



HAL
open science

Contribution à l'ordonnancement des activités de maintenance sous contrainte de compétence: une approche dynamique, proactive et multi-critère.

François Marmier

► To cite this version:

François Marmier. Contribution à l'ordonnancement des activités de maintenance sous contrainte de compétence: une approche dynamique, proactive et multi-critère.. Automatique / Robotique. Université de Franche-Comté, 2007. Français. NNT: . tel-00212750

HAL Id: tel-00212750

<https://theses.hal.science/tel-00212750>

Submitted on 23 Jan 2008

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.

Année : 2007

THÈSE

présentée à

**L'U.F.R. DES SCIENCES ET TECHNIQUES
DE L'UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ**

pour obtenir le

**GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ
DE FRANCHE-COMTÉ**

en **AUTOMATIQUE**

(École Doctorale Sciences Physiques pour l'Ingénieur et Microtechniques)

**Contribution à l'ordonnancement des activités de maintenance
sous contrainte de compétence :
une approche dynamique, proactive et multi-critère**

par

François MARMIER

Soutenu le 12 Décembre 2007 devant la Commission d'Examen :

Rapporteurs :

Alexandre DOLGUI

Professeur, ENSMSE, Saint-Étienne

Nidhal REZG

Professeur, Université Paul Verlaine, Metz

Examineurs :

Michel FERNEY

Professeur, UTBM, Belfort-Montbéliard

Kondo Hloindo ADJALLAH

Maître de Conférences - HDR, UTT, Troyes

Pascal BRESSY

Ingénieur, DCNS Ingénierie, Toulon

Directeurs de thèse :

Noureddine ZERHOUNI

Professeur, ENSMM Franche-Comté

Christophe VARNIER

Maître de Conférences, ENSMM Franche-Comté

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier ma petite Nanou pour qui mes soirées et week-ends de rédaction, mais aussi les relectures ont paru très longues. De plus, gérer un thésard en plus d'un bébé n'est pas très évident au jour le jour...

J'adresse toute ma reconnaissance à mes directeurs de thèse, Messieurs Nouredine Zerhouni, professeur et Christophe Varnier, Maître de Conférences, tous deux à l'École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques de Besançon (ENSM) pour leur encadrement remarquable. Leur compétence, leur disponibilité, leur confiance et les échanges que nous avons eu tout au long de ces années m'ont beaucoup appris.

Ces travaux de thèse ont été réalisés au Laboratoire d'Automatique de Besançon (LAB). Je remercie donc Monsieur Alain BOURJAULT, qui en a été le directeur durant mes deux premières années et je remercie au même titre Monsieur Nicolas Chaillet qui lui a succédé au début de ma troisième année. Tous deux ont contribué aux excellentes conditions de travail dans lesquelles se sont déroulées mes recherches.

Je remercie très sincèrement, l'ensemble du personnel du LAB pour l'ambiance particulièrement agréable qui y règne et tous ceux qui, au fil du temps, sont devenus des amis. Il y a aussi ceux qui n'y sont plus, je pense à Slava, Dada, Nico et Juju.

Je n'oublie pas ma famille du G4power (Laeti, Félie, Mook, Kurde, Cricri, Taliboule, Lao, Fiff). Je me souviens encore de leur crise de rire lorsqu'ils ont appris que je voulais devenir chercheur.

Je remercie aussi Messieurs Alexandre Dolgui, Professeur à l'ENSMSE de Saint-Etienne et Monsieur Nidhal Rezg Professeur à l'Université Paul Verlaine de Metz pour m'avoir fait l'honneur de rapporter ces travaux. Je tiens également à remercier Monsieur Michel Ferney, Professeur à l'UTBM, pour avoir présidé ma soutenance de thèse ainsi que Kondo Hloindo Adjallah, Maître de Conférences - HDR à l'UTT et Pascal Bressy, Ingénieur à DCNS Ingénierie, pour avoir accepté d'évaluer ces travaux.

François

Table des matières

Introduction générale	4
I Organisation et gestion des activités de maintenance industrielle	5
I.1 Introduction à la maintenance	6
I.1.1 Définitions	6
I.1.2 Les différentes stratégies de maintenance	8
I.1.2.1 La maintenance préventive	8
I.1.2.2 La maintenance corrective	9
I.1.2.3 La maintenance améliorative	9
I.1.2.4 Classification des tâches de maintenance	10
I.1.3 Les ressources du système de maintenance	10
I.1.3.1 Les pièces de rechange	11
I.1.3.2 L'outillage	12
I.1.3.3 Les ressources humaines en maintenance	12
I.2 De la maintenance à la e-maintenance	13
I.2.1 La maintenance à distance	14
I.2.1.1 La télémaintenance	14
I.2.1.2 La e-maintenance	15
I.2.1.3 La plate-forme e-maintenance	16
I.2.2 Organisation des services de maintenance	17
I.2.2.1 La maintenance décentralisée	17
I.2.2.2 La maintenance centralisée	17
I.2.2.3 Les organisations mixtes	18
I.2.2.4 La politique de l'activité	18
I.3 Décomposition fonctionnelle des services de maintenance	20
I.3.1 Une organisation stratégique des activités de maintenance	21
I.3.1.1 Politique de maintenance	22
I.3.1.2 Définition et utilisation du cadre contractuel	24
I.3.1.3 La GMAO : un support stratégique pour de l'information	26
I.3.1.4 Indicateurs et objectifs	27
I.3.2 La programmation tactique des activités de maintenance	29
I.3.2.1 Le processus de maintenance	29
I.3.2.2 Lien entre la maintenance et la production	30

