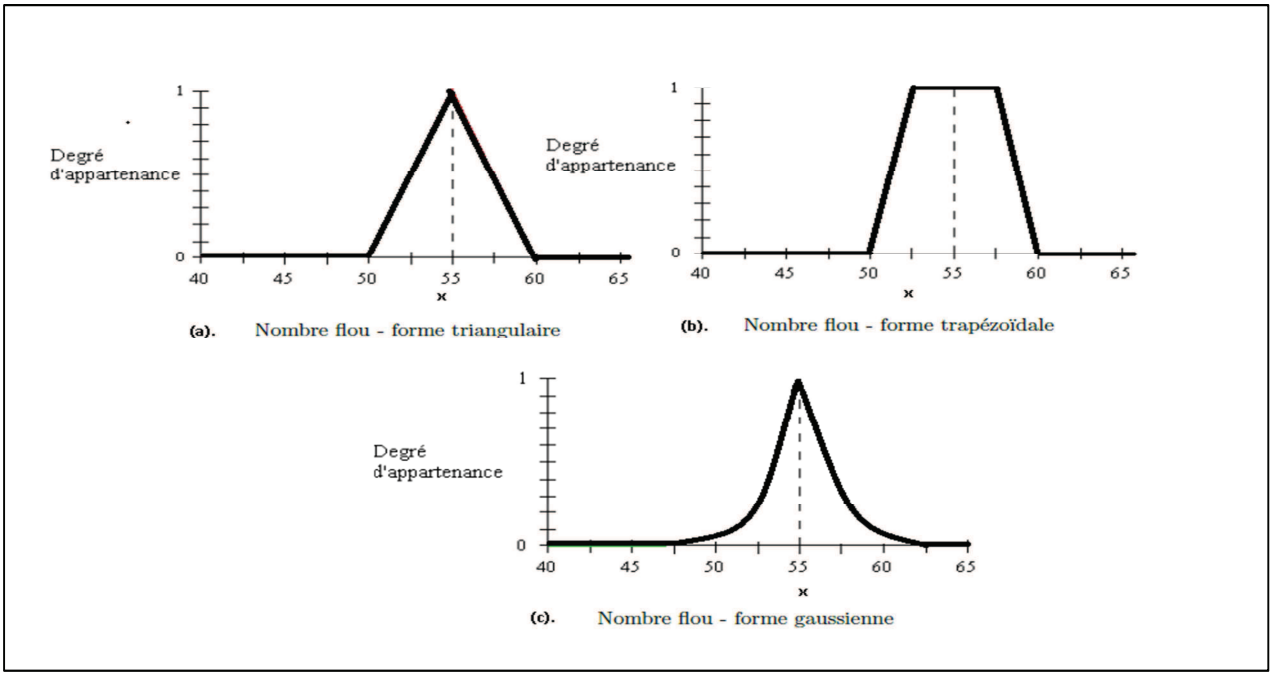

Figure 2.2. Formes de modélisation floue

La donnée floue peut être modélisée sous trois formes selon la nature de la donnée à modéliser (figure 2.3): triangle (2.2.a), trapèze (2.2.b) ou gaussienne (2.2.c).

6. Approches de résolution des ordonnancements sous incertitudes

Dans des environnements sujets à des perturbations tels que les ateliers de production, les ordonnancements ne peuvent pas être établis pour de longues périodes car les changements des données vont rendre les solutions générées obsolètes et inapplicables. C'est pour cela qu'il faut répondre à deux questions si l'on veut vraiment avoir une solution fidèle de l'état du système : *quand ordonnancer* ? et *comment ordonnancer ?* [Sabuncuoglu *et al.*, 2009].

6.1. Quand ordonnancer ?

Répondre à la question *Quand ordonnancer* ? revient à déterminer le moment idéal pour établir les fenêtres temporelles des travaux à réaliser. Plusieurs démarches peuvent être suivies : (1) *l'ordonnancement périodique*, c'est à dire établir un ordonnancement à chaque période de temps afin de prendre en compte les changements des données. La période peut être statique ou dynamique. Dans le cas de la période dynamique c'est le nombre de travaux exécutés qui est fixe ; (2) *l'ordonnancement conduit par les événements,* dans ce cas, à chaque événement perturbant l'ancien ordonnancement, un nouveau est généré ; Enfin (3) *l'ordonnancement adaptatif* est exécuté quand une déviation calculée à partir des données courantes dépasse un seuil donné.

6.2. Comment ordonnancer ?

La prise en compte des incertitudes dans l'ordonnancement peut se faire lors de deux phases: *la phase prédictive* et *la phase réactive* (figure 2.4).

- **La phase prédictive** se déroule avant l'exécution de l'ordonnancement. Elle est totalement hors ligne, où un ordonnancement prédictif ou proactif est calculé. Cette phase peut également être appelée «phase proactive» si l'ordonnancement tient compte des incertitudes.
- **La phase réactive** est la phase d'exécution de l'ordonnancement. Son but est de réagir en temps réel aux événements survenus dans l'atelier. Cette phase de l'ordonnancement doit pouvoir répondre en-ligne aux changements des données.

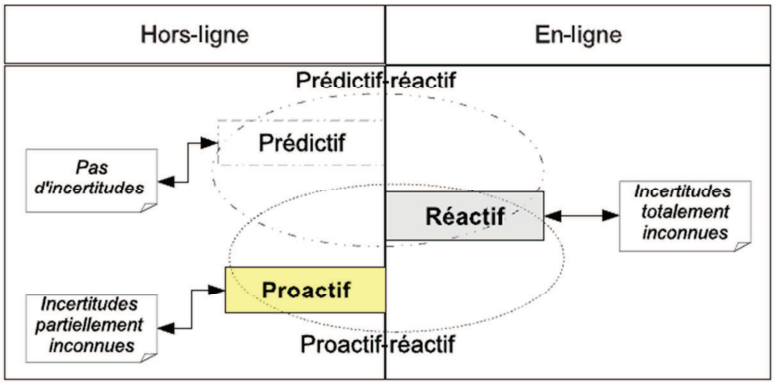

Figure 2.3. Approches de résolution sous incertitudes selon la phase d'ordonnancement développée [Ourari, 2010]

[Davenport *et al.*, 2000] et [Wojakowski *et al.*, 2014] proposent trois approches selon la phase d'ordonnancement dans laquelle l'incertitude est considérée: *les approches réactives*, *les approches proactives*, et *les approches hybrides*.

6.2.1. Les approches réactives

Dans les approches réactives, aussi appelée *« Dynamiques »,* les incertitudes sont considérées lors de l'exécution de l'ordonnancement (phase réactive). Ces approches permettent à l'ordonnancement de réagir face aux événements en temps réel. Dans ces approches, il n'y a aucun ordonnancement pré-calculé et les décisions d'ordonnancement sont totalement prises en temps réel. Les ordonnancements exécutés ne modélisent aucune information liée aux perturbations causées par les événements pouvant surgir. Cette approche est plutôt conduite par les événements d'où le nom d'approches réactives (figure 2.5).

[Aissani *et al.*, 2011] proposent un ordonnancement dynamique de production basé agents et appliqué à une compagnie multi-sites. Pour la modélisation du problème, ils ont utilisé la programmation linéaire. Les agents sont composés de trois modules : *perception*, *action* et *apprentissage-décision*. La prise de décision dynamique est modélisée par un processus de Markov. Quant à l'apprentissage, il est de type par renforcement. Chaque site est composé de 3 types d'agents : agent ressource, agent stock et un agent superviseur. Ce sont les agents ressources qui établissent les ordonnancements suite à une requête du superviseur. Ce dernier recevra la solution générée par l'agent ressources et l'évaluera.

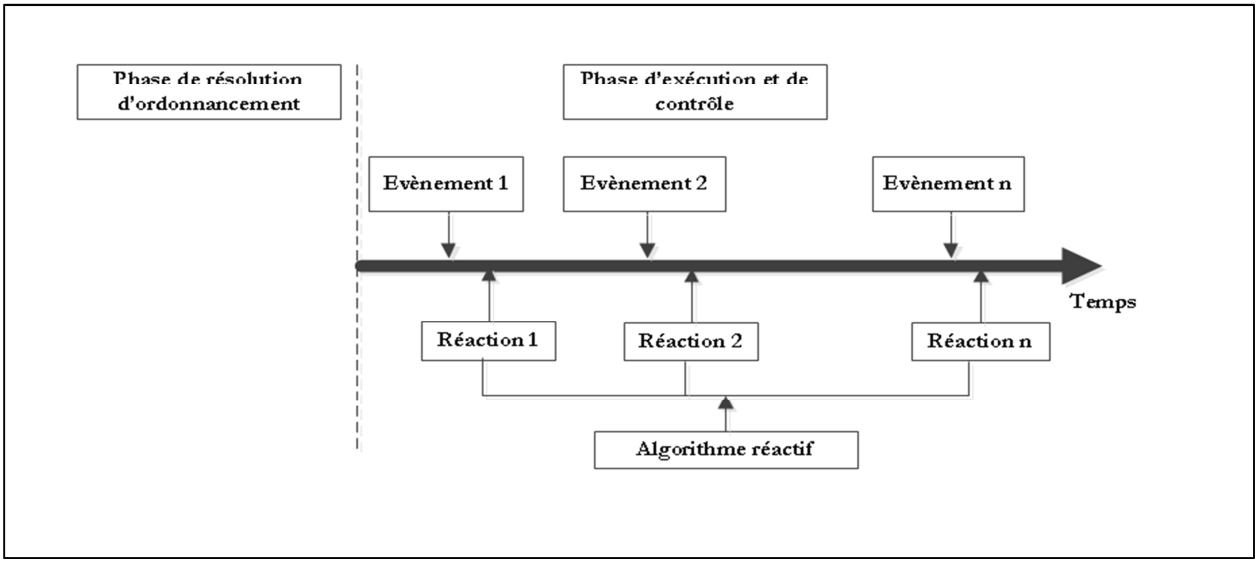

Figure 2.4. Les approches réactives d'ordonnancement de production

Dans [Piltan *et al.*, 2011], les auteurs présentent une méthode de conception d'un contrôleur dynamique flou de production. Il l'a appliquée à la production de torques. La démarche proposée est composée des étapes suivantes: *détermination des entrées et des sorties, choix des variables linguistiques, choix de la fonction d'appartenance* (ils ont choisi la fonction triangulaire)*, choix des règles floues* et enfin la *« déffuzification »*. Les résultats d'après les auteurs étaient très satisfaisants et le système a montré une robustesse vis-à-vis des imprécisions et des événements de l'environnement. Cependant et d'après les auteurs toujours, si les paramètres deviennent plus dynamiques le système peut agir de manière oscillatoire.

6.2.2. Les approches proactives

Ces approches, aussi appelées *approches robustes*, diffèrent des précédentes car elles établissent des ordonnancements hors-ligne avant la phase d'exécution (figure 2.6). L'établissement des ordonnancements nécessite une connaissance des incertitudes prévues (imperfection ou événements perturbateurs). Dans ces approches, c'est l'étape prédictive qui est privilégiée et les incertitudes sont prises en compte lors de la génération de l'ordonnancement prédictif. Les auteurs peuvent prévoir des temps morts par exemple pour les récupérer en cas de retard ou alors peuvent utiliser une modélisation des temps opératoires par intervalles ou par logique floue.

Dans [Petrovic *et al.*, 2011] deux systèmes d'ordonnancement de production ont été proposé: (1) Un ordonnancement proactif basé sur la logique floue a été appliqué dans un atelier d'imprimerie ; (2) Un ordonnancement proactif-réactif basé toujours sur la logique floue pour un atelier de poterie. Bien que les procédés de fabrication dans les deux ateliers soient très différents, les auteurs ont modélisé l'imprécision des paramètres d'ordonnancement, tels que les durées opératoires des opérations et les dates d'échéance des tâches avec de la logique floue. Le premier système est composé d'un système à base de règles floues pour le dimensionnement des lots des jobs, un algorithme génétique pour l'allocation des jobs sur les machines et un algorithme génétique multicritères pour le séquencement des jobs sur les machines.

Pour répondre à l'incertitude et réagir aux événements de l'atelier, les auteurs ont proposé dans le deuxième système un ordonnancement proactif-réactif. Ils ont eu besoin aussi d'un système à base de règles floues pour décider quand est ce qu'il faut réordonnancer.

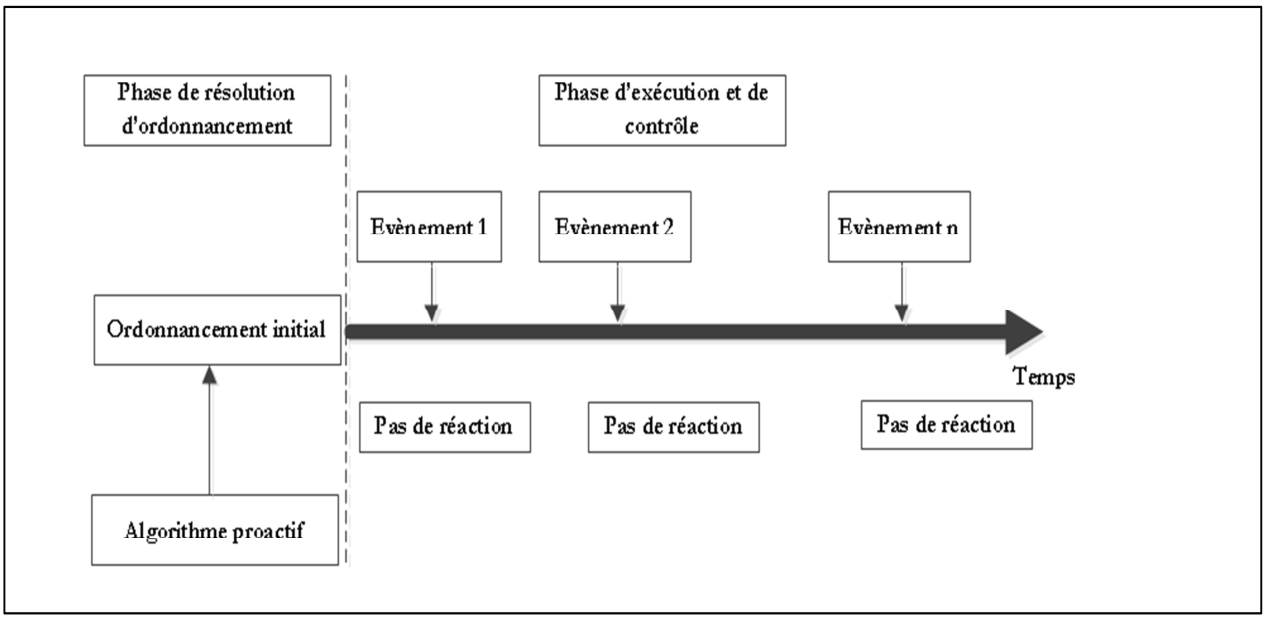

Figure 2.5. Les approches proactives d'ordonnancement sous-incertitudes

6.2.3. Les approches hybrides

Dans ces approches, un ordonnancement initial est calculé dans la phase prédictive. Il peut être proactif ou non. Puis, dans la phase réactive, un ré-ordonnancement est effectué à chaque fois qu'une perturbation est détectée dans l'atelier (figure 2.7).

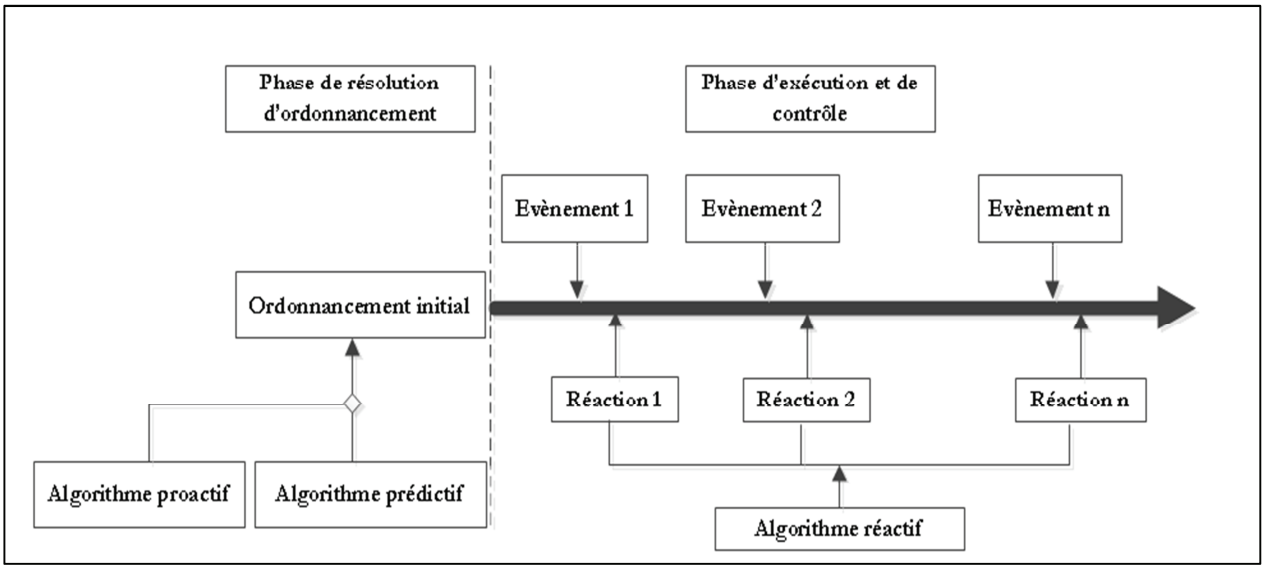

Figure 2.6. Les approches hybrides d'ordonnancement sous-incertitudes

6.3. Discussion

Les travaux dans le domaine des ordonnancements sous-incertitudes ont connu une explosion ces dix dernières années. Beaucoup de chercheurs ont recensé les insuffisances des ordonnancements déterministes. Les travaux proposés différents selon leur modélisation des incertitudes et selon la phase de résolution prise en compte (prédictive ou réactive).

L'incertitude et l'imprécision peuvent être modélisées ou non. Il existe des travaux qui ne proposent pas de modélisation explicite des incertitudes et essayent seulement de proposer des réagencements des tâches dans les ordonnancements en réponse aux perturbations.

Chacune des approches de résolution sous incertitudes présentées précédemment (proactives, réactives et hybrides) présentent des avantages. Les approches totalement réactives sont utilisées quand aucune connaissance préalable n'est disponible sur les incertitudes de l'environnement. Aussi, elles sont recommandées dans les ateliers à haute perturbation où la réaction doit être immédiate en temps réel. Les approches proactives quant à elles sont utilisées pour assurer plus de stabilité dans l'environnement en évitant les ré-ordonnancements répétitifs. Cependant, pour que cela soit possible, les incertitudes doivent être cernées, identifiées clairement puis prises en charge dans les ordonnancements. Enfin, pour les approches hybrides, à notre avis, elles tirent profit des avantages des deux premières approches.

Face aux événements perturbateurs, les approches d'ordonnancement peuvent : rien faire (cas des approches proactives), réordonnancer totalement ou bien réordonnancer partiellement (*réparer)* [Wojakowski *et al.*, 2014]. Les ré-ordonnancements totaux sont à éviter dans le cas où plusieurs contraintes sont prises en compte pour l'établissement de l'ordonnancement initial notamment les contraintes liées aux outillages et celles liées aux ressources humaines. Ces dernières vont se retrouver avec des emplois du temps modifiés à chaque apparition d'événements ce qui provoquera une *instabilité* dans l'atelier.

7. Conclusion

Un grand nombre de travaux existent dans la littérature pour résoudre le problème d'ordonnancement de la production. Ils différent selon l'atelier, les contraintes, les critères et les méthodes de résolutions considérés. Il serait plus adéquat et plus sage de proposer des solutions réalistes et donc applicables afin d'améliorer le travail des opérateurs au niveau contrôle.

La faisabilité des ordonnancements implique, à notre sens, de proposer des ordonnancements de production sous incertitudes mais aussi intégrés avec d'autres activités notamment l'ordonnancement de la maintenance afin d'avoir une vue globale sur les données interconnectées. Ces données reflètent l'état réel des ateliers et permettent donc la génération des solutions sur-mesure répondant aux besoins convenablement.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons les ordonnancements conjoints de production et de maintenance. Nous nous attarderons sur tous les détails du service maintenance afin d'essayer d'améliorer les solutions existantes. Ces dernières comme nous allons le constater ne font que simplifier le problème et sont de ce fait inapplicables.

Chapitre 3

Insuffisances des travaux traitant le problème d'ordonnancement de production en présence de maintenance

Dans le nouveau contexte industriel, les entreprises subissent de grandes pressions de la part de leurs clients. Ces derniers deviennent de plus en plus exigeants et demandent, des produits et des services de bonne qualité, à moindre coût, livrés rapidement et au bon moment avec un service après-vente performant. Pour satisfaire la demande en qualité et en quantité tout en respectant les délais de livraison et les coûts, l'entreprise manufacturière doit disposer d'un outil de production fiable, donc bien entretenu. La maintenance s'impose comme la meilleure solution permettant d'accroître les performances et d'améliorer le niveau de sûreté de fonctionnement de tout système industriel.

L'ordonnancement conjoint de production et de maintenance est un moyen efficace pour proposer des ordonnancements de production et de maintenance applicables. Il constitue un axe de recherche qui a séduit plusieurs chercheurs faisant ainsi apparaître des approches et des algorithmes très intéressants pour résoudre le problème. Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse de ces travaux. A travers nos différentes discussions, nous verrons comment les activités de maintenance sont insérées dans l'ordonnancement de la production de manière à assurer un équilibre entre les objectifs des deux activités.

Avant de présenter l'ordonnancement conjoint de production et de maintenance, nous commençons ce chapitre par une présentation détaillée de l'activité de maintenance afin de pouvoir évaluer les approches proposées.

Maintenir l'appareil de production n'est pas une tâche facile. Les concepts de la maintenance définissent des façons de faire pour maximiser la performance globale de l'entreprise. La mise en œuvre de ces concepts exige des ressources humaines compétentes.

Dans ce chapitre, nous démontrons la nécessité de la considération des contraintes des ressources humaines dans les ordonnancements conjoints de production et de maintenance. En effet, nous ne pouvons pas parler de planification de maintenance sans réservation d'un opérateur humain apte et disponible pour l'exécuter.

1. La maintenance dans les systèmes manufacturiers

La maintenance permet d'assurer la pérennité des équipements et de veiller à ce que le système ne tombe pas en panne et donc de maintenir le fonctionnement de l'appareil de production au plus haut niveau d'efficacité et garder ainsi le seuil de productivité à un niveau stable.

Les entreprises sont de plus en plus sensibilisées à l'importance des coûts induits par les défaillances accidentelles des systèmes de production manufacturiers. La maintenance, jusqu'à très récemment, était considérée comme un centre de coûts. Actuellement, les gestionnaires et décideurs, dans l'entreprise, sont de plus en plus conscients qu'elle peut contribuer d'une manière significative à la performance globale de l'entreprise.

Dans cette section, nous présentons de manière détaillée l'activité de maintenance en précisant sa définition selon l'association AFNOR de normalisation [AFNOR], ses différentes politiques, ses ressources et ses niveaux.

1.1 Définition de la maintenance

[AFNOR, 2002] définie la maintenance comme étant « *l'ensemble des activités destinées à maintenir ou rétablir un bien dans un état ou 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* ». Plus précisément selon [Nguyen *et al.*, 2008], la maintenance sert à réparer les équipements défaillants, préserver les bonnes conditions pour leur exploitation et finalement prévenir leurs pannes pour réduire les évènements hasardeux relatifs aux pannes machines et la perte en production.

Dans la définition de la maintenance, nous trouvons deux mots-clés : maintenir et rétablir [Keffal, 2001]. Le premier fait référence à une action préventive. Le deuxième fait référence à l'aspect correctif. Nous présentons dans les paragraphes qui suivent les définitions de chacune.

1.2 Les politiques de maintenance

Longtemps limitée à une action corrective, la maintenance est de plus en plus considérée comme un gisement de productivité. L'anticipation des pannes de l'outil de production et leurs préventions deviennent un enjeu majeur. Il s'agit de gérer la fonction Maintenance de l'entreprise de façon considérée et réfléchie.

La politique de maintenance consiste à fixer les orientations (méthodes, programme, budget, etc.), dans le cadre des buts et objectifs fixés par la direction de l'entreprise.

Deux classes de politiques de maintenance sont différenciées en fonction de l'occurrence de la défaillance: *la maintenance corrective* et *la maintenance préventive*. La maintenance corrective intervient après l'arrêt total de la machine causé par la panne. Tandis que la maintenance préventive vise à minimiser le nombre de pannes en programmant des maintenances préventives périodiquement.

L'ensemble des politiques appartenant à ces deux classes (figure 3.1) est présenté dans les sous-sections ci-après.

1.2.1 La maintenance corrective ou réactive

[AFNOR, 2002] définit la maintenance corrective comme étant une *« maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise »*.

Techniquement, c'est l'ensemble des activités réalisées après la défaillance, agissant sur les équipements défaillants ou après dégradation de leurs fonctions pour leurs permettre de reprendre leurs activités. Deux politiques de maintenance corrective sont distinguées : palliative ou curative.

a. La maintenance palliative

Activités de maintenance corrective destinées à permettre à un bien d'accomplir provisoirement toute ou partie d'une fonction requise. Appelée couramment *dépannage*, cette maintenance palliative est principalement constituée d'actions (interventions) à caractère provisoire qui devront être suivies d'actions curatives.

b. La maintenance curative

Activités de maintenance corrective ayant pour objectif de rétablir un bien dans un état spécifié ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise. Le résultat des activités réalisées doit présenter un caractère permanant. Ces activités peuvent être des réparations, des modifications ou aménagements ayant pour objectif de supprimer les défaillances.

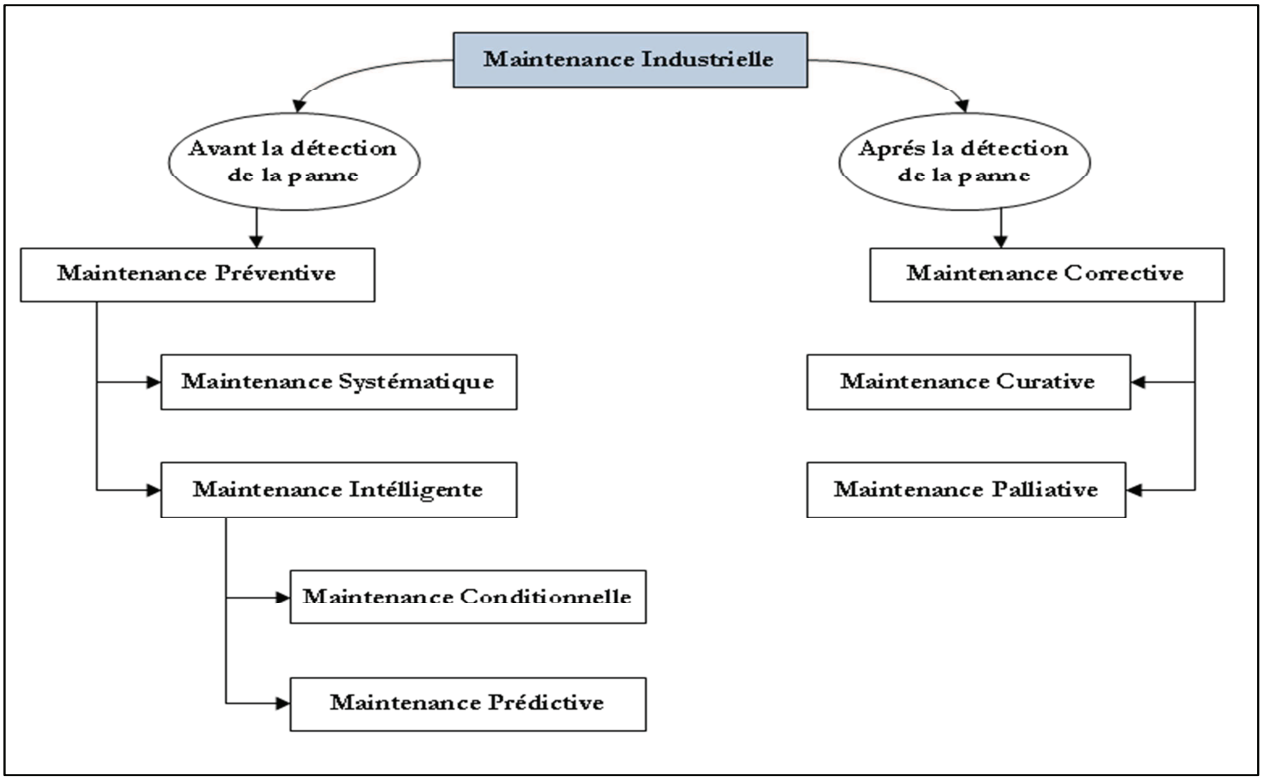

Figure 3.1. Les différentes politiques de maintenance

1.2.2 La maintenance préventive

L'occurrence d'une défaillance peut engendrer une perte de performance totale, la prévention permet d'éviter cette situation en maîtrisant le moment et l'état du système après l'intervention d'une maintenance préventive.

La maintenance préventive est une « *maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien ou d'un service rendu.* » [AFNOR, 2002].

Il faut noter que les actions de maintenance corrective ne peuvent être entièrement éliminées dans les systèmes de productions mais une bonne politique de maintenance préventive permet de réduire considérablement la nécessité des actions de maintenance corrective.

Trois politiques de maintenance préventive sont distingués : systématique, conditionnelle et prédictive. Ces deux dernières politiques sont appelées des *maintenances intelligentes* car elles visent à optimiser le coût de la maintenance.

a. La Maintenance préventive systématique ou basée temps

« *La maintenance préventive systématique comprend l'ensemble des actions destinées à restaurer, en totalité ou partiellement, la marge de résistance des matériels non défaillants. La maintenance préventive est exécutée à des*

intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien» [AFNOR, 2002].

La maintenance préventive systématique est appelée aussi maintenance préventive basée temps (TBM pour Time Based Maintenance). Le terme « temps » fait référence au temps d'exploitation de la machine. La TBM se traduit par deux types d'actions: les interventions planifiées et les inspections périodiques. Les interventions planifiées consistent à nettoyer, réparer ou remplacer certains matériels tels que des composants ou sous-ensembles d'équipements. Les inspections périodiques ont pour but de contrôler ces mêmes composants et sous-ensembles, d'effectuer des révisions mineures ou majeures d'équipements, voire d'ateliers entiers lors d'arrêts généraux.

En pratique, un certain écart (positif ou négatif) est toléré par rapport à la période idéale de maintenance T^*_j d'une activité M_j. Cette tolérance se matérialise par la mise en place d'*un intervalle* dit *de tolérance* [Benbouzid-Si Tayeb *et al.*, 2003] autour de chaque période de maintenance T_j . Durant cet intervalle, le coût de la maintenance, si elle est avancée ou retardée, est faible. La périodicité T_j de la tâche M_j est donc autorisée à varier dans cet intervalle noté [$Tmin_j$, $Tmax_j$] (figure 3.2)

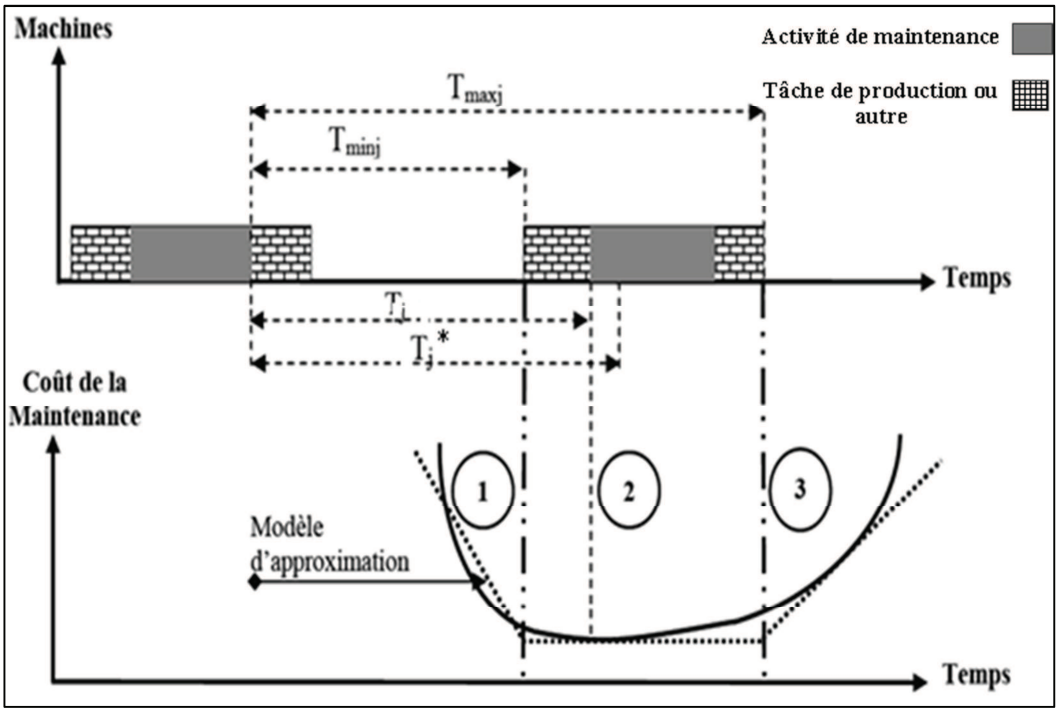

Figure 3.2. Intervalle de tolérance d'une activité de maintenance [Benbouzid-Si Tayeb *et al.*, 2003]

L'intervalle de tolérance représente un bon compromis entre le coût de maintenance et le risque de perte de disponibilité de la machine. Si la période, entre deux maintenances successives, est inférieure à Tmin (Figure 3.2-Zone 1), les interventions seront trop fréquentes, par rapport aux besoins réels de la machine en maintenance, et induiront ainsi un coût de maintenance trop élevé. Dans le cas contraire, c'est-à-dire une tâche de maintenance qui serait programmée après $Tmax_j$ (Figure 3.2-Zone 3), des pannes risquent d'apparaître et par conséquent les interventions de maintenance corrective aussi, ce qui est pénalisant en terme de disponibilité de la machine. Cet état de fait induit un accroissement du coût de la maintenance et une perte de productivité. Par contre, une intervention planifiée dans l'intervalle [$Tmin_j$, $Tmax_j$] induira un coût de maintenance relativement constant, sachant que l'optimum est atteint à T_j*.

b. La Maintenance Intelligente

Selon [El Khatib *et al.*, 2000], la maintenance corrective peut être très coûteuse en termes de perte de production et de destruction des machines. En plus, elle représente un danger aux personnels. Pour la maintenance préventive systématique, le plus grand défi est de trouver l'intervalle approprié pour la machine.

Afin de minimiser le nombre d'interventions préventives, les intervalles entre ces dernières doivent varier selon l'état du système. La surveillance de l'état du système nécessite l'implantation des capteurs qui enregistrent des variables (tels que la vibration, la température, la pression …) décrivant l'état du système en continu. Le rôle de la surveillance est d'observer l'état de dégradation du matériel et déclencher une alarme lorsque la dégradation atteint un niveau inacceptable.

Un système de maintenance intelligente est un système qui utilise les données recueillies à partir des contrôleurs des machines afin de prévoir et de prévenir des défaillances potentielles.

La pratique de la maintenance intelligente peut aider à améliorer la disponibilité, la fiabilité et la sécurité tout en réduisant les coûts de maintenance. Elle peut remplacer les traditionnelles politiques de maintenance impliquant les maintenances correctives et préventives systématiques.

Deux stratégies de maintenance suivent ce principe de contrôle: *la maintenance prédictive* et *la maintenance conditionnelle.*

b.1. La Maintenance préventive prédictive

La maintenance prédictive est une « *maintenance préventive subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation du bien, permettant de retarder et de planifier les interventions* » [AFNOR, 2002].

Plus exactement, elle est connue sous le nom de *maintenance prévisionnelle basée sur le pronostic de l'état de santé* (en Anglais PHM pour Prognostic Health Management ». Elle permet d'évaluer l'évolution future des indicateurs considérés comme représentatifs de l'état du matériel et permet de déduire, par le franchissement d'un seuil, la date de la future défaillance ou la valeur de la durée de vie utile restante (en Anglais RUL pour Remaining Useful Life).

Ces évaluations doivent donc prédire les évolutions futures des matériels en considérant l'ensemble des paramètres influant provenant des contextes opérationnels et environnementaux futurs ainsi que des actions de maintenance futures.

b.2. La maintenance préventive conditionnelle ou basée cas

La maintenance préventive conditionnelle (CBM pour Case Based Mainteance) « *comprend toutes les tâches de restauration de matériels ou de composants non défaillants, entreprises en application d'une évaluation de l'état du matériel par rapport à un critère d'acceptation préétabli (défaillance potentielle)* » [AFNOR, 2002].

La maintenance préventive conditionnelle est à appliquer sur les équipements critiques qui impliquent des coûts d'arrêt de production prohibitifs, et ou encore les équipements dangereux pouvant menacer la sécurité des personnes et des biens. Cette stratégie s'appuie sur la dégradation du matériel et non sur sa défaillance. Elle permet de déclencher l'opération de maintenance lors du franchissement d'un seuil représentant le niveau de dégradation maximal tolérable.

Selon [Tobon-Mejia *et al.*, 2011], lors de la mise en place d'une CBM, le pronostic de panne est considéré comme l'un des principaux objectifs, car il permet d'estimer le RUL avant la défaillance d'un système donné.

Il existe une multitude d'outils disponibles aujourd'hui aidant à détecter les problèmes de la machine avant qu'ils ne deviennent des pannes réelles ; comme l'échographie et l'imagerie infrarouge. Pour employer correctement ces outils, une bonne étude et compréhension du comportement des machines doit être établie en premier lieu.

Si la machine fonctionne encore, cela ne signifie pas que les pannes n'ont pas déjà commencé à se produire au sein du système. En effet, la plupart des premiers signes de pannes ne peuvent pas être détectés sans les outils mentionnés ci-dessus. En examinant de près la courbe P-F (Figure 3.3), le coût de la maintenance peut être mieux maitrisé.

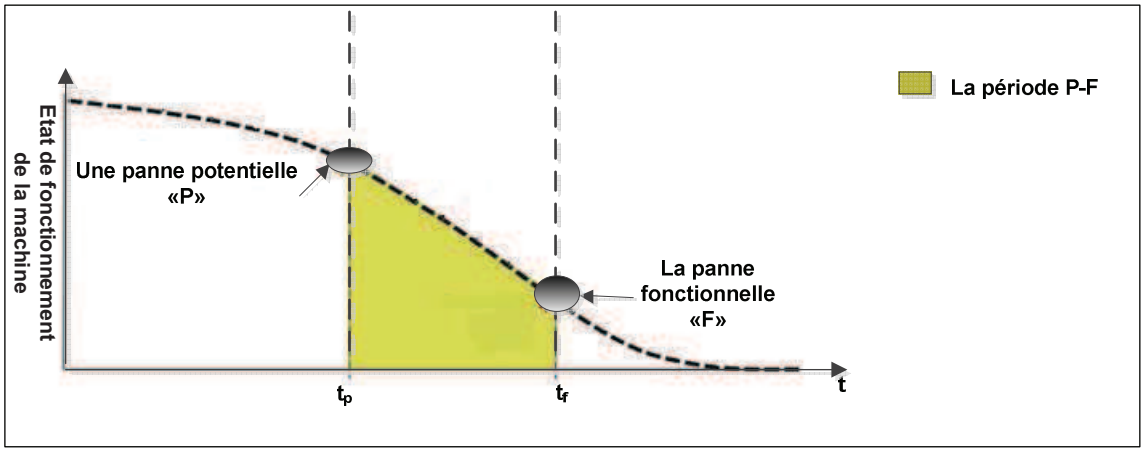

Figure 3.3. La courbe P-F

Sur l'axe X des coordonnées de la courbe P-F qui correspond au temps, des défauts peuvent être détectés à l'instant t_p (le point « P» avant que la défaillance ne se produise au point « F »). Entre les point P et F, des maintenances préventives peuvent être programmées pour éviter les pannes fonctionnelles. L'urgence de la programmation de ces maintenances dépend de la longueur de cet intervalle. Toute fois même si l'intervalle est grand, un risque de panne est toujours présent car l'estimation du RUL est approximative et la probabilité d'une panne augmente au fil du temps. Le gestionnaire de maintenance en choisissant de retarder la maintenance préventive prendra le risque d'une éventuelle panne de son équipement.

1.2.3 Discussion

Le rôle du responsable de maintenance a bien évolué, au-delà de ses connaissances techniques. Il doit désormais trouver le juste équilibre entre les exigences économiques imposées par les dirigeants (respect des délais de production, optimisation des coûts de production et de maintenance) et la disponibilité sans faille des équipements dont il est responsable. C'est pour ça qu'il doit choisir la politique nécessaire pour chaque type d'équipement.

L'optimisation de la maintenance consiste à trouver le meilleur compromis entre maintenance préventive et corrective tout en respectant les objectifs fixés. Il faut alors déterminer les actions de maintenance à effectuer et leur planification de manière à optimiser un critère de décision fixé. Ce critère de décision peut aussi bien se baser sur le coût, par exemple un coût moyen de maintenance à long terme ou le coût d'opération par unité de temps, que sur la disponibilité du système ou encore la sécurité [Castanier, 2002] [Hopp *et al.*, 1998].

La figure 3.4 présente une comparaison entre les différentes politiques de maintenance en termes de coût de maintenance et de nombre de pannes.

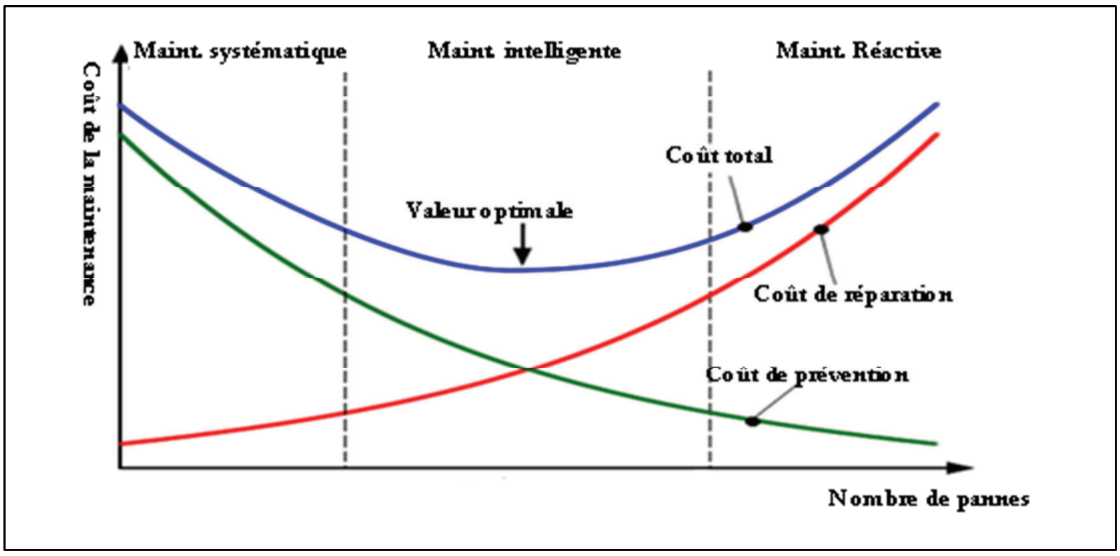

Figure 3.4. Comparaison du coût de maintenance des différentes politiques de maintenance

Nous remarquons que le coût total de maintenance (de réparation et de prévention) est optimal en appliquant les maintenances dites intelligentes représentées par la maintenance conditionnelle et prédictive. En effet, cette politique de maintenance permet de programmer les maintenances préventives seulement quand c'est nécessaire économisant ainsi en coût de maintenance par rapport aux maintenances systématiques et réactives.