I.3.2.3	Les ressources humaines et leurs compétences	31
I.3.3	La maintenance du point de vue opérationnel	33
I.3.3.1	Engagements et pénalités	34
I.3.3.2	Support informatique de gestion des ressources et des activités	35
I.3.3.3	Affectation tâches/ressources	36
I.4	Conclusion	36
II	Ordonnancement des activités de maintenance	39
II.1	Introduction aux problèmes d'ordonnancement	40
II.1.1	Définitions	40
II.1.2	Notations	41
II.1.3	Représentations	42
II.1.4	Typologie des problèmes	43
II.1.4.1	Les problèmes à une machine	43
II.1.4.2	Les problèmes à machines parallèles	43
II.1.4.3	Les problèmes d'atelier multi-machines	44
II.1.5	Contraintes	44
II.1.6	Objectifs et critères d'évaluations	45
II.1.7	Approches de résolution	45
II.1.7.1	Les approches exactes	45
II.1.7.2	Les méthodes approchées	47
II.2	Les spécificités de l'ordonnancement en maintenance	47
II.2.1	L'ordonnancement et les ressources humaines	48
II.2.1.1	La prise en compte des ressources humaines	48
II.2.1.2	La prise en compte des compétences	49
II.2.2	L'ordonnancement suivant l'horizon	51
II.2.2.1	Ordonnancement et planification	51
II.2.2.2	Ordonnancement statique et dynamique	53
II.2.2.3	L'aspect stochastique des activités de maintenance	54
II.2.3	La prise en compte de l'urgence des tâches	55
II.2.3.1	Ordonnancement et prise en compte de l'urgence	55
II.2.3.2	Occupation et disponibilité des équipements	56
II.2.3.3	Remise en fonctionnement selon les priorités et l'urgence	57
II.2.4	Un problème multi-critère	58
II.2.5	Synthèse bibliographique	59
II.3	La robustesse des ordonnancements de maintenance	60
II.3.1	La robustesse en ordonnancement	60
II.3.1.1	Les sources d'incertitudes dans l'industrie	61
II.3.1.2	Les incertitudes en maintenance	62
II.3.1.3	Flexibilité et robustesse	63
II.3.2	Les différentes approches d'ordonnancement robuste	65
II.3.2.1	Les approches réactives	65
II.3.2.2	Les approches proactives	67

II.3.2.3	Les approches proactives-réactives	67
II.4	Conclusion	68
III	Heuristiques pour l'ordonnancement et l'affectation des activités de maintenance	71
III.1	Ordonnancement et affectation statique	72
III.1.1	Modélisation	73
III.1.1.1	Les tâches	73
III.1.1.2	Les ressources humaines	73
III.1.1.3	Variables	74
III.1.1.4	Contraintes	74
III.1.1.5	Objectif	75
III.1.1.6	Modèle mathématique	75
III.1.2	Affectation des tâches de maintenance	76
III.1.2.1	Algorithme de référence	76
III.1.2.2	Résolution du problème $R C_{max}$	77
III.1.3	Ordonnancement des tâches	81
III.1.4	Applications	83
III.1.4.1	Génération des données	83
III.1.4.2	Algorithme d'affectation	83
III.1.4.3	Prise en compte du critère des retards pondérés	85
III.1.5	Synthèse des tests	87
III.2	Ordonnancement et affectation dynamique	87
III.2.1	Modélisation de l'ordonnancement courant	88
III.2.1.1	Calcul des dates de début au plus tôt	89
III.2.1.2	Calcul des dates de début au plus tard	90
III.2.2	Heuristique d'insertion dynamique	93
III.2.3	Amélioration de la solution obtenue	94
III.2.4	Validation de notre approche	96
III.2.4.1	Insertion d'une tâche	96
III.2.4.2	Insertions successives de tâches	97
III.3	Conclusion	100
IV	Approche de résolution dynamique pour le problème multi-critère d'affectation et d'ordonnancement des activités de maintenance	103
IV.1	Justification d'une approche multi-critère	104
IV.1.1	Les différentes méthodes multi-critères	105
IV.1.1.1	Les méthodes élémentaires	105
IV.1.1.2	Les méthodes d'optimisation mathématique	106
IV.1.1.3	Les méthodes d'aide à la décision multi-critères	109
IV.1.2	Optimisation multi-critère en ordonnancement	111
IV.2	Présentation de l'approche développée	113
IV.2.1	Les critères étudiés	114
IV.2.2	Modélisation	115

IV.2.3	Fonctions objectifs	115
IV.2.4	Modèle mathématique	116
IV.2.5	Heuristique d'insertion dynamique	117
IV.3	Validation de notre approche	118
IV.3.1	Impact de l'ajout de critères supplémentaires	119
IV.3.2	Impact du choix de la solution courante	120
IV.4	Conclusion	123
V	Approche de résolution proactive pour le problème d'affectation et d'ordonnancement des activités de maintenance en contexte incertain	125
V.1	Les sources d'incertitudes en maintenance	126
V.1.1	La simulation dans la littérature	128
V.1.2	La logique floue dans la littérature	130
V.2	Approche basée sur la logique floue	132
V.2.1	Notations	132
V.2.2	Modélisation de l'ordonnancement courant	134
V.2.3	Évaluation de la robustesse	136
V.2.3.1	Modèle mathématique	138
V.2.3.2	Exemple	138
V.3	Approche de résolution	140
V.4	Validation de notre approche	140
V.4.1	Mesure de robustesse et somme pondérée des retards	140
V.4.2	Validation de l'approche robuste	141
V.4.2.1	Méthodologie	142
V.4.2.2	Applications numériques	143
V.4.3	Prise en compte de l'ensemble des critères	144
V.5	Conclusion	147
VI	Valorisation des compétences, un nouveau chapitre de thèse	149
VI.1	Cadre général et enjeux de ma thèse	149
VI.1.1	Environnement et contexte local	149
VI.1.2	Implication au niveau national	150
VI.1.3	Présentation du sujet	150
VI.2	Définition et évolution du sujet	151
VI.2.1	Choix du sujet	151
VI.2.2	Évolution du sujet déroulement de la thèse	151
VI.2.3	Application des travaux	153
VI.2.4	Bilan financier	153
VI.3	Compétences, savoir-faire, qualités professionnelles et personnelles illustrées par des exemples	154
VI.3.1	Informatique	154
VI.3.2	Langue anglaise	154
VI.3.3	Enseignement	155
VI.3.4	Relationnel	155

VI.3.5 Persévérance	155
VI.3.6 Capacité de synthèse et d'organisation	156
VI.3.7 Ouverture d'esprit	156
VI.4 Résultats et impact de la thèse	157
VI.4.1 Bilan	157
VI.4.2 Perspectives	157
Conclusion générale	167
Annexes	169
A Application de l'heuristique d'affectation	169
A.1 Les ressources utilisées	169
A.2 Les tâches à traiter	170
A.3 Mise en oeuvre de l'algorithme ECT	170
A.4 Mise en oeuvre de l'heuristique <i>LPT-H</i>	171
A.5 Synthèse sur l'exemple	172
B Application de l'heuristique d'ordonnement statique mono-critère	173
B.1 Application de l'algorithme <i>ECT-EDD</i>	173
B.2 Application de l'heuristique <i>LPT-H-EDD</i>	174
B.3 Application de l'heuristique <i>WSPT-H-EDD</i>	174
B.4 Synthèse sur l'exemple	175
C Exemple d'Application de l'ordonnement dynamique mono-critère	177
C.1 Présentation de l'exemple	177
C.2 Les fenêtres d'insertion	178
C.3 Amélioration par modifications partielles	179
C.4 Comparaison avec un ré-ordonnement complet	181
C.4.1 Application de l'heuristique <i>LPT-H-EDD</i>	181
C.4.2 Application de l'heuristique <i>WSPT-H-EDD</i>	182
C.5 Synthèse de l'exemple	183
D Exemple multi-critère	185
D.1 Présentation	185
D.2 Réalisation de l'ensemble de solutions initiales	186
D.3 Amélioration de l'ensemble de solutions initiales	186
E Détail du calcul de $\mu_{lateness_j}$	191

Table des figures

I.1	Passage d'un état de bon fonctionnement à l'état de panne.	7
I.2	Nouvelles formes de maintenance.	14
I.3	Décomposition du fonctionnement de services.	21
I.4	Représentation de l'organisation de services.	22
I.5	Hiérarchisation des tableaux de bords	26
I.6	Exemple d'évolution de la disponibilité	35
II.1	Exemple de diagramme de Gantt	42
II.2	Incertitudes en fonction du type de tâche de maintenance	63
III.1	volume de temps disponible sans franchissement de BI	80
III.2	Évolution du C_{max} pour un problème à 5 ressources humaines	84
III.3	Évolution de $\sum w_j T_j$	86
III.4	Arrivées stochastiques de tâches	88
III.5	Principe de l'ordonnancement dynamique	88
III.6	Graphe utilisé dans notre problème d'ordonnancement	89
III.7	Graphe complété par les contraintes de disponibilités	89
III.8	Fenêtre d'insertion	90
III.9	Graphes utilisés dans notre problème d'ordonnancement	91
III.10	Exemple de situation conflictuelle	91
III.11	Second graphe complété par les contraintes de <i>due dates</i>	92
III.12	Exemple de date de début au plus tard réelle	93
III.13	Méthode d'insertion dynamique de tâches	94
III.14	Insertion dynamique d'une tâche	97
III.15	Insertion dynamique de 10 nouvelles tâches	98
III.16	Observation des phases d'amélioration	99
IV.1	Procédure de choix d'une méthode d'optimisation mathématique	109
IV.2	Solutions des approches mono et multi-critères	120
IV.3	Evolution des solutions de l'approche multi-critère	122
V.1	Fonctions d'appartenances	133
V.2	Durée floue d'une tâche j	134
V.3	Obtention de la date de début au plus tôt floue de la tâche j	135
V.4	Évaluation potentiel de retard de la tâche j	136

V.5	Exemple d'obtention de la durée effective d'une tâche préventive	138
V.6	Exemple d'obtention d'une date de début au plus tôt	139
V.7	Exemple d'obtention de $\mu_{lateness}$	140
V.8	Évolution de la robustesse au cours de l'algorithme	141
V.9	Illustration du comparatif de la sensibilité aux incertitudes	142
V.10	Variation de l'imprécision	143
V.11	Évolution des solutions de l'approche multi-critère	147
VI.1	Phases de la thèse et soumissions pour publications	152
A.1	Ordonnancement ECT	171
A.2	Affectation avec l'heuristique LPT-H	172
B.1	Ordonnancement ECT-EDD en contexte de faible charge	174
B.2	Ordonnancement ECT-EDD en contexte de forte charge	174
B.3	Ordonnancement LPT-H-EDD en contexte de faible charge	175
B.4	Ordonnancement LPT-H-EDD en contexte de forte charge	175
B.5	Ordonnancement WSPT-H-EDD en contexte de faible charge	176
B.6	Ordonnancement WSPT-H-EDD en contexte de forte charge	176
C.1	Graphe de l'ordonnancement courant avant insertion	177
C.2	Ordonnancement courant après insertion	178
C.3	Ordonnancement obtenu après permutation des tâches 2 et 7	179
C.4	Déroulement d'un saut	180
C.5	Ordonnancement réalisé avec l'heuristique LPT-H-EDD	181
C.6	Ordonnancement réalisé avec l'heuristique WSPT-H-EDD	182
D.1	Ordonnancement courant	185
D.2	Ensemble de solutions initial	187
D.3	Déroulement d'un saut	189