1.3 Les ressources du système de maintenance

Les opérations de maintenance pour être exécutées nécessitent la disponibilité d'un ensemble de ressources comme: les données techniques, les équipements d'essai, les pièces de rechange, l'outillage et la ressource humaine.

1.3.1 Les données techniques

Pour réaliser les opérations de maintenance sur une machine de production, il faut disposer d'un certain nombre de documents et en créer d'autres. Il s'agit en pratique de deux types de documents : *le dossier technique* et *le dossier de maintenance*.

a. Le dossier technique doit contenir tous les renseignements nécessaires à une intervention de maintenance. Il est composé de documents décrivant: *(i)* l'implantation et la nomenclature des composants qui permettent de les situer sur le système ; *(ii)* l'analyse du système du point de vue fonctionnel et du point de vue temporel (décrire le fonctionnement des différentes séquences en fonction du temps) ; et *(iii)* les schémas électriques qui sont indispensables en maintenance.

b. Le dossier de maintenance permet de suivre dans le temps toutes les défaillances du système. C'est le carnet de santé de l'équipement électrique. Il comprend : *(i)* l'historique des interventions ; *(ii)* le processus de visite préventive, document qui indique à l'opérateur les routines de contrôle ou de vérification à effectuer sur l'équipement et la périodicité de ces visites ; et *(iii)* le compte rendu de visite pour signaler les travaux à effectuer sur un équipement et leur urgence.

1.3.2 Les bancs ou les équipements d'essai

Ce sont des systèmes physiques permettant de mettre une machine en conditions d'utilisation paramétrables et contrôlées afin d'observer et mesurer son comportement. Le banc de test est largement utilisé dans l'industrie, au point de représenter une part importante du budget de développement de n'importe quel produit électrique. Selon le cycle de vie de la machine, plusieurs catégories de bancs peuvent être distinguées.

En phase de maintenance, il est plutôt appelé *« banc de charge pour la maintenance »*. Dans ce cas, c'est un outil permettant au technicien de maintenance de diagnostiquer la panne de la machine défectueuse (essentiellement dans le domaine de l'électronique). Le banc sert à mesurer les performances de la machine, permet de localiser l'origine de la panne et dans certains cas proposer le remplacement des pièces défectueuses.

1.3.3 Les pièces de rechange

La définition la plus simple d'une pièce de rechange est la suivante : « *une pièce de rechange est une pièce destinée à remplacer une pièce défectueuse ou dégradée d'un bien en exploitation* ».

Le maintien d'un matériel dans des conditions de fonctionnement satisfaisantes, suppose que tout composant qui n'est plus conforme à ses spécifications, soit : (i) suite à un accident, (ii) soit du fait de l'usure entraînée par le fonctionnement, (iii) soit parce que l'âge a modifié ses caractéristiques (cas des pièces en caoutchouc), doit être remplacé par un élément neuf, ou à la rigueur reconditionné de façon à retrouver des caractéristiques initiales.

L'optimisation de la gestion des pièces de rechange est un levier clé de performance des activités de maintenance. D'une part, la remise en fonctionnement des machines après défaillance et donc leur disponibilité dépendent directement de la mise à disposition des pièces qui les composent. D'autre part, ces pièces représentent un poste important du budget de maintenance, tant en termes d'achats que de coûts logistiques (transport, stockage, manutention). Il est d'usage de constater que jusqu'à 80% des pièces de rechange tenues en stock sont rarement utilisées (pas de mouvement sur plusieurs années) et que 50% des surstocks seront obsolètes dans un délai de 4 ans. De plus, 40% des surstocks sont liés aux achats initiaux et donc à une surestimation des besoins [Meunier, 2012].

Il s'agit donc d'instruire le compromis entre une couverture de stocks élevée mais onéreuse, destinée à garantir une disponibilité importante (voire immédiate) des pièces et une couverture de stock insuffisante, susceptible d'engendrer des pertes de disponibilité des machines actives.

Durant la dernière décennie, l'optimisation de la gestion des pièces de rechange a pris une place importante dans les recherches en maintenance.

[Wang *et al.*, 2015] partent du constat que la plupart des problèmes de contrôle des stocks dans le monde réel impliquent plusieurs échelons. Dans leur travail, ils proposent un algorithme basé sur l'optimisation par essaims pour la gestion des pièces de rechange à deux échelons : (1) il existe un certain nombre d'installations de maintenance et des pièces de rechange au premier échelon, et (2) une seule installation de maintenance et un entrepôt au deuxième échelon. Chaque installation de maintenance dispose d'un stock de réserve correspondant, qui dispose de certains types de pièces de rechange. Lorsqu'une ressource matérielle tombe en panne, l'unité défectueuse sera remplacée si une pièce de rechange existe dans le stock du premier échelon. Sinon, elle est commandée auprès du stock du deuxième échelon. L'installation de réparation locale tente de réparer les pièces défaillantes qui sont réparables sur place. Sinon, les pièces seront envoyées à la deuxième installation pour réparation. Les unités qui ont été réparées seront conservées dans le stock local comme pièces de rechange.

[Alhouaij, 2010] a proposé une méthode de gestion de la maintenance distribuée. L'objectif de ce travail est l'intégration de la fonction de maintenance dans un système de production possédant

plusieurs sites de production afin d'améliorer leurs performances et leurs sûreté de fonctionnement. Cette intégration se fait depuis la phase de conception jusqu'à la réalisation et la mise en œuvre. SL'auteur étudie le cas d'une entreprise constituée de plusieurs sites de production distribués géographiquement et possédant des machines complexes qui nécessite des techniciens spécialisés pour les diverses interventions de maintenance. Les équipements sont soumis à une maintenance préventive effectuée par un atelier mobile qui est en charge des visites régulières avec une politique de remplacement. Les équipements défaillants sont quant à eux réparés dans un atelier central de maintenance. Le système proposé gère les ressources de maintenance (techniciens, pièces de rechange, …), et planifie les tâches de maintenance.

[Rausch, 2010] propose un contrôle conjoint de production et de pièces de rechange en appliquant la maintenance conditionnelle. Une machine critique est continuellement contrôlée pour mesurer la dégradation de ses performances. Le coût de la dégradation est utilisé pour planifier l'activité de maintenance nécessaire. Cette planification doit prendre en compte l'inventaire des pièces de rechange, la taille des lots de production et les dates limites de réalisation.

1.3.4 L'outillage

L'outillage est tout équipement matériel aidant l'opérateur à réaliser l'activité de maintenance qui lui est affectée. La possibilité de l'intervention dépend donc de la disponibilité de cet outillage qui peut nécessiter une réservation. Certains outillages sont déplaçables, d'autres non. Parmi l'outillage déplaçable nous pouvons citer trois types d'outillages : (1) *l'outillage courant*, dont chaque opérateur de maintenance dispose (caisse à outils), (2) *l'outillage spécifique*, ou coûteux (matériel électro-portatif par exemple) qui est en quantité limitée et nécessite une réservation et (3) *l'outillage lourd,* qui n'est pas déplaçable, est en quantité limité. Il nécessite une intervention dans les locaux du service de maintenance et non sur site. L'utilisation de tels outils nécessite aussi d'être anticipée [Marmier, 2007]. Malheureusement, dans la littérature, il n'existe pas de travaux qui considèrent les contraintes liées à la gestion de l'outillage dans la planification de la maintenance.

1.3.5 Les ressources humaines

La ressource humaine constitue une composante importante au sein de n'importe quelle entreprise. Son degré d'importance varie selon le secteur d'activités de cette dernière.

La ressource humaine constitue un élément essentiel dans l'accomplissement de l'activité de maintenance. En effet, plus de 80% des activités de maintenance se font manuellement faisant intervenir des ressources humaines avec différents profils. La compétence des intervenants a un impact important sur les durées opératoires des activités qui leur sont allouées. Malgré cela, peu de travaux intègrent les contraintes relatives aux ressources humaines en ordonnancement de maintenance.

Nous consacrons toute la section 3 à l'étude de l'importance de l'insertion des contraintes des ressources humaines dans l'ordonnancement de la maintenance.

1.4 Les niveaux de maintenance

Afin de réussir un système de maintenance, il serait nécessaire de spécifier les niveaux de maintenance dans l'entreprise. [Monchy, 1991] [Lyonnais, 1992] proposent cinq niveaux de maintenance qui font référence à la complexité des tâches à effectuer et aux ressources humaines et matérielles nécessaires à la réalisation de chacune des tâches (tableau 3.1) :

– *1er niveau concerne les* réglages simples prévus par le constructeur au moyen d'organes accessibles sans aucun montage d'équipement ou échange d'équipements accessibles en toute sécurité.

– *2ème niveau* concerne les dépannages par échange standard d'éléments prévus à cet effet ou d'opérations mineures de maintenance préventive.

– *3ème niveau* concerne l'identification et le diagnostic de pannes, la réparation par échange de composants fonctionnels et les réparations mécaniques mineures.

– *4ème niveau* concerne les travaux importants de maintenance corrective ou préventive.

– *5ème niveau* concerne les travaux de rénovation, de reconstruction ou réparations importantes confiées à un atelier central.

Tableau 3.1. Les ressources nécessaires pour chaque niveau de maintenance.

Niveau AFNOR	Type de travail	Personnels intervenants	Moyens
Niveau 1	Réglage simple d'équipements accessibles sans démontage, échange d'éléments.	Opérateurs sur place.	Outillage léger défini dans la notice d'utilisation.
Niveau 2	Réparation ou dépannage par échange standard, opérations simples de prévention.	Opérateurs habilités sur place.	Outillage standard et pièces de rechange situés à proximité
Niveau 3	Identification d'origines de pannes, échange de composants fonctionnels.	Techniciens spécialisés, sur place ou en atelier de maintenance.	Outillage et appareils de mesure.
Niveau 4	Travaux importants de maintenance préventive et corrective	Equipe encadrée par un technicien spécialisé en atelier central.	Outillage général et spécialisé.
Niveau 5	Travaux de rénovation, de reconstruction et de réparations importantes, confiés aux sous-traitants.	Equipe polyvalente complète en atelier central.	Moyens importants proches de ceux du constructeur.

1.5 Ordonnancement de la maintenance

Le rôle de l'ordonnancement de la maintenance est la planification de la réalisation des tâches de maintenance sur les machines de production. Cette planification concerne en général les maintenances préventives (périodiques, prédictives ou conditionnelles) car elles sont programmables. Il consiste à fixer les dates de début et de fin des tâches de maintenance et réunir les moyens prévus pour leurs réalisations. Les activités principales de l'ordonnancement de la maintenance sont: *la programmation*, *le lancement* et *l'approvisionnement*.

– *La programmation* est l'intégration d'une tâche dans un planning en lui choisissant une date de début et une date de fin.

– *Le lancement* a pour but de rassembler tous les moyens nécessaires à la réalisation d'une tâche afin d'assurer leur disponibilité au moment de l'intervention.

– *L'approvisionnement* est responsable de la disponibilité des consommables et des pièces de rechange.

La figure 3.5 présente les éléments nécessaires pour l'établissement d'un ordonnancement de maintenance réaliste et applicable.

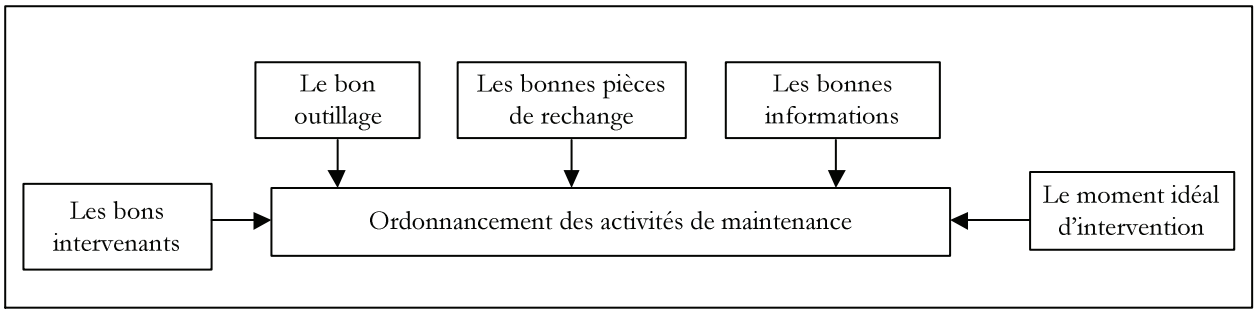

Figure 3.5. Eléments nécessaires pour un ordonnancement de maintenance réalisable

Malgré d'innombrables travaux traitant le problème d'ordonnancement de la maintenance, à notre connaissance, il n'existe pas de travaux qui prennent en considération les contraintes liées aux différentes ressources de la maintenance. La plupart des travaux traitent uniquement l'activité de programmation et ignorent les activités d'approvisionnement et de lancement ce qui rend les solutions proposées trop simplistes et éloignées de la réalité des ateliers de production.

2. Ordonnancement conjoint de production et de maintenance

Les matériels et équipements deviennent de plus en plus complexes et leur coût de plus en plus élevé. Par conséquent, de nombreuses entreprises cherchent à assurer une meilleure organisation de la fonction maintenance et une amélioration de ses relations avec la production.

En pratique, les étapes de réalisation de la maintenance se déroulent durant le processus de production qui doit en tenir compte. Une politique commune de gestion de la production et de la maintenance doit alors être mise en place. Son objectif est d'obtenir le meilleur compromis entre les coûts des services et la disponibilité des équipements obtenue.

Il existe en effet une relation fusionnelle entre la production et la maintenance justifiant la nécessite de coopération entre les deux services pour une meilleure optimisation de la gestion de l'atelier. Cette coopération n'est pas seulement nécessaire pour la programmation des activités mais aussi pour toutes les étapes de maintenance : le diagnostic, la préparation et la définition des programmes de maintenance, la consignation des équipements ou encore la réalisation de l'intervention elle-même. L'interdépendance des fonctions maintenance et production conduit en effet à ce que l'activité des uns soit tributaire des informations détenues par les autres: d'un côté, les informations détenues par les opérateurs de production peuvent avoir un rôle déterminant dans le déroulement des interventions de maintenance. De l'autre côté, la connaissance précise des équipements dont dispose la maintenance peut être essentielle pour la production.

[Grusenmeyer, 2000] a présenté une étude détaillée de la relation entre la production et la maintenance dans une fonderie d'aluminium. L'auteur s'intéresse principalement à la maintenance corrective. Des analyses de contenus effectuées, à partir d'entretiens avec plusieurs interlocuteurs, directement concernés par la maintenance, ont illustré la relation conflictuelle entre les deux services de production et de maintenance.

Les griefs de la production se résument dans l'opinion que le personnel de production se fait des agents de maintenance :

- « jamais disponibles »,
- « pas joignables »,
- des délais d'intervention trop longs

- pas d'information sur la fin de l'intervention
- etc.

Les griefs de la maintenance se résument dans le fait de crouler sous les demandes d'interventions et les bons de travaux, systématiquement déclarés comme urgents et importants, ingérables avec les ressources de plus en plus limitées qui lui sont consenties. Les interventions des agents ne peuvent se faire dans de bonnes conditions, tant que les responsables de production, obsédés par la perte de temps et la reprise de la production, les pressent de faire au plus vite.

Par ailleurs, les agents de maintenance reprochent aux opérateurs de production leur négligence et le manque de respect pour les machines qui leur sont confiées. Les plannings d'interventions planifiées sont rarement tenus, les créneaux horaires réservés à la maintenance souvent annulés pour des raisons de commandes urgentes ou de retards de production. Le client étant roi, les impératifs de la production l'emportent systématiquement. La maintenance n'a plus qu'à s'en accommoder.

Ce manque de coordination entre les équipes de production et de maintenance peut nuire au bon fonctionnement des ateliers. Il conduit d'un côté, à un arrêt du processus de production à cause des interventions prématurées sur les machines ce qui reporte l'exécution des tâches de production. D'un autre côté, l'exploitation excessive des machines de production et le report des interventions de maintenance entraineront sans doute une dégradation de l'état des machines voire leur arrêt total.

La solution pour remédier à ces problèmes est la réalisation d'un ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance étudié et devant **être respecté** par les deux services. L'intérêt majeur de l'ordonnancement conjoint est d'assurer un compromis entre le coût de maintenance et le risque de la perte de la disponibilité des machines.

2.1. Définition et classification

Un ordonnancement conjoint de production et de maintenance est composé de tâches de production et de maintenance construit à l'issu d'une coordination entre les deux services respectifs. Il faut préciser que l'établissement de ce type d'ordonnancement entre dans une stratégie préventive de maintenance. Ainsi les activités de maintenance peuvent être périodiques, conditionnelles ou prédictives. Pour les maintenances correctives, et vu le caractère accidentel des pannes, elles ne peuvent pas être planifiées à l'avance dans un ordonnancement conjoint.

L'ordonnancement conjoint de production et de maintenance est le fruit d'une stratégie appelée « maintenance productive totale » (en anglais TPM pour total productive maintenance) née officiellement au Japon en 1971[JIPM, 2017]. La signification de cette expression est la suivante :

- *Maintenance* : maintenir en bon état, c'est-à-dire réparer, nettoyer, graisser et accepter d'y consacrer le temps nécessaire.
- *Productive* : assurer la maintenance tout en produisant, ou en pénalisant le moins possible la production.
- *Totale* : considérer tous les aspects et y associer tout le monde.

Du point de vue de la conduite de machines, cela signifie chercher à maximiser le temps productif, réduire le temps non productif dû aux arrêts et pannes, conserver les cadences optimales et réduire la non-qualité. Ce sont les trois leviers qu'utilise la TPM : disponibilité, performance et qualité.

L'impact de l'insertion des activités de maintenance dans les ordonnancements de production provoque effectivement une perte de performance. Cependant, elle est profitable pour la robustesse de ce dernier face aux perturbations [Benbouzid-Si Tayeb, 2005]. En effet, la maintenance préventive diminue la disponibilité des équipements au profit de la qualité.

Plusieurs stratégies d'ordonnancement conjoint de production et de maintenance existent. Parmi ces stratégies, nous citons : l'ordonnancement séparé, l'ordonnancement séquentiel et l'ordonnancement intégré.

2.1.1. L'ordonnancement séparé

En appliquant cette stratégie, chacun des services de production et de maintenance établie séparément l'ordonnancement de son activité. Par la suite, des négociations sont menées afin de trouver un compromis entre les deux ordonnancements. Bien que c'est facile d'établir l'ordonnancement initial de chacune des activités parce qu'aucune contrainte de disponibilité des équipements n'est considérée, les négociations pour établir l'ordonnancement conjoint final est une tâche pénible qui peut causer une perte de temps considérable.

2.1.2. L'ordonnancement séquentiel

Cette stratégie consiste à planifier l'une des deux activités, maintenance ou production, et à utiliser cet ordonnancement comme une contrainte supplémentaire d'indisponibilité des ressources dans la résolution du problème d'ordonnancement de l'ensemble des deux types d'activités. De manière générale, la maintenance est planifiée en premier, par la suite l'ordonnancement de la production est réalisé en prenant les opérations de maintenance comme des contraintes fortes d'indisponibilité des ressources.

2.1.3. L'ordonnancement totalement intégré

Cette stratégie consiste à concevoir un ordonnancement conjoint et simultané des tâches de maintenance et de production. Une telle politique de planification limite les risques d'interférence entre production et maintenance et permet ainsi d'optimiser la qualité des ordonnancements.

2.2. Synthèse des travaux portant sur l'ordonnancement conjoint de production et de maintenance

Le nombre de travaux en ordonnancement conjoint de production et de maintenance a augmenté de manière considérable durant ces dernières années car les chercheurs ont relevé l'efficacité des solutions proposées du moment qu'elles sont plus applicables.

La plupart des synthèses bibliographiques de cet axe de recherche classe les travaux existants selon le type d'ateliers (machine unique ou multi-machines). Dans notre travail, nous avons choisi d'établir une synthèse selon la politique de maintenance prise en considération car nous avons pu constater dans la littérature que bien souvent les approches n'intègrent pas plusieurs politiques de maintenance en même temps malgré que ce soit le cas dans les ateliers. Nous classifions de ce fait, les solutions proposées en deux catégories :

- **Les ordonnancements conjoints de production et de maintenance hors-ligne.** Cette catégorie de travaux propose *des ordonnancements hors-ligne* déterministes ou sous-incertitudes. Dans le cas de la maintenance préventive systématique, le nombre d'interventions nécessaires pour chaque machine peut être prévu à l'avance en fonction de l'horizon de production et aussi de la périodicité optimale T^* de la maintenance. Aussi, en fonction du RUL, un certain nombre de maintenances préventives peut être prévu dans le cas de la maintenance prédictive. Par conséquence, un ordonnancement hors-ligne peut être réalisé en fonction du besoin en maintenances préventives. Ces ordonnancements peuvent être déterministes ou sous-incertitudes. Dans ce dernier cas, ils prennent

en compte les incertitudes liées aux estimations des temps opératoires et des dates de début et de fin des opérations de production et/ou de maintenance.

- **Les ordonnancements conjoints de production et de maintenance en-ligne.** Cette catégorie propose *des ordonnancements en-ligne* en réponse à des évènements. Dans le cas de la maintenance corrective, l'évènement est l'occurrence effective d'une panne machine nécessitant une intervention immédiate du service de maintenance pour remettre l'équipement en marche. Tandis que dans le cas de la maintenance conditionnelle, il s'agit seulement d'une anomalie de fonctionnement indiquant la nécessité de la planification d'une maintenance préventive pour éviter l'arrêt total de l'équipement

Dans les sections suivantes, nous présentons les travaux relatifs à chacune des deux catégories précitées.

2.2.1. Les ordonnancements conjoints de production et de maintenance hors-ligne

D'après notre revue de la littérature, la majorité des travaux traitant l'ordonnancement conjoint de production et de maintenance s'intéresse aux maintenances systématiques. Ces travaux proposent des algorithmes d'optimisation pour résoudre le problème d'ordonnancement en essayant de trouver le meilleur agencement des activités de production et de maintenance systématiques.

a. Cas de la maintenance systématique

De manière globale, les travaux proposés dans cette catégorie ont comme entrée l'ensemble des tâches de production et de maintenance systématiques avec leur différentes caractéristiques (durées opératoires, date de disponibilité, date d'échéance, etc.). Les solutions proposées essayent de trouver le meilleur agencement des travaux de production et de maintenance qui optimise un ou plusieurs objectifs. Ceci en utilisant des méthodes exactes ou approchées. Il peut s'agir de l'optimisation d'un seul objectif, généralement la date d'achèvement de la dernier tâche sur la dernière machine ou Cmax [Fnaiech *et al.*, 2015], le retard algébrique [Pan *et al.*, 2012] ou une agrégation d'un objectif de production et d'un autre de maintenance. Les auteurs dans[Xiao *et al.*, 2016], proposent un modèle d'ordonnancement conjoint pour minimiser le coût total qui est une somme pondérée du coût de la production, du coût de la maintenance préventive, du coût minimal de réparation des défaillances inattendues et du coût total du retard.

Dans le cas d'une optimisation multi-objectifs, une solution Pareto-optimale est choisie. [Wang *et al.*, 2015] ont étudié un problème d'ordonnancement parallèle multi-objectifs avec deux types de ressources (machines et moules) et des maintenances préventives sur ces ressources. L'objectif est de minimiser simultanément le C_{max} des jobs de production, l'indisponibilité des machines ainsi que celle des moules du système. Quant au travail présenté dans [Ye *et al.*, 2015], les auteurs cherchent à optimiser une fonction multi-objectifs considérant le C_{max} et le coût de la maintenance.

Les maintenances systématiques considérées dans les ordonnancements conjoints peuvent être de même type avec plusieurs occurrences [Benbouzid-Si Tayeb *et al.*, 2011] ou de plusieurs types différents. C'est ce dernier cas qui est plus proche de la réalité des ateliers de production. En effet, les machines peuvent nécessiter différents types d'entretiens comme la lubrification, le nettoyage, l'inspection, l'ajustement, l'alignement et/ou le remplacement. Ces types ont toujours différentes durées opératoires et différentes périodicités. [Mokhtari *et al.*, 2011] ainsi que [Wong *et al.*, 2013] proposent un ordonnancement conjoint de production et de maintenance qui tient compte de plusieurs types d'activités de maintenance.

Pour la prise en compte des incertitudes, très peu de travaux sur les maintenances systématiques les considèrent. Nous rencontrons plutôt ce type dans les travaux traitant la maintenance prévisionnelle.

b. Cas de la maintenance prévisionnelle

A l'issue de notre étude bibliographique, nous avons relevé l'intérêt croissant des chercheurs pour la maintenance prévisionnelle vu qu'elle propose la programmation des maintenances préventives selon les prévisions de l'état de santé des machines évitant ainsi des maintenances inutiles. Dès lors que c'est une nouvelle piste de recherche en ordonnancement conjoint de production et de maintenance, nous n'avons pu trouver que des travaux sur des ateliers à une machine multifonctionnelle qui peut réaliser plusieurs types de travaux.

Dans [Ladj *et al.*, 2015], chaque travail de production détériore la machine avec un degré diffèrent. Une maintenance préventive est programmée quand un seuil de détérioration est atteint suivant le RUL estimé de la machine. L'objectif global est la minimisation du coût total de la maintenance. Dans le même contexte, [Mifdal *et al.*, 2014] propose une approche stochastique séquentielle d'intégration de la production et la maintenance. L'horizon de planification est divisé en plusieurs périodes où chaque type de produit est réalisé pendant chacune d'elles. Au début, un plan stochastique optimal de production est établi. Puis sur la base de ce plan, les maintenances préventives sont programmées et ceci selon la détérioration des machines causée par les jobs de production.

[Lu *et al.*, 2015] proposent une approche proactive d'ordonnancement conjoint de production et de maintenance dans un atelier à une machine. La solution proposée cherche à optimiser la robustesse et la stabilité de l'ordonnancement. Selon le degré de détérioration de la machine, les maintenances préventives sont programmées. Pour assurer la robustesse de la solution et la stabilité de l'ordonnancement, les auteurs ont prévu un intervalle de temps mort avant le début de l'exécution des travaux. Vu que ces derniers sont disponibles au début de l'ordonnancement, à chaque fois que le tour d'un travail arrive il est décalé à gauche afin qu'il puisse être exécuté. Le temps mort est utile pour absorber les retards qui peuvent être causés par les aléas susceptibles d'apparaître durant la phase d'exécution.

Les travaux existants considèrent les données du pronostic (RUL) comme des données exactes ou déterministes, alors que ce n'est pas réellement le cas, puisque les prédictions sont, par essence, incertaines. De ce fait des erreurs de prévisions peuvent se présenter et une panne pourra avoir lieu avant la date prévue.

2.2.2. Les ordonnancements conjoints de production et de maintenance en-ligne

Les solutions décrites dans la section précédente sont réalisées à partir d'un ensemble de tâches de production et de maintenance préventives. Leur mise en place est possible car le nombre d'activités de maintenance systématiques ou prévisionnelles peut être anticipé. Cependant, la nature des pannes ou des anomalies pouvant survenir sur les équipements, fait que les tâches de maintenance correctives ou conditionnelles sont imprévisibles. Ceci se traduit donc par la nécessité d'insérer de nouvelles tâches dans l'ordonnancement courant mais aussi par le fait qu'à priori on ne peut pas être certain du nombre de tâches que comprendra l'ordonnancement final [Marmier, 2007].

Les travaux dans cette catégorie proposent des approches réactives en réponse à l'évènement de panne machine pour le cas de la maintenance corrective. Tandis que pour la maintenance conditionnelle, les solutions proposées répondent à une anomalie de fonctionnement signalée à partir d'un des capteurs du système de surveillance.

a. Cas de la maintenance corrective

La maintenance corrective est prise en compte dans la phase de pilotage. De ce fait, les approches qui traitent ce type de maintenance sont plutôt dynamiques. Si la machine en question tombe en panne, son ordonnancement conjoint ne sera plus valide. Toutes les tâches de production ou de maintenance programmées resteront en attente jusqu'à ce que la machine soit réparée.

À notre connaissance, il n'existe pas de travaux spécialement dédiés à la maintenance corrective. Elle est cependant prise en compte dans la phase réactive d'une approche d'ordonnancement hybride ou totalement réactive sous incertitudes (section 6.2 du chapitre 2). D'ailleurs c'est *le seul évènement* pris en compte par les différentes solutions proposées dans les ordonnancements de production sous incertitudes. Dans ce cas, la majorité des travaux proposés procèdent par ré-ordonnancement total des activités mises en attente après l'arrêt de la machine pour cause de panne. Elles ne peuvent être re-exécutées qu'une fois la machine dépannée. Par conséquent, l'ordonnancement initial n'est plus valide et de nouvelles dates de début et de fin des tâches de l'ordonnancement doivent être redéfinies.

Dans [Khelifati *et al.*, 2011], les auteurs proposent un ré-ordonnancement total dans la phase réactive. Ils exploitent la technologie agent pour gagner en temps de réaction grâce aux propriétés d'autonomie et de réactivité des agents. La date de début du nouvel ordonnancement correspond à la date de fin de la maintenance corrective qui ne peut pas être prévue à l'avance. Les auteurs dans [Petrovic *et al.*, 2011] proposent un ré-ordonnancement total des travaux de production dans le cas d'une panne machine.

La majorité des travaux ne proposent pas un scénario relatif à la prise en charge de l'activité de maintenance corrective et n'indiquent pas comment l'insérer dans l'ordonnancement initial.

En pratique, les tâches de maintenance corrective ne peuvent être exécutées qu'à la fin du diagnostic de la panne. Leur prise en compte doit aussi considérer des critères concernant les tâches mais aussi les ressources nécessaires (humaines et matérielles) pour le diagnostic et l'exécution. Dans ce contexte, [Marmier, 2007] a développé une approche réactive ou il traite la maintenance corrective en prenant en compte les contraintes relatives aux ressources humaines. Dans son travail, l'auteur affecte la maintenance à insérer dans l'ordonnancement courant à la ressource humaine la plus adéquate qui minimise la durée opératoire et l'écart type de la charge de travail des ressources humaines.

b. Cas de la maintenance conditionnelle

À la différence de la maintenance corrective qui intervient après l'arrêt total de la machine, la maintenance conditionnelle est de type préventif ce qui veut dire que la machine est toujours fonctionnelle. Le problème revient donc à trouver le bon moment d'intervention afin de ne pas perturber l'ordonnancement courant et éviter la panne fonctionnelle de la machine. L'intervention doit être programmée dans l'intervalle [P,F] (figure 3.3).

Comme pour le cas de la maintenance prévisionnelle, la plupart des travaux dans cette catégorie [Minou *et al.*, 2016][Peng *et al.*, 2016] cherchent à trouver les paramètres les plus significatifs annonçant l'arrivée d'une panne. Ils sont plutôt dans l'axe du pronostic industriel.

Dans [Phuc *et al.*, 2010], les auteurs proposent un modèle prédictif qui prend en compte le coût de la maintenance et le rythme de la production. Ils ont développé une approche analytique pour le calcul du coût de la maintenance. Ils supposent que l'intérêt de la performance des systèmes de production n'est pas seulement dans la disponibilité du système mais aussi dans la capacité de production à différents niveaux (ex. 100%, 90%, 80% de la capacité maximale) selon l'état du système. Le vieillissement du système diminue la capacité de la production. Pour cela, ils ont proposé un intervalle d'âge (l'équivalent de l'intervalle [P-F]) durant lequel une tâche de maintenance conditionnelle doit être effectuée. Au-delà de cet intervalle, une maintenance corrective est inévitable et un coût doit être rajouté pour chaque unité de temps à cause de l'arrêt de la production.

[Zheng *et al.*, 2013] proposent un ordonnancement conjoint de production et de maintenance conditionnelle dans le cas d'un atelier job shop flexible. La résolution se fait en deux phases : (1) *sans détection d'anomalie fonctionnelle* ou un ordonnancement généré à l'aide d'un algorithme génétique est exécuté ; (2) *après la détection d'une anomalie fonctionnelle* où une méthode d'insertion de maintenance préventive est appliquée en cherchant des temps morts dans l'ordonnancement initial.

2.2.3. Discussion

Malgré l'existence de beaucoup de travaux qui traitent le problème d'ordonnancement conjoint de production et de maintenance, des insuffisances peuvent être facilement détectées. Nous les énumérons dans ce qui suit :

Chaque travail proposé n'adopte qu'une seule stratégie de maintenance. Alors que dans la réalité, les stratégies de maintenance peuvent être combinées suivant l'état des machines et le niveau de maintenance requis. Nous ne pouvons choisir entre les stratégies de maintenance car chacune d'elles est recommandée dans un cas particuliers. Par exemple, les activités de maintenance de niveau I (section 1.4) peuvent être périodiquement programmées par la mise en place d'une stratégie systématique. Une machine indispensable dans l'atelier et dont la performance n'est pas à son niveau optimal peut nécessiter un contrôle continu de son état par la mise en place d'une stratégie conditionnelle. Dans le cas où l'état de cette machine se détériore de manière stable, une stratégie prévisionnelle peut être aussi mise en œuvre.

Très peu de travaux considèrent les incertitudes dans les ordonnancements conjoints de production et de maintenance. En effet, les temps opératoires des activités de maintenances tout comme ceux de production ne peuvent être connus de manière exacte. Dans 80% des cas, ces maintenances sont réalisées manuellement par des opérateurs humains possédant des compétences différentes ce qui influent sensiblement sur le temps opératoire des activités qu'ils réalisent.

Ces mêmes travaux considèrent le service de maintenance comme étant une boite noire d'où ils récupèrent les intervalles de réalisation des activités de maintenance sans prendre en compte les contraintes liées à ces activités. Nous citons plus particulièrement les contraintes liées aux ressources humaines.

Vu la relation indissociable entre maintenance et ressources humaines, nous consacrons la section suivante à l'intérêt et l'importance de la considération de leurs contraintes dans l'ordonnancement des activités de maintenance.

3. Vers la prise en compte des contraintes des ressources humaines dans les ordonnancements conjoints de production et de maintenance

Les ressources humaines constituent un composant essentiel pour les entreprises qu'elles soient de production ou de prestation de service, et le problème *d'ordonnancement du personnel* consistant à déterminer le nombre d'opérateurs devant être affectés à chacune des périodes du temps de travail d'une entreprise, afin de combler la charge de travail disponible, est une tâche importante de planification [Gunes, 1999].

Dans ce qui suit, nous présentons le problème d'ordonnancement de la ressource humaine et ses différentes catégories. Par la suite, nous discutons des propriétés relatives aux ressources humaines. Nous terminons cette section par une synthèse des travaux qui prennent en compte les contraintes des ressources humaines dans l'ordonnancement des activités de production et de maintenance.

3.1. Ordonnancement de la ressource humaine

Le problème *d'ordonnancement du personnel* aussi connu sous le nom du problème *d'affectation des ressources humaines* consiste à déterminer le nombre d'opérateurs devant être affectés à chacune des périodes de travail appelées *« Shifts »* d'une entreprise, afin de combler la charge de travail disponible. Chaque période de travail est affectée à une activité bien précise. Ce problème existe dans toute entreprise ayant les ressources humaines comme composant, et la recherche concernant ce sujet est étroitement liée aux besoins industriels et leurs applications.

Les problèmes d'affectation du personnel varient selon les besoins des entreprises. Nous pouvons distinguer deux grandes classes selon la structure du travail.

- Un travail peut consister en un certains nombre de tâches *non interruptibles* exigeant que l'employé termine toute tâche commencée.
- par contre, si le travail peut être *interrupu* ; l'employé peut être remplacé par un autre à tout moment.

Aussi, nous pouvons distinguer deux stratégies d'ordonnacements : séquentielle et integrée.

- *Les ordonnancements séquentiels* sont les ordonnancements réalisés en plusieurs étapes [Ernst *et al.*, 2004]. Selon la nature du problème, l'ordonnancement des tâches peut être généré sans la considération des contraintes relatives aux ressources humaines. Ensuite, ces dernières seront prises en compte pour choisir l'ordonnancement final. Par exemple, pour la gestion des équipages des avions, il est fréquent que les tâches prioritaires soient affectées aux personnels les plus qualifiés puis les tâches courantes soient affectées aux employés au jour le jour.
- *Les ordonnancements intégrés* sont réalisés en une seule phase et prennent en compte les informations disponibles sur les employés lors de la réalisation du planning.

3.2. Caractéristiques des ressources humaines

Les ressources humaines sont caractérisées par leurs compétences, leurs disponibilités et leurs performances.

3.2.1. Ressource humaine et compétence

Une ressource humaine peut posséder plusieurs compétences avec des degrés variables relatives à un ensemble d'activités.

a. Définition de la compétence

Le terme « *compétence* » appartient indiscutablement au lexique de la gestion des ressources humaines. La compétence est une qualification professionnelle désignant l'aptitude d'un opérateur humain à réaliser ou non une activité donnée. Elle se décline en *savoirs* (connaissances), en *savoir-faire* (pratiques) et en *savoir-être* (comportements relationnels) ainsi qu'en des aptitudes physiques.

Elle est acquise, mise en œuvre ou non sur le poste pour remplir les tâches qui sont attendues. Elle se distingue en cela du potentiel qui serait une *compétence en devenir*. En d'autres termes, elle regroupe toutes les connaissances nécessaires pour la réalisation d'une activité requise.

Les compétences des ressources humaines sont quantifiées par une estimation appelée *« Degré de compétence »* désignant le pourcentage de maîtrise de l'activité en question. Souvent les ressources humaines sont classées selon ce degré pour mesurer leur priorité d'affectation.

b. Type de compétences

Afin de gérer de manière plus flexible le personnel suivant ses compétences, une méthodologie d'élaboration d'un référentiel des compétences a été réalisée [Boumane *et al.*, 2003]. Cette approche classe les compétences en deux types :

- *Les compétences génériques* qui peuvent être utilisées dans différentes situations professionnelles,
- *Les compétences spécifiques* qui sont liées au domaine d'activité.

C'est à travers leurs compétences que les ressources humaines doivent être prises en compte car c'est cela qui fait leur importance pour l'entreprise. Elles représentent aussi en quelque sorte le métier de l'entreprise [Marmier, 2007].

c. Gestion des compétences

La gestion des compétences est un outil opérationnel de Gestion des Ressources Humaines (GRH) qui vise à optimiser les performances et la compétitivité de l'entreprise. Cette méthode permet de faire concorder les compétences dont l'entreprise a besoin et les compétences disponibles dans le capital humain de l'entreprise: savoirs, savoir-faire et savoir-être individuels et collectifs.

La norme AFNOR [AFNOR, 2002] met en avant cinq étapes, dans le processus de gestion des compétences afin de fournir un cadre complet pour la démarche : (1) Identification des compétences nécessaires pour l'entreprise en fonction de son métier, de ses activités et du développement future de celle-ci ; (2) Identifier celles dont dispose réellement la société ; (3) Analyser la différence entre les compétences détenues et celles qu'il faudrait pour que l'entreprise fonctionne de manière optimal, (4) Mise en place de ces actions afin d'obtenir les compétences manquantes (recrutement, formation, etc.) ; (5) La dernière étape, comme dans toute démarche qualité, consiste à faire en sorte que les services conservent leurs niveaux de compétences à jour et que cela se pérennise.

d. Importance de la considération de la contrainte de compétence en ordonnancement

L'ordonnancement des ressources humaines en fonction de leur compétence est très bénéfique pour les industriels. En effet, selon [Letouzey, 2001], 79% des entreprises trouvent que la gestion des opérateurs est utile ou indispensable en ordonnancement. Le choix des ressources humaines affectées aux tâches doit permettre de satisfaire des objectifs de délais de réalisation.

Les approches qui prennent en compte les compétences du personnel pour affecter les tâches sont principalement du type « capable ou non ». Elles peuvent être des classements [Boumane *et al.*, 2003], pour différencier les compétences génériques des compétences spécifiques qui sont détenues ou non. Ce type d'approche est aussi considéré dans l'affectation d'équipe ou d'équipage dans l'aviation [Zeghal *et al.*, 2001], où un pilote peut prendre la place d'un copilote mais pas l'inverse.

3.2.2. Ressources humaines et performance

Nous tenons à distinguer la notion de *compétence* de celle *de performance*. Nous définissons la performance par la vitesse et la qualité de réalisation de la tâche par une ressource humaine qui en possède la compétence. La performance dépend principalement de l'état physique de l'opérateur. Ce dernier peut avoir un degré de compétence élevé pour la réalisation d'une activité donnée mais peut en revanche avoir un degré de performance faible à cause d'une charge de travail élevée causant du stress à la ressource humaine ou un état de fatigue. En conséquence, il est impératif de prendre en compte la performance des opérateurs en compte lors de l'établissement des ordonnancements car elle peut donner des résultats plus réalistes en termes de temps opératoires des activités allouées.

3.2.3. Ressources humaines et disponibilité

L'ordonnancement des ressources humaines consiste à établir un plan d'intervention de ces dernières sur une période donnée appelée «*horizon de travail*».

Toutes les ressources humaines ne possèdent pas forcement le même rythme de travail. Il convient donc, de tenir compte de leur disponibilité lors de l'établissement des ordonnancements afin de proposer des solutions réalistes. Aussi, dans des cas de modification des ordonnancements établis au début (pour répondre à un évènement prévu ou non), la disponibilité des opérateurs ne doit pas être négligée.

3.3. Synthèse des travaux qui considèrent les contraintes des ressources humaines dans l'ordonnancement des ateliers de production

À travers les sections précédentes, nous avons montré l'importance de la présence des ressources humaines dans les ateliers et la nécessité de considérer les contraintes qui leur sont liées en ordonnancement afin de proposer des solutions plus réalistes.

Il est clair que dans tout notre travail, nous nous intéressons aux deux activités de production et de maintenance. De ce fait, les sections qui suivent synthétiseront les travaux en ordonnancement de production et de maintenance qui prennent en compte les contraintes des ressources humaines.

D'après notre revue de la littérature, nous avons constaté que malgré le fait que l'exécution des activités de maintenance soit généralement manuelle faisant intervenir ainsi des opérateurs humains, très peu de travaux en ordonnancement de maintenance prennent en compte les contraintes des ressources humaines. Ceci en comparant ces travaux avec ceux de l'ordonnancement de production qui sont assez nombreux et intéressants.

3.3.1. Considération des contraintes des ressources humaines dans l'ordonnancement de production

[Cheurfa, 2005] présente une étude sur la gestion des ressources humaines en production cyclique[1]. Son travail porte sur la prise en compte des contraintes liées aux ressources humaines en termes d'affectation des opérateurs aux machines dans les problèmes d'ordonnancement d'atelier. L'auteur propose une modélisation des ressources humaines basées sur trois notions : *le poste de charge*, *la configuration de l'atelier* et *l'affectation des opérateurs*. Le poste de charge modélise la supervision simultanée de plusieurs machines par un opérateur, une configuration d'atelier définit l'ensemble des équipements actifs dans l'atelier, et l'affectation des opérateurs précise quel opérateur supervise quelle(s) machine(s). Il propose trois modes de réaffectation des opérateurs en atelier : calendaire, sur événement et libre. Dans le premier mode, la réaffectation des opérateurs se fait de manière calendaire alors que dans le second mode, un opérateur ne peut être réaffecté que s'il a terminé l'une des tâches qu'il exécute. Dans le troisième mode, la réaffectation des opérateurs peut se faire de manière continue. L'auteur définit par la suite un problème d'ordonnancement d'atelier comme étant d'une part un problème de détermination d'une séquence de passage des travaux sur les machines et d'autre part un problème de détermination d'un chemin dans le graphe des configurations d'atelier.

Dans [Attia *et al.*, 2011], les auteurs prennent en considération l'évolution des compétences des ressources humaines en présentant une nouvelle approche d'affectation de ces ressources aux différentes activités de l'atelier. Leur objectif est d'obtenir un compromis entre le coût total du travail, et les gains attendus de l'augmentation de certains niveaux de compétences. Cette approche se décline

[1] Une production cyclique est une production réalisée à fréquence fixe.

sur trois axes: (1) le premier est la flexibilité résultant de la polyvalence des individus : chaque acteur peut maîtriser une ou plusieurs compétences en marge de sa compétence de base, avec un coût et des niveaux de qualité acceptables ; (2) Le deuxième axe est la politique de modulation du temps de travail : les horaires peuvent varier d'un acteur à l'autre, ou varier d'une période (jour, semaine, …) à l'autre pour un même acteur ; (3) Enfin, le dernier axe est la vision dynamique de l'efficacité des acteurs, qui fait référence à l'évolution de l'effort réel nécessaire à un même individu. Les auteurs partent du principe qu'en raison des horaires de travail variables et de la diversité des efficacités, les durées opératoires des activités allouées ne sont pas connues à l'avance et dépendront de la performance des acteurs chargés de les exécuter.

[Pichot *et al.*, 2001] présente une étude qui a permis de mettre en avant l'importance de gérer les ressources humaines et d'associer la gestion des compétences à la gestion de la production. Le travail présenté a été mené dans un atelier d'injection plastique disposant d'une trentaine de presses, d'outillages (moules), de palans pour le transport des outillages et comme ressources humaines des opérateurs et des régleurs. Une analyse des compétences requises a permis de mettre en évidence la criticité des régleurs. Deux stratégies globales d'ordonnancement ont été testées : (1) Ordonnancer les tâches sur les presses puis prendre en compte les régleurs; (2) Faire un modèle des compétences des régleurs, puis ordonnancer les tâches sur les régleurs avant de les ordonnancer sur les presses. Les résultats ont montré qu'il est plus intéressant de traiter les régleurs en premier et les ressources machines en second. C'est-à-dire débuter par un ordonnancement des tâches sur les ressources humaines puis une affectation des tâches aux ressources techniques.

Les auteurs dans [Sabar *et al.*, 2009] présentent une approche multi-agents pour les problèmes de planification du personnel dans le contexte d'un atelier d'assemblage multi-produits. Ils élaborent l'affectation quotidienne des employés aux postes de travail afin de minimiser simultanément les coûts opérationnels et les insatisfactions du personnel. L'approche proposée tient compte des compétences individuelles, de la mobilité et des préférences de chaque employé, ainsi que des exigences du personnel et des compétences associées à chaque activité d'assemblage compte tenu du calendrier actuel de l'assemblage et de l'équilibrage des lignes pour chaque produit.

Quant au travail décrit dans [Guyon *et al.*, 2010], les auteurs étudient l'intégration des problèmes d'emploi du temps et de planification de la production. Au premier niveau, ils gèrent un problème classique d'horaires d'employés. Au deuxième niveau, ils visent à fournir un calendrier de production réalisable pour un ensemble de tâches interruptibles avec des exigences de qualification et des fenêtres temporelles.

3.3.2. Considération des contraintes des ressources humaines dans l'ordonnancement de la maintenance

Dans sa thèse, [Mamier, 2007] présente une méthode de gestion des activités de maintenance par l'affectation des tâches aux meilleures ressources. Il a ramené le problème d'affectation des tâches de maintenance aux ressources humaines à un problème d'ordonnancement à machines parallèles indépendantes où chaque machine représente une ressource humaine et les durées opératoires d'une tâche sur les machines sont différentes et dépendent des compétences des ressources. Chaque ressource a un niveau de qualification pour chaque type de tâche. Une ressource efficace pour un type de tâche ne l'est pas forcément pour les autres types. Les tâches sont caractérisées par une durée opératoire, une date de début au plutôt et une date de de fin au plus tard. La tâche doit être entièrement exécutée dans cet intervalle. Le temps de traitement réel des tâches est calculé en fonction de la durée opératoire de la tâche et la qualification de la ressource humaine qui lui est affecté.

[De Snoo *et al.*, 2011] présentent une extension de la procédure classique de planification de la maintenance en insérant les contraintes relatives aux ressources matérielles et humaines. L'étude

proposée met l'accent sur la coopération entre tous les acteurs humains de l'atelier (planificateurs, ordonnanceurs et opérateurs) dans le processus de ré-ordonnancement et ceci dans le cas d'arrivée d'un évènement inattendu rendant obsolète l'ordonnancement initial.

Dans [Martorell *et al.*, 2010], les auteurs présentent une extension du modèle RAM+C (efficacité, disponibilité, maintenabilité et coût) afin de prendre en compte aussi et explicitement les contraintes liées aux ressources humaines et matérielles. Le modèle étendu explique comment les critères de décision dépendent des paramètres types qui représentent les types de stratégies de maintenance, les intervalles de maintenance, les durées opératoires, les ressources humaines et les ressources matérielles.

4. Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude détaillée de la fonction maintenance dans les ateliers de production. Notre intention est de pouvoir exploiter les informations acquises pour la proposition de solutions réalistes adaptées au problème d'ordonnancement conjoint de production et de maintenance.

À l'issue de notre étude bibliographique, nous avons constaté que la plupart des solutions proposées en ordonnancement conjoint de production et de maintenance sont simplistes et loin d'être réellement applicables. Elles n'accordent pas une grande importance à la façon dont les activités de maintenance sont réellement exécutées : leurs types, leurs durées opératoires, les ressources (matérielles et humaines) nécessaires pour leurs bonnes planifications, etc.

En effet, l'apparition des ordonnancements conjoints de production est de maintenance est survenue après avoir pris conscience de la non-applicabilité des ordonnancements de production classiques. Ces derniers supposent la disponibilité infinie des machines dans l'atelier. Par analogie, les ordonnancements conjoints de production et de maintenance proposés jusqu'ici, s'ils visent à être réellement appliqués, doivent impérativement traduire la planification de la fonction maintenance telle qu'elle est appliquée dans les ateliers qu'ils modélisent. Naturellement, les opérateurs humains sont une ressource indissociable de la fonction maintenance. La négligence des contraintes qui leur sont liées pour la construction de l'ordonnancement de la maintenance rend les solutions proposées quasiment inapplicables.

Très peu de travaux traitent les incertitudes dans les ordonnancements conjoints de production et de maintenance. Cependant tout le monde reconnait la non-applicabilité des ordonnancements déterministes. Assurément, les incertitudes peuvent entachées les données de production et/ou de maintenance. Si la production peut être interrompue par l'arrivée d'évènements imprévus (qui ne sont pas essentiellement des pannes machines) pouvant mettre l'ordonnancement actuel en péril, la maintenance à son tour peut être interrompue par l'arrivée d'évènements imprévus empêchant ainsi l'exécution normale des activités planifiées. Nous pouvons citer : la déficience d'une ressource humaine (due à un malaise par exemple), la non-disponibilité d'un outillage à la dernière minute, etc. Aussi le temps opératoire des activités de maintenance ne peut être déduit de manière exacte car : (1) en premier lieu, il dépend de la compétence et de la performance de la ressource humaine qui va les exécuter ; (2) en second lieu, surtout dans le cas des maintenances conditionnelles et correctives, il dépend de la qualité du diagnostic établie pour la panne (potentielle ou fonctionnelle).

Les entreprises manufacturières n'adoptent pas exclusivement une seule stratégie de maintenance. Nous avons démontré que le choix des stratégies dépend du coût estimé de la fonction maintenance. Un équilibre est à chercher par les gestionnaires de la maintenance des équipements afin d'assurer la disponibilité de ces derniers tout en maitrisant le coût résultant de la maintenance. De cette manière,

un ordonnancement conjoint de production et de maintenance ne peut pas contenir que des maintenances systématiques, ou bien que des maintenances conditionnelles ni prévisionnelles. Nous devons offrir aux gestionnaires de la maintenance une plateforme qui ne restreint pas leur choix de stratégies. Il faut cependant qu'elle soit adaptée à leur besoins et objectifs.

Dans la deuxième partie de ce manuscrit, nous exposerons ce que nous proposons comme contributions afin de répondre aux insuffisances recensées dans les travaux actuels en ordonnancement conjoints de production et de maintenance.

Deuxième partie

Contributions autour de l'ordonnancement conjoint de production et de maintenance

Introduction

A la fin de la première partie de notre thèse, nous avons recensé plusieurs insuffisances dans les travaux traitant le problème de l'ordonnancement conjoint de production et de maintenance. Nous présentons dans cette seconde partie nos trois contributions qui, à notre avis, apportent de nouvelles visions par rapport aux solutions existantes.

Dans ce qui suit, nous présentons les principes et les hypothèses sur lesquels nous nous sommes basés pour définir nos contributions. Nous voulons rassembler les points communs entre les solutions proposées pour éviter les répétitions dans leurs chapitres respectifs.

Principe 1 : prise en compte des contraintes liées aux ressources humaines dans la programmation des activités de maintenance

Malgré l'automatisation des processus de production, la présence des ressources humaines est indispensable : *(1) en production*, leurs interventions varient selon leurs rôles. Il peut s'agir de réglages (préparations des équipements à la production) ou simplement du contrôle du processus de production ; *(2) en maintenance,* leurs interventions sont plus importantes car les activités de maintenance sont dans la plupart du temps manuelles. Pour cette raison, dans notre travail, nous avons considéré les contraintes relatives aux ressources humaines seulement pour les activités de maintenance.

Dans les ateliers que nous étudions, le service de maintenance est composé de *R* ressources humaines indispensables pour l'exécution des activités de maintenance. Elles sont caractérisées par les propriétés suivantes:

1.1. La compétence

Chaque ressource humaine se distingue par un niveau de compétence reflétant son savoir-faire. C'est ce niveau de qualification qui explique le fait que le traitement de deux activités de même type par deux ressources différentes prend deux durées opératoires différentes. Dans notre travail nous modélisons la compétence par une valeur entière présentant le niveau de connaissances par rapport à la réalisation de l'activité en question. $Comp \epsilon \{1,2,3\}$. *Niveau 1*: novice, *niveau 2* : moyen et *niveau 3*: expert

Pratiquement, un bon niveau de compétence n'est pas suffisant pour définir un temps opératoire optimal. En effet, la propriété de performance est plus puissante.

1.2. La performance

Concrètement, la ressource la plus performante pour une activité donnée est celle qui prend moins de temps. Ceci dépend de l'état physique et psychique de la ressource humaine lors de l'exécution de l'activité. Dans la plupart des cas, la performance ne peut pas être fixée à l'avance dès lors qu'elle dépend elle-même de la charge de travail de l'intervenant, de sa forme physique et de son humeur. C'est pour cette raison que dans notre travail, nous supposons qu'il n'y a que la ressource humaine elle-même qui peut estimer sa performance.

La performance est représentée par un pourcentage $\text{Peform} \in [0,1]$. Ainsi, le temps opératoire Ph_i d'une activité de maintenance réalisée par une ressource humaine R_i est calculé par (eq.l). p' étant la durée maximale qu'une activité de maintenance peut prendre.

$$Ph_i = (p'/Comp_i) * Perfm_i \quad (1)$$

1.3. La disponibilité

La faisabilité d'une solution d'ordonnancement est conditionnée par la présence des ressources nécessaires pour l'exécution des activités qui la composent. Les ressources humaines étant une composante intrinsèque en maintenance, leur disponibilité doit être prise en compte dans la programmation surtout des activités de maintenance imprévues comme les maintenances conditionnelle (CBM) ou corrective. Pour les activités préventives temporelles (TBM) et prévisionnelles (PHM), le plan d'intervention établi hors-ligne doit être mis en place en prenant en compte la disponibilité des intervenants.

Pour chaque ressource humaine RH_i dans l'atelier, nous définissons la notion d'intervalle de disponibilité ID_i. Nous supposons que chaque RH_i peut être disponible dans plusieurs intervalles de disponibilité au nombre de n (eq.2).

$$ID_{ik} = [Tmin_{ik}, Tmax_{ik}], k = 1..n \quad (2)$$

Principe 2 : Une modélisation basée agents pour l'atelier

Dans nos travaux, nous adoptons une modélisation à base d'agents pour les ateliers étudiés. Les agents interagissent et collaborent pour trouver un accord sur l'ordonnancement qui satisfait les contraintes fixées et optimise au mieux la fonction objectif. Ils communiquent directement par envoi de messages. L'utilisation des agents favorise une réaction rapide aux évènements pouvant surgir dans les ateliers du fait de la distribution de la décision. Chaque agent ayant un but à accomplir oriente son comportement pour le réaliser sans attendre les décisions de la hiérarchie.

Dans notre travail, nous avons identifié cinq types d'agents: l'Agent Production, l'Agent Machine, l'Agent Maintenance, l'Agent Superviseur des Ressources Humaines et l'Agent Ressource Humaine.

- **L'Agent Production (AP)** possède toutes les informations sur les caractéristiques des tâches de production. Il les communique aux agents machines. C'est l'intermédiaire entre l'atelier et le monde extérieur.

- **L'Agent Machine (AM)** représente une machine dans l'atelier. Il possède toutes les informations relatives à la machine, notamment, la référence de la machine, son état à tout instant (arrêt/marche), la tâche qui s'y déroule et les tâches restantes. Son rôle est de calculer son ordonnancement local et de contrôler le bon déroulement de ses tâches. Nous distinguons trois types d'agents machine: **(1)** L'Agent Machine Sujet (**AMS**) qui représente une machine sujet MS. Dans un atelier à une machine, c'est la seule machine existante. En revanche s'il s'agit d'un atelier multi-machines, nous définissons aussi l'agent machine amont (AMA) et l'agent machine aval (AMV), **(2)** L'Agent Machine Amont (**AMA**) représente toute machine située avant la MS et **(3)** l'Agent Machine Aval **(AMV)**, représente toute machine située après la MS.

- **L'Agent Maintenance (AMC)** a une vue globale sur les activités de maintenance. Il connaît toutes les caractéristiques de ces activités (durée opératoire usuelle, périodicité, intervalle de tolérance, compétence requise). Son rôle est aussi de diagnostiquer les pannes machines, l'identification des activités de maintenance nécessaires et l'estimation de la valeur du RUL des machines en se basant sur les informations envoyées par l'AMS. De nombreux travaux intéressants pourraient être adoptés pour la mise en œuvre du AMC [Bach *et al.,* 2011][Chebel-Morello *et al.*, 2009][Hanemann, 2006].

- **Les Agents Ressources Humaines (ARH)** modélisent les ressources humaines. Il existe autant d'ARH que de ressources humaines dans l'atelier (**R** agents). C'est eux seuls qui peuvent estimer le temps opératoire d'une activité de maintenance en estimant objectivement leur performance.

- **L'Agent Superviseur des Ressources Humaines (ASRH)** joue le rôle d'intermédiaire entre l'AMC et les ARHs. Il a une vue globale sur la ressource humaine dans l'atelier (son nombre, ses compétences et sa disponibilité). Sa mission principale est de gérer le processus de négociation des intervenants afin d'affecter la meilleure ressource humaine à l'activité de maintenance en question. L'intérêt de mettre en place un superviseur est d'épargner l'agent machine des détails des négociations avec les ressources humaines. Et aussi de centraliser une partie des informations relatives aux ressources humaines afin de gagner en temps de négociation. Il possède ainsi une base de données appelée *référentiel* rassemblant toutes les informations relatives aux ressources humaines.

Principe 3 : Prise en compte des incertitudes liées aux deux activités de production et de maintenance simultanément

Les ateliers de production sont sujets à des perturbations qui peuvent entraîner des retards de livraison des produits. Ces perturbations sont souvent imprévues comme les pannes soudaines de machine, la reprise d'une tâche de production, un malaise d'une ressource humaine intervenante, etc. Les incertitudes choisies pour être étudiées dans notre travail sont liées aux deux activités de production et de maintenance. Aussi, des imprécisions peuvent entacher les données relatives à chacune des deux activités. Le tableau 4.0.1, présente une synthèse des incertitudes pouvant être prises en compte dans les ateliers de production. Les items colorés **en gras** représentent les incertitudes traitées dans nos travaux.

Tableau 4.0.1. Synthèse des évènements liés à la production et à la maintenance

Type d'incertitude	La donnée incertaine	Eventuelles causes	
		En production	**En maintenance**
Imprécision	**Durée Opératoire**	**Mauvaise estimation du temps de réalisation (changement de matière première, dégradation de l'état de la machine qui est devenue plus lente).**	**Compétence et performance variées des intervenants.**
	Date de début d'exécution	• **Retard des activités précédentes.** • **Une panne soudaine de la machine au moment du lancement de l'exécution de la tâche en cours.** • **Non disponibilité de la matière première**	• Non disponibilité des pièces de rechange. • Non disponibilité de l'outillage Non disponibilité des intervenants humains
	RUL	/	**La valeur du RUL est une estimation approximative et ne peut pas être ni exacte ni précise**
Incertitude	**Evénements possibles**	• **Arrivée imprévue d'un job ou nécessité de reprendre une tâche** • **Panne soudaine d'une machine** • Epuisement de la matière première	• **Malaise soudain d'un intervenant.** • **Panne imprévue d'une machine (tâche non prévue)** • Panne d'un outillage de maintenance • Epuisement des pièces de rechange. • **Apparition d'une anomalie de fonctionnement : nécessité de programmation d'une CBM**

3.1. Modélisation floue des imprécisions

Les données incertaines que nous avons pris en considération dans notre travail sont : (1) Pour la première contribution, le RUL et la durée opératoire de la CBM. (2) Pour la deuxième contribution, les durées opératoires des activités de production et de maintenance ainsi que leur dates de début et de fin d'exécution.

3.1.1. Les fonctions d'appartenance choisies

Nous avons modélisé les durées opératoires imprécises des tâches de production et de maintenance par des ensembles flous $\tilde{p}^f$ ayant une fonction d'appartenance triangulaire donnée par un triplet (p_1^f, p_2^f, p_3^f)[1]. Le choix de cette fonction triangulaire est justifié par le fait qu'une opération de production est accomplie généralement dans une durée donnée, cette durée est représentée par le point p_f^2. Si la machine ne peut pas exécuter l'opération dans cette durée (durée d'exécution supérieure ou inférieure), la durée est donc représentée par un point appartenant à [p_1^f, p_2^f] ou bien à [p_1^f, p_2^f]. La figure 4.0.1 illustre cette modélisation.

Pour obtenir une estimation floue $\tilde{p}^f$ à partir de la valeur la plus probable p^f_2, nous définissons la notion de *largeur de la base floue* « *fbw* » (figure 4.0.1). Ainsi, $\tilde{p}^f$ est obtenue en appliquant (eq.3).

$$\tilde{p}^f = (p^f_1, p^f_2, p^f_3) = (p^f_2 - p^f_2 * fbw,\ \ p^f_2,\ \ p^f_2 + p^f_2 * fbw) \qquad (3)$$

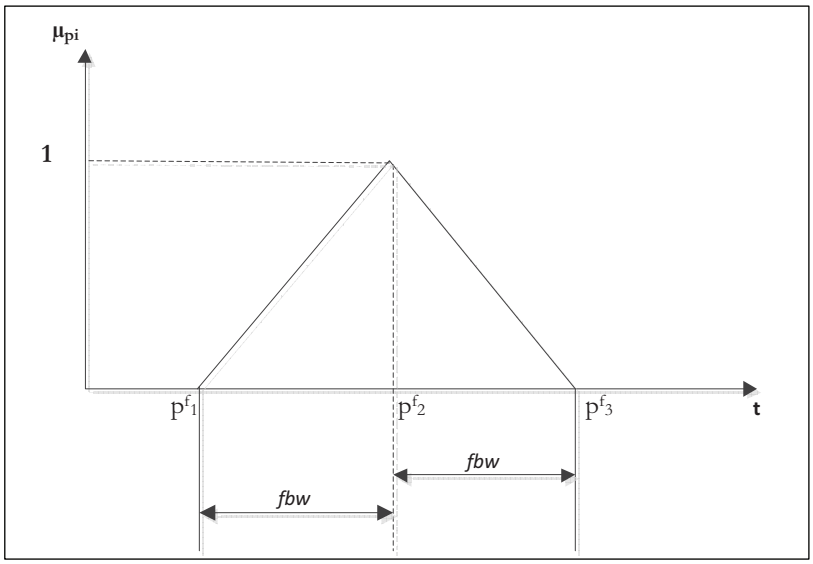

Figure 4.0.1. Fonction triangulaire modélisant la durée opératoire floue

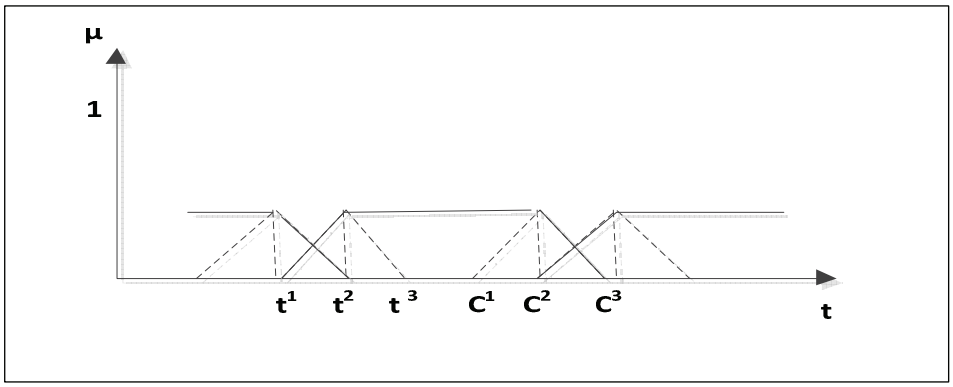

Figure 4.0.2. Modélisation des fenêtres temporelles des tâches de production et de maintenance.

Le caractère flou de la durée opératoire d'une tâche T_i aura une conséquence sur sa date de fin d'exécution c_i et la date de début d'exécution t_i des tâches (de production ou de maintenance) qui la

[1] *f* fait référence à la fonction de production *(p)* ou de maintenance *(m)*

succèdent qui, seront à leur tour floues. Elles seront aussi modélisées par une fonction d'appartenance triangulaire. Par conséquent, l'intervalle d'exécution de la tâche de production ou de maintenance aura une fonction d'appartenance trapézoïdale comme montré dans la figure 4.0.2.

Les opérateurs flous utilisés

Afin de pouvoir manipuler les valeurs floues considérées dans notre travail, nous avons utilisé les opérateurs flous basiques introduits dans [Chen, 1995]. Il s'agit des opérateurs d'addition $(\widetilde{+})$, de soustraction $(\widetilde{-})$ et de division $(\widetilde{\div})$ floues (eq.4, eq.5 et eq.6).

Soient $\tilde{A}$= (a_1, a_2, a_3) et $\tilde{B}$= (b_1, b_2, b_3) deux estimations floues avec une fonction d'appartenance triangulaire.

$$\tilde{A}\widetilde{+}\tilde{B} = (a_1, a_2, a_3) \widetilde{+} (b_1, b_2, b_3) = (a_1+ b_1, a_2+ b_2, a_3+ b_3) \quad (4)$$

$$\tilde{A}\widetilde{-}\tilde{B} = (a_1, a_2, a_3) \widetilde{-} (b_1, b_2, b_3) = (a_1- b_3, a_2- b_2, a_3- b_1) \quad (5)$$

$$\tilde{A} \widetilde{\div} \tilde{B} = (a_1, a_2, a_3) \widetilde{\div} (b_1, b_2, b_3) =(a_1\div b_3, a_2\div b_2, a_3\div b_1) \quad (6)$$

Le classement des valeurs floues en un ordre total est très important dans les problèmes de décision. Dans notre travail, nous en aurons besoin pour comparer les valeurs des fonctions objectif afin de décider laquelle des deux est la meilleure. Malheureusement, dans la littérature, il n'existe pas de standards appliqués par la communauté de la logique floue. Dans notre travail, pour comparer les deux valeurs floues $\tilde{A}$et $\tilde{B}$, nous avons adopté l'approche proposée par [Kauffman *et al.* , 1978] et nous utilisons pour cela deux critères qui sont (eq.7):

$$\text{Min}(\tilde{A}, \tilde{B})=\begin{cases}\tilde{A}\ si\ (D(\tilde{A}) < D(\tilde{B})) \vee (D(\tilde{A}) = D(\tilde{B})) \wedge (a_2 < b_2)) \\ \tilde{B}\ si\ (D(\tilde{B}) < D(\tilde{A})) \vee (D(\tilde{B}) = D(\tilde{A})) \wedge (b_2 < a_2))\end{cases} \quad (7)$$

- Les distances D($\tilde{A}$) et D($\tilde{B}$) séparant respectivement $\tilde{A}$ et $\tilde{B}$ du l'abscisse 0. Elles sont calculées par (eq.8).

$$D(\tilde{A})= \frac{a_1+a_3}{2} \quad (8)$$

- La valeur moyenne de l'estimation floue. Selon notre modélisation, il s'agit de la valeur la plus probable du nombre flou (c.-à-d. a_2 et b_2).

Dans l'exemple de la figure 4.0.3, la valeur minimale entre $\tilde{A}$ et $\tilde{B}$ est $\tilde{A}$ car $D(\tilde{A}) < (\tilde{B})$.

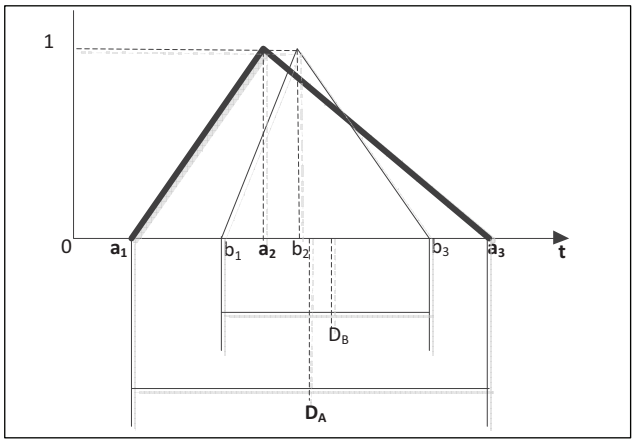

Figure 4.0.3. Comparaison de deux valeurs $\widetilde{\boldsymbol{A}}$ et $\widetilde{\boldsymbol{B}}$

3.2. Prise en compte des évènements : ré-ordonnancement partiel plutôt que total

La plupart (si ce ne sont pas tous) des travaux qui prennent en compte l'arrivée d'évènements dans les ateliers, procèdent par ré-ordonnancement total des activités de production et de maintenance. A notre avis, cette solution n'est pas adaptée à un problème pareil. En effet, le ré-ordonnancement total peut être admissible pour les activités de production. En revanche, pour des activités comme celles de maintenance où des contraintes relatives aux ressources humaines et à l'outillage ont été prises en compte, le ré-ordonnancement sera difficile car tout doit être remis en cause. En plus dans des ateliers dynamiques à forte perturbation, le ré-ordonnancement total va provoquer ce qui est appelée la *nervosité* de l'atelier et une *instabilité* des ressources humaines à qui on doit à chaque fois affecter un nouveau planning.

En conclusion, afin d'assurer une perturbation minimale de l'ordonnancement initial, nous proposons des ré-ordonnancements partiels et ceci en fonction de l'évènement qui apparait. Nous adoptons ainsi l'approche par scénarios [Rossi, 2003]. Cette approche est basée sur le traitement d'un ensemble d'évènements avec des scénarios de résolution différents. Elle consiste à construire un arbre de décision dont les feuilles désignent les scénarios d'ordonnancement proposés pour traiter les différents cas d'apparition des évènements (figure 4.0.4). Nous avons adopté la démarche suivante:

a) Lister tous les événements possibles (s étant le nombre d'évènements possibles) ;

b) Construire tous les scénarios des événements possibles ($Se=\{1,...,2^s\}$. 2^s combinaisons possibles) ;

c) Générer pour chaque scénario Se_i, un ensemble de traitements $Tr_{i,j}$ (les ordonnancements possibles) ;

d) Choisir parmi ces traitements, les meilleurs qui représentent des scénarios d'ordonnancement;

e) Obtenir pour chaque scénario d'événements, une stratégie d'ordonnancement.

Dans nos travaux, nous avons traité cinq événements que nous avons jugé être les plus fréquents: deux liés à l'activité de production (l'ajout et la suppression d'une tâche de production) et trois liés à la maintenance (une panne machine, une défection d'une ressource humaine et apparition d'une anomalie de fonctionnement nécessitant la programmation d'une CBM). Le dernier évènement de maintenance (insertion d'une CBM) est traité en détail.

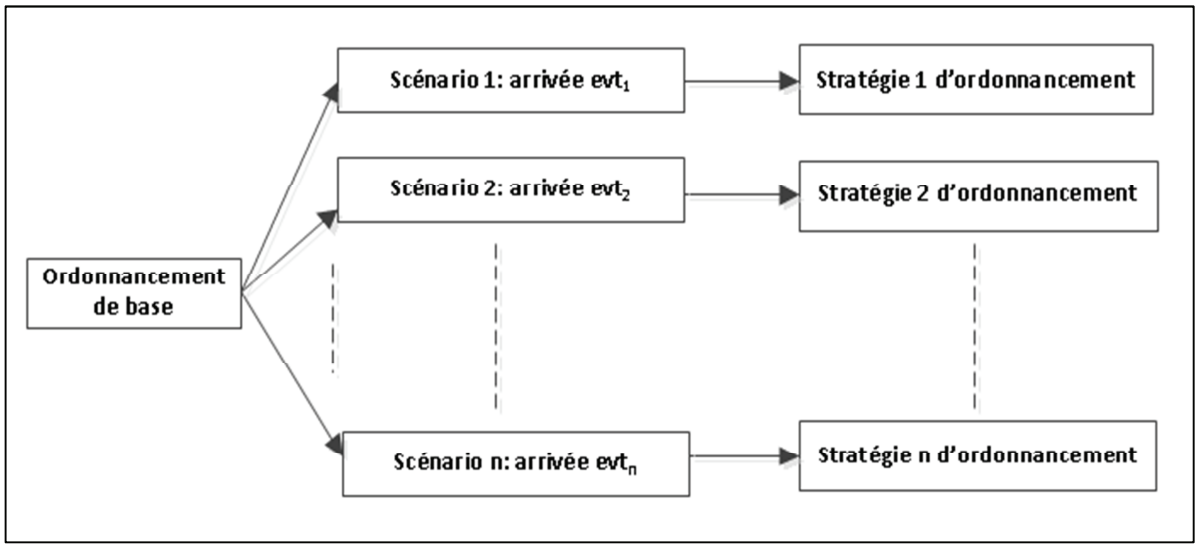

Figure 4.0.4. Illustration de la gestion des évènements par la méthode des scénarios

Principe 4 : Prise en compte de la maintenance conditionnelle (CBM)

D'après notre revue de la littérature, nous avons constaté que les travaux qui traitent la CBM essayent de trouver les indicateurs significatifs de pannes et ne se soucient pas de la programmation de la CBM. En effet, l'insertion de la CBM dans l'ordonnancement initial est un évènement qui doit être pris en compte dans l'atelier. Par conséquent, les maintenances préventives ne peuvent pas être uniquement temporelles, elles peuvent être aussi conditionnelles et c'est ce qui se passe en réalité dans les ateliers de production. Les gestionnaires de maintenance combinent les stratégies pour optimiser le coût de la maintenance et la disponibilité des équipements. Les travaux en ordonnancements conjoints de production et de maintenance sont de ce fait *irréalistes* car ils supposent à chaque fois l'application d'un seul type de stratégie.

La différence entre la détection d'une anomalie de fonctionnement est l'arrivée d'une panne est que la première présente un aspect moins urgent que la seconde. Les acteurs de l'atelier ont, de ce fait, le temps pour prendre une décision adéquate qui minimise les perturbations pouvant être causées par une panne. De plus, plusieurs options peuvent être évaluées avant de se décider sur l'ordonnancement final.

Conclusion

Après avoir introduit tous les principes sur lesquels nous nous sommes basés pour la proposition de nos contributions, nous présentons dans les chapitres qui suivent chacune de nos contributions en détail.

Dans le quatrième chapitre, nous proposons une approche réactive pour la prise en compte de l'évènement de l'insertion d'une CBM dans l'ordonnancement courant d'une machine donnée. Nous étudions ensuite l'effet de cette insertion sur les ordonnancements des machines voisines.

Dans le cinquième chapitre, nous proposons une approche proactive-réactive d'ordonnancement conjoint de production et de maintenance dans le cas d'un atelier à une machine. Dans les deux phases de résolution (proactive et réactive) nous prenons en compte quelques incertitudes liées aux deux activités de production et de maintenance.

Quant au sixième chapitre, il présentera l'outil que nous avons proposé pour faciliter l'automatisation des tests effectués sur nos contributions. Il s'agit d'une plateforme multi-agents baptisée ETOMA pour Environnement de Test des Ordonnancements Multi-Agents.

Chapitre 4

Une approche réactive pour la prise en compte de la maintenance conditionnelle dans un ordonnancement conjoint de production et de maintenance

Dans ce chapitre, nous présentons notre première contribution dans le domaine de l'ordonnancement conjoint de production et de maintenance qui traite le cas de la maintenance conditionnelle (CBM). D'après notre synthèse bibliographique, nous avons constaté l'absence de travaux qui s'intéressent à la programmation de ce type de maintenance. En effet, Ils mettent l'accent sur la recherche de paramètres qui pourront permettre de déceler l'occurrence d'une panne potentielle. Ces travaux ne donnent cependant pas d'indications sur la programmation d'une CBM pour éviter la panne.

En effet, une CBM est une maintenance préventive programmée suite à une anomalie de fonctionnement signalée à l'aide d'outils utilisés par le système de contrôle de production. A l'opposé d'une maintenance corrective, la machine est toujours opérationnelle. Il faut choisir seulement le bon moment d'intervention afin de perturber le moins possible le plan de production qui est en cours d'exécution.

Nous proposons dans ce travail, une résolution à deux niveaux : (1) le niveau une-machine où le plan de la machine qui nécessite l'intervention est modifié pour insérer la nouvelle CBM ; et (2) le niveau multi-machines où les plans de production des machines voisines sont mis à jour, si jamais ils ont été affectés par le premier niveau.

1. Introduction

Nous considérons un atelier multi-machines où chaque machine M_i exécute un ordonnancement conjoint composés de tâches de production et de maintenance systématiques (TBM). L'exécution de ces tâches est contrôlée par un système de production qui utilise des capteurs. Ces derniers sont connectés à un ordinateur sur lequel un logiciel d'aide à la décision est exécuté. Il compare les données collectées avec celles définissant l'état normal des machines et agit en cas d'anomalie.

Afin d'éviter qu'une panne survienne une « *Machine Sujet* » (MS), une activité de maintenance préventive CBM_j doit être impérativement programmée sur cette dernière. Elle sera notée CBM_{ij} et doit être de ce fait insérée dans l'ordonnancement actuel de *MS*.

Le *RUL* comme déjà présenté dans le chapitre 3 (section 1.3.2.-b.1), est la durée d'exploitation restante d'un équipement. Son estimation est essentielle pour le pronostic et la gestion des états des machines. C'est une estimation approximative de l'apparition d'une panne fonctionnelle de la machine. Le *RUL* est ainsi considéré comme étant une date limite avant laquelle il faut agir pour remettre la machine en bon état afin d'éviter son arrêt total et donc la perturbation du processus de production.

Après le début de l'exécution du plan de production, les données collectées sur la machine *MS* indiquent l'existence d'une anomalie de fonctionnement (point "P"- figure 4.1-a) ce qui signifie l'arrivée probable d'une panne (point "F"- figure 4.1-a).

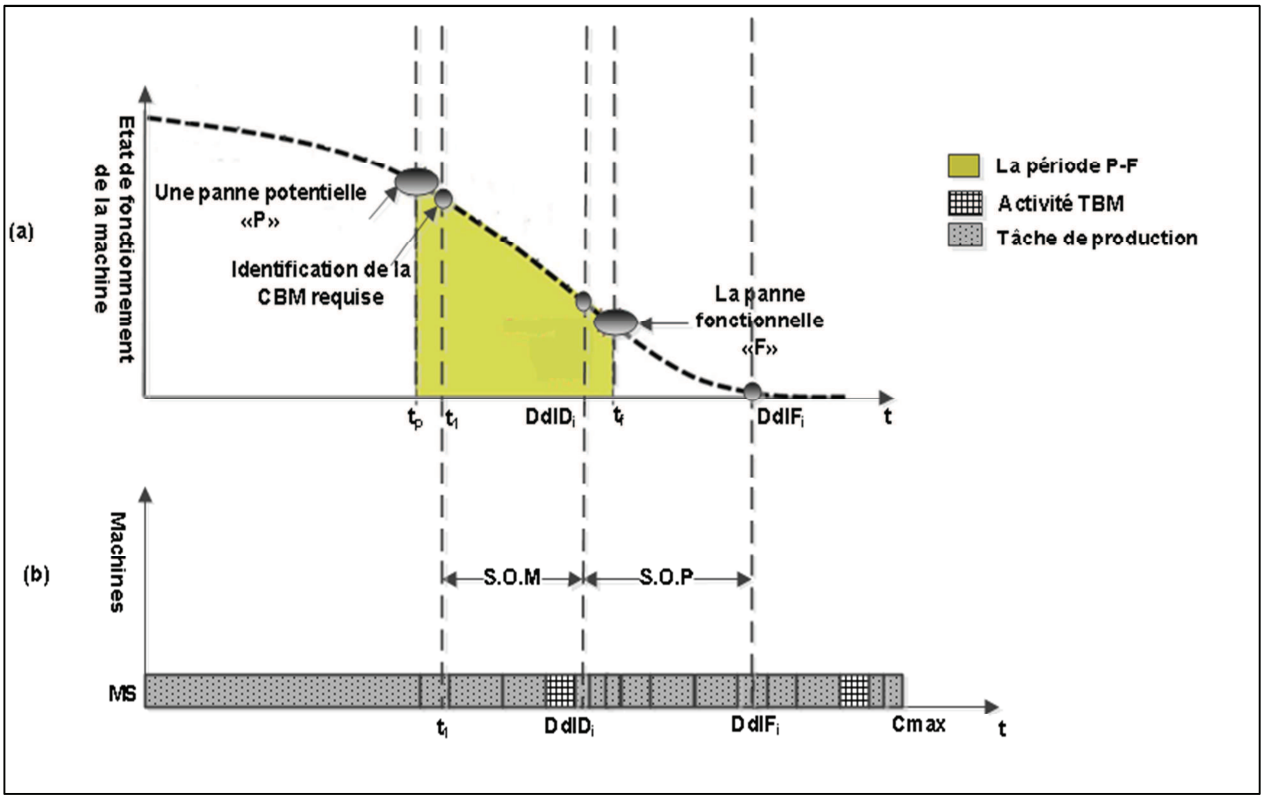

Figure 4.1. La courbe P-F et les stratégies de résolution adoptées

Après le diagnostic, c'est-à-dire l'identification de la CBM_{ij} nécessaire, cette dernière doit être insérée dans l'ordonnancement courant de la machine MS. Idéalement, la CBM_{ij} doit être planifiée avant la fin du RUL_i c'est-à-dire a l'intérieur de l'intervalle $[t_1, t_f]$.

Si la CBM_{ij} est programmée après RUL_i, les pannes sont susceptibles d'apparaître et par conséquent la machine serait indisponible. Comme t_f (fin de RUL_i) est inexacte, nous supposons qu'elle pourrait varier entre deux valeurs $DdlD_i$ (Début du Deadline) et $DdlF_i$ (Fin du Deadline) (figure 4.1-a).

Chaque activité de maintenance (TBM ou CBM) requiert une compétence pour son exécution. Le temps opératoire d'une activité de maintenance dépend du niveau de compétence et de performance des ressources humaines intervenantes. *La performance* des intervenants dépend de plusieurs paramètres comme leur charge de travail, leur état de santé et leur humeur. Il devient donc difficile d'estimer le temps qu'un intervenant passera pour exécuter une activité de maintenance. Par conséquent, nous supposons que c'est à l'intervenant lui-même de l'estimer. La *disponibilité* et la *compétence* sont les deux autres contraintes relatives aux ressources humaines devant être prises en compte impérativement lors de l'établissement des ordonnancements. En effet, du moment que le travail a déjà commencé en atelier, les emplois du temps des intervenants sont déjà établis. De ce fait, pour que la CBM_{ij} soit exécutée, un intervenant *apte* et *disponible* doit être désigné. Si ces contraintes sont prises en compte en ordonnancement, la solution proposée sera plus réaliste.

Le choix de la date de début de la CBM_{ij} est très difficile puisque la production est en cours. Interrompre le processus de production pourra causer des retards de réalisation et perturbera ainsi le plan de toutes les machines. Afin d'offrir plus de flexibilité aux décideurs et de trouver l'équilibre entre le risque de panne et le retard dans la production, nous proposons deux stratégies de résolution pour la gestion de la maintenance des machines : (1) la Stratégie Orientée Maintenance *(S.O.M)* et (2) la Stratégie Orientée Production *(S.O.P)* (figure 4.1-b).

(1) La Stratégie Orientée Maintenance (S.O.M) implique que la CBM_{ij} doit être insérée dans l'intervalle [t_1, $DdlS_i$] afin de ne pas prendre le risque qu'une panne machine se produise.

(2) La Stratégie Orientée Production (S.O.P) favorise les tâches de production par rapport aux activités de maintenance. Dans cette stratégie, le risque qu'une panne machine se produise est pris dans le but de maintenir la stabilité du plan de production. La CBM_{ij} dans ce cas, est insérée dans l'intervalle [$DslD_i$, $DdlF_i$].

2. Formalisation du problème

Dans ce qui suit, nous présentons le problème d'ordonnancement de la production, le problème de planification des activités de maintenances avec prise en compte des ressources humaines et les fonctions objectif à optimiser.

2.1. Le problème d'ordonnancement de la production

Soit un ensemble M={M_1, M_2,.. M_{m0}} de machines et un ensemble P= {P_1, P_2... P_{m1}} de travaux de production ordonnancés sur M. Chaque travail de production P_k sur une machine M_i est caractérisé par : une date de disponibilité r_{ik}, une date de début d'exécution t_{ik}, une durée opératoire p_{ik}, une date de fin d'exécution c_{ik} et une date d'échéance d_{ik}.

Les temps opératoires des travaux de production sont fixés et positifs. Nous supposons en plus que chaque travail peut être exécuté sur une seule machine à la fois, les opérations le composant sont non-préemptives et le temps d'installation peut être estimé avec le temps opératoire de chaque opération.

2.2. Planification des activités de maintenance préventive avec prise en compte des contraintes liées aux ressources humaines

Chaque TBM_{il} {l=1,…m_2} planifiée sur une machine M_i est caractérisée par une date de début d'exécution t'_{il} et une date de fin d'exécution c'_{il}.

Etant donné que les CBM sont planifiées seulement à la demande c'est à dire après la détection d'une anomalie de fonctionnement, elles sont donc associées à l'évènement d'arrivée des signaux à partir des capteurs. Chaque CBM_{ij} {j=1,…m_3} est caractérisée par une durée opératoire p'_{ij}, une compétence nécessaire pour son accomplissement cr_{ij} et une date limite RUL_i devant être respectée afin d'assurer la disponibilité de la machine M_i. En effet, p'_{ij} et RUL_i ne peuvent pas être connus de manière exacte. Pour cette raison, nous avons adopté une estimation approximative en utilisant les ensembles flous. p'_{ij} et RUL_i sont modélisés par les ensembles flous $\widetilde{p'}_{ij}$ et $\widetilde{RUL}_i$ avec une fonction d'appartenance triangulaire définie par le triplet (v_f^1,v_f^2,v_f^3)[1] (figure 4.2.a).

Le caractère flou du temps opératoire $\widetilde{\boldsymbol{p'}}_{ij}$ de la CBM_{ij} a un impact sur la date de fin d'exécution ($\boldsymbol{c'}_{ij}$) et les limites des fenêtres temporelles[2] des tâches qui la suivent. Les fenêtres d'exécution des tâches de production et de maintenance sont modélisées par une fonction d'appartenance de forme trapézoïdale (figure 4.2.b). Le caractère flou de la valeur $\widetilde{\boldsymbol{RUL}}_i$ influence seulement sur la décision concernant la planification de la CBM_{ij} (voir section 3).