Liste des tableaux

III.1	Résultats des algorithmes d'affectation	85
III.2	$\overline{\sum w_j T_j}$ obtenu avec les heuristiques	86
III.3	$\sum w_j T_j$ après insertion d'une nouvelle tâche	96
III.4	$\sum w_j T_j$ après insertion de 10 nouvelles tâches	98
IV.1	$\sum w_j T_j$ après insertion de 10 nouvelles tâches	119
IV.2	Évaluations après insertion de 10 nouvelles tâches	121
V.1	Apport de la prise en compte de la robustesse	144
V.2	Impact de la prise en compte de R(S) sur les autres critères	145
V.3	Insertions dynamiques et successives de 10 tâches	146
VI.1	Bilan financier.	153
VI.2	Détail de mes frais de déplacement.	154
A.1	Données concernant les tâches de maintenance préventive.	170
A.2	Algorithme ECT	171
A.3	Algorithme LPT-H	172
A.4	Tableau récapitulatif de l'affectation	172
B.1	Tableau récapitulatif	175
C.1	Données concernant les tâches pour l'ordonnancement statique.	178
C.2	Insertion dynamique	178
C.3	Application de la méthode du kangourou	179
C.4	Algorithme LPT-H	181
C.5	Algorithme WSPT-H	182
C.6	Tableau récapitulatif	183
D.1	Données concernant les tâches pour l'ordonnancement statique.	186
D.2	Ensemble de solutions initial	187
D.3	Ensemble de solutions initial après suppressions	187
D.4	Recherche locale sur la solution n°3	188
D.5	Ensemble de solutions	188
D.6	Application de la méthode du kangourou	188
D.7	Ensemble de solutions	189

D.8	Application de la méthode du kangourou sur la solution 2	190
D.9	Ensemble de solutions	190

Introduction générale

Les marchés mondiaux engagent les entreprises dans une course effrénée à la recherche de gains de productivité. La mondialisation a une double connotation. La mondialisation représente un nouvel horizon d'opportunités en ce troisième millénaire, mais, elle peut être perçue comme une menace pour l'ordre économique et social de chaque nation. Alcatel, Alstom, Continental, JVC, ... Elles ont pour point commun d'avoir fermé des sites implantés en France tout en délocalisant leur production vers l'étranger. Pour que les entreprises ne soient pas amenées à suivre cette démarche, il est nécessaire qu'elles améliorent leur compétitivité. Ces grandes entreprises ont des moyens de production déjà optimisés. Différents leviers d'améliorations, autres que l'optimisation du fonctionnement des équipements, restent possible. On retrouve par exemple, l'amélioration des conditions de travail, la formation du personnel, ou encore la réduction des temps d'indisponibilité des équipements.

Les services de maintenance interviennent pour maintenir ou remettre en état de bon fonctionnement les équipements. De ces deux politiques d'interventions, il découle deux types de tâches de maintenance : les tâches de maintenance *préventive* et les tâches de maintenance *corrective* [AFNOR, 2001]. La principale différence existant entre ces tâches est que les tâches préventives sont connues et que l'on sait quand elles doivent avoir lieu. Les tâches correctives, quant à elles, sont nécessaires suite à des événements imprévisibles et la connaissance que l'on en a dépend d'un diagnostic. Le service de maintenance est composé entre autre, de ressources humaines. Ce sont elles qui réalisent les tâches de maintenance. En général, ces ressources ont toutes les compétences nécessaires pour leurs différentes interventions [Monchy, 2000]. En fonction des caractéristiques des tâches et de celles des ressources, l'un des problèmes du manager du service de maintenance sera de trouver, pour chaque tâche, quelle ressource doit la traiter et quand.

Dans le contexte de la maintenance industrielle, certaines approches s'intéressent à l'ordonnancement des tâches de maintenance préventive [Adzakpa *et al.*, 2003b] sur des ressources identiques. D'autres s'intéressent à l'insertion dynamique de tâches dans un ordonnancement courant pour des ressources n'ayant qu'une compétence [Duffuaa *et al.*, 1999]. Même si en production, de nombreuses études portent sur l'ordonnancement des activités pour des ressources humaines [Tchommo *et al.*, 2003] peu d'approches prennent en compte les niveaux de compétence des ressources [Letouzey, 2001]. On peut tout de même noter les travaux de Gruat La Forme *et al.* [Gruat-La-Forme *et al.*, 2007b] prennent

en compte les niveaux de compétence à travers un taux de productivité variable dans problème multi-critère. Le contexte hospitalier présente des similitudes avec celui de la maintenance : l'arrivée stochastiques de patients, la charge des blocs opératoires, l'urgences de certains cas [Hammami *et al.*, 2003].

Les niveaux compétences des ressources humaines sont peu intégrés dans les modèles. Les ressources sont en effet souvent considérées comme identique ou n'ayant qu'une compétence. Le service de maintenance doit traiter des tâches de maintenance préventives et correctives. Or nous avons pu constater dans la littérature que bien souvent les approches n'intègrent pas les différents types de tâches avec leurs différentes spécificités. Cette problématique n'est pas uniquement liée au contexte de la maintenance mais se retrouve plus généralement l'affectation et l'ordonnancement de l'activité d'un service. Le premier verrou scientifique que nous étudierons dans cette thèse sera donc l'ordonnancement d'activités de maintenance sur des ressources humaines différentes.