[1] f={p_{ij}', RUL_i)

[2] fenêtre temporelle = [date de début d'exécution, date de fin d'exécution]

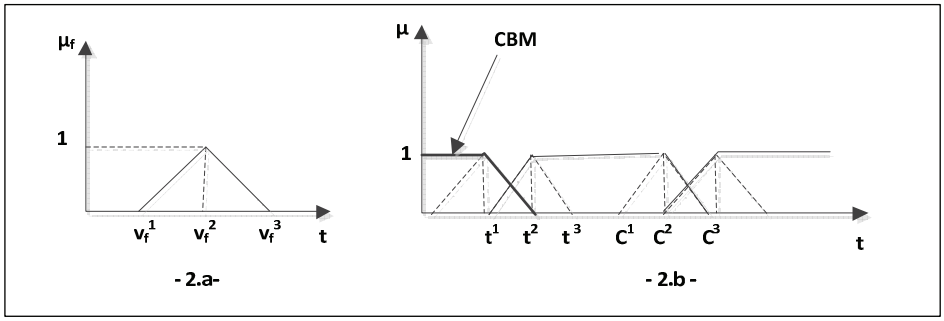

Figure 4.2. Modélisation floue du temps opératoire, du RUL et des fenêtres temporelles des tâches

Chaque ressource humaine dans le service maintenance $HR_m\{m=1,\ldots, m_4\}$ est caractérisée par $CR_m=\{cr_{m1},cr_{m2},..\}$ un ensemble de compétences qui la qualifient pour exécuter des activités de maintenance, un ensemble d'intervalles $ID_m=\{ID_{m1}, ID_{m2},..\}$ représentant ses disponibilités. Avec $ID_{mn}= [IDmin_{mn}, IDmax_{mn}]$ et un niveau de performance $Perfm_m$ qui précise le temps qu'elle consommera pour exécuter ses activités.

Etant donné qu'il n'y a que la ressource humaine qui peut estimer sa performance. Chaque HR_m peut proposer son estimation moyenne p'_{mp} de temps opératoire (eq.1). Elle s'exprime ensuite dans une forme floue $\widetilde{p'}_{mp}$ triangulaire.

$$p'_{mp} = (p'/Cr_{mp}) * Perform_m \qquad (1)$$

2.3. Fonctions objectif

Le but de l'approche proposée est d'insérer une nouvelle CBM dans un ordonnancement conjoint existant tout en prenant en compte les contraintes de compétence, de disponibilité et de performance des ressources humaines. L'objectif principal est de minimiser les perturbations de l'ordonnancement courant tout en assurant la disponibilité des machines.

Assurer une perturbation minimale implique que les fenêtres temporelles des activités courantes de production et de TBM doivent être changées au minimum. Nous supposerons que les activités de TBM ne vont pas être modifiées parce qu'elles ont été planifiées en prenant en compte plusieurs contraintes comme celles relatives aux ressources humaines et aux outils nécessaires pour leur exécution. Pour toutes ces raisons, nous proposons un ré-ordonnancement partiel au lieu d'un ré-ordonnancement total pour assurer la stabilité du plan de production courant.

Les fenêtres temporelles des travaux de production peuvent être modifiées car leur planification ne dépend que de la disponibilité des machines présentes dans l'atelier. L'objectif de la production $\widetilde{f_1}$ est alors de minimiser la moyenne du retard des travaux de production (eq.2). Le retard global $\widetilde{T}_{ik}$ d'un travail P_k exécuté sur une machine M_i est calculé comme suit (eq.3)

$$\widetilde{f_1} = 1/m_1 \sum_{i=0}^{m_1} \widetilde{T}_{ik} \qquad (2)$$

$$\widetilde{T}_{ik} = Max\,(0, ((\widetilde{c}_{ik}) - d_{ik})) \qquad (3)$$

La panne fonctionnelle de MS dépend de la date t'_{ij} de planification de la CBM_{ij} après la réception du signal à t_p (figure 4.1-a). Nous appelons la période entre t_p et t'_{ij} *le retard de la CBM* (eq.4). Le risque de panne augmente avec l'augmentation du retard de la maintenance.

$$f_2 = Max\left(0, (t'_{ij} - t_p)\right) \qquad (4)$$

En conclusion, le problème revient à minimiser la fonction objectif globale $\tilde{f}$ (eq.5) définie comme étant la somme pondérée de la moyenne du retard de production $\widetilde{f_1}$ et du retard de la CBM f_2.

$$\begin{cases} \tilde{f} = w_1 \widetilde{f_1} + w_2 f_2 \\ w_1 + w_2 = 1 \end{cases} \qquad (5)$$

Les poids w_1 and w_2 mesurent respectivement l'effet du retard de production et le retard de la CBM sur la valeur de la fonction objectif globale $\tilde{f}$. Leurs valeurs dépendent de la stratégie de maintenance adoptée: (1) Quand nous adoptons la stratégie *SOM*, le retard de la CBM sera très faible. Ainsi, nous nous intéressons à la minimisation du retard de jobs de production en donnant à $\widetilde{f_1}$ le poids le plus important ($w_1 > w_2$); (2) Toutefois, si c'est la stratégie SOP qui est adoptée, et du moment que la CBM sera planifiée après $DdlD_i$, le retard de la CBM sera important. Dans ce cas, c'est au tour de f_2 d'avoir le poids le plus fort.

3. Approche de résolution

Dans notre travail, nous proposons une résolution à deux niveaux :(1) le niveau une-machine; et (2) le niveau multi-machines. Dans le niveau une-machine, la nouvelle CBM_{ij} est insérée dans l'ordonnancement courant de la machine MS en prenant en compte les contraintes liées aux ressources humaines. L'ordonnancement résultant de la résolution locale de la MS peut affecter les ordonnancements des machines voisines (les machines en amont et en aval). Afin de réajuster leurs ordonnancements, dans le niveau multi-machines, la machine MS initie une négociation avec les machines en amont pour essayer d'absorber le retard causé par les modifications apportées. Ensuite, la MS informe les machines en aval des modifications apportées si jamais le retard n'a pas pu être absorbé en amont.

Nous utilisons les agents AMS, AVA, AMA, AMC, ASRH et ARH pour modéliser les acteurs de notre atelier. Ils modélisent respectivement : la machine MS, toute machine en amont de MS, toute machine en aval de MS, l'agent maintenance, l'agent superviseur des ressources humaines et les agents ressources humaines.

3.2. Le niveau une-machine

Dans cette section, nous décrivons la résolution locale du AMS c'est-à-dire comment que l'AMS procède pour insérer la CBM dans son plan de production actuel. Nous proposons un ré-ordonnancement partiel où seul l'ordonnancement des travaux de production peut être affecté. Cette résolution locale se compose de sept étapes: (1) l'étape d'initialisation, (2) l'étape d'analyse, (3) l'étape d'appel à intervention, (4) l'étape de formulation de propositions, (5) l'étape de réception (6) l'étape de planification et d'évaluation et finalement (7) l'étape de finalisation. La figure 4.3 et la figure 4.4 illustrent respectivement le diagramme d'interactions et celui d'activités des agents impliqués.

3.2.1. Etape Initialisation

Lorsque l'AMS reçoit des signaux en provenance des capteurs, il envoie une demande d'analyse à l'AMC. La demande se compose des codes des signaux et des informations relatives à l'état de la machine. Ces informations permettent à l'AMC de déterminer le problème, la suggestion de l'activité de maintenance nécessaire et l'estimation du RUL_i.

3.2.2 Etape Analyse

Dans cette étape et selon les informations envoyées par l'AMS, l'AMC identifie d'abord le problème ainsi que l'activité de maintenance nécessaire pour corriger l'anomalie pour enfin estimer la valeur du RUL_i. Cette dernière est floue et est définie par trois points [$DdlD_i$, t_f, $DdlF_i$] (figure 4.1-a). Il envoie toutes les informations nécessaires à l'ASRH pour faire un appel à intervention.

3.2.3. Etape d'appel à intervention

L'ASRH est muni du *référentiel* qui contient la liste de tous les ARH, leurs compétences et leurs plannings d'intervention. Tout d'abord, il doit choisir une stratégie de maintenance pour spécifier l'intervalle d'intervention I_{ij}:

(1) Pour la stratégie SOM, I_{ij}=[t_1, $DdlD_i$] c'est-à-dire juste après le diagnostic et la spécification de la maintenance à planifier et avant la valeur minimale du RUL_i.

(2) Pour la stratégie SOP, I_{ij} =[$DdlD_i$, $DdlF_i$] c'est-à-dire entre la valeur minimale et maximale de RUL_i.

Si selon la stratégie adoptée, l'ASRH, n'a pas pu trouver d'intervenants disponibles, il change de stratégie. Ainsi, il envoie un appel à intervention (CFP) à tous les intervenants disponibles et qualifiés pour l'exécution de la CBM_{ij}. Le CFP est composé de l'identifiant de la CBM_{ij} et de l'intervalle préféré de l'intervention I_{ij}.

3.2.4. Etape Formulation des propositions.

Chaque ARH_m contacté vérifie son plan d'intervention. Selon ses disponibilités, il répond à l'appel de l'AMC. Chaque ARH_m contacté peut envoyer plusieurs propositions à l'AMC. Une proposition est composée de : l'identifiant de la CBM_{ij}, une liste d'intervalles de disponibilité AI_m et le temps opératoire $\widetilde{p'}_{jm}$ qu'il va prendre pour exécuter l'activité. $\widetilde{p''}_{jm}$ est défini par trois points [p'_{jm1},p'_{jm2},p'_{jm3}]. L'algorithme 4.1 décrit le comportement de chaque ARH_m contacté.

Algorithm 4.1. Le comportement du ARH_m

Soit $\widetilde{p'}_{jm}$ le temps proposé par HRA_m pour réaliser CBM_{ij},[$Imin_{ij}$, $Imax_{ij}$] l'intervalle d'intervention indiqué par l'AMC et Prop_list la liste des propositions.

Cas1. Si ARH_m reçoit un CFP, il procède ainsi:

- **Etape1.** Il calcule le temps opératoire $\widetilde{p'}_{jm}$ en utilisant (eq.1)
- **Etape2.** À partir de $Imin_{ij}$ et tant que $Imax_{ij}$ n'est pas dépassé, pour chaque intervalle de disponibilité avec une longueur>=p'_{jm3}, il insère cet intervalle dans la Prop_list
- **Etape3.** Il envoie la Prop_list à l'ASRH.

Cas2. Si ARH_m reçoit une confirmation d'intervention, il met à jour son plan d'intervention local et sa disponibilité.

3.2.5. Etape Réception

Dans cette étape, l'ASRH reçoit des réponses des ARHs contactés. Il retient les réponses positives (les acceptations) et les transmet à l'AMC qui les transmettra à l'AMS.

3.2.6. Etape Ordonnancement et évaluation

L'AMS procède par l'évaluation des propositions afin de sélectionner la meilleure en fonction de son objectif. Nous appelons *position* une date où on peut insérer la CBM_{ij} (voir la figure 4.6.(0)). Elle est

située entre chaque fin d'exécution d'un travail de production et la date de début de la prochaine TBM. Selon la stratégie adoptée (SOM ou POM), l'AMS tente d'insérer la CBM_{ij} dans la position la plus adaptée aux intervalles de disponibilité des ARHs. Pour ce fait, il ordonnance les jobs de production de façon à minimiser $(\widetilde{f_1})$ (algorithme 4.2). Enfin, il évalue tous les ordonnancements obtenus (selon la valeur de la fonction objectif $\tilde{f}$), puis sélectionne celui qui minimise le mieux $\tilde{f}$.

3.2.7. Etape Finalisation

Après évaluation, l'AMS envoie sa décision à l'AMC qui la transmet à l'ASRH. Ce dernier informera à son tour l'ARH correspondant de la décision en lui envoyant une confirmation de proposition. Aussi, un message d'annulation sera envoyé aux ARHs non retenus. L'ARH sélectionné met à jour son plan d'intervention et sa disponibilité en insérant la CBM_{ij} et informe la ressource humaine réelle en lui envoyant un message pour l'informer que son planning a été modifié.

Algorithme 4.2. Le comportement de l'AMS

Étape2. Il identifie toutes les positions où il peut insérer la CBM_{ij} dans son ordonnancement.
Étape3. Plusieurs cas peuvent être distingués:
- Si aucune position n'est disponible, il change de stratégie de maintenance et ré-exécute **étape2.**
- Si aucune autre stratégie ne peut être choisie, il réordonnance totalement tous les travaux de production et passe à **l'étape8.**

Étape4. Il retire tous les travaux de son ordonnancement courant
Étape5. Pour chaque position "pos", l'AMS:
- Insère CBM_{ij} dans "pos"
- Calcule f_2, le retard de la CBM.
- Insère les travaux de production un après l'autre dans leur ordre initial selon la place disponible.
- Construit deux listes P et PA. P Contient les travaux en retard et PA contient les travaux en avance
- Pour chaque p de P faire:
  Tant que (p n'a pas été permuté avec un travail pa de PA), l'AMS:
  - Permute p et pa
  - Calcule $\widetilde{f_1}$, la moyenne du retard des travaux de production
  - si $\widetilde{f_1}$ a été améliorée alors il retient le nouvel ordonnancement

  Fin tant que
  Fin pour
- Calcule la valeur de la fonction objectif globale $\tilde{f}$

Étape6. L'AMS sélectionne l'ordonnancement qui optimise $\tilde{f}$
Étape7. Il identifie l'ARH sélectionné
Étape8. Fin

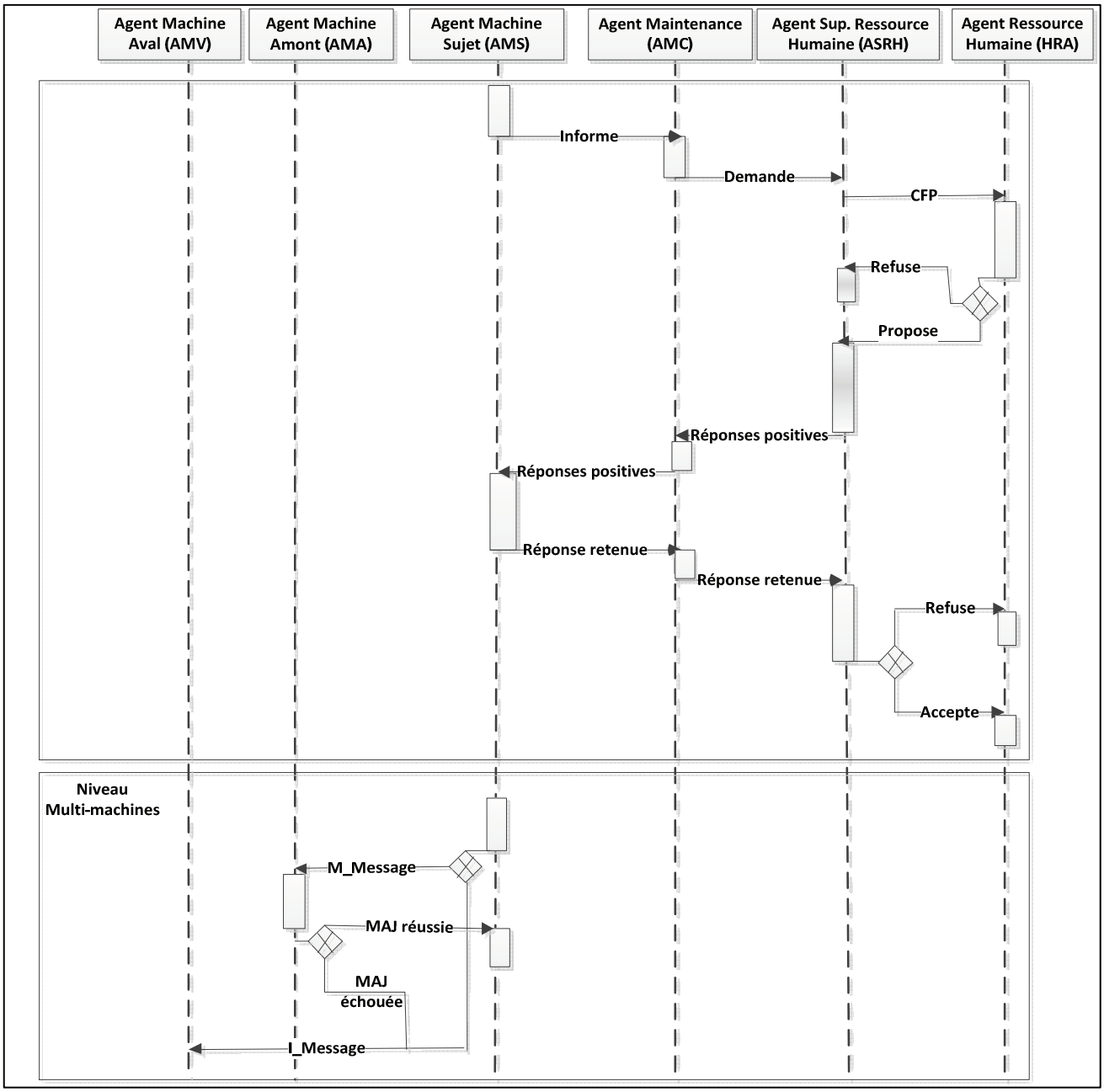

Figure 4.3. Le protocole d'interactions multi-agents

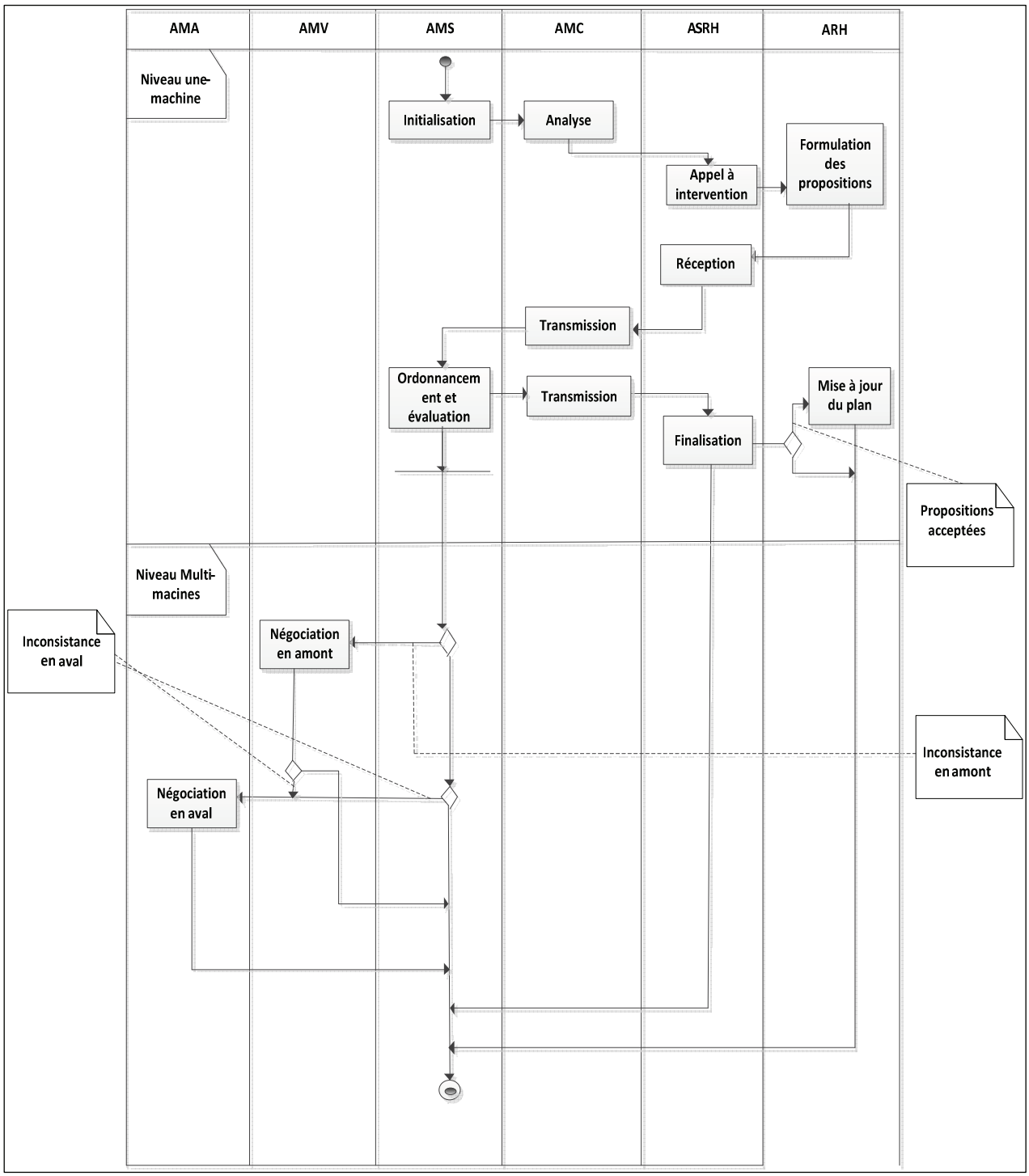

Figure 4.4. Diagramme d'activités multi-agents

3.2.8. Exemple illustratif

Nous considérons un AMS avec le plan représenté par la figure 4.5. Le tableau 4.1 récapitule toutes les données relatives aux activités de production et de maintenance du plan. A travers cet exemple, nous décrivons la résolution dans le niveau une-machine.

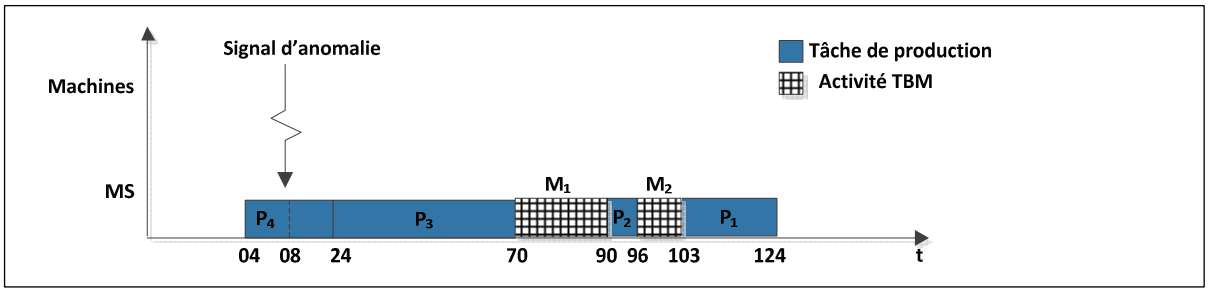

Figure 4.5. L'ordonnancement conjoint des activités de production et de maintenance exécuté sur la MS

Tableau 4.1. Données relatives à l'ordonnancement initial de la MS

Ordre tâches	Id_i	p_i	t_i	c_i	r_i	d_i	Id de RH	Type maint.
1	P_4	20	4	24	0	60	/	/
2	P_3	46	24	70	24	40	/	/
3	M_1	20	70	90	/	/	2	TBM
4	P_2	6	90	96	39	93	/	/
5	M_2	7	96	103	/	/	1	TBM
6	P_1	21	103	124	20	110	/	/

a. Étape Initialisation. Nous supposons qu'une anomalie a été signalée pendant l'exécution de P4 à l'instant t_8. En attendant la fin d'exécution de P_4, l'AMS traite le signal. Il envoie une demande d'analyse auprès de l'AMC.

b. Étape Analyse. Nous supposons que l'AMC identifie l'activité de maintenance nécessaire pour éviter la panne et la valeur du RUL qui est égale à [100,120,140]. Cette étape a pris 3 unités de temps. Il envoie les informations nécessaires à l'ASRH.

c. Étape Appel à intervention l'ASRH envoie des CFP aux ARH identifiés. Nous supposons qu'il choisit la stratégie SOM pour gérer ses maintenances. En conséquence, l'intervalle souhaité d'intervention sera [t11,t90].

d. Etape Formulation des propositions. Nous supposons que deux intervenants ARH_1 et ARH_2 proposent respectivement ((4,7,9), [t20,t40]) et ((3,6,9), [t76,t105]) pour le temps d'exécution et l'intervalle de disponibilité.

e. Etape Ordonnancement et d'évaluation. Du moment que c'est la MOS qui est adoptée, les poids w_1 et w_2 de la fonction objectif seront respectivement 0.75 et 0.25. AMS entame donc l'ordonnancement et l'évaluation.

e.1) Evaluation de la proposition de ARH_1: selon son plan, l'AMS n'a que la position t24 (figure 4.6.(0)) où il peut insérer la CBM_{ij} puisque ARH_1 propose l'intervalle [t20 et t40]. Dans ce cas-là, f_2= Max (0, (24-8)) =16.

Afin de construire un nouvel ordonnancement, l'AMS, retire, tout d'abord, tous les travaux de production de son plan courant et laisse les activités TBM telles quelles (figure 4.6.(1)). Par la suite, il ajoute les travaux de production l'un après l'autre tout en respectant leur ordre initial c'est-à-dire P_3, P_2, puis P_1. L'ordonnancement effectué par l'AMS peut être résumé en deux étapes:

Étape 1. Il ordonnance P_1, P_2 et P_3 selon leur ordre: au début, il essaye d'insérer P_3 juste après la CBM_{ij} mais il ne pourra pas car son temps opératoire est plus grand que le temps entre la CBM_{ij} et M_1 (46 >37). Aussi, il ne pourra pas l'insérer entre M_1 et M_2 pour la même raison. De ce fait, il insère P_3 après M_2 et insère P2 et P1 après P_1 (figure 4.6.(2)).

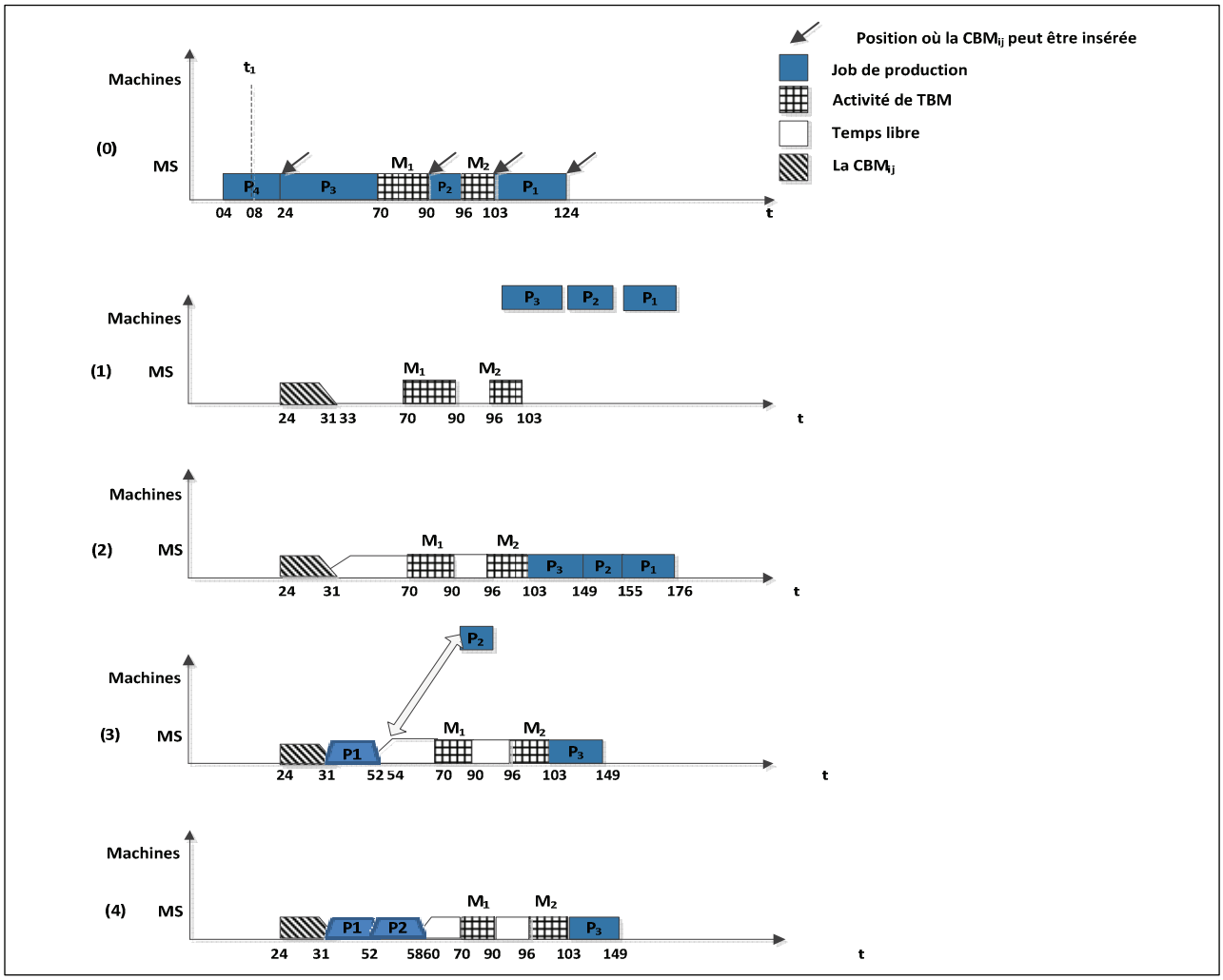

Figure 4.6. Construction de l'ordonnancement conjoint de production et de maintenance selon la proposition d'ARH_1

Tableau 4. 2. Les données relatives à l'ordonnancement construit selon la proposition d'ARH1

Ordre tâches	Id tâches	p_i	t_i	c_i	r_i	d_i	Id de RH	Type maint.	Le retard	*f1*	*f2*
1	CBM_{ij}	(4,7,9)	24	(28,31,33)	/	/	1	CBM	/		
4	A_0	14	(28,31,33)	70	/	/	/	/	/		
5	M_1	20	70	90	/	/	1	TBM	/		
6	A_1	0	90	96	/	/	/	/	/		
7	M_2	7	96	103	/	/	2	TBM	/	79	16
8	P_3	46	103	149	24	40	/	/	109		
3	P_2	6	149	155	39	93	/	/	62		
2	P_1	21	155	176	20	110	/	/	66		

Étape 2: il essaye d'améliorer la moyenne du retard de l'ordonnancement par le processus de permutation. Dans cette étape, l'AMS essaye d'améliorer la moyenne des retards des travaux de production ($\widetilde{f1}$) de l'ordonnancement généré dans l'étape1. Le Tableau 4.2 décrit les caractéristiques des travaux de production (la date de disponibilité r_i, la date de fin d'exécution $\widetilde{c}_i$, la date d'échéance d_i et le retard de production et de maintenance). L'AMS construit deux listes: (1) *la liste P* qui contient les travaux en retard et (2) *la liste PA* qui contient les travaux en avance (PA peut contenir des temps libres (les travaux "A")). L'AMS permute chaque travail P avec un autre de PA, calcule $\widetilde{f1}$ et retient l'ordonnancement qui améliore $\widetilde{f1}$. Pour notre exemple, comme illustré dans la figure 4.6.(3), du moment que P_2 arrive à l'instant t39, l'AMS permute P_1 avec un travail "A" localisé entre la CBM_{ij} et M_1. Il permute après P2 avec un autre travail "A" localisé entre P_1 et M_1. Le plan retenu est celui illustré sur la figure 4.6. (4) et les résultats finaux sont ceux présentés dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3. Données relatives à l'ordonnancement final construit selon la proposition d'HRA1

Ordre tâches	Id tâches	p_i	t_i	$\widetilde{c}_i$	r_i	d_i	Id de RH	Type maint.	Le retard	f1	f2
1	CBM_{ij}	(4,7,9)	24	(28,31,33)	/	/	1	CBM	16		
2	P1	21	(28,31,33)	(49,52,54)	20	110	/	/	0		
3	P2	6	(49,52,54)	(55,58,60)	39	93	/	/	0		
5	M_1	20	70	90	/	/	1	TBM	/	36.33	16
6	A_1	6	90	96	/	/	/	/	/		
7	M_2	7	96	103	/	/	2	TBM	/		
8	P_3	46	103	149	24	40	/	/	109		

e.2) Evaluation de la proposition de ARH_2: dans ce cas, l'AMS n'a que la position t103 pour insérer la CBM_{ij} (figure 4.7.(0)). Selon le tableau 4.4, il reste encore t32 avant d'atteindre le deadline $DdlF_i$ qui est t100. Ainsi, la stratégie *SOM* est retenue et le retard de CBM f_2=Max (0, (103-8)) =95.

L'AMS laisse les travaux P_3 et P_2 dans leur positions parce que l'intervalle de l'ARH commence à t103. Il retire P_1 (figure 4.7.(1)) et insère la CBM_{ij} à l'instant t103 et juste après, il insère P_1(figure 4.7.(2)). A la fin le plan retenu est celui illustré sur la figure 4.7.(3) et les calculs finaux sont résumés dans le tableau 4.4.

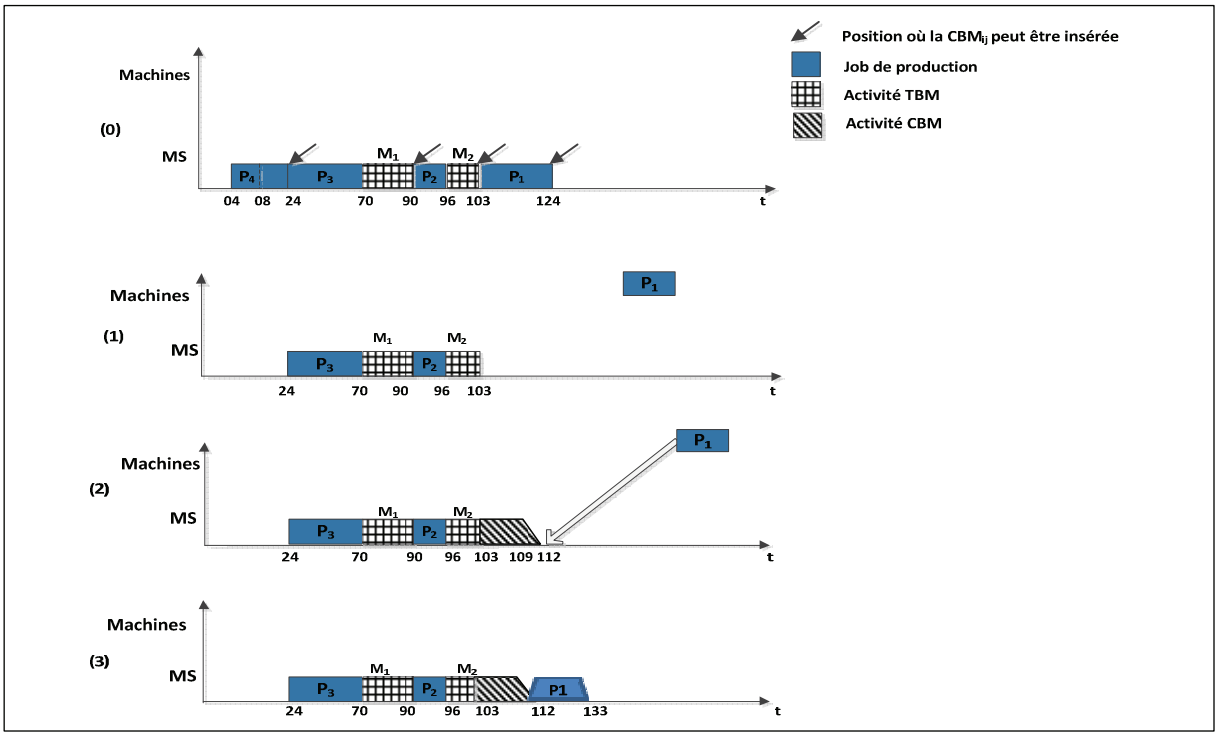

Figure 4.7. Construction de l'ordonnancement conjoint de production et de maintenance selon la proposition de AHR_2

Tableau 4.4. Données relatives à l'ordonnancement généré selon la proposition d'ARH_2

Ordre tâches	Id tâches	p_i	t_i	c_i	r_i	d_i	Id de RH	Type maint.	Retard	*Temps avant DdlF*	f_1	f_2
1	P_3	46	24	70	24	40	/	/	30	38	(21,22,23)	95
2	M_1	20	70	90	/	/	2	TBM	/	38		
5	P_2	6	103	109	39	93	/	/	16	32		
4	M_2	7	96	103	/	/	1	TBM	/	32		
3	CBM_{ij}	(3,6,9)	103	(106,109,112)	/	/	2	CBM	95	/		
6	P_1	21	(106,109,112)	(127,130,133)	20	110	/	/	(17,20,23)	/		

Le tableau 4.5 présente l'évaluation des deux propositions des ressources humaines. Nous avons trouvé que la meilleure proposition est celle d'ARH_1 car c'est elle qui minimise $\tilde{f}$

Tableau 4.5. Comparaison des propositions des ARHs

HRA	HRA_1	HRA_2
$\widetilde{f1}$ = Moyenne du retard	36.33	(21,22,23)
f_2 = retard de la CBM	16	95
$\tilde{f} = 0.75 * f_1 + 0.25 * f_2$	31.2475	(39.5,40.25,41)
ARH retenu	X	

3.3. Le Niveau Multi-machines

Après la résolution locale de l'AMS, son nouvel ordonnancement peut affecter les ordonnancements des machines voisines: les machines en amont et en aval. C'est pour cette raison que nous identifions deux types d'inconsistance: en amont et en aval.

– **L'inconsistance en amont** est avérée si *la date d'exécution* t_{ik} d'un travail de production P_k sur une machine M_i est inférieure à la date de fin d'exécution $c_{(i-1)k}$ sur la machine qui est juste avant la machine i ($t_{ik} < c_{(i-1)k}$).

– **L'inconsistance en aval** est avérée si la date de *fin d'exécution* c_{ik} d'un travail de production P_k sur une machine M_i est supérieure à sa date de début d'exécution $t_{(i+1)k}$ sur la machine qui suit la machine M_i ($c_{ik} > t_{(i+1)k}$).

Par conséquent, une renégociation est inévitable afin de réajuster l'ordonnancement actuel en respectant les ordonnancements de toutes les machines. Suivant les positions des AMs (agents machines) contactés lors des négociations, nous identifions les négociations en amont et les négociations en aval.

3.3.1. La négociation en amont

La négociation en amont est nécessaire quand un travail de production doit être avancé. En effet, un travail de production n'est disponible sur l'AMS qu'une fois son exécution terminée sur la machine en amont:$c_{(i-1)k} < t_{ik}$. Dans le cas contraire, c'est une inconsistance en amont qui est détectée. Dans ce cas, l'AMS formule un message appelé Mise_à_jour_Message (M_Message) dans lequel il spécifie les travaux concernés par l'éventuelle avance. Aussi, il spécifie les travaux qui peuvent être retardés selon son plan local. Il envoie le message à son AMA direct.

(a) Traitement d'un M_Message : quand un AM reçoit un message de type M_Message, il essaye de réordonnancer ses travaux de production selon l'ordre proposé par l'AM émetteur (figure 4.8). Deux cas peuvent apparaître:

a.1) Il réussit à réajuster son plan local et absorbe donc l'inconsistance. Dans ce cas, il formule un message d'information de type Information_Message (I_Message) dans lequel il spécifie les nouvelles dates de fin d'exécution des travaux. Il envoie ce message à la machine aval direct (AMV).

a.2) Il détecte à son tour une inconsistance en amont. Dans ce cas, si l'AMA contacté ne représente pas la première machine dans la ligne de production, il envoie à son tour un M_Message à son AMA direct afin de réajuster ses jobs inconsistants. Cependant, si c'est la première machine, il formule un I_Message à son AMV pour l'informer de son ordonnancement final.

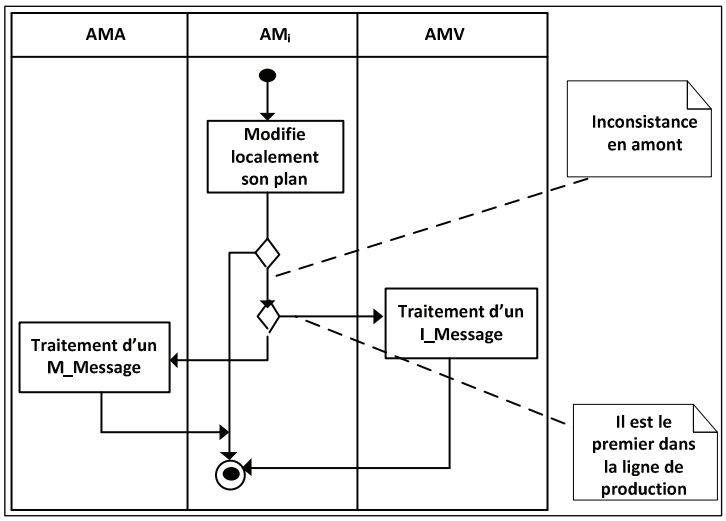

Figure 4.8. Diagramme d'activités du traitement du M_Message

(b) Traitement d'un I_Message: comme expliqué avant, l'AMA contacté peut envoyer un message de type "I_Message" après avoir modifié son propre plan (figure 4.8). Le récepteur de ce message doit réajuster son plan selon les dates de fin d'exécution des travaux de production. Il peut envoyer à son tour un I_Message à son AMV si jamais l'inconsistance persiste encore.

3.3.2. La négociation en aval

A la fin de la négociation antérieure, l'AMS met à jour son plan. Ce dernier peut ne pas être similaire à celui de la résolution locale car il dépend des changements effectués par les agents avec qui l'AMS a négocié. L'AMS formule un message de type I_Message et l'envoie à son AMV direct pour qu'il soit au courant des nouvelles modifications. En conséquence, cette étape est une propagation des résultats calculés par chacun des agents en aval (figure 4.9).

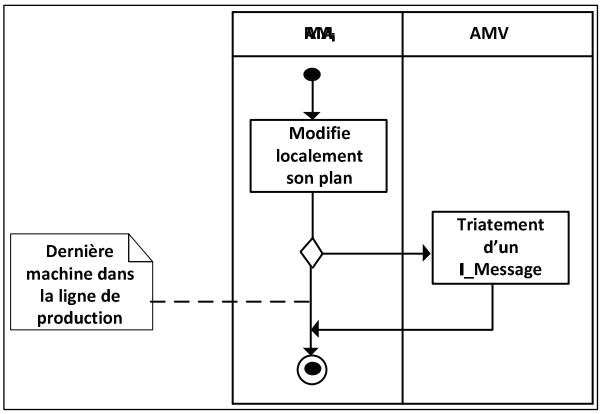

Figure 4.9. Diagramme d'activités du traitement d'un I_Message

4. Résultats expérimentaux

Dans cette section, nous présentons les résultats des expérimentations réalisées pour tester l'efficacité de notre nouvelle approche. Nous avons effectué les expérimentations sur un ordinateur personnel avec un processeur Intel Core i3, 2.53 GHz (4 CPUs), 4 Go de RAM et Windows7 (32 bits) comme système d'exploitation. Nous décrivons en premier lieu le logiciel utilisé et le protocole de test. Par la suite, nous présentons et discutons les résultats obtenus. Nous avons réalisé plusieurs séries de test en utilisant ETOMA [Bouzidi-Hassini *et al.*, 2014], une plateforme multi-agents dédiée au développement et le test des solutions d'ordonnancement de production et de maintenance. Elle sera présentée dans le sixième chapitre.

4.1. Le protocole de test

Nous considérons pour nos expérimentations un atelier de type flow-shop avec date de disponibilité et date d'échéance pour les tâches de production. Selon notre revue de la littérature, il n'existe pas d'instance pour le problème d'ordonnancement conjoint de production et de maintenance tel que nous le définissons dans notre travail. De ce fait, nous avons généré nous-mêmes les données de de maintenance et celles des ressources humaines. Nous construisons plusieurs ordonnancements conjoints de production et de maintenance prédictifs. Après cela, nous simulons l'arrivée de l'évènement d'anomalie en provenance des capteurs et nous observons le comportement de notre

système. Afin d'étudier tous les scénarios possibles, la date d'arrivée de l'anomalie peut être au début, au centre ou à la fin de l'horizon de production.