La problématique d'affectation et d'ordonnancement des activités de maintenance est multi-critère. Les critères pris en compte dans le domaine de maintenance ne sont pas comparables, leur importance dépend du contexte et de la perception du manager. Ceux-ci ne peuvent pas être hiérarchisé à travers des préférences ou agrégé en une seule fonction objectif comme on le retrouve souvent dans la littérature. Le deuxième verrou que nous étudierons dans cette thèse sera le problème multi-critère d'affectation et d'ordonnancement des activités de maintenance.

Certaines données concernant les tâches et les ressources présentent des incertitudes. L'approche d'ordonnancement doit prendre en compte ce type de données pour être peu sensible aux incertitudes et permettre d'obtenir des solutions robustes [Billaut *et al.*, 2005]. Ces incertitudes doivent même être anticipées lors de la réalisation de l'ordonnancement. L'approche doit alors être proactive [Davenport *et al.*, 2000]. Le troisième verrou auquel nous nous intéresserons est alors l'ordonnancement des activités de maintenance en contexte incertain.

Le problème d'ordonnancement ne consiste alors plus seulement à prendre en compte les différentes contraintes liées aux tâches lors de la répartition de la charge de travail entre les ressources humaines. Celui-ci doit, en plus, considérer les différences de niveau de compétences des ressources, les différences entre les types de tâches, prendre en compte un ensemble de critères ainsi que les incertitudes du contexte. Nous traiterons donc, dans cette thèse, d'un problème multi-critère d'affectation et de d'ordonnancement de tâches de maintenance différentes à un ensemble de ressources humaines différentes. La résolution de ce problème d'ordonnancement nous conduira donc à trouver la bonne ressource et la bonne date de traitement pour chacune des tâches.

Dans le cadre de ce problème nous nous limitons à la prise en compte des ressource humaines. Les ressources matérielles sont supposées disponibles et en quantité suffisante sur les lieux des interventions. La durée des tâches comprend l'ensemble des différentes actions et déplacements nécessaires. Nous supposons aussi que chaque tâche ne nécessite pour être traité qu'une seule ressource et que ces tâches ne sont pas sécables. Concer-

nant les ressources humaines, elles sont en nombre limité mais sont supposées toujours présentes et disponibles.

Ce mémoire de thèse est articulé en six chapitres.

De nos jours, la maintenance permet non seulement l'identification réactive des éléments défaillants, mais aussi la prévision des pannes. Les exploitant d'équipements de production confient le maintien et la remise en état de bon fonctionnement au service de maintenance. Les ressources humaines sont les principales ressources du système de maintenance. L'organisation des activités des ressources permet au service de maintenance d'être plus efficace. La maintenance, son organisation et son fonctionnement sont décrits au travers d'un état de l'art proposé dans le **Chapitre I**.

L'efficacité du service de maintenance provient essentiellement du choix de la bonne ressource pour le traitement de chaque tâche. Cependant, il est aussi important que ces tâches soient bien organisées dans le temps. Le **Chapitre II** est consacré à l'ordonnancement et particulièrement à l'ordonnancement des activités de maintenance. Nous montrons ici les spécificités des problèmes d'ordonnancement dans un contexte de maintenance.

Le manager doit intégrer les différents types de tâches à l'ordonnancement. Nous nous intéresserons dans un premier temps, à l'ordonnancement des tâches telle la maintenance préventive, qui sont connues en début d'horizon. L'approche de résolution mise en place pourra alors être de type statique. Nous proposons, dans le **Chapitre III**, une approche de résolution à ce problème d'ordonnancement mono-critère des activités de maintenance. Le critère considéré est la somme pondérée des retards. Au cours de ce chapitre, nous prenons en compte le fait que les tâches de maintenance correctives, ne sont pas connues pour la période considérée. Nous complétons l'approche statique destinée à l'ordonnancement des tâches préventives par une approche dynamique, orientée sur l'insertion des tâches correctives dans un ordonnancement existant.

Les services de maintenance ayant plusieurs objectifs, cette approche dynamique est étendue dans le **Chapitre IV**, au multi-critère. Nous prenons alors comme critère, non seulement les retards dans le traitement des tâches, mais aussi le nombre de tâches en retard. Ce problème d'ordonnancement concernant l'activité des ressources humaines, nous prendrons aussi en compte l'équilibrage de la charge et le nombre de modifications réalisées dans un ordonnancement lors de l'insertion dynamique d'une nouvelle tâche. La contribution présentée dans ce chapitre est une extension de l'approche mono-critère au multi-critère d'ordonnancement des activités de maintenance.

Certaines caractéristiques des tâches et des ressources peuvent ne pas être connues avec précisions. Au cours du **Chapitre V**, nous proposons de modéliser les incertitudes du contexte de maintenance à partir de la logique floue. Cette problématique réside dans le fait de fournir une solution au problème d'ordonnancement, qui soit peu sensible à l'incertitude des données. En d'autres termes, l'efficacité de la solution fournie est conservée même si les données réelles présentent des différences par rapport à celles utilisées dans

la résolution du problème. Nous proposons, dans le Chapitre V, une approche d'ordonnement proactive.

La conduite de la thèse est une expérience professionnelle qui m'a permis de développer des compétences professionnelles et personnelles. Le **Chapitre VI** est le Nouveau Chapitre de Thèse (NCT) destiné à valoriser ces compétences acquises au cours des trois années de thèse. Sa réalisation a été encadré par un mentor indépendant du travail de thèse, formé et délégué par l'Association Bernard Gregory et l'Université de Franche-Comté.

En conclusion, nous résumerons les différents apports de nos travaux et présenterons les perspectives de ceux-ci.