4.1.1. Génération des données de maintenance

Nous avons généré nos propres instances en adaptant les benchmarks de Taillard [Taillard, 1993] : nous générons les dates de disponibilité r_{ij} et les dates d'échéance d_{ij} pour chaque tâche de production *j* sur une machine *i* en appliquant respectivement (eq.6) et (eq.7).

$$r_{ij} = r_{(i-1)j} + p_{(i-1)j} \qquad (6)$$

$$d_{ij} = (d_j - r_j) * p_{ij} / p_j \qquad (7)$$

Pour chaque machine, plusieurs activités TBM sont planifiées. Les temps opératoires sont générés aléatoirement à partir d'un intervalle. Les activités de maintenance ne peuvent pas être planifiées aléatoirement car ceci dépend de la durée d'exploitation de la machine. Une période T_j entre deux occurrences d'une TBM de type j est calculée en utilisant (eq.8).

$$T_j = MP_j * NPT \qquad (8)$$

MP_j représente le temps opératoire moyen des tâches de production et NPT le nombre des tâches de production entre deux TBM.

4.1.2. Les instances des ressources humaines

Nous varions le nombre d'ARH entre 2 et 8 afin d'évaluer son influence sur les performances de l'approche proposée. Nous nous sommes arrêtés à 8 ARHs parce que nous n'avons qu'une seule ligne de production dans l'atelier et une seule CBM à insérer.

Dans le cas d'existence de plusieurs activités de CBM avec différents temps opératoires que nous devons insérer dans le plan de production, l'AMS traite les CBM une après l'autre.

Les caractéristiques d'une ressource humaine RH_m sont: la compétence $Comp_m$, la performance $Perform_m$ et les intervalles de disponibilité $[IDmin, IDmax]_m$.

- Les compétences $Comp_m$ peuvent prendre les valeurs [1, 2,3] telles que : 1-novice, 2 -moyen et 3-expert.
- Les performances $Perform_m$ sont des réels générés aléatoirement dans l'intervalle [0,1]
- Nous générons un plan de disponibilité pour chaque RH_m dans l'atelier. La disponibilité des intervenants dépend du nombre d'activités de maintenance planifiées et du nombre des ressources humaines dans le service de maintenance. La moyenne des périodes TRH_m séparant deux interventions de chacun des RH_m est calculée par (eq.9).

$$TRH_m = H / NRH_m \qquad (9)$$

$$NRH_m = NAM / NHR \qquad (10)$$

H représente l'horizon d'ordonnancement et NRH_m (eq.10) le nombre moyen d'activités de maintenance affectées à une RH_m. NAM est le nombre total des activités de maintenance planifiées et NHR est le nombre de ressources humaines existantes dans le service.

Afin de construire le plan d'intervention de n'importe quelle RH_m, nous générons ses intervalles de disponibilité $ID_m = \{ID_{m1}, ID_{m2}, \ldots\}$. Chaque intervalle ID_{mk} est défini par $[IDmin_{mk}, IDmax_{mk}]$ (eq.11 et eq.12). p'_{mi} représente le temps opératoire consommé par la ressource RH_m pour réaliser la CBM_i.

$$IDmin_{mk} = IDmax_{mk-1} + p'_{mi} + \alpha_1 \qquad (11)$$

$$IDmax_{mk} = IDmin_{mk} + \mu * p'_{mi} + \alpha_2 \qquad (12)$$

$\alpha_1$et α_2 sont des nombres aléatoires avec (eq.13 et eq.14) :

$$p'_{mi} / 2 <= \alpha_1 <= 2 * p'_{mi} / 3 \qquad (13)$$

$$0 <= \alpha_2 <= 2 * p'_{mi} \qquad (14)$$

Nous proposons trois types d'intervalles de disponibilité selon leur taille. C'est la valeur du paramètre μ qui détermine la taille de chaque intervalle : {3-large, 2-moyen, 1-petit}. La figure 4.10 illustre les types d'intervalles de disponibilité testés.

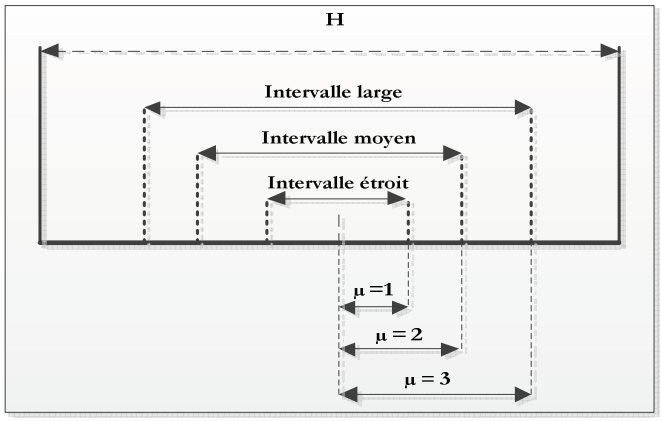

Figure 4.10. Type des intervalles de disponibilité considérés

4.1.3. Les données floues

La largeur de la base floue *fbw* d'une fonction d'appartenance triangulaire (figure 4.10) représente la distance entre la valeur la plus probable de la mesure floue et sa valeur minimale et maximale. C'est la moitié du support de la fonction d'appartenance.

Comme nous venons de l'avancer, nous proposons deux mesures floues : $\widetilde{RUL_i}$ et p'_m. Le choix de la valeur du *fbw* a un impact sur les résultats de l'approche de résolution.

Pour RUL_i, la valeur du *fbw* influera sur la largeur des intervalles des deux stratégies SOM et SOP. En effet, l'existence des stratégies est insensée si nous considérons des intervalles très larges ou très restreints : si l'intervalle est très large, les résultats peuvent être irréalistes. Aussi si l'intervalle est très restreint, la probabilité de trouver un ARHs disponible pour l'exécution de la CBM est très petite. Le but derrière la considération d'un deadline pour la planification de la CBM est l'évaluation (1) du cas de sa planification tout en retardant la production et (2) le cas de la retarder et maintenir le plus possible l'ordonnancement actuel. De ce fait, il est important de proposer des largeurs réalistes pour les intervalles des stratégies de maintenance. Pour ces raisons, nous avons choisi la valeur 0.4 pour la bw du RUL_i ($t_f \pm t_f$*0.40).

Quant à *fbw* et p''_{mI}, leur valeurs influent sur le nombre de positions possibles où la CBM peut être insérée. Nous choisissons la valeur 0.2 ($p''_{mI} \pm p''_{mI}$*0.2) qui est moyenne et reflète une imprécision rationnelle concernant le temps opératoire des activités de maintenance.

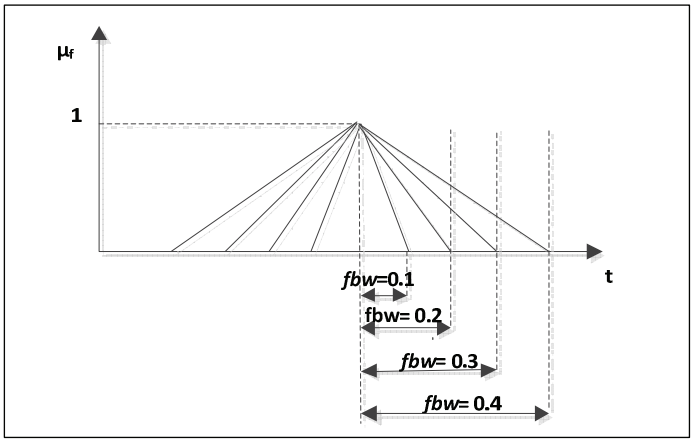

Figure 4. 11. La largeur "f*bw*" pour une fonction d'appartenance

4.1.4. Simuler l'arrivée du signal d'anomalie

Afin d'étudier l'influence de la date d'arrivée du signal d'anomalie, nous générons un signal au début, au milieu et à la fin du plan de l'AMS. De ce fait, nous divisons le plan de l'AMS en trois intervalles de même largeur. Pour chaque série d'expérimentation, nous générons un signal d'anomalie dans les 3 intervalles. En ce qui concerne l'ordre de l'AMS dans la chaîne de production, nous choisissons dans chaque benchmark la position du milieu afin d'avoir des résultats significatifs.

4.2. Résultats des simulations

Nous présentons deux séries de tests. Dans la première série d'expérimentations, nous évaluons la réactivité du système en mesurant l'influence du nombre de machines m_0, de jobs de production m_1, des ressources humaines m_4, de la stratégie adoptée et du moment de l'arrivée de l'anomalie sur le temps de résolution. Dans la deuxième série, nous évaluons la capacité de notre approche à minimiser le retard de production.

4.2.1. La réactivité du système

La réactivité du système est une propriété très importante dans la phase réactive de l'ordonnancement. C'est le temps de résolution pris pour l'insertion de la CBM dans l'ordonnancement courant. Afin d'évaluer cette propriété, nous varions le nombre de machines (m_0), le nombre de jobs de production (m_1) et le nombre de ressources humaines (m_4). Nous calculons pour chaque configuration le temps de résolution résultant dans le niveau une-machine puis dans le niveau multi-machines. Nous simulons l'arrivée de l'évènement au début, au milieu et à la fin du plan de production de l'AMS. Nous appliquons les deux stratégies SOM et POM et nous analysons les résultats. Les résultats sont rapportés sur le tableau 4.6.

Selon le tableau 4.6, nous pouvons noter que le temps de résolution multi-machines est toujours petit en le comparant au temps de résolution une-machine. En effet, l'inconsistance a été rarement détectée entre les machines voisines ce qui signifie que la résolution une-machine que nous proposons a pu absorber l'évènement localement sans perturber le voisinage de l'AMS.

Le nombre de ressources humaines n'a pas d'influence sur le temps de résolution du niveau multi-machines; il influe seulement sur le niveau une-machine car les ARH avec l'ASRH et l'AMS négocient la planification de la CBM. Dans la plupart des cas, quand le nombre d'ARH augmente, le temps de

résolution une-machine augmente mais reste comme même raisonnable (inférieur à 10s). Nous avons remarqué que dans quelques cas, augmenter le nombre d'ARH n'augmente pas nécessairement le temps de résolution (ex. les cases grasses dans le tableau 4.6). Il dépend de la disponibilité des ARHs. L'existence de 8 ARH dans le service de maintenance ne signifie pas forcément que ces 8 ARH sont disponibles pour l'exécution de la CBM.

Quand le nombre de jobs augmente, le temps de résolution une-machine augmente parce que l'AMS, après avoir inséré la CBM, doit réordonnancer un nombre important de jobs de production ce qui augmente significativement le temps de résolution. Augmenter le nombre de machines augmente la résolution multi-machines mais pas avec le même degré que celui de la résolution une-machine parce que peu d'inconsistance sera détectée. Le temps de résolution multi-machines a augmenté car quand une inconsistance est détectée, l'AMS doit négocier avec ses machines voisines pour qu'elles réajustent leurs ordonnancements, elles vont de ce fait réajuster un nombre important de jobs ce qui prendra du temps.

Tableau 4.6. Influence du nombre de jobs, de machines et de ressources humaines sur le temps de résolution

m_0	m_1	m_4	Niveau une-machine (ms)						Niveau Multi-machines (ms)					
			Début		Milieu		Fin		Début		Milieu		Fin	
			SOM	SOP	SOM	SOP	SOM	SOP	SOM	SOP	SOM	SOP	SOM	SOP
5	20	2	40,21	31.33	34.52	23.65	20,21	21.33	7.00	3.33	4.23	1.50	2.05	1.75
		4	55.56	40.35	45.33	55.63	25.55	20.33						
		8	70.33	42.36	80.25	65.33	20.33	22.25						
	50	2	120.33	80.33	130.25	136.23	120.23	100.23	20.33	16.33	13.89	13.67	12.56	12.86
		4	200.33	100.55	253.33	152.33	150.33	145.33						
		8	213.66	125.36	363.23	226.3	223.36	235.33						
	100	2	200.23	145.33	123.66	130.33	123.33	140.25	24.44	21.56	17.89	17.11	13.78	12.44
		4	250.36	150.33	223.33	250.23	223.33	189.33						
		8	286.33	160.25	250.23	200.33	260.33	190.66						
10	20	2	**465.33**	**333.25**	330.25	236.25	300.33	350.25	28.00	26.22	14.22	13.33	12.00	11.78
		4	350.25	245.33	320.25	250.25	250.23	220.36						
		8	**250.25**	**260.33**	350.25	360.25	325.25	356.3						
	50	2	350.5	265.33	460.36	350.25	356.62	250.25	22.33	20.44	17.44	17.56	15.26	12.85
		4	365.23	277.33	420.25	450.25	450.23	350.23						
		8	425.55	330.25	450.25	400.25	350.25	325.25						
	100	2	678.55	550.25	700.25	650.25	500.25	650.25	36.33	33.25	22.22	21.11	10.33	9.67
		4	650.33	454.33	650.25	500.85	423.36	350.25						
		8	780.23	550.25	885.25	900.25	650.52	589.25						
20	20	2	120.33	50.33	220.36	120.25	200.25	140.25	28.03	28.25	24.78	23.40	11.89	13.00
		4	253.33	298.23	265.25	270.25	198.23	150.23						
		8	986.33	1120.33	1125.25	1203.25	985.25	900.55						
	50	2	1985.33	1325.25	2540.33	1983.33	1203.25	956.56	31.35	23.25	27.56	16.33	17.78	16.50
		4	2536.36	2352.33	2436.33	2456.33	2123.25	1985.25						
		8	4536.33	3256.33	4856.33	3562.33	2003.25	2013.25						
	100	2	7965.33	4134.00	6402.33	5360.23	3652.25	2546.35	49.58	42.65	35.25	35.25	18.00	19.89
		4	8563.33	5840.00	6135.33	4652.33	4563.25	3252.25						
		8	9563.22	7862.00	9635.33	8523.33	6523.23	6235.23						

4.2.2. Capacité de l'approche à absorber la moyenne du retard de production.

Dans cette section, nous comparons la moyenne du retard de production sur le plan de l'AMS avant et après l'insertion de la CBM. En plus, nous comparons le retard global de production qui peut être détecté sur la dernière machine de la ligne de production. Pour chaque test exécuté, nous notons combien de temps la moyenne du retard de production a été améliorée, n'a pas changé ou a augmenté. Les résultats sont rapportés sur le tableau 4.7. Nous pouvons remarquer que quel que soit le nombre des ressources humaines ou la stratégie adoptée, dans plus de 60% des cas, le retard de production de la résolution une-machine a été amélioré et dans 70% des cas le retard de la résolution multi-machines **est resté inchangé** ce qui prouve que l'objectif visant à minimiser la perturbation du plan actuel a été atteint.

En ce qui est de la comparaison des stratégies, nous remarquons que les retards de production dans les deux stratégies sont très proches. Ce qui nous pousse à considérer que la stratégie SOM est la plus intéressante du moment qu'elle vise à réduire le risque de panne. En l'adoptant, les deux retards de production et de maintenance seront réduits.

Tableau 4.7. Le retard résultant des résolutions une-machine et multi-machines selon la stratégie de maintenance adoptée et le nombre de ressources humaines dans l'atelier

m_4	Le retard une-machine						Le retard multi-machines					
	Stable		Amélioré		Détérioré		Stable		Amélioré		Détérioré	
	SOM	SOP	SOM	SOP	SOM	SOP	SOM	SOP	SOM	SOP	SOM	SOP
2	32.85%	31.13%	65%	62.23%	2.15%	6.64%	77.90%	77.14%	20.40%	21.63%	1.70%	1.23%
4	35.67%	32.34%	61%	65.31%	3.33%	2.35%	77.14%	83.42%	22.66%	13.33%	3.25%	3.25%
8	32.74%	31.29%	62%	60.37%	5.26%	8.34%	71.80%	72.41%	25.26%	25.12%	2.94%	2.47%

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un modèle réactif en réponse à l'évènement d'insertion d'une CBM dans un plan courant de production. Nous proposons un ré-ordonnancement partiel afin s'assurer une certaine stabilité dans l'atelier. La résolution se fait en deux niveaux : une machine et multi-machines et selon deux stratégies de gestion de la maintenance pour planifier la CBM: *Stratégie orientée Maintenance et stratégie orientée production*.

Le niveau de résolution une-machine décrit le comportement de l'AMS en réponse au signal d'anomalie. Alors que la résolution multi-machines décrit le comportement des machines voisines dans le cas de la détection d'une inconsistance entre les ordonnancements des machines. Les incertitudes sont prises en compte en proposant une estimation floue au RUL de la machine MS et du temps opératoire de la CBM à insérer.

Afin de mesurer les performances de l'approche proposée, nous avons effectué plusieurs séries de tests. Les résultats ont montré que la résolution du niveau une-machine que nous adoptons a pu absorber l'évènement d'insertion de la CBM localement et minimiser le retard moyen de production.

En outre, la stratégie MOS offre les meilleurs résultats en termes de retard de production et de retard de CBM.

Dans le chapitre suivant, nous présentons notre deuxième contribution. Il s'agit d'une approche de résolution sous incertitudes pour la génération d'ordonnancements conjoint de production et de maintenance. A travers les deux étapes : *proactive* et *réactive*, nous essayons de répondre à quelques

incertitudes pouvant affecter le bon déroulement du processus de production. La solution présentée jusqu'à présent dans le cas de l'insertion d'une CBM peut être traitée dans la phase réactive de l'approche sous incertitudes.

Chapitre 5

Une approche proactive-réactive pour la génération d'ordonnancements conjoints de production et de maintenance sous incertitudes

Dans le présent chapitre, nous présentons notre deuxième contribution. C'est une approche proactive-réactive pour la génération d'un ordonnancement conjoint de production et de maintenance dans un atelier à machine unique.

Dans la phase proactive, un ordonnancement conjoint flou de tâches de production et de maintenance préventive systématique est généré avec prise en compte des contraintes de disponibilité, de compétence et de performance des ressources humaines. Tandis que dans la phase réactive, plusieurs ordonnancements sont proposés selon l'évènement perturbateur qui survient. Nous partons du principe que chaque événement peut être traité de manière différente par rapport aux autres et ceci en proposant des ré-ordonnancements partiels puisque le ré-ordonnancement total; le plus utilisé dans la littérature ; cause une nervosité dans l'atelier. L'approche proposée est plus générale par rapport à notre première contribution. En effet, Notre première contribution peut apparaître dans la phase réactive en réponse à l'évènement de l'apparition d'une anomalie de fonctionnement dans la machine.

1. Introduction

Nous considérons un atelier à une machine appelée *«Machine Sujet»* (MS) réalisant des tâches de production composés d'une seule opération. Sur cette machine, des interventions de maintenance préventive sont programmées périodiquement (TBM). L'objectif est de trouver un ordonnancement conjoint de production et de maintenance qui d'un côté minimise la somme des retards des tâches de production, et de l'autre côté, minimise la somme des avances et des retards des TBM tout en tenant compte des contraintes de compétence, de performance et de disponibilité des ressources humaines intervenantes.

Nous proposons une approche proactive-réactive afin de prendre en compte les incertitudes qui caractérisent l'atelier de production.

Dans la phase proactive, un ordonnancement robuste est généré. Il prend en compte les incertitudes liées aux imprécisions des données manipulées. Les données considérées sont les temps opératoires des tâches de production et de maintenance, leurs dates de début et leurs dates de fin d'exécution. L'affectation des ressources humaines se fait en suivant une résolution séquentielle : (1) Tout d'abord, nous générons un ensemble de solutions d'ordonnancements conjoints de production et de maintenance jugées de bonne qualité en utilisant un algorithme génétique flou. Par la suite, (2) nous affectons les activités de maintenance aux ressources humaines aptes, disponibles et qui proposent les meilleurs temps opératoires pour leurs exécutions.

Dans la phase réactive, et en cas d'apparition d'évènements qui rendent obsolètes les ordonnancements initiaux, nous proposons des ré-ordonnancements partiels selon l'évènement

considéré. La méthode des scenarios supporte notre point de vue en proposant des résolutions différentes selon le scenario qui se produit.

2. Formalisation du problème

Dans ce qui suit, nous présentons le problème d'ordonnancement de la production, le problème de planification des maintenances avec prise en compte des ressources humaines et les fonctions objectif à optimiser.

2.1. Le problème d'ordonnancement de la production

Soit une machine MS et un ensemble de n travaux de production $P=\{P_1,P_2,.., P_n\}$ à ordonnancer sur MS. Chaque tâche P_i est caractérisée par les valeurs floues suivantes : $\tilde{p}_i$ sa durée opératoire, $\tilde{t}_i$ sa date de début d'exécution, $\tilde{c}_i$ sa date de fin d'exécution qui n'est rien d'autre que la somme de $\tilde{t}_i$ et $\tilde{p}_i$ et enfin $\boldsymbol{d_i}$ sa date de fin au plus tard. $\tilde{p}_i$ est représentée par une fonction triangulaire tandis que $\tilde{t}_i$ et $\tilde{c}_i$ sont représentées par des fonctions trapézoïdales.

Nous supposons que tous les travaux sont disponibles avant le début de leur traitement et que la tâche réalisée par MS est non-préemptive. En plus, le temps d'installation peut être estimé avec le temps opératoire de la tâche.

2.2. Le problème de planification des activités de maintenance avec prise en compte des contraintes des ressources humaines

Dans l'atelier, nous supposons que la machine MS doit subir un seul type d'activité TBM avec *m* occurrences. Les interventions $TBM_j\{TBM_1,\ldots, TBM_m\}$ sont programmées systématiquement chaque T période (voir section (1.2.2.a chapitre 2) et chaque occurrence dépend de celle qui la précède sur MS. Le nombre « m » d'occurrences de TBM n'est pas connu à l'avance. Il dépend de la longueur de l'horizon de production et aussi de la durée d'exploitation de la machine MS.

Chaque activité de maintenance pour être exécutée nécessite la disponibilité d'une ressource humaine apte c'est-à-dire possédant la compétence nécessaire pour sa réalisation, et disponible dans l'intervalle d'exécution demandé.

Chaque ressource humaine dans le service maintenance $HR_k\{m=1,\ldots,R\}$ est caractérisée par $CR_k=\{cr_{k1},cr_{k2},..\}$ un ensemble de compétences qui la qualifient pour exécuter des activités de maintenance, un ensemble d'intervalles $ID_k=\{ID_{k1}, ID_{k2},..\}$ représentant ses disponibilités et un niveau de performance $Perfm_k$ qui l'aidera après pour l'estimation du temps opératoire des activités qu'elle exécute.

L'occurrence « j » d'une TBM est donc caractérisée par: $\widetilde{p'}_j$ sa durée opératoire, $\widetilde{t'}_j$ sa date d'exécution floue, $[Tmin_j, Tmax_j]$ l'intervalle de tolérance dans lequel elle doit être exécutée pour assurer un fonctionnement normal de MS, la compétence nécessaire pour son exécution *Comp*, et enfin la ressource humaine qui lui est affectée RH_{jk}.

2.3. Critères d'optimisation

Notre objectif est de minimiser la somme des retards des tâches de production tout en maintenant la machine en bon état de fonctionnement. Pour assurer un minimum de retard pour les tâches de production, il faut exploiter au maximum la machine en minimisant les temps d'arrêt. Cependant, pour assurer la disponibilité de la machine, des activités de maintenance doivent être régulièrement programmées.

La fonction objectif de production $\widetilde{f_1}$ est calculée par l'équation (eq.1). Elle représente la somme des retards $\tilde{L}_i$ des tâches de production.

$$\tilde{f}_1 = \sum_{i=1}^{n} \tilde{L}_i \,/\, \tilde{L}_i = \max(0, \tilde{c}_i \ominus \tilde{d}_i) \qquad (1)$$

La fonction objectif de maintenance $\widetilde{f_2}$ est calculée par l'équation (eq.2). Elle représente la somme des retards et des avances $\widetilde{E'}_j$ et $\widetilde{L'}_j$ des activités de maintenance.

$$\tilde{f}_2 = \sum_{j=1}^{m} (\tilde{E}'_j \tilde{+} \tilde{L}'_j) \qquad (2)$$

Pour optimiser les deux critères nous prenons en compte la fonction $\tilde{f}$ donnée par l'équation (eq.3).

$$\tilde{f} = \tilde{f}_1 \tilde{+} \tilde{f}_2 \qquad (3)$$

3. Proposition d'une approche proactive-réactive pour l'ordonnancement conjoint de production et de maintenance

Dans cette section, nous présentons la solution que nous proposons. Il s'agit d'une méthode proactive-réactive à base d'agents. L'objectif est de proposer une solution qui soit attentive à la nature et aux besoins des ateliers de production en prenant en considération les incertitudes pouvant affecter le processus de production ou de maintenance.

Dans la phase proactive, un ordonnancement ***conjoint flou*** des activités de production et de maintenance est calculé. Les imprécisions sont modélisées par la logique floue. Les tâches de production et de maintenance sont planifiées ***conjointement*** et ***simultanément*** lors du calcul de l'ordonnancement. Ces tâches seront considérées comme équivalentes, ce qui revient à leur accorder la même priorité.

Dans la phase réactive, la réponse aux évènements se fait en temps réel et ceci en préparant quelques algorithmes d'ordonnancement. Leurs exécutions dépendent donc de l'événement survenu.

Pour modéliser l'atelier de production, nous utilisons cinq types d'agents : l'agent machine sujet AMS, l'agent maintenance AMC, l'agent production AP, des agents ressources humaines ARH, et l'agent superviseur des ressources humaines ASRH.

3.1. La phase proactive

La résolution suit quatre étapes (figure 5.1). L'initialisation du système, la génération d'une population d'ordonnancements conjoints, l'affectation des ressources humaines et le choix du meilleur ordonnancement.

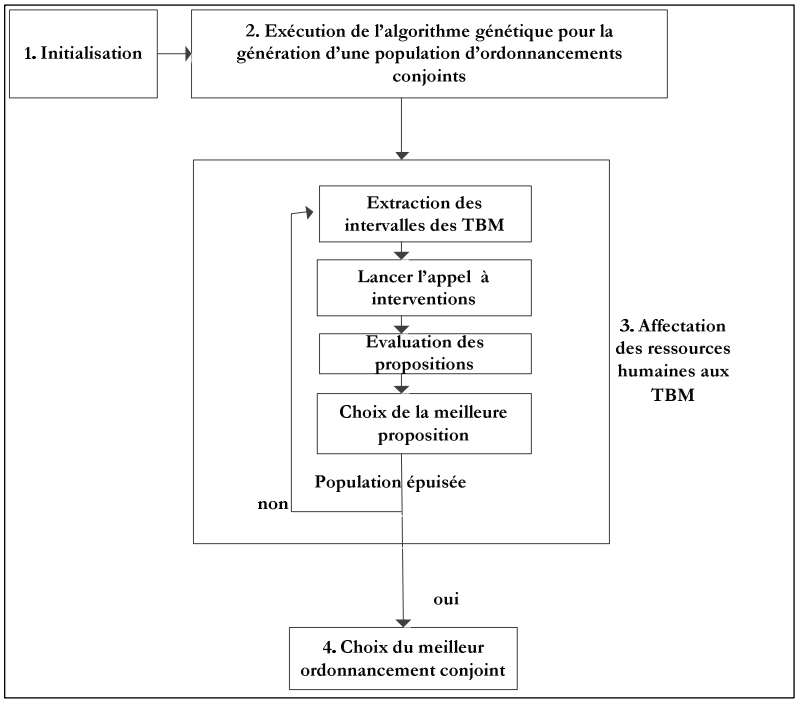

Figure 5.1. Etapes de résolution de la phase proactive

3.1.1. Initialisation du système

Dans cette étape, les agents AP et AMC transmettent à l'agent AMS les données relatives aux tâches de production et de maintenance.

3.1.2. Exécution de l'algorithme génétique pour la génération d'une population d'ordonnancements conjoints

Vue la difficulté liée à la résolution de notre problème à l'aide d'une méthode exacte (problème NP-Difficile) [Kan, 2012], nous avons choisi d'utiliser un algorithme génétique ***flou***. A la fin de cette étape, l'agent AMS génère une population d'ordonnancements semi-optimaux au lieu d'un seul ordonnancement. Les particularités de l'algorithme génétique flou que nous proposons sont les suivantes:

- Les solutions potentielles sont composées conjointement des tâches de production et de maintenance. Un codage particulier est proposé pour les activités de maintenance.
- Utilisation des règles de priorité pour générer une partie de la population initiale.
- C'est un algorithme génétique manipulant des données floues (dates d'exécution, durées opératoires et fonction objectif).
- Nous retenons la population d'ordonnancements associée à la dernière génération.

L'algorithme 5.1 présente les grandes lignes de l'algorithme génétique. Il est ensuite détaillé dans les sections suivantes.

Algorithme 5.1. Les étapes de l'algorithme génétique proposé

Soient : $\mathbf{P_{size}}$ la taille de la population; **NbGen** et $\mathbf{Nb_{Improve}}$, les conditions de terminaison; $\mathbf{P_c}$, la probabilité de croisement et $\mathbf{P_m}$, la probabilité de mutation.
Début
Initialisation de la population
Tantque (les valeurs de NbGen et $Nb_{Improve}$ ne sont pas atteintes) **faire**
- Évaluer la fonction *fitness* des individus
- Sélection : Déterminer la sous-population qui va subir le croisement et la mutation;
- Croisement avec P_c
- Mutation avec $\mathbf{P_m}$
- Remplacement

Fin Tant que
Fin

a. Codage des solutions et détermination de la fonction Fitness

Chaque chromosome (individu) représente une solution d'ordonnancement potentielle représentée par une séquence d'activités de production et de maintenance. Le chromosome retenu est de longueur égale au nombre total des tâches à réaliser (de production et de maintenance). Soit L cette longueur (eq.4) avec N le nombre de tâches de production et Nb_Occ le nombre d'occurrences de l'activité de maintenance TBM.

$$L=N+Nb_Occ \qquad (4)$$

Les tâches de production sont représentées par leur identifiants de 1 à N et les activités de maintenance par les identifiants de N+1 à N+ Nb_Occ. Compte tenu du fait que les activités de maintenance ont des caractéristiques différentes des tâches de production ; Leurs codes sont de ce fait différents [Kaabi-Harrath, 2004]. Elles sont caractérisées par:

- Un intervalle de tolérance autour de chaque occurrence TBM_j, durant lequel l'occurrence de l'activité peut être exécutée.
- L'impossibilité de permuter l'occurrence j et l'occurrence j+1 d'une TBM.

Nous proposons donc un codage qui tient compte des propriétés de la maintenance en rajoutant des informations dans les gènes correspondants. Ces informations sont leur identifiants et leurs dates d'exécution qui permettra de déduire l'avance et le retard par rapport à leurs intervalles de tolérance.

Exemple

Le tableau 5.1 décrit les tâches de production et de maintenance qui composent un individu donné et la figure 5.2 présente le codage résultant.

Tableau 5.1. Description des tâches constituant le plan de production

P_i	$\tilde{p}_i$	r_i	d_i
P_1	(18,20,22)	0	25
P_2	(6,5,7)	60	70
P_3	(8,10,14)	0	30
P_4	(47,50,56)	5	90
M	10	45	65

Nous supposons la programmation de deux occurrences de l'activité M avec une période T^*=55t et une durée opératoire maximale égale à 10t. Le chromosome est de longueur égale à 6. Les tâches de

production sont codées de 1 à 4. Tandis que les occurrences de maintenance seront codées par leurs numéros {5,6} et leur dates de début d'exécution floues respectives {(26, 30, 36), (89, 55, 109)}.

1	3	5, (26,30,36)	4	2	6, (89,95,109)

Figure 5.2. Codage d'une solution avec 6 tâches de production

Lorsqu'une population de chromosomes est générée, chaque chromosome S représente une solution potentielle du problème, il est évalué selon une fonction **Fitness** (eq.5) égale à l'inverse de la fonction objectif globale.

$$\text{Fitness}(S)=1/\tilde{f}(S) \qquad (5)$$

b. Génération de la population initiale

La génération aléatoire de la population initiale est couramment appliquée dans les algorithmes génétiques. Le but est d'obtenir une diversification de la population favorisant l'évolution. Cependant, les individus aléatoires ont souvent de faibles valeurs pour la fonction Fitness et peuvent dans ce cas ralentir la convergence. Pour booster la convergence de l'algorithme, les auteurs dans [Chen *et al.*, 2014] [Kodaganallur *et al.*, 2014] ont proposé d'utiliser des heuristiques pour générer une partie de la population initiale. Cette approche peut non seulement fournir une grande diversité dans la population, mais aussi peut être plus performante que l'approche précitée.

Par conséquent, dans ce travail, nous avons proposé une procédure d'initialisation en deux étapes comme suit:

Étape 1. Nous générons une population de séquence de tâches de production qui comprend deux classes distinctes d'ordonnancements. La première classe (la plus grande) consiste en des séquences de production générées aléatoirement. La seconde est composée de quatre séquences de production générées en utilisant les règles de priorités[1]: (1) EDD; (2) ERD; (3) SPT; et (4) LPT.

Étape 2. Dans cette deuxième étape, les occurrences de TBM sont insérées dans les séquences de production générées dans l'étape 1. Nous insérons quand il est possible les TBM à l'intérieur de leurs intervalles de tolérance. Sinon, nous les insérons juste avant Tmin ou juste après Tmax et nous sélectionnons l'ordonnancement qui minimise $\widetilde{f_2}$. L'algorithme 5.2 décrit le processus d'insertion des cativités de maintenance dans les ordonnancements de la population initiale

Algorithme 5.2. Insertion des activités de maintenance dans les ordonnancements de la population initiale

Soit **TBM** une activité de maintenance avec un temps opératoire $\tilde{p}'$ et un intervalle de tolérance **IT = [Tmin, Tmax]**
Début
Pour chaque occurrence $\mathbf{TBM_j}$ **(j = 1, ... Nb_Occ) faire**
- Insérez $\mathbf{TBM_j}$ à l'intérieur de son intervalle de tolérance $\mathbf{IT_j}$, c'est-à-dire après l'achèvement de la première tâche de production se trouvant à l'intérieur de $\mathbf{IT_j}$, ou exactement à $\mathbf{Tmin_j}$ si aucune tâche n'est exécutée à ce moment.
Si l'insertion est impossible, insérez $\mathbf{TBM_j}$ juste avant $\mathbf{Tmin_j}$ ou juste après $\mathbf{Tmax_j}$, c'est-à-dire à la fin de la tâche de production, qui est juste avant $\mathbf{Tmin_j}$, ou juste après l'exécution de la tâche qui est juste après $\mathbf{Tmax_j}$.
- Sélectionnez la solution qui optimise $\widetilde{f_2}$.

[1] EDD (Earliest Due Date), ERD (Earliest Release Date), SPT (Shortest Processing Time), LPT (Longest Processing Time).

```
- Mettre à jour le gène de maintenance en insérant le temps d'exécution effectif
FinPour
Fin
```

c. La sélection

Pour donner des chances à tous les individus (ayant des faibles et fortes valeurs de la fonction fitness) nous choisissons une méthode de sélection simple: le premier parent (P_1) est sélectionné aléatoirement tandis que le deuxième parent (P_2) est celui ayant la meilleure fonction objectif dans E individus sélectionnés aléatoirement.

d. Le croisement

Pour créer deux enfants E_1 et E_2 à partir de deux parents P_1et P_2, l'opérateur de croisement est appliqué. Nous avons choisi l'opérateur à deux points. (Algorithme 5.3).

Algorithme 5.3. Croisement à deux points

Soient $\mathbf{P_1}$ et $\mathbf{P_2}$ deux parents sélectionnés selon l'opérateur de sélection pour générer deux enfants $\mathbf{E_1}$ et $\mathbf{E_2}$, $\mathbf{P_{cross}}$ la probabilité de croisement et une probabilité de croisement **P** associée à chaque gène;
Début
Générer aléatoirement deux positions $\mathbf{pos_1}$ et $\mathbf{pos_2}$ telles que: $\mathbf{pos_1} < \mathbf{pos_2}$ et $\mathbf{pos_1}$ et $\mathbf{pos_2}$ ne correspondent pas à des positions des activités de maintenance,
Si $\mathbf{P} <= \mathbf{P_{cross}}$ **alors**
- Copier tous les éléments (qui sont inférieurs à $\mathbf{pos_1}$ et supérieurs à $\mathbf{pos_2}$) des parents choisis dans les deux enfants respectivement. Nous copions ceux du parent $\mathbf{P_1}$ dans l'enfant $\mathbf{E_1}$, et ceux du parent $\mathbf{P_2}$ dans l'enfant $\mathbf{E_2}$;
- Compléter la partie restante de l'enfant $\mathbf{E_1}$ par les éléments du parent $\mathbf{P_2}$ et la partie restante de l'enfant $\mathbf{E_2}$ par les éléments du parent $\mathbf{P_1}$ en balayant de gauche à droite et en ne reprenant que les éléments non encore transmis;
- Mettre à jour les dates de début des maintenances t.

FinSi
Fin

e. La mutation

Nous appliquons l'opérateur de mutation aux individus issus de l'opération de croisement avec une probabilité P_{mut}. Nous choisissons l'opérateur de mutation qui est une simple permutation de deux tâches de production comme suit :

- Générer aléatoirement deux positions différentes pos_1 et pos_2 où sont stockée respectivement g_1 et g_2 et une probabilité P;
- Permuter les contenus de g1 et g2 si $P<=P_{mut}$;

f. Le remplacement: Génération de la nouvelle population

À la fin de chaque génération, la taille de la population double parce que chaque opération de croisement génère deux nouveaux individus. Conserver uniquement les meilleurs individus de l'ensemble résultant tend à réduire la diversité et amener l'algorithme à converger rapidement vers un optimum local. Afin de conserver la diversité, la nouvelle population comprend des individus de la génération initiale et aussi d'autres de la génération récemment générée. Ces derniers représentent les individus les plus performants en termes de fonction fitness. Cela permet à un certain pourcentage de chromosomes ayant une fonction fitness faible d'être inclus dans la population de sorte qu'il y aura une meilleure chance de sortir des minima locaux.

g. Les critères d'arrêt

Traditionnellement, soit le temps de calcul, soit le nombre de générations est choisi comme critère d'arrêt dans les algorithmes génétiques. Dans notre travail, nous avons considéré les deux. Autrement dit, si un nombre maximal de générations NB_{max} n'est pas atteint l'algorithme réitère. Toutefois, ce critère seul pourrait prendre beaucoup de temps pour les grands problèmes. Par conséquent, nous nous arrêtons aussi si durant $NB_{Improve}$ générations consécutives les solutions ne sont pas améliorées. Notre algorithme se termine de ce fait lorsqu'au moins un des deux critères est satisfait.

3.1.3. Affectation des ressources humaines aux activités de maintenance

À la fin de l'étape précédente, nous obtenons une population d'ordonnancements conjoints de production et de maintenance jugée de bonne qualité car c'est la dernière génération formée par l'algorithme génétique. En vue d'assurer la faisabilité des ordonnancements générés, les activités TBM sont allouées aux ressources humaines aptes et disponibles pour leur réalisation. Tout d'abord, les ordonnancements intégrés sont triés par ordre décroissant de leur fonction objectif $\tilde{f}$. Ensuite, pour chaque occurrence TBM_k, l'ASRH cherche les ARHs disponibles et aptes à sa réalisation. A chacun de ces derniers, il envoie un appel à intervention pour qu'il propose le temps opératoire qu'il consommera pour l'exécution de TBM_k. L'algorithme 5.4 décrit le déroulement de la phase d'affectation et la figure 5.3 illustre les interactions inter-agents.

Algorithme 5.4. Procédure d'affectation des ressources humaines aux activités de maintenance

Soit **SL**, la liste des ordonnancements de la dernière génération triés par ordre décroissant de $\tilde{f}$.
Début
Pour chaque ordonnancement **SC** de **SL faire**
Pour chaque $\mathbf{TBM_k}$ avec intervalle d'exécution $\mathbf{EI_k}$ **faire**
Après avoir contacté et reçu les réponses des **ARHs**
S'il existe une ou plusieurs **AHRs** disponibles avec des temps de traitement différents, **alors**
- retenir l'**ARH** qui propose le plus petit temps opératoire pour $\mathbf{TBM_k}$.
- Mettre à jour le gène de maintenance (le temps d'exécution)

Sinon S'il existe un $\mathbf{ARH_1}$ disponible dans un intervalle qui ne perturbe pas la planification de $\mathbf{TBM_{k+1}}$ (venant juste avant $\mathbf{EI_{k+1}}$) **alors**
- Allouer AHR_1 à TBM_k
- Mettre à jour les disponibilités des ressources humaines
- Mettre à jour le gène de maintenance (le temps d'exécution)

Sinon Passer à l'ordonnancement suivant dans la liste **SL**
Fin si
Fin

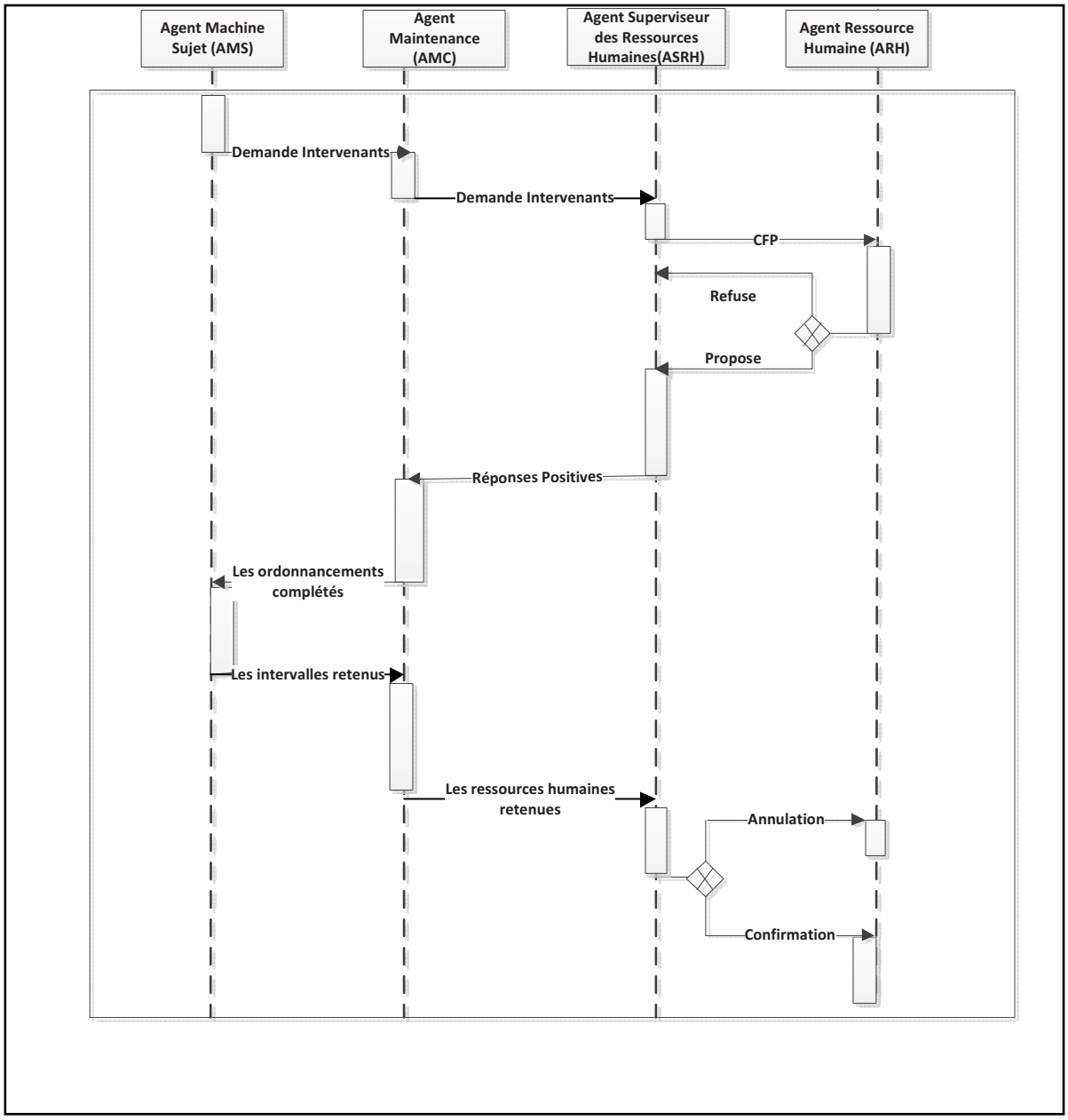

Figure 5.3. Interaction inter-agents pour l'affectation des ressources humaines aux activités de maintenance

3.1.4. Choix du meilleur ordonnancement

A la fin de l'étape précédente, chaque ordonnancement appartenant à la dernière génération est finalisé avec sa planification effective des activités de maintenance en tenant compte des disponibilités des ressources humaines et les temps opératoires proposés. Dans cette étape, l'AMS choisit le meilleur ordonnancement (celui qui minimise la fonction objectif $\check{f}$) pour le mettre en exécution et informe l'ASRH via l'AMC de son choix. L'ASRH réserve les ARHs correspondants en leur envoyant des confirmations finales afin qu'ils mettent à jour leur tables de disponibilité locales. D'autre part, il informe les autres participants à la négociation de son choix final.