Chapitre I

Organisation et gestion des activités de maintenance industrielle

En remettant en état de bon fonctionnement les équipements de production et en prévenant les défaillances, le service de maintenance agit de manière visible sur la compétitivité et la réactivité des entreprises. Il met en place des stratégies d'intervention, de manière à traiter efficacement les différentes tâches qu'il peut rencontrer. Le service de maintenance est organisé autour de ses ressources humaines. Ce sont elles qui réalisent les tâches et agissent pour rendre les équipements de production disponibles pour leur fonction première : produire.

A travers ce chapitre, nous allons présenter le fonctionnement du service de maintenance, avec ses stratégies, son organisation et ses ressources. Nous décomposerons ce fonctionnement suivant le schéma classique d'organisation à trois niveaux stratégique / tactique / opérationnel. Le niveau stratégique comprend alors l'élaboration de décisions non programmables telles que les objectifs de l'entreprise ou des services sur le long terme, ainsi que le contrôle de l'ensemble de l'activité. Le niveau tactique comprendra la gestion du processus de maintenance et la gestion des ressources humaines. Le niveau opérationnel correspond, quant à lui, à l'exécution des décisions prises. Nous nous focalisons particulièrement sur les niveaux tactiques et opérationnels qui permettent de montrer l'importance des ressources humaines ainsi que l'importance d'une bonne organisation de leurs activités pour l'efficacité du service de maintenance.

Ce chapitre commence par une présentation des notions de base de la maintenance. Puis, nous présenterons les différentes formes d'organisation des services de maintenance. Enfin, nous nous intéresserons plus en détail au fonctionnement des services de maintenance à travers la décomposition fonctionnelle de ce service et de son fonctionnement.

I.1 Introduction à la maintenance

La maintenance consiste à conserver ou à remettre un bien en état de bon fonctionnement. Dans ce sens, les entreprises font appel aux services de maintenance. Ces services organisent l'activité des ressources humaines et matérielles qui le composent.

I.1.1 Définitions

Il existe principalement deux grands types d'activités de maintenance : la maintenance préventive, dont l'activité peut être planifiée et la maintenance corrective qui est liée aux pannes non prévisibles.

La maintenance est, après la production, une des fonctions très importante de l'entreprise. La définition en est donnée par l'AFNOR (Association Française de Normalisation)

Définition I.1 Maintenance [AFNOR, 2001]

*Ensemble de toutes les actions administratives et de management durant le cycle de vie d'un **bien**, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise*

Il est précisé dans la définition que des événements peuvent survenir sur tout **bien** et entraîner des conséquences sur son fonctionnement. Ce que nous entendons par bien est aussi défini par l'AFNOR :

Définition I.2 Bien [AFNOR, 2001]

Tout élément, composant, mécanisme, sous-système, unité fonctionnelle, équipement ou système qui peut être considéré individuellement

Les événements pouvant survenir et entraîner un fonctionnement anormal du bien ou un arrêt de ce fonctionnement sont des *défaillances* (comme on peut l'observer sur la figure I.1) ou des *dégradations*. Afin de bien cerner le sens de ces mots, la norme en précise les définitions :

Définition I.3 Défaillance [AFNOR, 2001]

La cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise

À travers le terme de défaillance, il y a la notion d'un événement anormal survenu à un instant donné du fonctionnement de l'équipement (du bien). Cela le diffère de la dégradation, qui est une évolution de l'état.

C'est donc dans le temps qu'évolue le fonctionnement de l'équipement. Cette évolution provoque l'éloignement de ce que l'on obtient de celui-ci (en fonctionnement en mode

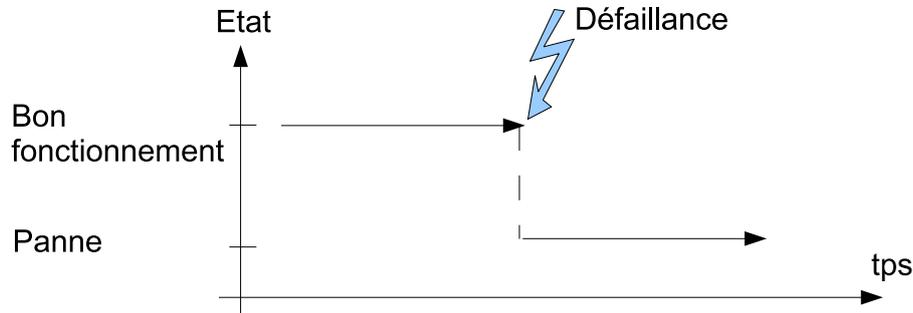


FIG. I.1 – Passage d'un état de bon fonctionnement à l'état de panne.

Définition I.4 Dégradation [AFNOR, 2001]

Évolution irréversible d'une ou plusieurs caractéristiques d'un bien liée au temps, à la durée d'utilisation ou à une autre cause externe

dégradé) par rapport à ce que l'on devrait obtenir au cours d'un fonctionnement normal (fonctionnement en mode nominal).

Les évolutions actuelles des activités de maintenance visent à ne plus subir de défaillance. Ainsi la fonction processus de pronostic est apparue. Le pronostic permet alors de prévoir l'évolution de l'état de l'équipement. Il est défini de la manière suivante :

Définition I.5 Pronostic [Muller *et al.*, 2005]

Après détection de la dégradation d'un composant ou d'une fonction, le rôle du processus de pronostic est de prédire l'évolution future des performances du système en tenant compte d'interventions de maintenance planifiées et éventuellement, de conditions opérationnelles ou environnementales changeantes

Celui-ci doit donner une vision globale des performances futures du système, mais il doit aussi prendre en compte les actions de maintenance déjà réalisées ainsi que les modifications de l'équipement engendrées par son évolution. Le pronostic s'appuie sur la connaissance de l'historique de l'équipement, de son état courant et de l'utilisation prévue.