3.2. La phase réactive: Gestion des événements

La phase réactive est totalement en ligne. Dans cette phase, l'ordonnancement proactif généré à la fin de la phase précédente est mis en exécution et les évènements pouvant survenir dans l'atelier sont gérés par l'approche par scénarios. Cette approche consiste à construire un arbre de décision dont les feuilles désignent les approches de résolutions proposées pour traiter les différents scénarios d'évènements (figure 5.4). Nous avons choisi de traiter des évènements relatifs aux activités de production et de maintenance. Pour la production, il s'agit de l'ajout et la suppression d'une tâche de production. Tandis que pour la maintenance, nous considérons la défection d'une ressource humaine et une panne machine.

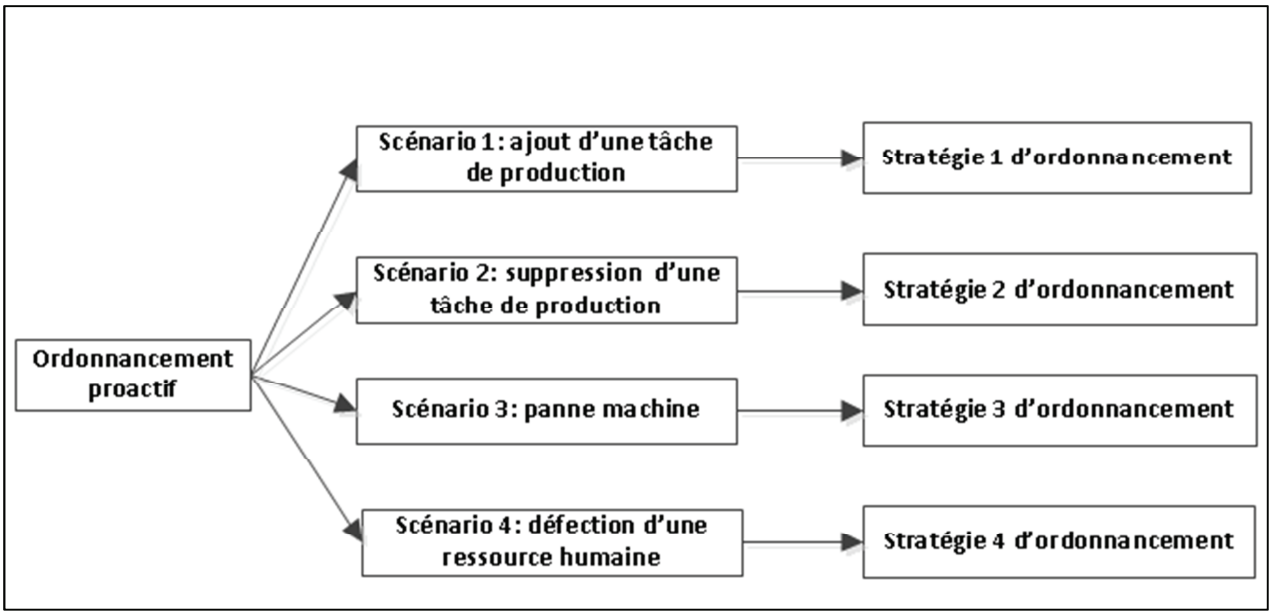

Figure 5.4. Les différents scénarios considérés dans la phase réactive

3.2.1. Scénario 1: Ajout d'une nouvelle tâche de production

Un des événements les plus fréquents dans un atelier de production est sans doute l'arrivée d'une nouvelle tâche de production à ordonnancer qu'il faudra ajouter dans la liste des tâches en attente. Pour répondre à cet événement et afin d'assurer la stabilité de l'atelier, c'est un réajustement partiel du plan de base que nous proposons et non pas un ré-ordonnancement total. L'AMS procède aux réajustements des tâches de production uniquement. Les activités de maintenance ne sont pas concernées car leur planification dépend de la disponibilité des ressources humaines. En effet, le changement des intervalles d'exécution des activités de maintenance remettrait en cause toute la planification préétablie.

L'utilisation de la logique floue dans la phase proactive nous permet de proposer des temps maximum de réalisation ce qui permet d'absorber des retards de réalisation et générer des temps libres dans le plan de base au fil de l'exécution des tâches. Ce qui permet d'insérer de nouvelles tâches imprévues. La résolution de l'agent AMS est décrite dans l'algorithme 5.5 et résumée comme suit :

(i). Une demande d'ajout de la tâche P_i est lancée par l'agent AP vers l'agent AMS. Cette demande contient les caractéristiques de la tâche (durée opératoire $\widetilde{p_i}$ et date d'échéance d_i).

(ii). L'agent AMS essaye de trouver un emplacement libre où il peut insérer la nouvelle tâche.

(iii). Si l'AMS n'arrive pas à trouver une place libre, il retire toutes les tâches de production et laisse les activités de maintenance telles quelles sont. Il insère les tâches de production une après l'autre dans leur ordre initial. La résolution suivie est celle adoptée par notre première contribution pour la mise à jour des ordonnancements initiaux.

(iv). L'AMS calcule la fonction objectif $\tilde{f}$ des ordonnancements possibles et choisit le meilleur ordonnancement.

Algorithme 5.5. Procédure d'insertion d'une tâche de production imprévue dans l'ordonnancement de base

Soient **P** la tâche de production à insérer et **SC** l'ordonnancement proactif initial.
Début
S'il existe un emplacement libre qui peut contenir la tâche **P alors**
l'**AMS** met à jour l'ordonnancement **SC** avec la tâche **P**
Sinon
- L'AMS retire toutes les tâches de production et laisse les tâche de maintenance **TBM** telles quelles
- L'**AMS** calcule tous les ordonnancements possibles en adoptant la stratégie de mise à jour de notre première contribution
- Il choisit l'ordonnancement qui optimise $\tilde{f}$

Fin

3.2.2. Scénario 2 : Supprimer une tâche de production

Comme l'ajout d'une tâche de production, sa suppression est aussi un événement très fréquent dans les ateliers de production. La suppression d'une tâche de production signifie la libération de la machine pendant la durée opératoire de la tâche. Ceci rend possible l'insertion d'au moins une tâche de production dont la durée opératoire est inférieure ou égale à l'intervalle d'inactivité. Ainsi, un décalage à gauche des tâches de production est effectué tout en laissant inchangée la planification des activités de maintenance pour les raisons citées précédemment. Le décalage se fait bien sûr selon les dates de disponibilité des tâches de production. La suppression d'une tâche de production P_i est décrite dans (Algorithme 5.6).

Algorithme 5.6. Procédure de mise à jour de l'ordonnancement de base après suppression d'une tâche de production

Soient **P** la tâche de production à supprimer et **SC** l'ordonnancement proactif initial.
Début
L'**AMS** supprime la tâche **P** de l'ordonnancement courant
L'**AMS** décale les tâches de production à gauche en maintenant les activités de maintenance telles quelles.
Fin

3.2.3. Scénario 3: Panne machine

Même si les TBM sont programmées régulièrement, les pannes machines peuvent arriver à tout moment causant ainsi l'arrêt total du processus de production. L'atelier doit réagir rapidement pour reprendre son activité de production.

Afin de reprendre le processus de production, la panne doit être diagnostiquée et traitée par les ressources humaines. Le traitement de la panne signifie l'insertion d'une maintenance corrective MC dans l'ordonnancement conjoint courant. Le problème pour le cas d'une activité MC est que sa date de début d'exécution ne peut être connue qu'à la fin du processus de diagnostic et lorsque les ressources nécessaires pour son exécution seront disponibles. En plus, la date de début du diagnostic dépend de la disponibilité des ressources humaines pour pouvoir la réaliser. Tandis que sa durée

opératoire dépend de la nature de la panne. Par conséquent, la date de début de la MC ne peut être estimée à l'avance.

En pratique, la prise en compte d'une MC est la tâche la plus difficile et la plus ennuyeuse au sein de l'atelier de production pour plusieurs raisons. La première est qu'une panne peut en cacher une autre. Dans la plupart des cas, le diagnostic et la correction de la panne n'assurent pas forcement la remise en marche immédiate de la machine. La deuxième raison est que le service de maintenance exerce une forte pression sur les intervenants en maintenance même dans leur lieu de travail afin de leur livrer la machine le plutôt possible pour reprendre leur production. Alors que des tests de performances et des réglages doivent être réalisés avant sa remise en marche effective [Marmier, 2007].

Du moment que nous partons du principe de ne pas perturber la planification des activités TBM. Leurs fenêtres temporelles resteront inchangées dans le nouvel ordonnancement. Cependant, si le diagnostic et l'exécution de la MC prennent beaucoup de temps, nous rompons ce principe. Par conséquent, nous adoptons la résolution suivante:

- S'Il existe des TBM dont les fenêtres temporelles sont encore valides. Dans ce cas, elles sont maintenues et resteront inchangées. En plus, si le temps qui sépare la date de fin d'exécution de la MC et la date de début de la prochaine TBM valide est inférieur à T/2. Dans ces conditions, nous supprimons la prochaine occurrence de la TBM, nous libérons sa fenêtre temporelle et nous décalons les tâches de production à gauche.
- Les TBM dont les fenêtres temporelles ne sont plus valides sont supprimées de l'ordonnancement et reprogrammées à partir de la fin de la dernière TBM valide.

Il faut noter qu'à ce stade de résolution, la contrainte de performance n'est pas prise en compte dans la résolution de ce scénario pour ne pas perdre du temps à chercher des intervenants et reprendre rapidement le processus de négociation. La MC est directement allouée au premier ARH disponible et capable de l'exécuter.

Les interactions décrites dans la figure 5.5 et dans les algorithme 5.7 et 5.8 résument la résolution suivie par les agents.

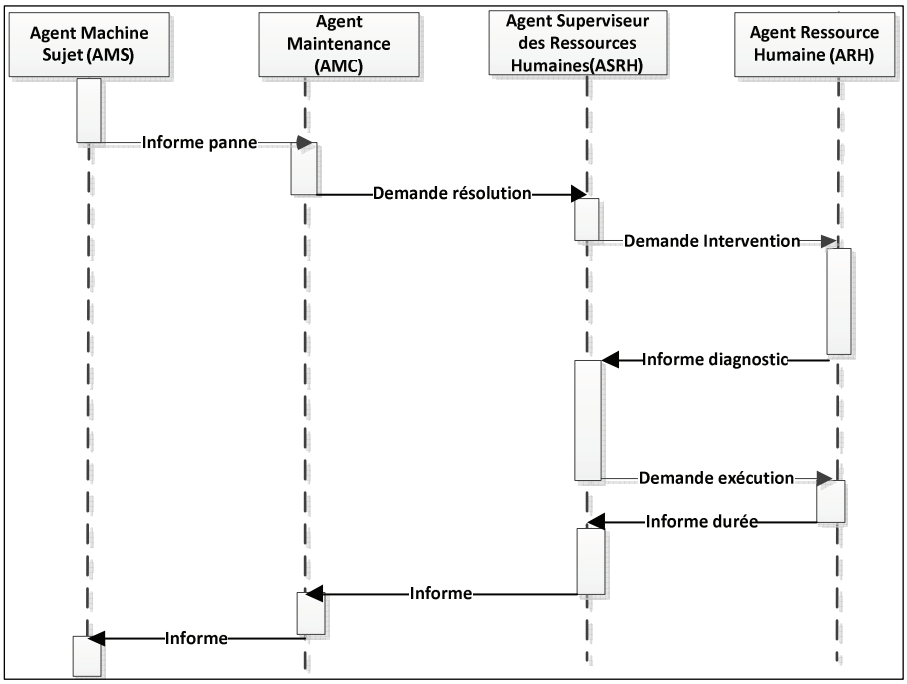

Figure 5.5. Interactions inter-agents pour la prise en compte d'une panne machine

Algorithme 5.7. Procédure de prise en charge d'une panne machine

Début
- L'**AMS** envoie un message à l'**AMC** pour l'informer de la panne.
- L'**AMC** sollicite l'**ASRH** pour lui trouver un **ARH** apte et disponible pour réaliser le diagnostic et éventuellement la correction de la panne.
- En utilisant son référentiel, l'**ASRH** désigne le premier **ARH** apte et ayant le plus large intervalle de disponibilité pour effectuer le diagnostic et la correction.
- Après le diagnostic, si l'**ARH** désigné est apte à corriger la panne, il l'entame immédiatement, sinon, il informe l'**ASRH** de la compétence requise pour la correction.
- L'**ARSH** sollicite directement l'**ARH** disponible qui en possède la compétence.
- L'**ARH** exécute la **MC** et en informe l'**AMS**

Fin

Algorithme 5.8. Ré-ordonnancement après la fin de la MC

Soient ***SC*** l'ordonnancement proactif initial, **T** la périodicité de la maintenance **TBM**, **MC** la maintenance corrective à insérer, $\mathbf{t_0}$ la date actuelle et $\mathbf{t_1}$la date de début de la première occurrence valide de **TBM** après $\mathbf{t_0}$.

Début
- L'**AMS** maintient dans son **SC** les **TBM** encore valides c'est-à-dire dont les dates de début ne sont pas encore dépassées.
- Si la période entre $\mathbf{t_0}$ et la date de début de $\mathbf{TBM_s}$ est inférieure à **T/2** alors l'**AMS** supprime l'occurrence $\mathbf{TBM_s}$.
- Toutes les tâches de production sont décalées à droite.
- le processus de production est poursuivi, alors que l'**AMS** sollicite l'**AMC** pour trouver des intervenants pour les **TBM** supprimées et réinsérées.

3.2.4. Scénario 4: Défection d'une ressource humaine

L'affectation d'une activité de maintenance TBM_d à une ressource humaine n'assure pas son exécution. Des événements peuvent surgir à tout moment comme la défection de l'intervenant qui va assurer son exécution. Dans ce cas, un remplaçant doit être trouvé rapidement pour assurer l'exécution normale du plan établi. L'algorithme 5.9 résume le comportement des agents en réponse à cet événement.

L'ASRH après avoir été informé par l'ARH défectueux de son incapacité à réaliser l'activité TBM_d, essaye dans un premier temps de trouver un remplaçant disponible exactement dans la fenêtre temporelle de la TBM_d. Pour cela, il lance un appel à intervention auprès des ARHs disponibles pour qu'ils proposent leur temps opératoires. Son choix se portera sur l'ARH qui propose la durée opératoire la plus proche possible de la durée initiale pour assurer la stabilité du plan. Si par contre il n'existe pas d'ARHs disponibles dans la fenêtre temporelle de TBM_d. L'ASRH dans ce cas lance un appel à intervention dans l'intervalle de disponibilité le plus proche de celui de TBM_d que ce soit avant ou après ce denier. Il choisit aussi le minimum des durées opératoires proposées, envoie à l'AMS la nouvelle fenêtre temporelle de TBM_d pour mettre à jour son plan. Et enfin, il informe les participants à la négociation de son choix final.

L'AMS à la réception de la nouvelle durée opératoire, met à jour son plan de production en décalant à gauche ou à droite les tâches de production.

Algorithme 5.9. Procédure de remplacement d'une ressource humaine défectueuse

Soient $\mathbf{\mathit{TBM_d}}$ l'activité de maintenance dont l'intervenant est défectueux, ***SC*** l'ordonnancement proactif initial.

Début

SI L'**ASRH** a pu détecter dans son référentiel des **ARHs** aptes à réaliser $\mathbf{TBM_k}$ et disponibles exactement dans la fenêtre temporelle de $\mathbf{TBM_d}$ **alors**

- Il lance un appel à intervention aux **ARHs** concernés.

```
-   Il classe les temps opératoires proposés par ordre décroissant
-   Il choisit la durée opératoire égale sinon inférieure à celle de TBMd.
Sinon
-   Il lance l'appel à intervention dans l'intervalle de disponibilité le plus proche de
    la fenêtre temporelle de TBMd
-   Classe les offres
-   et choisit la durée opératoire minimale
Finsi
L'ASRH envoie à l'AMS la nouvelle fenêtre temporelles de TBMd.
L'AMS Met à jour SC en décalant à gauche ou à droite si nécessaire ses tâches de
production
Fin
```

4. Expérimentations

Afin d'implémenter la méthode proposée, nous avons aussi utilisé la plateforme multi-agents ETOMA (Chapitre 6). Nous avons effectué nos expérimentations sur un ordinateur personnel avec un processeur Intel Core i3, 2.53 GHz (4 CPUs), 4 Go de RAM et Windows7 (32 bits) comme système d'exploitation.

Dans ce qui suit, nous décrivons en premier lieu le protocole de test. Par la suite, nous présentons et discutons les résultats des expérimentations

4.1. Le protocole de test

Les benchmarks adoptés dans la plateforme ETOMA sont ceux de [Taillard, 1993]. Malheureusement, il n'y existe pas d'instances pour le problème à une machine. Nous étions dans l'obligation de générer nous-mêmes nos propres instances. Ainsi, nous avons adopté la méthode proposée par [Kaabi-Harrath, 2004] qui tient compte de la maintenance au moment de la génération des données de production. Pour les données des ressources humaines nous proposons une méthode semblable à celle que nous avons utilisée pour les expérimentations de notre première contribution.

4.1.1. Génération des Benchmarks de production et de maintenance

Comme expliqué dans la section 2.1, les caractéristiques d'une tâche de production sont: la durée opératoire $\tilde{p}_i$, la date de disponibilité $\tilde{r}_i$ et la date d'échéance $\tilde{d}_i$. Une activité de maintenance TBM, quant à elle, est caractérisée par sa durée opératoire $\widetilde{p'}$, sa période T^* et son intervalle de tolérance IT.

- Les durées opératoires des tâches de production p_i (la valeur exacte) sont générées par une loi uniforme entre 1 et 99 ;
- Les valeurs exactes des activités de maintenance sont supposées être de durée maximale. La durée opératoire p' d'une maintenance est la moyenne des durées opératoires maximales des tâches de production (eq.6). p_{maxi} est toute durée opératoire de production supérieure à la moyenne.

$$p' = \frac{1}{Z} * \sum_{i=1}^{Z} p_{maxi} \qquad (6)$$

- Le retard/avance toléré pour la maintenance ΔT est donné par (eq.7).

$$\Delta T = 0.05 * T \qquad (7)$$

- Les dates de disponibilité r_i des tâches de production sont générées par une loi uniforme entre 0 et x. x est calculé par (eq.8).

$$x = \alpha * \left(\sum_{i=1}^{N} p_i + p' \quad * \frac{\sum_{i=1}^{N} p_i}{T}\right) \text{ avec } \alpha \in \{0, 0.5, 1\} \qquad (8)$$

- Les dates d'échéance d_i sont générées par une loi uniforme en appliquant (eq.9) et (eq.10).

$$d_i = d_i - (r_i + p_i) \in [0, Y] \qquad (9)$$

$$Y = \beta * \left(\sum_{i=1}^{N} p_i + p' \quad * \frac{\sum_{i=1}^{N} p_i}{T}\right) \text{ et } \beta \in \{0.15, 0.25, 0.5\} \qquad (10)$$

- La période T^* entre deux occurrences d'une TBM est calculée en utilisant (eq.11). MP représente le temps opératoire moyen des tâches de production et NPT le nombre des tâches de production entre deux TBM.

$$T^* = MP * NPT \qquad (11)$$

- Les valeurs des paramètres α, β et γ ont été choisis comme suit :
  - α = 0.5 afin que les tâches de production ne soient pas toutes disponibles à t=0 (cas du α =0), et ne soient disponibles trop tard (cas du α =1).
  - β= 0.25 afin que les dates d'échéance soient uniformes avec les dates de disponibilité.
  - γ = 0.25 pour avoir un nombre d'occurrence moyen pour les opérations de maintenance (quatre à cinq maintenances) dans l'horizon de production.

4.1.2. Génération des Benchmarks pour les données des ressources humaines

Comme il n'existe pas dans littérature des benchmarks pour les ressources humaines, nous proposons une méthode de génération appropriée à notre contexte.

Les caractéristiques d'une ressource humaine RH_k sont: la compétence $Comp_k$, la performance $Perform_k$ et les intervalles de disponibilité $ID_k=[IDmin_k, IDmax_k]$.

Puisque nous sommes face à un problème d'atelier à une machine avec un seul type de TBM, nous supposons que deux ressources humaines RH_1 et RH_2 sont affectées à l'atelier possédant respectivement les compétences $Comp_1$ et $Comp_2$ et deux niveaux de performances $Perform_1$ et $Perform_2$. Pour exécuter l'occurrence TBM_j par l'une des ressources humaines, deux durées sont possibles $\widetilde{ph}_{k1}$ et $\widetilde{ph}_{k2}$. Telles que leurs valeurs exactes: $ph_{k1}=(p'_k/Comp_1) * Perform_1$ et $ph_{k2}=p'_k/Comp_2 * Perform_2$.

- Les compétences $Comp_1$, $Comp_2$ peuvent prendre les valeurs [1, 2, 3]: 1 : novice, 2 : moyen et 3 expert.
- Les performances $Perform_1$ et $Perform_2$ sont des réels générés aléatoirement dans l'intervalle [0,1]
- Nous générons un plan de disponibilité pour chaque RH_k dans l'atelier. La disponibilité des intervenants dépend du nombre d'activités de maintenance planifiées et du nombre des ressources humaines dans le service de maintenance. La moyenne des périodes TRH_k séparant deux interventions de chacun des RH_k est calculée par (eq.12).

$$TRH_k = H / NRH_k \qquad (12)$$

$$NRH_k = NAM / NHR \qquad (13)$$

H représente l'horizon d'ordonnancement et NRH_k (eq.13) le nombre moyen d'activités de maintenance affectées à un RH_k. NAM est le nombre total des activités de maintenance planifiées et NHR est le nombre de ressources humaines existantes dans le service.

Afin de construire le plan d'intervention de n'importe quel RH_k, nous générons ses intervalles de disponibilité $ID_k=\{ID_{k1},\ldots, ID_{kl}\}$. Chaque intervalle ID_{kl} est défini par $[IDmin_{kl}, IDmaxi_{kl}]$ (eq.14 et eq.15). ph_{kj} représente le temps opératoire consommé par la ressource RH_k pour réaliser l'occurrence TBM_j.

$$IDmin_{kl} = IDmax_{kl-1} + ph_{kj} + \alpha_1 \quad (14)$$

$$IDmax_{kl} = IDmin_{kl} + \mu * ph_{kj} + \alpha_2 \quad (15)$$

$\alpha_1$et α_2 sont des nombres aléatoires avec $- ph_{kj} / 2 <= \alpha_1 <= 2 * ph_{kj} /3$ et $0<=\alpha_2<= 2 * ph_{kj}$, μ est un coefficient qui caractérise la longueur de l'intervalle {3 large, 2 moyen, 1 petit}. La figure 5.6 illustre les types d'intervalles de disponibilité testés.

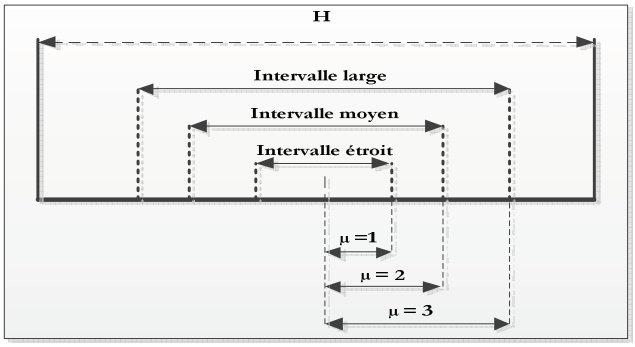

Figure 5.6. Type des intervalles de disponibilité considérés

4.1.3. Les données floues

Comme avancé dans le chapitre 4 - section 4.2.4, la largeur de la base floue *fbw* d'une fonction d'appartenance triangulaire (figure 5.7) représente la distance entre la valeur la plus probable de la mesure floue et sa valeur minimale et maximale.

La valeur de *fbw* a un impact direct sur la valeur de la fonction objectif. Nous testons les valeurs suivantes $fbw \in \{0.1, 0.2, 0.3\}$ et nous choisissons celle qui offre les meilleurs résultats.

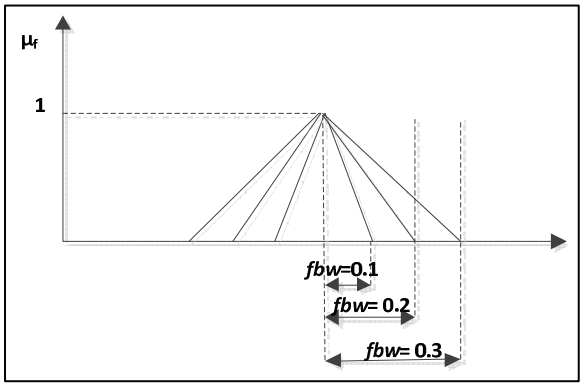

Figure 5.7. Variation de la largeur de la base floue

4.2. Résultats des simulations

Dans cette section, nous présenterons les résultats des expérimentations effectuées. Ces dernières sont classées en deux catégories : celles effectuées en phase proactive de résolution et celles effectuées en phase réactive.

4.2.1. Phase proactive

Dans cette série de tests, nous testons l'efficacité de l'algorithme génétique conjoint et flou en le comparant avec une heuristique de la littérature. Par la suite, nous vérifions la faisabilité des ordonnancements vis-à-vis de la contrainte de disponibilité des ressources humaines.

a. Performance de l'algorithme génétique conjoint flou

Dans cette section, nous étudions l'efficacité de notre algorithme génétique pour l'ordonnancement proactif. Les données utilisées sont les benchmarks de production et de maintenance décrits précédemment (section 4.1.1). La validation de notre algorithme génétique passe par deux étapes: *le calibrage* et *la comparaison.*

a.1. Le calibrage

Afin de choisir les meilleurs paramètres pour l'algorithme génétique nous proposons une série de tests avec le benchmark N=20 ayant 10 instances. Pour chaque instance, nous avons exécuté l'algorithme dix fois. Nous fixons la largeur de la base floue *fbw* à 0.1 et nous proposons trois valeurs pour les paramètres suivants :

- Une taille de population P_{size} égale à 50, 100 et 150 ;
- Deux critères d'arrêt qui sont: (1) le nombre de générations Nb_{gen}, égal à 100, 300 et 500; et (2) le nombre de générations sans amélioration $Nb_{Improve}$ égal à 10,20 et 30 ;
- Une probabilité de croisement P_{cross} égale à 0.7, 0.8 et 0.9 ;
- Une probabilité de mutation P_{mut} égale à 0.01, 0.02 et 0.03 ;
- Un pourcentage α des parents retenus d'une génération en génération égal à 20%, 30% et 40%.

Le tableau 5.2 présente la moyenne de la fonction objectif $\tilde{f}$ des dix exécutions pour chaque instance.

Les moyennes des dix instances pour chaque valeur de P_{size} sont proches, avec un petit écart qui donne plus d'avantage pour P_{size}=150. Nous fixons la taille de la population à 150.

Nous reproduisons le processus pour le reste des paramètres Nb_{gen}, $Nb_{Improve}$, P_{cross}, P_{mut} et α. Les valeurs retenues sont les suivantes : Nb_{gen}=500, $Nb_{Improve}$=20, P_{cross}= 0.9, P_{mut} = 0.02, α=40%.

Tableau 5.2. Calibrage de l'algorithme génétique: le paramètre Psize

Instance	P_{size}=50	P_{size}=100	P_{size}=150
Instance_1	(1289, 1851, 2597)	(1246, 1740, 2455)	(1236, 1804, 2619)
Instance_2	(797, 1102, 1568)	(682, 908, 1318)	(608, 868, 1296)
Instance_3	(1755, 2298, 2992)	(1671, 2240, 3028)	(1571, 2099, 2806)
Instance_4	(1016, 1509, 2127)	(1108, 1598, 2222)	(1005, 1512, 2169)
Instance_5	(2045, 2724, 3584)	(2113, 2739, 3524)	(2115, 2768, 3569)
Instance_6	(1819, 2521, 3392)	(1767, 2402, 3248)	(1747, 2438, 3327)
Instance_7	(1641, 2303, 3152)	(1476, 2115, 2933)	(1525, 2197, 3034)
Instance_8	(1503, 2139, 2980)	(1425, 2035, 2801)	(1418, 2034, 2809)
Instance_9	(2053, 2687, 3416)	(1996, 2584, 3303)	(1886, 2432, 3090)
Instance_10	(906, 1405, 2078)	(931, 1381, 2040)	(941, 1417, 2112)
Moyenne	(1353, 1868, 2528)	(1316, 1800, 2441)	(1281, 1776, 2421)

a.2. Comparaison

Dans la littérature, il n'existe pas de travaux traitant le problème d'ordonnancement sur une machine avec les mêmes contraintes que les nôtres. Cependant, il existe des travaux traitant le problème avec d'autres contraintes. Dans [Kaabi-Harrath, 2004], l'auteur propose deux heuristiques HS1 et HS2 pour résoudre le problème de l'ordonnancement conjoint de production et de maintenance sur une machine. Nos résultats seront comparés à l'heuristique HS2. Le critère de comparaison des résultats obtenus est le pourcentage de déviation calculé par (eq.16). HS2 étant la fonction objectif de l'heuristique de comparaison.

$$\%Déviation_1 = (\tilde{f} - HS2)/HS2 * 100 \qquad (16)$$

Le tableau 5.3 présente pour chaque benchmark, la fonction objectif moyenne $\tilde{f}$ des 10 instances pour la largeur *fbw* égal à 0.1, nous calculons le pourcentage de déviation *%Déviation*$_1$ par rapport aux résultats de l'heuristique HS2 obtenus par [Kaabi-Harrath, 2004].

Nous remarquons que pour tous les benchmarks, les pourcentages de déviation sont très grands même pour les bornes supérieures des fonctions objectif. Ceci prouve la performance de l'algorithme génétique que nous proposons. En effet, HS2 est une heuristique de base et l'algorithme génétique est une méta-heuristique. Une autre observation est que les pourcentages de déviation sont presque égaux pour tous les benchmarks, quand le nombre de tâches augmente, l'écart par rapport à HS2 reste fixe.

Tableau 5.3. Résultats de calcul de l'algorithme génétique

Benchmark	$\tilde{f}$	HS2	%Déviation$_1$
20	(1141, 1624, 2372)	4945	- (75.73%, 66.45%, 52.37%)
40	(2300, 3525, 6203)	18978	- (88.85%, 82.18%, 68.32%)
60	(5092, 7316, 13450)	41427	- (88.75%, 83.48%, 68.48%)
80	(8345, 12366, 23417)	73728	- (88.68%, 83.22%, 68.23%)
100	(15979, 23506, 41978)	114448	- (86.03%, 79.46%, 63.32%)
120	(20575, 31716, 57386)	156969	- (86.89%, 79.79%, 63.44%)
140	(27729, 42656, 76556)	232345	- (88.05%, 81.64%, 65.05%)
160	(34456, 54279, 101270)	279282	- (87.66%, 80.56%, 63.73%)
180	(34453, 56902, 110169)	362156	- (90.48%, 84.28%, 69.57%)
200	(43280, 71221, 133459)	431495	- (89.96%, 83.49%, 69.07%

b. Insertion des contraintes des ressources humaines

Après la génération de la population de bonne qualité, il faudra identifier le meilleur ordonnancement qui satisfait les contraintes des ressources humaines. A travers deux séries de tests, nous évaluons l'impact de l'insertion des contraintes des ressources humaines dans les ordonnancements générés.

b.1. Faisabilité du meilleur ordonnancement

Dans cette série de tests, nous retenons le meilleur ordonnancement de la population générée et nous testons sa faisabilité en essayons d'affecter les ressources humaines aux activités de maintenance. Aussi, nous varions la largeur *fbw* des fonctions d'appartenance des données floues, et la taille des intervalles de disponibilité des ressources humaines qui peuvent être larges (IL), moyens (IM) ou étroits (IE).

Le tableau 5.4 présente les résultats pour les 10 benchmarks (20 à 200 tâches de production). Pour chaque benchmark, nous testons 10 instances et nous calculons un pourcentage de faisabilité.

D'après, le tableau 5.4, nous remarquons que ce n'est que lorsque les intervalles de disponibilité des ressources humaines sont larges que nous retenons le meilleur ordonnancement dans plus de 70% des cas. Dans la pratique, les intervalles de disponibilité des ressources humaines ne sont pas toujours larges. Dans le cas d'un intervalle moyen, le meilleur ordonnancement est retenu dans 35% des cas. Dans le cas où les intervalles sont étroits, le meilleur ordonnancement n'est faisable que dans 12% des cas. Ceci est justifié par le fait que pour la majorité des instances, au moins pour une occurrence de maintenance TBM_j il n'y a pas de ressources humaines disponibles dans son intervalle de planification, et aucune des deux ressources ne possède un intervalle de disponibilité qui ne perturbe pas l'occurrence j+1 de l'activité de maintenance.

Un autre résultat concerne la largeur de la base floue *fbw* des fonctions d'appartenance des données floues. Il s'agit des fonctions relatives aux dates de début et de fin d'exécution des tâches de production et de maintenance. Le choix des valeurs 0.2 et 0.3 n'assure pas toujours qu'une ressource humaine puisse être affectée à une activité de maintenance facilement. Nous remarquons que le coefficient 0.1 présente des résultats plus intéressants dans le cas d'intervalles de disponibilité moyens.

Tableau 5.4. Pourcentage de faisabilité du meilleur ordonnancement

N	fbw= 0.1			fbw=0.2			fbw=0.3		
	IL	IM	IT	IL	IM	IT	IL	IM	IT
20	50%	30%	0%	50%	10%	0%	60%	30%	0%
40	70%	0%	20%	70%	20%	0%	50%	20%	0%
60	90%	20%	10%	80%	40%	20%	90%	40%	20%
80	70%	50%	20%	70%	50%	10%	60%	30%	20%
100	70%	40%	10%	60%	50%	10%	80%	50%	10%
120	70%	40%	20%	70%	40%	20%	80%	30%	10%
140	80%	70%	30%	70%	50%	10%	60%	20%	0%
160	70%	50%	20%	60%	20%	0%	80%	30%	0%
180	90%	50%	30%	80%	50%	30%	80%	30%	20%
200	60%	30%	20%	70%	20%	40%	80%	40%	0%

b.2. Choix du meilleur ordonnancement faisable

Dans ces tests, nous vérifions la possibilité de l'affectation des ressources humaines à l'ensemble de la population.

Nous fixons la largeur *fbw* à 0.1 et nous prenons le cas des intervalles de disponibilité moyens. Le tableau 5.5 résume les résultats obtenus. Pour chaque benchmark, est présenté pour quelques instances, le rang de l'ordonnancement retenu et le pourcentage de déviation (*% Déviation*$_2$) par rapport à la valeur ($\tilde{f}_{init}$) de la fonction objectif de l'ordonnancement résultant de la première phase (eq.17). Le rang 0 est l'indice du meilleur ordonnancement.

$$\%Déviation_2 = (\tilde{f} - \tilde{f}_{init})/\tilde{f}_{init} * 100 \qquad (17)$$

Pour tous les benchmarks, à l'exception des instances 1, 6 du benchmark 20 et l'instance 5 du benchmark 40, il existe au moins un ordonnancement qui satisfait la contrainte de disponibilité des ressources humaines.

Dans 98% des cas (de l'ensemble des instances) l'ordonnancement retenu n'est pas le meilleur de la population. Nous nous basons sur ces résultats pour défendre notre choix d'une population d'ordonnancements semi-optimaux au lieu d'un seul afin de choisir un ordonnancement réalisable. Par exemple, dans l'instance 8 du benchmark 40, l'ordonnancement retenu était classé 122ème par rapport à l'ordonnancement semi-optimal initial.

L'écart marqué des pourcentages de déviation *(%Déviation*$_2$*)* est expliqué par le fait que dans certaines instances (par exemple l'instance 5 du benchmark 20) l'affectation de la ressource humaine ne dégrade le résultat que par 23% qui est une petite valeur. Au contraire de certaines instances (par exemple l'instance 1 du benchmark 60) où le pourcentage de déviation est très élevé (265%). Ces résultats sont justifiés par le fait que si *%Déviation*$_2$ est petit, les ressources humaines sont disponibles au moment voulu (l'intervalle de planification de la maintenance). Une autre observation importante dans ce contexte, est que dans les cas où les pourcentages *% Déviation*$_2$ sont élevés les rangs des ordonnancements retenus sont aussi élevés (l'instance 1 du benchmark 60, l'instance 9 du benchmark

80). En effet, les valeurs des fonctions objectif initiales de ces ordonnancements sont très grandes par rapport aux meilleurs ordonnancements.

Tableau 5.5. Faisabilité de la population d'ordonnancement

Benchmark		Rang de l'ordonnancement Retenu	% Déviation$_2$
20	Instance 2 Instance 5 Instance 1, 6	82 22 Aucun	+ 257.59% + 23.94 -
40	Instance 8 Instance 6 Instance 5	122 74 Aucun	+ 105.32% + 124.4% -
60	Instance 1 Instance 2	135 84	+ 265.81% + 66.37
80	Instance 8 Instance 9	97 89	+ 113% + 235.53%
100	Instance 1 Instance 2	2 112	+ 44.50% + 63.49%
120	Instance 7 Instance 4	0 17	+ 44.85% - 3.97%
140	Instance 4 Instance 9	5 107	+ 40.09% + 109.40%
160	Instance 3 Instance 9	93 120	+ 71.83% + 98.104%
180	Instance 1	0	+ 23.12%
200	Instance 7 Instance 5	89 82	+ 52.70% + 67.47%

Par ailleurs, pour l'instance 4 du benchmark 120 une amélioration de 4% est marquée. Cependant, ce n'est pas l'ordonnancement initial qui a été retenu. Cette amélioration est justifiée par le fait que l'ordonnancement classé 17 dans la population d'ordonnancement après les modifications dues à l'affectation de la ressource humaine, donne une fonction objectif inférieure à celle du meilleur ordonnancement sans considérer la contrainte de disponibilité de la ressource humaine.

4.2.2. Phase réactive

Dans cette partie, nous simulons l'apparition des événements pris en compte par notre solution, nous observons la réaction de notre système puis nous analysons les résultats pour tous les benchmarks. Pour chaque type d'événements (insertion ou suppression d'une tâche de production, apparition soudaine d'une panne machine et défection d'une ressource humaine allouée), nous simulons son apparition au début et au milieu de l'ordonnancement. sNous donnons les résultats pour au moins deux instances du même benchmark (des benchmarks de 20 à 200 tâches de production). Nous avons retenu la valeur 0.1 pour la largeur *fbw* et des intervalles moyens pour la disponibilité des ressources humaines. Le tableau 5.6 présente les résultats obtenus.

L'apparition de l'événement d'insertion d'une nouvelle tâche de production (Arrivée TP**)** au début signifie une date de disponibilité égale à l'instant où l'événement est apparu et une date d'échéance vers le milieu. Aussi, une apparition de cet événement au milieu signifie une date de disponibilité égale à l'instant où l'événement est apparu et une date d'échéance vers la fin. Nous remarquons que dans 68% des cas, la fonction objectif dans le cas du début est moins bonne que celle du milieu car la somme des retards des tâches de production f_1 va être importante vu que le nombre de tâches en

retard va augmenter. Il faut mentionner que les activités de maintenance ne seront pas affectées donc f_2 reste inchangées pour les deux cas. La fonction f est moins bonne que sa valeur idéale mais l'utilisation de la logique floue nous a permis d'absorber cet aléa car sa valeur est toujours inférieure à la valeur maximale.

La suppression d'une tâche de production (Suppression TP) au début ou à la fin donne des résultats différents. Dans 57% des cas, la fonction objectif f est moins bonne au milieu qu'au début. En effet, la suppression de la tâche de production au début permet d'avancer les autres tâches de production et donc de diminuer leur retard.

Les stratégies adoptées pour les deux scénarios précédents (ajout et suppression d'une tâche de production) offrent plus de stabilité à l'atelier puisqu'il n'y a que les tâches de production qui sont affectées. Les activités de maintenance restent inchangées.

En ce qui concerne l'événement de la panne machine, nous avons constaté qu'une panne au début engendre dans 61% des cas, une fonction objectif moins bonne qu'une panne au milieu. Ceci est expliqué par le fait que le retard des tâches de production décalées va augmenter et probablement les retards des activités de maintenance aussi. Pour les 39% des cas restants et lorsque la panne apparaît au milieu, la dégradation de la fonction objectif est justifiée par le fait de pas pouvoir trouver une ressource humaine qui puisse exécuter l'activité de maintenance sans affecter la prochaine occurrence de la maintenance préventive. Par conséquent, la machine reste inactive tant que l'intervalle n'est pas atteint, et cette durée d'inactivité sera rajoutée à la somme des retards des tâches de production. Nous résumons dans ce qui suit, les situations qui peuvent se présenter:

Enfin, pour la défection d'une ressource humaine (Défection RH) nous n'avons pas trouvé une ressource humaine remplaçante dans le cas de l'apparition de l'événement au début pour seulement 6% des benchmarks testés. Cependant, quand l'événement apparaît au milieu, nous avons trouvé 17% de cas impossibles. Ces résultats sont expliqués par le fait que l'ASRH n'a pas pu trouver un remplaçant qui propose un intervalle qui n'affecte pas la prochaine occurrence de l'activité de maintenance. Donc un réagencement des activités de maintenance dans ces cas est indispensable. De plus, si nous analysons la fonction objectif, dans tous les cas possibles, la fonction $\tilde{f}$ est dans son intervalle flou estimé. Donc, l'événement de la défection a été absorbé par notre système.