Néanmoins, en cas de réparation de l'équipement, le fonctionnement normal peut être retrouvé alors que, si l'appareil est laissé dans cet état, la dégradation peut aller jusqu'à la panne. Cela nous permet donc d'introduire la définition de ce qu'est une panne :

Un équipement ne peut pas accomplir sa fonction requise si celui-ci est arrêté pour la réalisation de maintenance préventive. Ce n'est cependant pas un état de panne. Les pannes

Définition I.6 Panne [AFNOR, 2001]

État d'un bien inapte à accomplir une fonction requise, excluant l'inaptitude due à la maintenance préventive ou à d'autres actions programmées ou à un manque de ressources extérieures

peuvent être provoquées par une cause externe au bien ou par un manque d'entretien. Il est possible que la remise en fonctionnement de l'équipement nécessite l'intervention de techniciens ainsi qu'éventuellement le remplacement de composants (sous-ensemble du bien maintenu). Cela nous amène à introduire une autre notion qui est celle de la maintenabilité.

Définition I.7 Maintenabilité [AFNOR, 2001]

Dans des conditions données d'utilisation, aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits

Pour maintenir le système dans un état dans lequel il est capable de remplir sa fonction première, il existe principalement deux grands types d'activité de maintenance : la maintenance préventive, dont l'activité peut être planifiée et la maintenance corrective qui est liée aux pannes non prévisibles.

I.1.2 Les différentes stratégies de maintenance

La norme AFNOR distingue plusieurs types de maintenance aussi appelé stratégies. Les deux principales stratégies de maintenance sont la maintenance préventive et la maintenance corrective. La différence entre les deux réside dans le fait que la maintenance préventive est réalisée avant l'arrivée de la défaillance tandis que la maintenance corrective s'effectue après. La maintenance préventive peut être systématique, conditionnelle ou encore prévisionnelle, tandis que la maintenance corrective peut être palliative ou curative. Bien que les deux stratégies de maintenance évoquées précédemment soient les principales, on rencontre aussi la maintenance améliorative qui permet d'améliorer les fonctions des équipements. Ces termes sont définis dans les paragraphes suivants.

I.1.2.1 La maintenance préventive

Afin de maintenir en conditions opérationnelles les systèmes de production, le concept de durabilité oblige les industriels à améliorer leur niveau global de performance. C'est dans cet objectif que sont développées les stratégies de maintenance préventive.

La maintenance préventive peut être de trois types : systématique, conditionnelle ou

Définition I.8 Maintenance préventive [AFNOR, 2001]

Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien

encore prévisionnelle. La maintenance systématique est une maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unité d'usage mais sans contrôle de l'état du bien. La maintenance conditionnelle est basée sur la surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les fonctions qui en découlent. La maintenance prévisionnelle quant à elle correspond à une maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien.

I.1.2.2 La maintenance corrective

Définition I.9 Maintenance corrective [AFNOR, 2001]

Maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise

La maintenance corrective peut être dite *palliative* si l'intervention donne lieu à un dépannage et à une réparation provisoire. Mais elle peut aussi être dite *curative* si la réparation restitue l'état de fonctionnement nominal.

Tant que les actions de maintenance corrective n'ont pas été traitées, il n'est pas possible de savoir de quoi l'intervention sera composée. L'intervenant de maintenance réalise alors un diagnostic qui est défini comme suit :

Définition I.10 Diagnostic [AFNOR, 2001]

Actions menées pour la détection de la panne, sa localisation et l'identification de la cause

Cependant, si l'identification de la cause peut donner des indications sur les actions à mettre en oeuvre, la durée finale de l'intervention sera peut être différente de celle qui sera prévue. Suivant l'expérience des ressources humaine envoyées sur l'intervention, la durée de traitement de celle-ci pourra varier.

I.1.2.3 La maintenance améliorative

Cette activité s'inscrit dans le cadre d'une démarche de progrès et d'amélioration. C'est l'ensemble des mesures qui, par le biais de l'intervention de maintenance, parviennent à

améliorer la sûreté de fonctionnement du bien sans changer sa fonction première [Monchy, 2000].

Une fois les différentes stratégies de maintenance définies, les différentes tâches de maintenance doivent être classifiées.

I.1.2.4 Classification des tâches de maintenance

Le système de maintenance présenté par Monchy [Monchy, 2000] comporte cinq niveaux. Ceux-ci font référence à la complexité des tâches à effectuer et, entre autres aux ressources matérielles nécessaires à la réalisation de chacune des tâches :

Le premier niveau comporte des réglages simples prévus par le constructeur au moyen d'organes accessibles sans aucun montage d'équipement ou échange d'équipements accessibles en toute sécurité. L'outillage nécessaire est un outillage léger et est défini dans les instructions d'utilisation.

Le second niveau comporte les opérations de dépannage par échange standard d'éléments prévus à cet effet ou d'opérations mineures de maintenance préventive. De l'outillage léger est nécessaire. Celui-ci est défini dans les instructions d'utilisation.

Le troisième niveau nécessite une identification et un diagnostic des pannes. La réparation s'effectue toujours par un échange de composants fonctionnels et les réparations mécaniques à réaliser sont mineures. L'outillage nécessaire est courant et prévu pour ce type d'intervention. De plus des appareils de mesure (banc d'essai, contrôle, etc) sont nécessaires pour la remise en route correcte de l'équipement qui a nécessité l'intervention.

Le quatrième niveau est celui des travaux importants de maintenance corrective ou préventive. Un outillage plus spécialisé est généralement requis tel que du matériel d'essai ou de test, un banc de contrôle, etc.