Tableau 5.6. Réaction du système aux différents événements traités

jobs	$\tilde{f}$ Initiale (Min, Idéale, Max)	*Arrivée TP*		*Suppression TP*		*Panne machine*		*Défection RH*	
		Début	**Milieu**	**Début**	**Milieu**	**Début**	**Milieu**	**Début**	**Milieu**
20	(3030, 3181, 3336)	3395	3240	3162	3216	3155	3128	3301	3191
	(3173, 3425, 3681)	3296	3383	3323	3359	3468	3353	3460	3384
	(2987, 3214, 3481)	3508	3332	3171	3195	5049	3614	3249	3331
	(4674, 4938, 5230)	5160	5040	4856	4926	5118	5232	Impossible	Impossible
40	(8281, 8965, 9711)	9476	8916	8845	8530	8948	9629	8944	8382
	(8999, 9833, 10688)	9794	9520	9638	9710	9615	9669	Impossible	Impossible
60	(14683, 16536, 18659)	16491	16340	16047	16449	16103	16944	Impossible	17581
	(11441, 12759, 14760)	12999	12840	12678	12719	13952	12818	13916	Impossible
	(14581, 16432, 19188)	17461	16827	16949	16603	16786	16772	16803	Impossible
80	(18063, 26284, 37373)	23900	25268	24823	21264	23121	24163	19815	Impossible
	(25825, 31657, 38798)	20526	20324	20042	19736	20226	21886	19612	20352
	(13013, 16917, 22100)	14850	15684	14881	14500	15756	16208	14689	Impossible
100	(40771, 47183, 54279)	46139	46288	45902	45890	46900	45910	46167	45707
	(37706, 42809, 48710)	47999	42973	41860	40688	42982	44056	42846	39424
	(39933, 43982, 50371)	43979	42248	42036	42225	44900	42135	42112	41948
120	(49608, 56824, 64575)	55063	56278	55132	54489	56236	55566	53920	56491
	(37746, 48270, 61190)	50102	49728	48984	49373	48776	50466	48817	48711
140	(42601, 59040, 82370)	55774	55438	54541	55303	57179	61096	50703	Impossible
	(53600, 62684, 74978)	64912	65753	65111	64696	64089	66395	62201	60775
160	(129468, 142757, 157552)	142494	140831	140144	140918	142471	142250	132729	136671
	(232988, 250512, 268935)	252669	251602	248795	249610	250454	250373	243942	237571
180	(92857, 112956, 139834)	110567	109706	107666	109130	118754	107399	97173	109536
	(91081, 114081, 141022)	106749	106803	106202	107718	107643	106837	107534	105541
200	(130043, 150277, 171852)	151438	150712	150383	151071	152603	152075	150273	144747
	(120618, 141296, 169611)	137964	140074	139885	137114	140971	139146	141953	129242
	(92357, 121610, 154858)	124639	128828	126036	126847	131528	127022	118534	Impossible

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une approche proactive-réactive pour l'ordonnancement conjoint de production et de maintenance. Nous avons essayé d'être les plus proches possibles de la réalité des ateliers de production en considérant les incertitudes liées aux deux activités de production et de maintenance et aussi en prenant en compte les contraintes liées aux ressources humaines.

Nous avons montré à travers nos différentes séries de tests que notre approche présente des avantages aussi bien pratiques que théoriques.

Dans le chapitre suivant, nous présentons la plateforme que nous avons utilisée pour réaliser nos expérimentations. C'est une plateforme multi-agents qui facilitent la génération et la gestion automatique des tests.

Chapitre 6

La plateforme ETOMA. L'Environnement de Test développé pour les Ordonnancements Multi-Agents

La phase de test d'une solution d'ordonnancement est très importante. Elle consiste à faire varier les données du problème d'ordonnancement (le nombre de jobs, leur durées opératoires, le nombre de machines,…etc.) et comparer les résultats générés par la nouvelle solution avec ceux des benchmarks existants. Ces derniers ayant déjà prouvé leur efficacité.

Afin de faciliter le développement et le test des solutions d'ordonnancement multi-agents, une plateforme multi agents est nécessaire. Actuellement, il n'existe pas de plateformes multi-agents dédiées à ce genre de tests. C'est pour ça que dans ce chapitre nous proposons notre troisième contribution. Il s'agit d'une plateforme multi-agents pour tester les performances des solutions d'ordonnancement basées agents.

1. Introduction

Le but de notre travail est de développer un outil qui nous permet de tester les performances d'une solution d'ordonnancement multi-agents pour les ateliers de production. Par conséquent, nous pourrons établir rapidement une première liste de fonctionnalités :

- Créer les composants de l'atelier à étudier (les différents agents représentants les acteurs de l'atelier).
- Lancer les simulations.
- Visualiser les résultats.

Cependant, pour assurer ces fonctionnalités, d'autres fonctionnalités de base doivent être définies et ça concerne :

- La création et la destruction des agents.
- La gestion du cycle de vie des agents : consiste à suivre l'état des agents de leur création jusqu'à leur disparition.
- La communication inter-agents.
- Sauvegarde des solutions d'ordonnancement.
- Récupération des solutions existantes.
- Importation des instances des tests.
- Génération des graphes, des tableaux de statistiques et des rapports de tests pour mesurer les performances d'une solution testée.

Nous proposons un système composé de deux grands modules et d'un troisième qui assure la communication entre les deux premiers.

a. Le module « Develop » de configuration de la solution. Ce module comprend les fonctions nécessaires pour le bon fonctionnement d'un système multi-agents c-à-d les agents créés par l'utilisateur (les agents ordonnanceurs) à savoir la création et la suppression des agents, la gestion du cycle de vie de ces derniers, l'ajout et la suppression de leurs compétences ainsi que leur communication.

b. Le module « Test » pour tester la solution. Ce module comporte toutes les fonctionnalités nécessaires pour tester une solution d'ordonnancement multi agents d'un atelier de production, à savoir l'importation de scenarios existants, le mécanisme de test sur des scenarios spécifiques (base des benchmarks), et enfin la génération d'un rapport complet sur le résultat de chaque test permettant à l'utilisateur d'évaluer sa solution.

c. Le module « Tableau noir ». La communication entre les deux précédents modules est assurée par la structure du tableau noir.

La figure 6.1 illustre l'architecture générale de notre plateforme et détaille la composition des deux modules cités ci-dessus. De plus, elle montre d'une façon générale les interactions entre les deux modules.

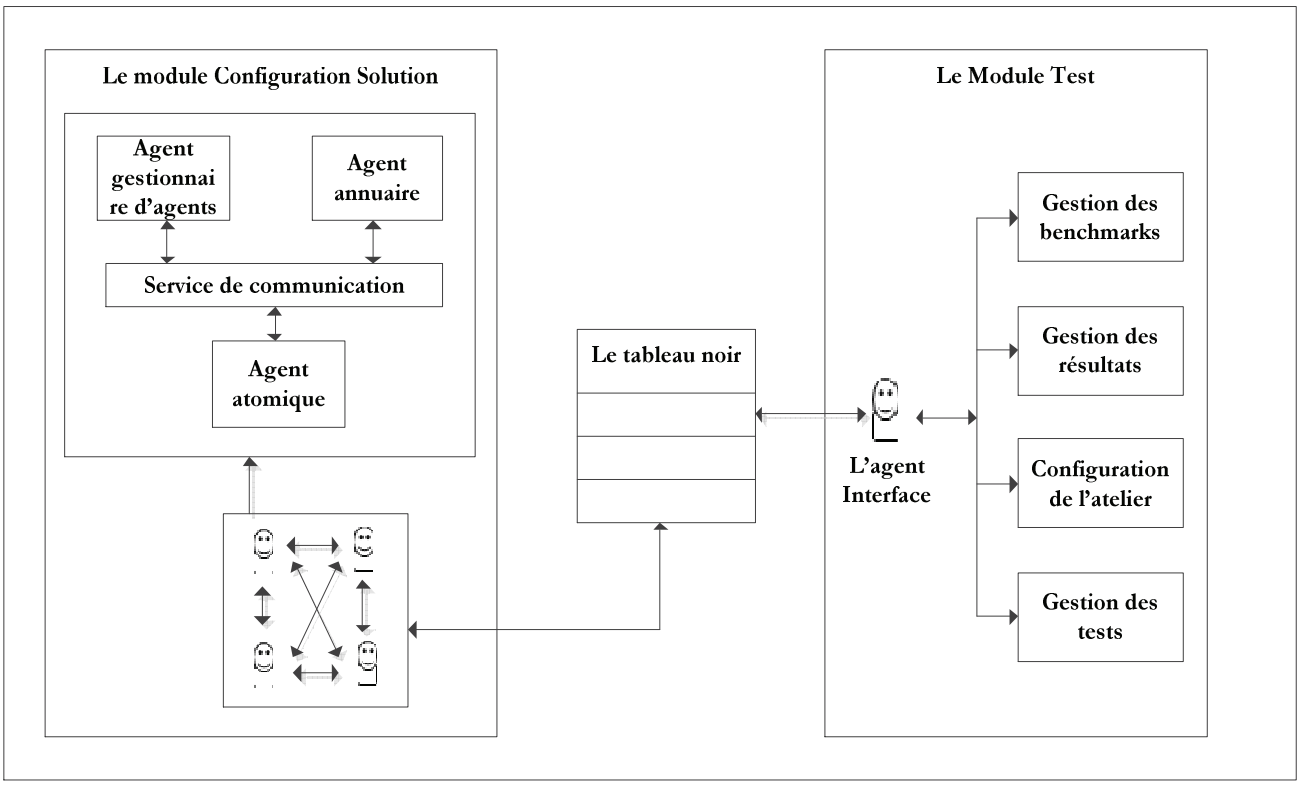

Figure 6.1. Architecture globale d'ETOMA

2. Architecture d'ETOMA

Dans ce qui suit, nous présentons en détail les composants d'ETOMA mentionnés précédemment.

2.1. Description de Develop

Ce module offre les services nécessaires pour la définition de la solution de l'utilisateur. Ces services sont la création, la destruction et la communication des agents. Il respecte la norme FIPA [FIPA,1996] pour l'identification, le cycle de vie et les services offerts.

2.1.1. Caractéristiques de l'agent proposé

L'agent Develop peut réaliser plusieurs traitements. Il possède son propre état, comportement, thread de contrôle et a une capacité d'interagir avec les autres agents. Nous proposons une architecture d'agent basée sur la notion de *compétence* comme définie par la plateforme Magique (Multi-AGent hiérarchIQUE) [Magique, 2005]. Un agent est une coquille vide dans laquelle nous pouvons insérer des compétences. Ces dernières peuvent varier de simples comportements comme répondre aux messages reçus jusqu'à la réalisation de traitements complexes. L'idée est de séparer l'agent de ce qu'il peut faire. Ainsi, un agent est défini comme étant : « une entité dotée de compétences » [Mathieu *et al.*, 2005]. Tout de même, nous définissons un ensemble de compétences minimales pour n'importe quel agent. Nous supposons que deux compétences initiales sont nécessaires pour n'importe quel agent: (1) *la capacité de communiquer* et (2) *la capacité de posséder de nouvelles compétences.*

a. Identification des Agents

Chaque agent est caractérisé par un identifiant unique appelé AID pour Agent IDentifier de façon à ce qu'il puisse être facilement identifié dans la plateforme. L'AID est attribué à chaque agent au moment de sa création. Il est composé des champs suivants :

- *L'identifiant unique global(GUID) :* le nom local de l'agent sur la plateforme
- *Le nom de la plateforme:* par défaut, c'est le nom de la machine hôte.

Exemple: machine_agent@user-pc

b. Les compétences des Agents

Une compétence est définie comme étant une séquence d'opérations nécessaires pour réaliser une tâche précise. En programmation, elle peut être perçue comme étant une classe java qui va être insérée dans la classe de l'agent. Cette approche favorise la réutilisabilité et la modularité. Une fois la compétence est préparée, elle peut être utilisée dans différents contextes. Elle peut être considérée comme un composant logiciel réutilisable. Le comportement d'un agent est composé de plusieurs compétences qui se traduisent en actions sur son environnement.

c. Education des agents

Au début, tous les agents ont le même comportement. Ils ont seulement deux compétences: la communication et l'acquisition de nouvelles compétences. Par conséquent, la différence entre les agents réside dans leur éducation. Leurs compétences peuvent être définies par le programmeur au moment de leur création ou apprises dynamiquement à travers l'interaction avec les autres agents.

c. Description de l'Agent Machine

D'après notre revue de la littérature, nous avons trouvé qu'il n'existe pas une modélisation multi-agents unique des ateliers de production. Cependant et comme nous le proposons dans nos travaux d'ailleurs, toutes les solutions définissent un agent qui représente une machine dans l'atelier. Pour

cette raison, nous définissons un « Agent machine » avec des compétences élémentaires requises par les utilisateurs. Ces compétences sont :

- *Proposition des durées opératoires.* Chaque agent machine doit proposer des temps opératoires pour les tâches qu'il va exécuter. Il récupère ces durées de l'instance de l'atelier qui est en cours d'exécution.
- *Récupérer les benchmarks de maintenance.* Pour chaque instance de production, notre système génère un plan de maintenance (section 3.2.4). Afin d'ordonnancer les tâches de production, l'Agent Machine doit prendre en considération les activités de maintenance systématiques qui doivent être planifiées sur la machine qu'il représente. Pour celà, il récupère le benchmark de la maintenance du tableau noir.

2.1.2. Les services offerts par *Develop*

Nous identifions quelques agents FIPA pour la gestion de la plateforme. Nous retenons l'Agent de Gestion du Système (AMS) et l'agent facilitateur d'annuaire (DF).

a. L'Agent du Système de Gestion (AMS)

En général, l'agent assure les fonctionnalités suivantes:

- *Inscrire un nouvel agent:* chaque agent doit être inscrit auprès de l'AMS afin de sauvegarder son identifiant (AID) dans son répertoire.
- *Modifier un AID existant:* l'AMS vérifie tout d'abord qu'il n'existe pas un autre agent qui possède le nouvel AID.
- *Supprimer un AID existant*: quand l'agent n'existe plus dans la plateforme, son AID doit être supprimé du répertoire de l'AMS.
- *Retrouver un agent.*
- *Créer, lancer, suspendre, réveiller, détruire des agents*: Chaque agent père peut effectuer ces actions suite à la demande de l'AMS.

b. L'agent facilitateur d'annuaire (DF)

Le DF est un agent qui offre le service de pages jaunes. Il permet la correspondance entre les agents et leurs compétences. Il peut effectuer les actions suivantes: *inscrire des agents avec leurs compétences dans l'annuaire* et *retrouver les agents qui possèdent les compétences recherchées.*

c. La communication inter-agents

La communication inter-agents est directe par l'envoi et la réception de messages asynchrones. Les agents peuvent communiquer sans avoir recours à un intermédiaire. Afin de sauvegarder les messages reçus, chaque agent est doté d'une boite aux lettres appelée le BAL. Le BAL procède comme un courrier postal et suit la stratégie FIFO. Nous proposons trois modèles de communication :

- *Mono-diffusion (un-à-un):* il n'existe qu'un seul receveur pour le message.
- *Multi-diffusion (un-à-plusieurs):* Il existe plusieurs receveurs du message envoyé.
- *Diffusion globale (un-à-tous):* tous les agents de la plateforme vont recevoir le message.

Nous avons implémenté plusieurs structures de messages. Nous proposons une librairie de messages élémentaires. Ces structures permettent l'échange de textes, d'objets, de compétences ou des messages en accord avec les spécifications FIPA. Tous les messages doivent contenir des attributs obligatoires et attributs qui varient selon les données échangées. Les attributs obligatoires sont : la *performative*, *l'identifiant de l'émetteur, l'identifiant du receveur* et *le contenu.*

2.2. Description du module Test

En concevant ce module, nous avons essayé d'offrir les fonctionnalités nécessaires pour la mise en place des expérimentations utilisateurs. A savoir la *configuration* et la *sauvegarde* des solutions et la *gestion des résultats*. Nous avons eu besoin de la considération d'un agent médiateur que nous avons appelée *Agent Interface* et d'un module pour la génération des ordonnancements de maintenance.

2.2.1. Configurer et sauvegarder les solutions d'ordonnancements

Avant de commencer une simulation, l'utilisateur doit spécifier le type d'atelier qui va être étudié et la fonction objectif qu'il veut optimiser. Après cela, le système choisit le benchmark adéquat pour les tests.

i) *Les types d'ateliers:* le système que nous proposons permet le test des solutions pour des ateliers de type: *job-shop*, *flow-shop* et *open-shop*.

ii) *La fonction objectif:* cette information est utile pour la comparaison des résultats. Elle représente la fonction que l'utilisateur veut optimiser.

iii) *Les benchmarks utilisés:* nous utilisons les benchmarks de Taillard [Taillard, 1993] pour différentes raisons : (1) ces benchmarks sont fréquemment utilisés en production ; (2) ils contiennent les principaux types d'atelier (*flow-shop*, *job-shop* et *open-shop*) ; (3) la documentation abondante existante sur ces benchmarks facilite leur compréhension.

Après avoir défini une solution d'ordonnancement c'est à dire les agents et leurs comportements, nous pouvons sauvegarder cette configuration sous format XML afin de la réutiliser. Aussi, notre système peut configurer un atelier de production à partir d'une description XML.

2.2.2. L'agent Interface

Le module *Test* contient un agent appelé l'*Agent Interface*. Il joue le rôle de médiateur entre l'utilisateur, le module Develop et le module Test (figure 6.2). Il identifie un ou deux scénarios de test selon la configuration d'atelier choisie par l'utilisateur. Ensuite, il les dépose sur le tableau noir. Puis, il récupère les résultats après l'exécution de la solution afin de l'afficher. Les compétences de l'agent interface sont:

- *Déposer un benchmark sur le tableau noir.*
- *Déposer le plan de maintenance:* ce point sera expliqué dans la section 2.2.4.
- *Récupération des résultats:* permet la récupération des résultats du tableau noir, afin de les afficher.
- *Exécution de la simulation :* l'Agent interface est chargé de lancer les simulations.

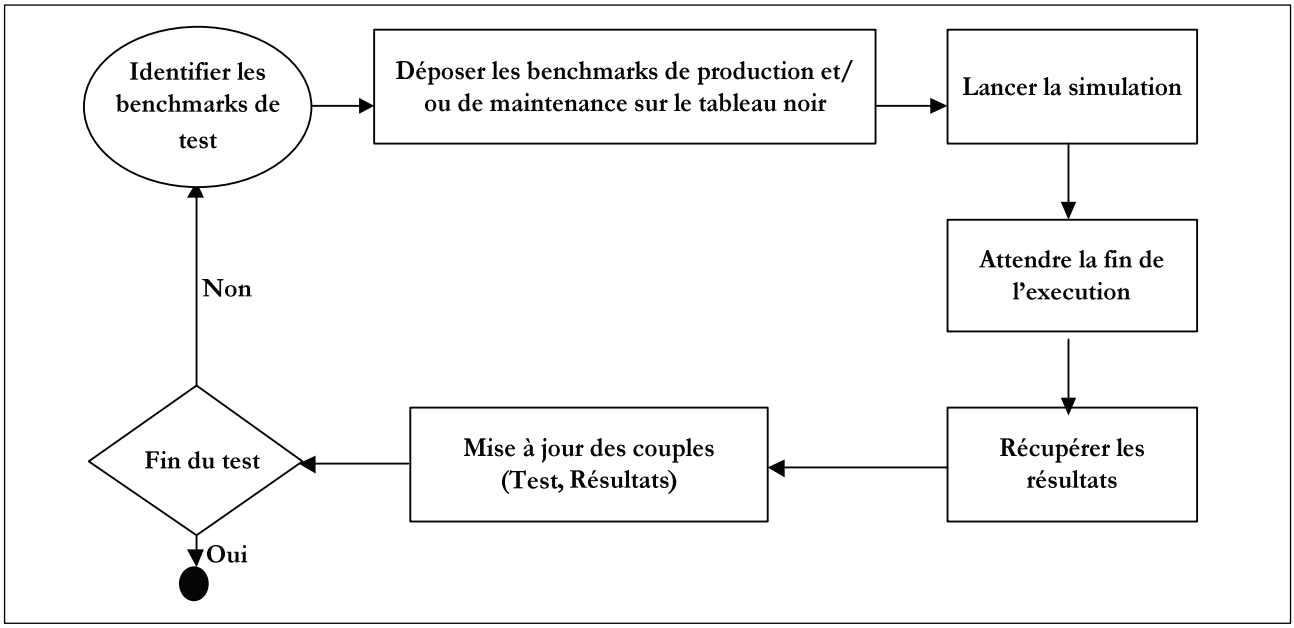

Figure 6.2. Le comportement de l'Agent Interface

2.2.3. Gestion des résultats

Les fonctionnalités suivantes sont offertes:

(i). La génération des rapports de test: en générant un rapport, toutes les informations qui concernent les tests et l'atelier étudié peuvent être groupées. Il résume le type de l'atelier, le nombre de tests exécutés et les résultats finaux c'est-à-dire la valeur de la fonction objectif.

(ii). La visualisation graphique des résultats: La visualisation graphique des résultats est très appréciée par les utilisateurs afin de les comparer avec d'autres résultats de la littérature. Par conséquent, notre système permet de visualiser des courbes et tableaux.

2.2.4. Génération des benchmarks de la maintenance

Notre système prend en charge l'ordonnancement conjoint de production et de maintenance. Vu le manqué des benchmarks dédiés à ce type d'ordonnancement, nous avons procédé ainsi: plusieurs activités de maintenance peuvent être planifiées dans l'ordonnancement pour être exécutées sur chaque machine. Les durées opératoires des tâches de maintenance peuvent varier dans un intervalle fixé par l'utilisateur. Effectivement, nous ne pouvons pas définir aléatoirement le nombre d'activités de maintenance. Ceci dépend du temps d'exploitation de la machine et de l'horizon de planification. En conséquence, nous admettons que la période entre deux activités de maintenance peut être calculée par (eq.1).

$$T_i = MP_i * NTM. \qquad (1)$$

Avec MP_i est la moyenne du temps opératoire du benchmark de production sélectionné NTM et le nombre de tâches de production entre deux activités de maintenance. C'est un paramètre fixé par l'utilisateur.

2.3. Le tableau noir

C'est un composant important dans notre plateforme. Il assure la communication entre les modules Develop et Test. En effet, la solution de l'utilisateur (définie dans Develop) a besoin de données du module Test et ce dernier a besoin aussi de données du premier. En plus, du moment qu'il n'existe pas de modélisations générique pour la solution d'ordonnancement, nous ne pouvons pas savoir quel est l'agent responsable du calcul des résultats. Cette structure permet la récupération des résultats afin de les afficher par le module Test. Le tableau noir est composé de trois petits modules. Le premier est utilisé pour déposer et récupérer les benchmarks. Le deuxième pour déposer et récupérer les résultats et le troisième pour déposer et récupérer le plan de maintenance.

3. Exemple d'exécution

Afin d'illustrer toutes les fonctionnalités présentées dans les sections précédentes, nous considérons un exemple (figure 6.3) et nous l'exécutons sur notre plateforme.

Soit une solution d'ordonnancement multi-agents pour un atelier de type flow-shop où la fonction objectif est de minimiser le Cmax. En plus de l'agent Machine (AM) et l'agent interface, nous identifions deux autres agents :

- *L'gent OF:* il est responsable de l'initiation du processus de négociation en envoyant un appel d'offre (CFP) aux agents machines (AM).
- *L'Agent Optimisation:* son rôle est de calculer les résultats de l'ordonnancement

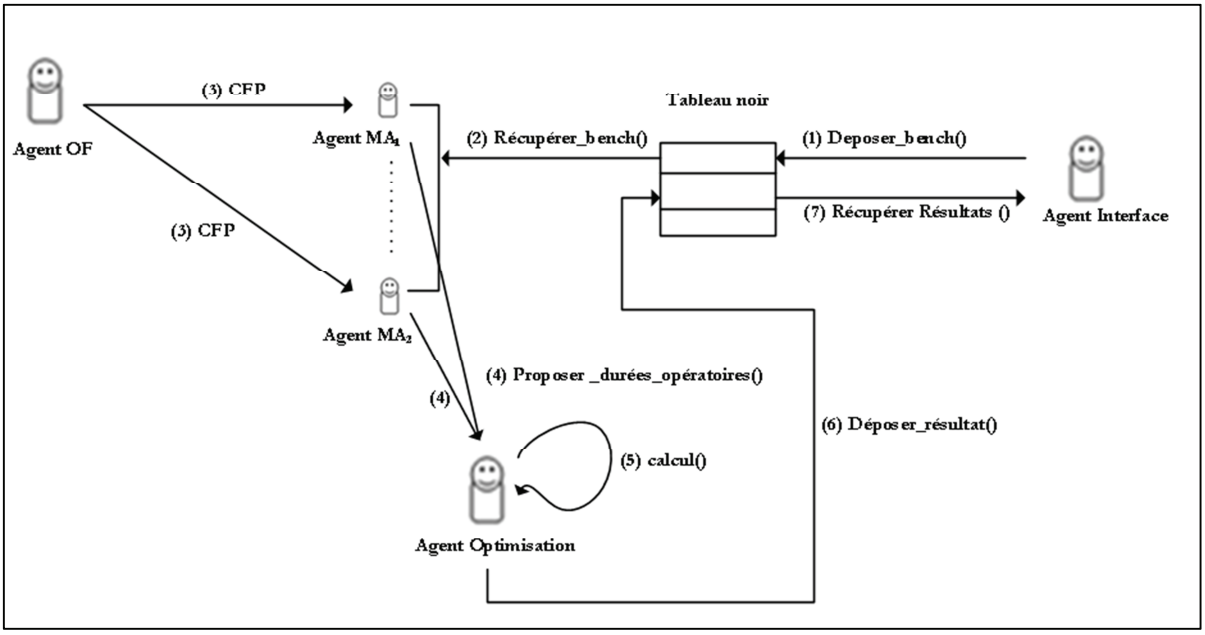

Figure 6.3. Illustration des interactions entre les agents

Comme l'illustre la figure 6.3, après la sélection des benchmarks par l'utilisateur, (1) l'agent interface les dépose sur le tableau noir tout en créant les agents machines. Après cela, (2) l'agent OF envoi des CFP aux agents AM existants. Ces derniers envoient leurs propositions de temps opératoires à l'agent optimisation et ceci selon les valeurs données dans le benchmark de test. L'agent optimisation calcule

la fonction objectif en exécutant la compétence *Calculer*(). Il dépose ensuite le résultat sur le tableau noir. Finalement, l'agent interface récupère le résultat afin de le sauvegarder.

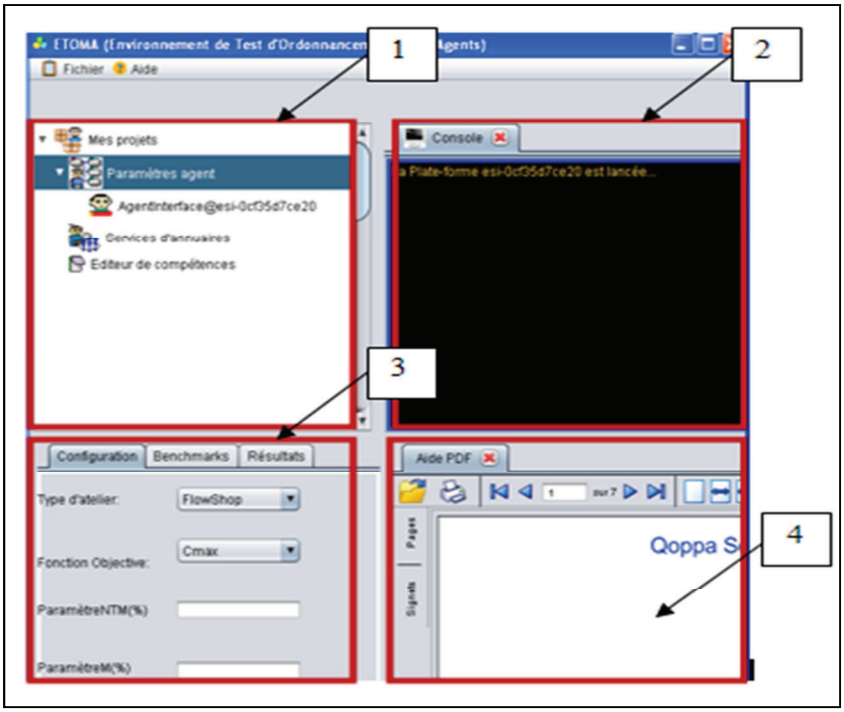

Figure 6.4. La fenêtre principale d' ETOMA

Nous avons déroulé le précèdent exemple sur notre plateforme. Nous illustrons les comportements des agents et les fonctionnalités de la plateforme à travers un ensemble d'écrans. La Figure 6.4 montre la fenêtre principale d' ETOMA qui est composée de quatre parties:

(1) La première partie présente les agents définis pour la solution d'ordonnancement. Au début, il n'existe que les agents AMS, Interface et le DF. Après cela, l'utilisateur peut créer les agents qu'il définit dans sa solution (figure 6.5). Pour l'exemple précèdent, nous avons rajouté les *agents OF* et *Optimisation*. Nous les avons ensuite muni de compétences : *CFP()* pour l'agent OF et *Calculer()* et *Déposer_Résultat()* pour l'agent Optimisation.

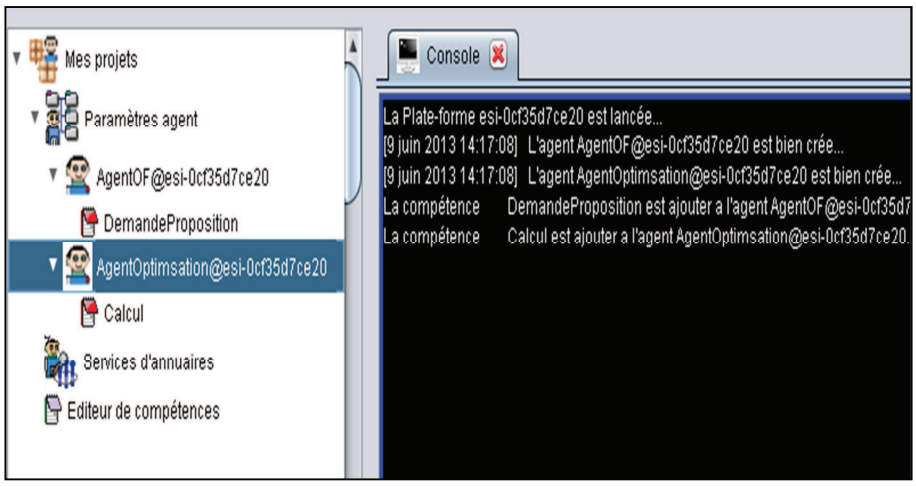

Figure 6.5. Création des agents utilisateur

(2) *La deuxième partie* représente une console qui affiche la trace de l'exécution des solutions. En effet, c'est très important pour les utilisateurs de suivre l'exécution de leurs applications. De ce fait, cette partie affiche chaque tâche réalisée par les agents.

(3) *La troisième partie* permet aux utilisateurs de définir le type d'atelier à étudier (flow-shop, job-shop ou open-shop), la fonction objectif (C_{max}, L_{max} et R_{max}) et les paramètres de maintenance (NMT et MP). Dans notre exemple, nous sélectionnons une configuration de type flow-shop (figure 6.6), le C_{max} comme fonction objectif et nous n'avons pas considéré les paramètres de maintenance. Dans la même partie, nous pouvons sélectionner les benchmarks. Comme avancé dans les sections précédentes, nous utilisons les benchmarks de Taillard. Notons que nous pouvons utiliser d'autres benchmarks à condition qu'ils aient la même structure que celle de Taillard. Une fois les benchmarks sélectionnés, les agents machines peuvent être ainsi créés (figure 6.7) (le nombre d'agents dépend des benchmarks sélectionnés). Si nous choisissons par exemple l'instance "tail 20_20_4", elle signifie que le flow-shop est composé de 20 machines qui vont exécuter 20 jobs. Le nombre 4 correspond à l'identifiant de l'instance.

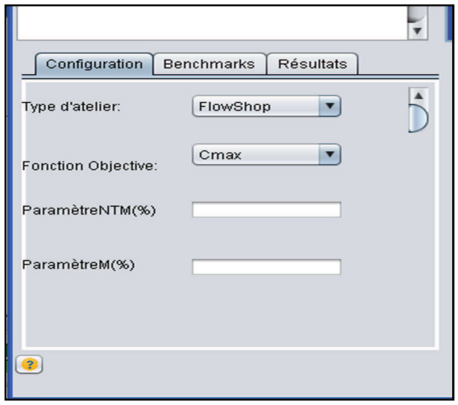

Figure 6.6. Définir les caractéristiques de l'atelier à étudier

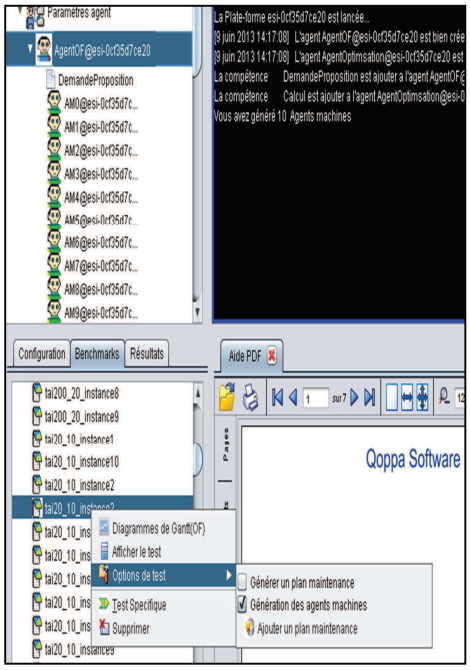

Figure 6.7. Création des agents machine selon l'instance du benchmark sélectionnée

(4) *La quatrième partie* permet de visualiser les résultats sur une courbe (figure 6.8) ou sur un tableau (figure 6.9) après la fin des simulations.

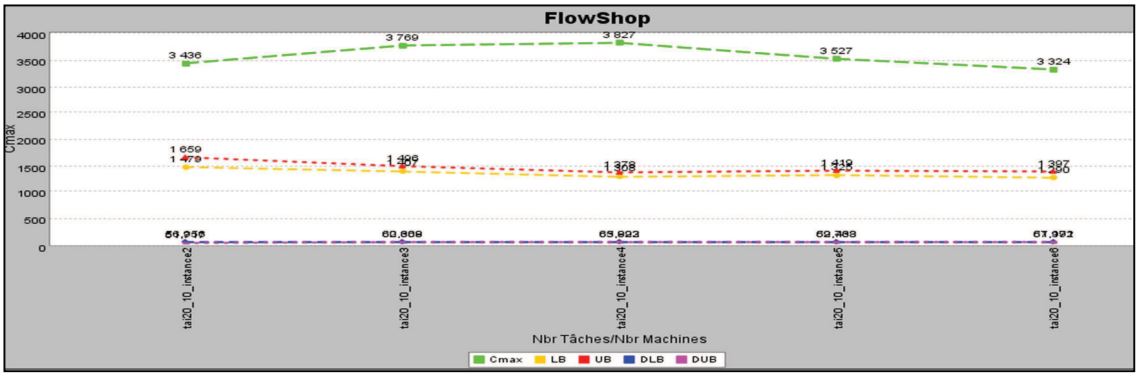

Figure 6.8. La courbe résultante

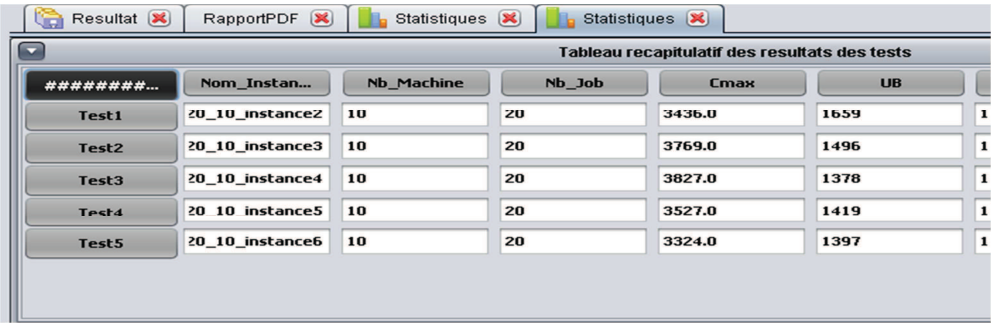

Figure 6.9. Tableau des statistiques

4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un nouvel outil appelé ETOMA pour développer et tester les ordonnancements multi-agents. Il se compose de trois modules. Le premier appelé *Develop* définit la solution de l'utilisateur multi-agents en créant tous les agents du système et leur comportement. Le second appelé *Test* gère les tests et le troisième appelé *Tableau noir* assure la communication entre les deux modules précédents. La plateforme ETOMA n'impose aucune architecture multi-agents du système qui représente l'atelier. Le concept de compétence adoptée par notre système assure la réutilisabilité des fonctionnalités des agents. ETOMA couvre la configuration des ateliers: Flow-shop, Job-shop et Open-shop ce qui la rend conçue pour un grand nombre d'applications. La plate-forme est extensible de manière à ajouter d'autres fonctionnalités et options.

Conclusion Générale : les leçons de la thèse

Cette thèse présente le fruit de 6 années de recherche dans le domaine de l'ordonnancement conjoint de production et de maintenance. A travers notre étude bibliographique, nous avons constaté les insuffisances des travaux proposés dans ce domaine. En effet, les activités de maintenance telles quelles sont considérées dans les ordonnancements conjoints ne permettent pas de fournir des solutions réalistes et applicables. Ceci est dû principalement à : (1) la non considération des contraintes qui leur sont liées et plus particulièrement celles relatives aux ressources humaines; (2) la non prise en compte des incertitudes qui peuvent les caractériser ; (3) et enfin la non prise en compte des autres types de maintenance préventives ; notamment la maintenance conditionnelle et la maintenance prévisionnelle alors qu'elles présentent plus d'avantages que la maintenance systématique.

Les interventions de maintenance se font dans la plupart des cas de manière manuelle et font intervenir ainsi des ressources humaines. Ces dernières possèdent différentes compétences leur permettant d'exécuter les tâches qui leur sont allouées. Les ressources humaines sont aussi caractérisées par leur disponibilité qui est soumise à des règles relatives à la politique de gestion des emplois du temps suivie par le service de maintenance. En plus de la compétence et de la disponibilité, une autre caractéristique des ressources humaines peut être rajoutée, il s'agit de la *performance*. Elle caractérise la durée qu'une ressource humaine propose pour réaliser une tâche donnée. En pratique, la durée opératoire d'une activité de maintenance ne peut être connue de manière précise car elle dépend de la compétence et de l'état physique de la ressource humaine au moment de l'intervention (en forme, fatiguée, malade, stressée, ..). Afin de proposer des solutions d'ordonnancement conjoint de production et de maintenance qui reflètent la réalité des ateliers de production, les contraintes relatives aux ressources humaines doivent impérativement être prises en compte.

Les travaux en ordonnancement conjoint de production et de maintenance ne considèrent que la maintenance préventive systématique (TBM). Alors que d'autres formes plus intéressantes et qualifiées comme plus économiques peuvent être considérées. Il s'agit de la maintenance conditionnelle (CBM) et la maintenance prévisionnelle(PHM). La maintenance conditionnelle ou la CBM est une stratégie de maintenance préventive qui vise à ne programmer les activités de maintenance qu'en cas de besoin c'est-à-dire suite à une anomalie de fonctionnement détectée au cours du processus de production. Elle est plus économique que la TBM car elle évite la planification de maintenances parfois non nécessaires due au manque de contrôle de l'équipement. Malheureusement, la plupart des travaux traitant la CBM, ne s'intéresse pas à son intégration dans l'ordonnancement actuel de la machine, elle étudie plutôt les paramètres les plus significatifs qui prédissent l'arrivée de la panne. Chacune des stratégies TBM et CBM est nécessaire pour une bonne gestion des équipements de l'atelier. La première est utile pour des activités peu coûteuses comme le

nettoyage, le dégraissage, etc. Tandis que la deuxième stratégie est utile dans le cas d'activités coûteuses comme le changement d'un composant de la machine. Pour couvrir ces deux stratégies, les ordonnancements conjoints de production et de maintenance doivent être composés de TBM et CBM à la fois.

1. Bilan et principales contributions

Concrètement, les principales contributions de cette thèse sont les suivantes :

– La proposition d'une approche réactive d'ordonnancement conjoint de production et de maintenance avec prise en compte des contraintes des ressources humaines

– La proposition d'une approche proactive-réactive d'ordonnancement conjoint de production et de maintenance périodique avec prise en compte des contraintes des ressources humaines

– La proposition d'une plateforme de développement et de test des solutions d'ordonnancement multi-agents.

Dans la première contribution, nous avons proposé un ordonnancement conjoint de production et de maintenance dans le cas d'insertion d'une nouvelle activité de maintenance préventive conditionnelle (CBM). C'est un ordonnancement réactif car il répond à un signal indiquant une anomalie de dysfonctionnement ou ce qui est connu sous le nom de détection d'une panne potentielle. La machine qui subira l'intervention appelée « la machine sujet » (MS) doit être maintenue avant que la panne fonctionnelle survienne. Nous avons proposé une résolution à deux niveaux : (1) le niveau une-machine où le plan de la machine qui nécessite l'intervention est modifié pour insérer la nouvelle CBM ; (2) et le niveau multi-machines où les plans de production des machines voisines, qui sont affectés par la première résolution, seront mis à jours. Pour offrir une flexibilité aux décideurs, nous avons proposé deux stratégies de planification de la maintenance : une Stratégie Orientée Maintenance (SOM) et une Stratégie Orientée Production (SOP). La stratégie SOM vise à accélérer la programmation de la CBM pour réduire le risque de panne alors que la stratégie SOP tolère un risque de panne en retardant la programmation de la CBM afin de maintenir l'ordonnancement initial de la MS aussi stable que possible. Les résultats expérimentaux ont montré que quel que soit la stratégie adoptée, le retard de production est absorbé grâce au ré-ordonnancement partiel proposé. Ce résultat nous emmène à dire que l'adoption de la stratégie SOM est plus intéressante car elle maintient l'ordonnancement initial stable avec un faible risque de panne.

Dans la seconde contribution, nous avons proposé une approche proactive-réactive pour la génération d'un ordonnancement conjoint de production et de maintenance. Pour la planification de la maintenance, les contraintes de disponibilité, de compétence et de performance des ressources humaines sont prises en compte. Dans la phase proactive, un ordonnancement conjoint flou de tâches de production et de maintenance systématiques est généré. Tandis que dans la phase réactive, plusieurs ordonnancements sont proposés selon l'évènement perturbateur qui survient. Nous partons du principe que chaque événement peut être traité de manière différente par rapport aux autres et ceci en proposant des ré-ordonnancements partiels puisque le ré-ordonnancement total; jusqu'à présent le plus adopté; cause une nervosité dans l'atelier. Les résultats expérimentaux ont montré que l'algorithme génétique que nous proposons génère une population de solutions de meilleure qualité par rapport à celles générées par l'heuristique HS2 proposée par [Kaabi-Harrath, 2004]en termes de fonction objectif. Un autre résultat concerne l'importance de la considération des contraintes des ressources humaines sur la faisabilité des activités de maintenance dans les solutions générées. En effet, ces dernières ne satisfont pas forcement les contraintes de disponibilité des ressources humaines puisque la seule contrainte considérée pour leur programmation est la périodicité de la maintenance

systématique. Le dernier résultat concerne les ré-ordonnancements partiels proposés dans la phase réactive en réponse aux différents évènements perturbateurs. Les expérimentations effectuées ont montré que l'adoption de ces ré-ordonnancements et la modélisation floue des données du problème font que les solutions générées restent dans tous les cas robustes en absorbant les évènements survenus puisque la valeur de la fonction objectif globale ne dépasse jamais sa valeur maximale.

Dans la troisième contribution, nous avons proposé ETOMA une plateforme multi-agent dédiée au développement et test des ordonnancements des ateliers de production. L'architecture d'ETOMA est composée de trois modules: *Dévelop*, *Test* et le *Tableau noir*. Le premier permet à l'utilisateur de définir sa solution en spécifiant ses agents et leur comportement. Le second se charge de lancer les simulations en se basant sur les benchmarks de Taillard et de visualiser les résultats. Enfin, le Tableau noir, assure la communication entre les deux modules prédéfinis. ETOMA permet de tester toute solution d'ordonnancement sans imposer une architecture spécifique pour les agents. En outre, ETOMA fournit à la fin de simulations un rapport composé d'un tableau récapitulatif ou d'une courbe selon le choix de l'utilisateur.

2. Perspectives de recherches

Les travaux proposés dans cette thèse ont permis d'ouvrir plusieurs perspectives à court et à moyen terme.

2.1. Perspectives à court terme

Dans le cadre du travail de thèse de Doctorat de Madame Meriem TOUAT, nous sommes en phase d'amélioration de l'approche proactive-réactive, principalement la phase proactive.

Nous avons proposé une approche intégrée d'allocation des ressources humaines aux activités de maintenance. En d'autres termes, l'allocation ne se fait plus en deux phases (spécification des fenêtres temporelles des activités de maintenance puis chercher les intervenants aptes et disponibles dans ces fenêtres) mais plutôt, dès la génération de la population initiale de l'algorithme génétique. Ainsi, les meilleures ressources humaines (proposant une durée opératoire optimale) sont allouées aux activités de maintenance. Une étape qui s'avère donc nécessaire est celle de *réajustement* des solutions afin qu'elles satisfassent la contrainte de disponibilité des ressources humaines à chaque génération d'un nouvel individu. En effet, le déplacement du gène de maintenance dans le chromosome après une mutation ou un croisement nécessite de vérifier si la ressource humaine allouée à l'activité de maintenance en question est disponible dans la nouvelle fenêtre temporelle. A travers, les différents tests, nous comparons les résultats de l'approche séquentielle (initiale) et conjointe. Les calculs ont montré que l'approche conjointe est plus intéressante en termes de valeur de la fonction objectif globale mais moins performante en temps de calcul par rapport à l'approche séquentielle. Ce dernier résultat est causé par l'étape de réajustement qui doit être exécutée à génération de nouveaux individus pour poursuivre la résolution.

Nous avons rédigé et envoyé un article décrivant ce travail à la revue *« Applied Soft Computing »* de l'éditeur *« Elsevier »*. Nous avons reçu une première puis une deuxième réponse suggérant des modifications. Ainsi, des corrections majeures puis très superficielles ont été apportées à la dernière version envoyée pour répondre aux recommandations des rapporteurs. Nous avons ré-envoyé la nouvelle version et actuellement nous attendons une réponse définitive de l'éditeur.

En parallèle, nous somme en cours de rédaction d'un article qui présente une revue de la littérature sur les solutions proposées pour la résolution du problème d'ordonnancements de la production. A

travers une synthèse bibliographique, nous présentons notre propre classification des solutions proposées. Nous les répartissons selon trois critères: *production seule ou intégrée avec d'autres activités*, *résolution exacte ou approchée* et *prise en compte ou non des incertitudes*.

2.2. Perspectives à moyen terme : les projets post-thèse

Après la finalisation de nos travaux en cours, nous envisageons poursuivre nos recherches sur deux volets :

a. *Le premier volet* concerne la phase réactive de notre deuxième contribution. Il est important et intéressant d'étudier les performances des ré-ordonnancements partiels proposés pour chaque scénario comme nous l'avons fait pour le cas de la programmation de la CBM. Le but de l'étude serait de démontrer les avantages d'adopter de telles résolutions par rapport d'autres ou par rapport aux ré-ordonnancements totaux.

b. *Le deuxième volet* concerne la proposition d'un ordonnancement conjoint de production et de maintenance en prenant en compte les contraintes relatives aux ressources humaines dans l'exécution des deux activités (production et maintenance). En effet, dans cette thèse, notre objectif était depuis le début d'essayer d'être les plus proches de la réalité et des besoins des ateliers de production ceci en proposant des approches réalistes et applicables. Selon notre point de vue, l'insuffisance majeure des travaux en ordonnancement conjoint de production est de maintenance est de ne pas prendre en considération les contraintes relatives aux ressources humaines. Ces dernières représentent une ressource très importante pour l'exécution des travaux dans l'atelier. Que ces travaux soient de production ou de maintenance l'importance est la même. Du moment que dans nos travaux, c'est la première fois que les contraintes des ressources humaines sont considérées dans un ordonnancement conjoint de production et de maintenance. Nous avons essayé de simplifier le problème en considérant les ressources humaines seulement pour l'activité de maintenance.

Dans la réalité des ateliers de production, une machine de production ne reste jamais sans opérateurs donc les tâches de production doivent être affectées aux opérateurs pour assurer la continuité du processus de production. Aussi, les activités de maintenance de bas niveau (Niveau I et II) sont généralement affectées aux opérateurs de production afin d'accélérer l'intervention en maintenance et ainsi éviter de longues attentes avant que les intervenants en maintenance n'arrivent sur les lieux. Par conséquent, les temps opératoires des maintenances périodiques dépendent de la compétence et de la performance de l'opérateur de production se trouvant sur place. Ceci va permettre d'éliminer la contrainte de disponibilité de l'ensemble des contraintes prises en compte pour la planification des activités de maintenance périodiques. Cependant cette même contrainte doit être prise en compte pour la planification des activités de maintenance conditionnelle et corrective qui demandent des compétences de niveau élevé pour être exécutées.

3. Les publications de la thèse

S. Bouzidi-Hassini, F. Benbouzid-Si Tayeb, S. Aknine, A Multi Agent Scheduling Integrating Planning and Maintenance for Generalized Floor Shops. In proceeding of the The International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists, Hong Kong, 14-16 March, 2012.

S. Bouzidi-Hassini, F. Benbouzid-Si Tayeb, Multi-Agent based Joint Production and Maintenance Scheduling Considering Human Resources, Proceeding of the 5th International conference on modeling simulation and applied optimization ICMSAO'13, Hammamet, Tunisie, 28-30 Avril 2013.

S. Bouzidi-Hassini, S. Bourahla, Y. Saboun, F. Benbouzid-Si Tayeb, S. Khelifati, ETOMA: A Multi-Agent Tool for Shop Scheduling Problems, Advanced Approaches to Intelligent Information and Database Systems Studies in Computational Intelligence, Springer International Publishing, Volume 551, 2014, pp. 79-88.

M. Touat, **S. Bouzidi-Hassini**, F. Benbouzid-Si Tayeb, Une approche proactive/réactive pour l'ordonnancement conjoint de production et de maintenance avec contraintes de ressources humaines. 10ème Conférence Francophone De Modélisation, Optimisation Et Simulation- MOSIM'14 (France), 5 – 7 Novembre 2014.

S. Bouzidi-Hassini, F. Benbouzid-Si Tayeb, F. Marmier, M. Rabahi, Considering Human Resource Constraints for Real Joint Production and Maintenance Schedules, Computers & Industrial Engineering (CAIE), Elsevier, 2015, Vol. 90, pp.197-211, doi:10.1016/j.cie.2015.08.013.

Références

[Abudul-Razak *et al.*, 1990]: T. S. Abdul-Razak, C.N. Potts, L.N. Van Wassenhove, *A survey of algorithms for the single machine total weighted tardiness scheduling problem*, Discrete Applied Mathematics, vol. 26, pp.235-253, 1990.

[AFNOR]: *Association francophone de normalisation*, http://www.afnor.org/.

[AFNOR, 2002]: *Maintenance industrielle, Fonction maintenance*, FD X 60-000, 2002.

[Aissani *et al.*, 2011]: N. Aissani, A. Bekrar, D. Trentesaux, B. Beldjilali, *Dynamic scheduling for multi-site companies: a decisional approach based on reinforcement multi-agent learning*, Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 23, no. 6, pp. 2513–2529, 2011.

[Aknine *et al.*, 2008]: S. Aknine, D. Anane, S. Pinson, *Coordination of supply chain activities: a coalition based approach*, IFIP International Federation for Information Processing, 2008.

[Alhouaij, 2010] : A.A. Alhouaij, *Contribution à l'optimisation de la maintenance dans un contexte distribué*, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2010.

[Allahverdi *et al.*, 2008]:A. Allahverdi, J.N.D. Guptab, T. Aldowaisan, *A review of scheduling research involving setup considerations*, Omega, Int. J. Mgmt Sci., vol. 27, pp. 219-239, 1999.

[Allahverdi, 2016]: A.Allahverdi, *A survey of scheduling problems with no-wait in process*, European Journal of Operational Research, vol. 255, pp. 665-686, 2016.

[Aloulou *et al.*, 2008]: M.A. Aloulou, F. Della Croce, *Complexity of single machine scheduling problems under scenario-based uncertainty*, Operations Research Letters, vol. 36, no. 3, pp. 338-342, May 2008.

[Anand *et al.*, 2015]:E. Anand, R. Panneerselvam, *Literature Review of Open Shop Scheduling Problems*, Intelligent Information Management, vol. 7, pp. 33-52, 2015.

[Armel, 2003]: J. Armel, *La flexibilité technologique un survol de la littérature*, Revue d'économie politique, vol. 113, 2003.

[Artigues *et al.*, 2002]: C. Artigues, C. Briand, M.Portmann, F. Roubellat, *Pilotage des systèmes de production*. Chapitre Pilotage d'atelier basé sur un ordonnancement flexible. Edition Hermès, 10, 2002.

[Attia *et al.*, 2011]: E.A Attia, P. Duquenne, J.M. Le Lann, *Prise en compte des évolutions de compétences pour les pour les ressources humaines*. (2011) In: 9ème Congrès International de Génie Industriel (CIGI2011), Saint-Sauveur, Canada, 12-14 Oct 2011.

[Bach *et al.*, 2011]: K. Bach, K.D. Althoff, R. Newo, A. Stahl, *A Case-Based Reasoning Approach for Providing Machine Diagnosis from Service Reports*, In Case-Based Reasoning Research and Development, LNCS 6880, pp. 363-377, 2011.

[Bagchi *et al.*, 2006]:T.P. Bagchi, J.N.D. Gupta, C. Sriskandarajah, *A review of TSP based approaches for flowshop scheduling*, European Journal of Operational Research, vol. 169, pp. 816-854, 2006.

[Batun *et al.*, 2009]: S. Batun, M. Azizoğlu, *Single machine scheduling with preventive maintenance*, International Journal of Production Research, vol. 47, no. 7, pp.1753-1771, 2009.

[Beck *et al.*, 2007]: J.C. Beck, N. Wilson, *Proactive algorithms for job shop scheduling with probabilistic durations*, *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 28, pp. 183-232, 2007.

[Bellman, 1957]: R. Bellman, *Dynamic Programming*, Ed Princeton University Press, pp.83, 1957.

[BenBouzid-Sitayeb *et al.*, 2003]: F. Benbouzid-SiTayeb, C.Varnier, N.Zerhouni, *Resolution of joint maintenance/ production scheduling by sequential and integrated strategies*. In 7th international work conference on artificial and natural neural networks IWANN2003, Spain. Proceedings LNCS 2687, pp. 782–789, 3–6 June, 2003.

[Benbouzid-Sitayeb, 2005]: F. Benbouzid-SiTayeb, *Contribution à l'étude de la performance et de la robustesse des ordonnancements conjoints de production/Maintenance –Cas Du Flowshop,* Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comte, 2005.

[Benbouzid-Sitayeb *et al.*, 2011]: F. Benbouzid-Sitayeb, S.A. Guelbi, Y. Bessadi, C. Varnier, N. Zerhouni, *Joint scheduling of jobs and Preventive Maintenance operations in the flow-shop sequencing problem: a resolution with sequential and integrated strategies*, International Journal of Management Research (IJMR), vol. 6, no. 1, pp. 30-48, 2001.

[BenHmida-Sakli, 2009]: A. BenHmida-Sakli, *Méthodes arborescentes pour la résolution de problèmes d'ordonnancement flexible*, Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, France, 2009.

[Bertsimas *et al.*, 2004]: D. Bertsimas, M. Sim. *The price of robustness*, Operations Research, vol. 52, no. 1, pp. 35-53, 2004.

[Bhatt *et al.*, 2015]: N. Bhatt, N.R. Chauhan, *Genetic algorithm applications on Job Shop Scheduling Problem: A Review*, B2015 International Conference on Soft Computing Techniques and Implementations- (ICSCTI), Department of ECE, FET, MRIU, Faridabad, India, Oct 8-10, 2015.

[Billaut, 1999]: J-C. Billaut, *Recherche Opérationnelle et aide à la décision pour les problèmes d'ordonnancement,* Habilitation à diriger des recherche, Laboratoire d'Informatique, E3i, Université François Rabelais, Tours, France, 1999.

[Billaut *et al.*, 2004]: J.C. Billaut, A. Moukrim A., E. Sanlaville, *Flexibilité et robustesse en ordonnancement*. Hermes Science, Paris, December 2004.

[Blazewicz *et al.*, 1996]: J. Blazewicz, K.H. Ecker, E. Pesch, G. Schmidt, J. Weglarz, *Scheduling in computer and manufacturing processes*, Springer Verlag, 1996.

[Bouchon-Meunier *et al.*, 2003]: B. Bouchon-Meunier, C. MARSALA, *Logique floue, principes, aide à la décision*, Hermès, Paris, pp. 252, 2003.

[Boughzala, 2001]: I. Boughzala, *Démarche méthodologique de conception de systèmes d'information coopératifs inter-agents pour la gestion des connaissances*, Thèse de Doctorat, Université de Paris VI, 2001.

[Boumane *et al.*, 2003]: A. Boumane, A. Talbi, D. Bouami, C. Tahon, *Contribution méthodologique à la construction d'un référentiel de compétences en maintenance industrielle*, Colloque Francophone sur le thème : Performances et Nouvelles Technologies en Maintenance, 2003.

[Bouzidi-Hassini *et al.*, 2012]: S. Bouzidi-Hassini, F. Benbouzid-Si Tayeb, S. Aknine, *A Multi Agent Scheduling Integrating Planning and Maintenance for Generalized Floor Shops*, In proceeding

of the The International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists, vol. 2, pp. 877-882, Hong Kong, 14-16 March, 2012.

[Bouzidi-Hassini *et al.*, 2013]:S. Bouzidi-Hassini, F. Benbouzid-Si Tayeb, *Multi-Agent based Joint Production and Maintenance Scheduling Considering Human Resources*, Proceeding of the 5th International conference on modeling simulation and applied optimization ICMSAO'13, Hammamet, Tunisie, 28-30 Avril 2013.

[Bouzidi-Hassini *et al.*, 2014]:S. Bouzidi-Hassini, S. Bourahla, Y. Saboun, F. Benbouzid-Si Tayeb, S. Khelifati, *ETOMA: A Multi-Agent Tool for Shop Scheduling Problems*, Advanced Approaches to Intelligent Information and Database Systems Studies in Computational Intelligence, Springer International Publishing, vol. 551, pp. 79-88, 2014,

[Bouzidi-Hassini *et al.*, 2015]:S. Bouzidi-Hassini, F. Benbouzid-Si Tayeb, F. Marmier, M. Rabahi, *Considering Human Resource Constraints for Real Joint Production and Maintenance Schedules*, Computers & Industrial Engineering (CAIE), Elsevier, vol. 90, pp.197-211, 2015.

[Briand *et al.*, 2003]: C.Briand, H.T. La, *Une procédure par séparation et évaluation progressive pour l'ordonnancement robuste de problème à une machine*, RVIF03, Première conférence internationale associant chercheurs vietnamiens et francophones en informatique, 2003.

[Briand *et al.*, 2010]: C. Briand, S. Ourari, B. Bouzouia, *Un algorithme coopératif pour un problème d`atelier job shop multi agents*. 8ème Conférence internationale de modélisation et simulation - MOSIM`10, Hammamet, Tunisie, 2010.

[Briand *et al.*, 2013]: C. Briand, S. Ourari, *Minimizing the number of tardy jobs for the single machine scheduling problem: MIP-based lower and upper bounds*, RAIRO - Operations Research, vol.47, pp. 33-46, January 2013.

[Carlier, 1984]: J. Carlier, *Problèmes d'Ordonnancement à Contraintes de Ressources : algorithmes et complexité*, Thèse d'état, Université Pierre et Marie Curie, Institut de programmation, Paris, France, Mai 1984.

[Carlier *et al.*, 1988]: J. Carlier, P. Chretienne, *Problèmes d'ordonnancement : Modélisation Complexité, Algorithmes. Etude et recherche en informatique (ERI)*, Edition MASSON, 1988.

[Castanier, 2002]: B. Castanier, *Modélisation stochastique et optimisation de la maintenance conditionnelle des systèmes à dégradation graduelle*, Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Troyes, France, 2002.

[Chaari, 2010]: T. Chaabi, *Un algorithme génétique pour l'ordonnancement robuste : application au problème du flow shop hybride,* Thèse de Doctorat. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, France, 2010.

[Charon *et al.*, 1996]: I. Charon, A. Germa, O. Hudry, *Méthodes d'optimisation combinatoire*, Masson, Paris, 1996.

[Chebel-Morello, 2009]: B. Chebel-Morello, K. Haouchine, N. Zerhouni, *A methodology to conceive a case based system of industrial diagnosis*, In World Congress of Engineering Asset Management, Greece, 2009.

[Chen, 1995]: S.M. Chen, *Fuzzy system reliability analysis using fuzzy number arithmetic operations*, Fuzzy Sets and Systems, vol. 69, 1995.

[Chen *et al.*, 2014]: S.-H. Chen, M.C. Chen, Y.C. Liou, *Artificial chromosomes with genetic algorithm 2 (ACGA2) for single machine scheduling problems with sequence-dependent setup times*, Applied Soft Computing, vol. 17, pp. 167-175, 2014.

[Cheng *et al.*, 2005]: T.C.E. Cheng, C.T. Ng, J.J. Yuan, Z.H. Liu, *Single machine scheduling to minimize total weighted tardiness*, European Journal of Operational Research, vol. 165, pp. 423-443, 2005.

[Cheurfa, 2005]: M. Cheurfa, *Gestion des ressources humaines en production cyclique*, Thèse de Doctorat, Ecole des mines de Sainte Etienne, France, 2005.

[Cho *et al.*, 1998]: K.K. Cho, J.S. Oh, K.R. Ryu, H.R. Choi, *An Integrated Process Planning and Scheduling System for Block Assembly in Shipbuilding*, Annals of the ClRP, vol. 47, 1, 1998.

[Colorni *et al.*, 1992] : M. Colorni, Dorigo, V. Maniezzo, *An investigation of some proprieties of an Ant algorithm*. In Manner and Manderick, pp. 509–520, 1992.

[Dantzig, 1963] : G.B. Dantzig, *Linear programming and extensions*, a report prepared for united States Air force Project Rand, 1963.

[Davenport *et al.*, 2000]: A.J. DavenportetJ.C. Beck, *A survey of techniques for scheduling with uncertainty*, 2000, Disponible à: http://www.eil.utoronto.ca/profiles/chris/chris.papers.html.

[De Snoo *et al.*, 2011]: C. De Snoo, W.V Wezel, J.C. Wortmann, G.J.C. Gaalman, *Coordination activities of human planners during rescheduling: case analysis and event handling procedure*, International Journal of Production Research, vol. 49, no. 7, pp. 2101–2122, April 2011,

[Dhand *et al.*, 2016]: S. Dhand , A. Singla, *Sensitivity Analysis and Optimal Production Scheduling as a Dual Phase Simplex Model*, Indian Journal of science and technology, vol. 9, no. 39, October 2016.

[Dong *et al.*, 2015]: L. Dong, P. Bettinger, Z. Liu, H. Qin, *A comparison of a neighborhood search technique for forest spatial harvest scheduling problems: A case study of the simulated annealing algorithm,* Forest Ecology and Management, vol. 356, pp. 124-135, 15 November 2015.

[Dubois *et al.*, 1985]: D. Dubois, H. Prade, *Théorie des possibilités: applications à la représentation des connaissances en informatique*, Paris: Masson, 1985.

[El Khatib *et al.*, 2000]: A. El Khatib, G. A. Nassef, M. N. Fors, *Scheduling of condition-based predictive maintenance in ANSDK using computer-based on-line monitoring network*, Energy engineering, vol. 97, no. 5, pp. 63-79, 2000.

[Ernst *et al.*, 2004]: A.T. Ernst, H. Jiang, M. Krishnamoorthy, B. Owens, D. Sier, *Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models*, European Journal of Operational Research, vol. 153, no. 3, pp.3-27, 2004.

[Esswein, 2003]: C. Esswein, *Un apport de flexibilité séquentielle pour l'ordonnancement robuste*, Thèse de Doctorat, Université François Rabelais, Tours, France, Décembre 2003.

[FIPA, 1996]: *Foundation of Intelligent Physical Agents*, http://www.fipa.org/.

[Fnaiech *et al.*, 2015] : N. Fnaiech, C. Fitouri, C. Varnier, F. Fnaiech, N. Zerhouni, *A New Heuristic Method for Solving Joint Job Shop Scheduling of Production and Maintenance*, IFAC-PapersOnLine, vol.48, no. 3, pp. 1802–1808, 2015.

[Galuszewska *et al.*, 2003] : M. Galuszewska, J.M. Sahut, Intelligent Agent Stake for E-Commerce, SAINT-W '03, Proceedings of the 2003 Symposium on Applications and the Internet Workshops (SAINT'03 Workshops), 2003.

[Garey *et al.*, 1979]: R.M. Garey , S.M. Johnson, *Computers and Intractability, A guide to the Theory of NP-Completeness*, W.H. Freeman and Co., San Francisco, 1979.

[Gunes, 1999]: E. D. Gunes, *Workforce Scheduling, TR-06533*, Department of Industrial Engineering Bilkent University Ankara, April 1999.

[GomezUrruta, 2014]: E.D. GomezUrruta, *Optimisation intégrée des décisions en planification et ordonnancement dans une chaîne logistique*, Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 2014.

[GOThA, 2002]: GOThA. *Flexibilité et Robustesse en Ordonnancement*, Le bulletin de la ROADEF, vol. 8, pp. 10-12, 2002.

[Graham *et al.*, 1979]:R.L. Graham, E.L. Lawler, J.K. Lenstra, A.H.G. RinnooyKan, *Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling : a survey*. Annals of Discrete Mathematics, vol. 5, pp. 287-326, 1979.

[Glover, 1986]: F. Glover, *Future paths for integer programming and links to artificial intelligence*, Computers and Operations Research, vol. 13, pp.533- 549, 1986.

[Goldberg, 1989]: D.E. Goldberg, *Genetic algorithms in search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston, MA, USA, 1989.

[Grusenmeyer, 2000]: C. Grusenmeyer. *Organisation de la maintenance et interactions Maintenance-production dans une fonderie d'aluminium*, Rapport de recherche, Notes scientifiques et techniques de l'INRS NS 182, Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS), 2000.

[Guillaume *et al.*, 2014 : R. Guillaume, R. Houé, B. Grabot, *Robust competence assessment for job assignment*, European Journal of Operational Research, vol. 238, pp. 630–644, 2014.

[Guyon *et al.*, 2010]: O. Guyon, P. Lemaire, E. Pinson, D. Rivreau, *Cut generation for an integrated employee timetabling and production scheduling problem*, European Journal of Operational Research, vol. 201, no. 2, pp. 557–567, 2010.

[Haimes, 1998]: Y.Y. Haimes, *Risk modeling, assessment and management*, Wiley Series in Systems Engineering, John Wiley and Sons, Inc., pp. 720, 1998.

[Hall *et al.*, 2004]: N.G. Hall, M.E. Posner, *Sensitivity analysis for scheduling problems*, Journal of Scheduling, vol. 7, pp. 49-83, 2004.

[Hanemann, 2006]: A. Hanemann, *A Hybrid Rule-Based/Case-Based Reasoning Approach for Service Fault Diagnosis*, Proceedings of 20th International Conference on Advanced Information Networking and Applications, Austria, 2006.

[Herroelen *et al.*, 2005]: W.S. Herroelen, R. Leus, *Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials*. European Journal of Operational Research, vol.165, no. 2, pp. 289-306, 2005.

[Hertz *et al.*, 1996]: A. Hertz, M. Widmer, *An improved tabu search approach for solving the job shop scheduling problem with tooling constraints*, Discrete Applied Mathematics, vol. 65, no. 1–3, pp. 319-345, 7 March 1996.

[Hopp *et al.*, 1998]: W.J. Hopp, Y.L. Kuo, *An optimal structured policy for maintenance of partially observable aircraft engine components*, Naval Research Logistics, vol. 45, pp. 335–352, 1998.

[Holland, 1975]: J. H. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems*, University of Michigan press, 1975.

[Huegler *et al.*, 1997]:P.A. Huegler, F.J. Vasko, *A performance comparison of heuristics for the total weighted tardiness problem*, *Computers iml. Engng,* vol.32, No. 4, pp. 753 767, 1997.

[Jain *et al.*, 1999]: A.S. Jain, S. Meeran, *Deterministic job-shop scheduling: past, present and future*, European Journal of Operational Research, vol. 113, pp. 390-434, 1999.

[JIPM, 2017]: Guide pratique de la TPM par Japan Institute of Plant Maintenance Editions IQM (Institut Qualité et Management), https://www.jipm.or.jp/en, 2017.

[Kaabi-Harrath, 2004]: J. Kaabi-Harrath, *Contribution à l'ordonnancement des activités de maintenance dans les systèmes de production*, Thèse de Doctorat, L'UFR Des Sciences et Techniques De L'université de Franche-Comté, 2004

[Kaabi *et al.*, 2014]: J.Kaabi, Y.Harrath, *A Survey of Parallel Machine Scheduling under Availability Constraints*, International Journal of Computer and Information Technology, vol. 3, no. 02, March 2014.

[Kacem *et al.*, 2002]: I. Kacem, S. Hammadi, P. Borne, *Pareto-optimality approach for flexible job shop scheduling problems: Hybridization of evolutionary algorithms and fuzzy logic*. Mathematics and Computers in Simulation, vol. 60, pp.245- 276, 2002.

[Kauffman, 1978]: A. Kaufmann, *Introduction à la théorie des sous-ensembles flous à l'usage des ingénieurs: applications à la linguistique, à la logique et à la sémantique*, *Masson, Paris,* 1978.

[Kan, 2012]: A.H.G.R. Kan, *Machine scheduling problems*, Classification, complexity and computations, Springer Science & Business Media, 2012.

[Keffal, 2001]: H. Kaffel, *La Maintenance distribuée: concept, évaluation et mise en œuvre*, Thèse de Doctorat, faculté des études supérieures de l'Université Laval, France, 2001.

[Khelifati *et al.*, 2011] : S. Khelifati, F. Benbouzid-Sitayeb, *A multi-agent approach for scheduling jobs and maintenance operations in the flow shop sequencing problem*, International Journal of Intelligent Engineering Informatics, vol. 2, no. 1, pp. 47–70, 2011.

[Kim *et al.*, 2003] : Y.K. Kim, K. Park, J. Ko, *A symbiotic evolutionary algorithm for the integration of process planning and job shop scheduling*, Computers & Operations Research, vol. 30, pp. 1151–1171, 2003.

[Kirkpatrick *et al.*, 1983]:S. Kirkpatrick, C.D.J. Gelatt, M.P. Vecchi, *Optimization by simulated Annealing*. Science, vol. 220, 1983.

[Kouiss *et al.*, 1997]: K. Kouiss, H. Pierreval, N. Mebarki, *Using multi-agent architecture in FMS for dynamic scheduling*, Journal of Intelligent Manufacturing, vol.8, pp. 41-47, 1997.

[Kodaganallur *et al.*, 2014]: V. Kodaganallur, A. K. Sen, and S. Mitra, *Application of graph search and genetic algorithms for the single machine scheduling problem with sequence-dependent setup times and quadratic penalty function of completion times*, Computers & Industrial Engineering, vol. 67, pp. 10-19, 2014.

[La, 2005]: H.T. La, *Utilisation d'ordres partiels pour la caractérisation des solutions robustes en ordonnancement*. Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, France, 2005.

[Ladj *et al.*, 2015]: A. Ladj , C. Varnier, F. Benbouzid-Si Tayeb, *IPro-GA: an integrated prognostic based GA for scheduling jobs and predictive maintenance in a single multifunctional machine*, IFAC-PapersOnLine, vol.49, no. 12, pp. 1821-1826, 2016.

[Letouzey , 2001]: A. Letouzey, *Ordonnancement interactif basé sur des indicateurs : Application à la gestion de commandes incertaines et à l'affectation des opérateurs*, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2001.

[Levasseur *et al.*, 2007]:N. Levasseur, P. Boizumault, S. Loudni, *A Value Ordering Heuristic for Weighted CSP*, In 19-th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence, (ICTAI'07), vol. 1, pp. 259–262, Patras, Greece, 2007.

[Levasseur *et al.*, 2008]: N. Levasseur, P. Boizumault, S. Loudni, *Boosting VNS with Neighborhood Heuristics for Solving Constraint Optimization Problems*, Chapter Hybrid Metaheuristics, Volume 5296 of the series Lecture Notes in Computer Science, pp. 131-145, 2008.

[Lawler *et al.*, 1966]: E.L. Lawler, D.E. Wood, *Branch and bound methods: A survey*, Operations Research, vol. 14, pp. 699-719, 1966.

[Liu *et al.*, 2009]: H. Liu, A. Abraham, Z. Wang, *Multi-swarm Approach to Multi-objective Flexible Job-shop Scheduling Problems*, Fundamenta Informaticae, vol. 95, pp. 1–25, 2009.

[Li *et al.*, 2009]: N. Li, Z. Hong, H. Xiaoting, *Dynamic Integration Mechanism for Job-Shop Scheduling Model Base Using Multi-Agent*. Proceeding of the 2009 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering, 2009.

[Li *et al.*, 2010]: X. Li , C. Zhang, L. Gao, W. Li , X. Shao, *An agent-based approach for integrated process planning and scheduling*, Journal of Expert Systems with Applications, vol. 37, pp. 1256 -1264, 2010.

[Lim *et al.*, 2009]: M.K. Lim, Z. Zhang, W.T. Goh, *An iterative agent bidding mechanism for responsive manufacturing*, Journal of Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 22, pp. 1068 –1079, 2009.

[Lopez *et al.*, 2001]: P. Lopez, F. Roubellat, *Ordonnancement de la production*, Hermès, Paris, ISBN 2-7462-0184-4, 2001.

[Lu *et al.*, 2015]: Z. Lu, W. Cui, X. Han, *Integrated production and preventive maintenance scheduling for a single machine with failure uncertainty*, Computers & Industrial Engineering, vol. 80, pp. 236–244, 2015.

[Lyonnais, 1992]: P. Lyonnais, *Maintenance mathématique et méthode*, Troisième édition, Technique et édition Lavoisier, France, 1992.

[Magique, 1995]: *Multi-AGent hiérarchIQUE*, http://www.lifl.fr/MAGIQUE/presentation/.

[Marmier, 2007]: F. Marmier, *Contribution à l'ordonnancement des activités de maintenance sous contrainte de compétence : une approche dynamique, proactive et multicritères,* Thèse de Doctorat, Université Franche-Comte, France, 2007.

[Martorell *et al.*, 2010]: S. Martorell, M.Villamizar, S.Carlos, A.Sanchez, *Maintenance modeling and optimization integrating human and material resources*, Reliability Engineering and System Safety, vol. 95, pp. 1293–1299, 2010.

[Masc, 2010]: *Mascplatform*, http://www.irit.fr/MASC.

[Mathieu *et al.*, 2005]: P. Mathieu, J.C. Routier, Y. Secq, *Multi-Agent hiérarchique*. http://www2.lifl.fr/SMAC/projects/magique/presentation/presentationContent.html#intro.

[Matta, 2009]: M.E. Matta, *A genetic algorithm for the proportionate multiprocessor open shop*, Computer Operational Research, vol. 36, pp. 2601–2618, 2009.

[Matsveichuk *et al.*, 2009]: N.M. Matsveichuk, Y.N. Sotskov, N.M. Egorova, T.C. Lai, *Schedule execution for two-machine flow-shop with interval processing times*, Mathematical and Computer Modelling, vol.49, no 5-6, pp. 991-1011, 2009.

[Meunier, 2012] : A. Meunier, *Fonction maintenance, Gestion des pièces de rechange. Les leviers de l'optimisation*, Magazine Argon, http://www.argon-consult.com/fr.

[Mifdal *et al.*, 2014]: L. Mifdal, Z. Hajej, S. Dellagi, *Joint optimization approach of maintenance planning and production scheduling for a multiple-product manufacturing system*, Proceedings of the 19th World Congress, The International Federation of Automatic Control, Cape Town, South Africa, August 24-29, 2014.

[Minou *et al.*, 2016]: C.A. Minou, K. Olde, H.T. Ruud, V. Jasper, *Joint condition-based maintenance and inventory optimization for systems with multiple components*, European Journal of Operational Research, vol. 257, pp. 209–222, 2016.

[Mirabedini *et al.*, 2013]: S. N. Mirabedini, H. Iranmanesh, *A scheduling model for serial jobs on parallel machines with different preventive maintenance (PM)*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 70, no.9, pp. 1579–1589, 2013.

[Mohamad *et al.*, 2011]: N.H. Mohamad, F. Said, *Solving Single Machine Scheduling Problem With Common Due Date*, Business Management Dynamics, vol.1, no.4, Oct 2011, pp.63-72.

[Mokhtari *et al.*, 2011]: H. Mokhtari, A. Mozdgir, I.N.K. Abadi, *A reliability/availability approach to joint production and maintenance scheduling with multiple preventive maintenance services*, International Journal of Production Research, vol. 50, no. 20, pp.5906–5925, 2011.

[Monchy, 1991] : F. Monchy, *La fonction maintenance : Formation à la gestion de la maintenance industrielle*, Collection technologies de l'université à l'industrie, MASSON, 1991.

[Monk, 2005]: E. Monk, *Concepts in Entreprise Resource Planning*, Course Technology 2nd ed., 2005

[Nesterov *et al.*, 1995] : Y.E. Nesterov, A.S. Nemirovskii, *An interior point method for generalized linear-fractional programming.* Mathematical Programming, vol. 69, no. 1, pp. 177–204, July 1995.

[Neufeld *et al.*, 2016]: J.S.Neufeld, J.N.D.Gupta, U. Buscher, *A comprehensive review of flowshop group scheduling literature*, Computers &Operations Research, vol. 70, pp. 56–74, 2016.

[Nguyen *et al.*, 2008] : D. Nguyen, M. Bagajewicz, *Optimization of Preventive Maintenance Scheduling in Processing Plants*, 18th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE 18, 2008.

[Nowicki *et al.*, 1986]: E. Nowicki, S.Zdrzalka, *A note on minimizing maximum lateness in a one-machine sequencing problem with release dates*, European Journal of Operational Research, vol. 23, no. 2, pp. 266-267, February 1986.

[Nowicki *et al.*, 1996]: E. Nowicki, C. Smutnicki, *A fast taboo search algorithm for the job shop problem*, Management Science, vol. 42, no. 6, June 1996.

[Orlicky, 1975]: J. Orlicky, Material Requirement Planning, Editions McGraw- Hill, 1975.

[Ourari, 2010]: S. Ourari, *De l'ordonnancement déterministe à l'ordonnancement distribué sous incertitudes.* Thèse de doctorat, Ecole nationale Supérieure d'informatique, Alger, Algérie, Novembre 2010.

[Owliya *et al.*, 2010]: M. Owliya, M. Saadat, M. Goharian, R. Anane, *Agents-based Interaction Protocols and Topologies in Manufacturing Task Allocation*, Proceeding of the 5th International Conference on System of Systems Engineering, 2010.

[Pan *et al.*, 2012]: E. Pan, W. Liao, L. Xi, *A joint model of production scheduling and predictive maintenance for minimizing job tardiness*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 60, no. 9, pp. 1049–1061, June 2012.

[Papadimitriou *et al.*, 1982]: C.H. Papadimitriou, K. Steiglitz, *Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity*. Prentice-Hall, 1982.

[Peng *et al.*, 2016]: H. Peng, G.J. Van Houtum, *Joint optimization of condition-based maintenance and production lot-sizing*, European Journal of Operational Research, vol. 253, pp. 94–107, 2016.

[Phuc *et al.*, 2010]: D.V. Phuc, C. Bérenguer, *Condition based maintenance model for a production deteriorating system*, In Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol), 2010 Conference on. IEEE, pp. 424-429, 2010.

[Pinedo, 1995]: M. Pinedo, *Scheduling Theory, Algorithms and Systems*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1995.

[Petrovic *et al.*, 2011]: S.Petrovic, D. Petrovic, E. Burke, *Fuzzy logic-based production scheduling and rescheduling in the presence of uncertainty*, International Series in Operations Research & Management Science, vol. 152, pp. 531–562, 2011.

[Pichot *et al.*, 2001]: L. Pichot, P. Baptiste, *Ordonnancement de ressources humaines : Etude du cas d'une entreprise d'injection plastique*, 3ème Conférence Francophone de Modélisation et SIMulation "Conception, Analyse et Gestion des Systèmes Industriels", MOSIM'01 – du 25 Avril au 27 avril 2001, Troyes (France).

[Piltan *et al.*, 2011]: F. Piltan, A. Salehi, N.B. Sulaiman, *Design Artificial Robust Control of Second Order System Based on Adaptive Fuzzy Gain Scheduling*, World Applied Sciences Journal, vol. 13, no. 5, pp. 1085-1092, 2011.

[Pinot, 2008]:G. Pinot, *Coopération homme-machine pour l'ordonnancement sous incertitudes*. Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France, 2008.

[Rausch, 2010]: M. Rausch, *Joint Production and Spare Part Inventory Control Strategy Driven by Condition Based Maintenance*, IEEE Transactions On Reliability, vol. 59, no. 3, September 2010.

[Rodammer *et al.*, 1988]: F. Rodammer, P.K. White, *A Recent Survey of Production Scheduling*, IEEETransactions on System, Man and Cybernetics, vol. 18, no. 6, pp.841-851, 1988.

[Ronconi *et al.*, 2010] : D.P. Ronconi, M.S. Kawamura, *The single machine earliness and tardiness scheduling problem: lower bounds and a branch-and-bound algorithm*, Computational & Appplied Mathematics, vol.29, no.2, 2010.

[Rossi, 2003] : A. Rossi, *Ordonnancement en milieu incertain Mise en œuvre d'une démarche robuste*, Thèse de doctorat. Institut national polytechnique de Grenoble, France, 2003.

[Sabar *et al.*, 2005]:M. Sabar, B. Montreuil, J.M. Frayret, *Competency and preference based personnel scheduling in large assembly lines*. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, vol. 21, no. 4, pp.468–479, 2005.

[Sabar *et al.*, 2009]: M. Sabar, B. Montreuil, J.M. Frayret, *A multi-agent-based approach for personnel scheduling in assembly centers*, Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 22, pp.1080–1088, 2009

[Sabuncuoglu *et al.*, 2009]: I. Sabuncuoglu, S. Goren, *Hedging Production Schedules Against Uncertainty In Manufacturing Environment With A Review Of Robustness And Stability Research*, International Journal of Computer Integrated Manufacturing , vol. 22, no. 2, 2009.

[Sanvanille, 2005] : E. Sanvanille, *Ordonnancement sous conditions changeantes: Comment prendre en compte les variations, aléas, incertitudes sur les données*. Rapport de HDR, Université de Clermont-Ferrand, France, 2005.

[Seker *et al.*, 2013] : A. Seker, S.Erol, R. Botsali, *A neuro-fuzzy model for a new hybrid integrated Process Planning and Scheduling system*, Expert Systems with Applications, vol. 40, no. 13, Pages 5341–5351, October 2013.

[Senthilkumar *et al.*, 2010]: P. Senthilkumar, S. Narayanan, *Literature Review of Single Machine Scheduling Problem with Uniform Parallel Machines*, Intelligent Information Management, vol. 2, pp.457-474, 2010.

[Shakhlevich *et al.*, 2005]: N.V. Shakhlevich, V.A. Strusevich, *Pre-emptive scheduling problems with controllable processing times*, Journal of Scheduling, vol. 8, pp. 233-253, 2005.

[Shao *et al.*, 2009] : X. Shao, X. Li, L. Gao, C. Zhang, *Integration of process planning and scheduling – A modified genetic algorithm-based approach*, Computers & Operations Research, vol. 36, pp. 2082 – 2096, 2009.

[Smith, 1980]: R.G. Smith, *The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver*, IEEE Transactions on Computers, vol. C-29, no. 12, 1980.

[Taillard, 1993]: E. Taillard, *Benchmarks for basic scheduling problems*. European Journal of Operational Research, vol. 64, no.2, pp.278-285, 1993.

[TehraniNikNejad *et al.*, 2008]: H. TehraniNikNejad, H. Sugimura, N. Iwamura, Y. Tanimizu, *Multi agent architecture for dynamic incremental process planning in the flexible manufacturing system*. Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 21, no.4, pp.487–499, 2008.

[T'kindt, 1999] : V. T'Kindt, *Etude des problèmes d'ordonnancement multicritères,* Thèse de Doctorat soutenue à l'Université François Rabelais, Tours, France, 1999.

[Tobon-Mejia *et al.*, 2011] : D. Tobon-Mejia, K. Medjaher, N. Zerhouni, G. Tripot, *Hidden Markov models for failure diagnostic and prognostic*, In Prognostics and System Health Management, IEEE Catalog Number : CFPII6IH-PRT, pp.1–8, Shenzhen, Chine, 2011.

[Touat *et al.*, 2014]:M. Touat, S. Bouzidi-Hassini, F. Benbouzid-Si Tayeb, *Une approche proactive/réactive pour l'ordonnancement conjoint de production et de maintenance avec contraintes de ressources humaines*, 10ème Conférence Francophone De Modélisation, Optimisation Et Simulation- MOSIM'14 (France), 5 – 7 Novembre 2014.

[Trentesaux, 1996] : D. Trentesaux, *Conception d'un système de pilotage distribué, supervisé et multicritère pour les systèmes automatisés de production*, Thèse de Doctorat en Automatique - Productique, Institut National Polytechnique de Grenoble, soutenue le 24 janvier 1996.

[Trung, 2005] :L.H. Trung, *Utilisation d'ordre partiel pour la caractérisation des solutions robustes en ordonnancement*, Thèse de Doctorat, Institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2005.

[Upton, 1994]: D. Upton, *The management of manufacturing flexibility*, California Management Review Winter, pp.72–89, 1994.

[VanLaarhoven *et al.*, 1992]: P.J. M. VanLaarhoven, E.H. L. Aarts, J.K. Lenstra, *Job Shop Scheduling by Simulated Annealing, Operations Research*, vol. 40, no. 1, pp. 113-125, , 1992.

[Vob et al., 2006]: S. Vob, D.L. Woodruff, *Introduction to Computational Optimization Models for Production Planning in a Supply Chain,* 2nd ed. Springer, 2006.

[Wang *et al.*, 2015]: S. Wang, M. Liu, *Multi-objective optimization of parallel machine scheduling integrated with multi-resources preventive maintenance planning*, Journal of Manufacturing Systems, vol. 37, pp.182–192, 2015.

[Wolosewicz, 2008] : C. Wolosewicz, *Approche intégrée en planification et ordonnancement de la production*, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2008.

[Wojakowski *et al.*, 2014] : P. Wojakowski, D. Warżołek, *The Classification Of Scheduling Problems Under Production Uncertainty*, Research in logistics and production, vol. 4, no. 3, pp. 245-255, 2014.

[Wong *et al.*, 2013]: C.S. Wong, F.T.S. Chan, S.H. Chung, *A joint production scheduling approach considering multiple resources and preventive maintenance tasks*, International Journal of Production Research, vol.51, no. 3, pp. 883–896, 2013

[Xia *et al.*, 2005]: W. Xia, Z. Wu, *An effective hybrid optimization approach for multi-objective flexible job-shop scheduling problems*, Computers and Industrial Engineering, vol., 48, no. 2, pp.409 – 425, 2005.

[Ye *et al.*, 2015]: J. Ye, H. Ma, *Multi-objective Joint Optimization of Production Scheduling and Maintenance Planning in the Flexible Job-Shop Problem*, Mathematical Problems in Engineering, vol. 2015, 2015.

[Xiao *et al.*, 2016] : L. Xiao, S. Song, X. Chen, D.W. Coit, *Joint optimization of production scheduling and machine group preventive maintenance*, Reliability Engineering and System Safety, vol. 146, pp. 68–78, 2016.

[Zadeh, 1965]: L.A. Zadeh, *Fuzzy sets*, Information and control, vol. 8, pp. 338-353, 1965.

[Zeghal *et al.*, 2001] : F. Zeghal, M. Minoux, *Modélisation et résolution d'un problème d'affectation d'équipages en transport aérien*, 3e Conférence Francophone de Modélisation et SIMulation, Conception, Analyse et Gestion des Systèmes Industriels, Troyes (France), 2001.

[Zheng *et al.*, 2013]: Y. Zheng, K. Mesghouni, S. C. Dutilleul, *Condition based Maintenance applied to Reduce Unavailability of Machines in Flexible Job Shop Scheduling Problem*, 7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control International Federation of Automatic Control, Saint Petersburg, Russia, June 19-21, 2013.