Le cinquième et dernier niveau comporte les travaux de rénovation, de reconstruction ou réparations importantes confiés à un atelier central. Les moyens nécessaires pour effectuer ce type d'intervention sont proches de ceux qui ont été utilisés lors de la fabrication de l'équipement par le constructeur.

Après avoir défini l'activité du service de maintenance dans le milieu industriel, nous allons maintenant en détailler la composition avec notamment ses ressources.

I.1.3 Les ressources du système de maintenance

Les ressources du service de maintenance sont principalement le personnel qualifié pour les différentes interventions. Cependant celui-ci a aussi besoin d'outillage et, pour les réparations, de pièces de rechanges ainsi que de consommables d'entretien.

I.1.3.1 Les pièces de rechange

La maintenabilité de l'équipement est liée au fabricant de pièces détachées. En effet, la disparition d'un unique fabricant d'un type de pièces de rechange peut rendre très difficile l'obtention des pièces de rechange et donc la remise en service de l'équipement. En ce qui concerne leur stockage, s'il a lieu chez le fournisseur, il peut faire gagner dans certains cas non seulement sur les coûts de stockage classique (surface, manutention, rangement,...) mais aussi sur les coûts de transfert car cette ressource serait directement envoyée à l'endroit où elle est demandée. Et donc, elle générerait l'économie du transfert entre le lieu de stockage et le lieu de la panne "délocalisée". Un programme de gestion de la maintenance a pour objectif de réduire la quantité de pièces de rechange en stock. Il permet principalement de pouvoir gérer leurs lieux de stockage, d'en connaître la disponibilité, d'éviter le gaspillage, de connaître l'évolution des stocks et la nécessité de lancer des commandes. Le fait de codifier les équipements permet d'organiser le magasin de pièces de rechange

Une revue de littérature concernant la gestion des pièces détachées a été présentée par Kennedy *et al.* [Kennedy *et al.*, 2002]. La gestion des pièces détachées destinées aux activités de maintenance est différente de celles des composants destinés à la production. La décision de la réalisation d'une maintenance a un impact immédiat sur les inventaires de pièces et les effets d'un manque ne sont pas les mêmes. Huiskonen présente les stratégies logistiques pour la gestion des pièces détachées dédiées à la maintenance [Huiskonen, 2001]. Les caractéristiques telles que la criticité, la spécificité, le type ou la valeur des pièces sont utilisées pour déterminer comment elles seront gérées.

Rustenburg *et al.* ont, quant à eux, étudié l'application de modèles et techniques sophistiqués pour la gestion des stocks de pièces détachées dans un environnement très technologique que sont les frégates de la marine Néerlandaise [Rustenburg *et al.*, 2001].

Il est important de savoir quelles pièces de rechange il est nécessaire de conserver en stock [Boyer *et al.*, 2005]. Les arrêts d'utilisation d'un équipement, dus à l'attente d'une pièce de rechange indisponible, peuvent être très longs. Il s'agit de connaître ses équipements et notamment d'avoir identifié les équipements critiques et pour lesquels aucune attente ne peut être admise suite à une panne. Les équipements sont donc triés suivant différents critères afin d'obtenir la criticité de la pièce et d'en gérer la conservation en stock ou non.

D'une manière similaire, dans la gestion hospitalière, l'une des principales problématiques de la gestion des stocks de médicaments ou d'équipement de soins dans un hôpital (au même titre que des pièces de rechanges pour une entreprise) est de ne jamais être en manque de produits [Hassan *et al.*, 2005]. Une rupture pourrait engendrer effectivement le blocage des activités de soin (comme de la réparation d'équipement dans le domaine de la maintenance) et mettre en danger la vie de patients (de même pour certains fonctionnement de machines en mode dégradé). La méthode employée pour le réapprovisionnement dépend alors, tout comme pour une entreprise, de la taille de l'éta-

blissement, de l'organisation de ses services et de l'historique de sa consommation.

D'autres ressources doivent aussi être stockées et gérées. Il s'agit de l'outillage, dont la gestion est soumise à des problématiques différentes de celles des ressources humaines.

I.1.3.2 L'outillage

Les différentes formes d'interventions de maintenance requièrent des ressources matérielles telles que l'outillage. La possibilité de l'intervention dépend donc de leur disponibilité et nécessite d'être planifiée. Certains outillages sont déplaçables, d'autres non. Parmi l'outillage déplaçable on peut déterminer deux types d'outillages : l'outillage courant, dont chaque opérateur de maintenance dispose (caisse à outils). Mais aussi l'outillage spécifique, ou coûteux (matériel électro-portatif par exemple) qui est en quantité limitée et nécessite une réservation. L'outillage lourd, qui n'est pas déplaçable, est en quantité limitée. 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. On trouve très peu de publications sur la gestion de l'outillage en tant que ressource pour l'activité de maintenance. Les ressources les plus importantes du service de maintenance, mais aussi les plus compliquées à gérer, sont cependant les ressources humaines.

I.1.3.3 Les ressources humaines en maintenance

Les compétences sont le fer de lance de l'activité de maintenance. Chaque tâche de maintenance ayant ses particularités, il n'est pas possible d'automatiser la fonction de maintenance. C'est cela qui rend les techniciens de maintenance si importants aux yeux des autres services. L'AFNOR donne la définition suivante des compétences :

Définition I.11 Compétence [AFNOR, 2002]

La mise en œuvre, en situation professionnelle, de capacités qui permettent d'exercer convenablement une fonction ou une activité

Cependant, l'Association pour la Certification des Compétences Professionnelles (ACCP) en retient la définition élargie suivante :

Définition I.12 Compétence [ACCP, 2005]

L'ensemble des capacités démontrées par les preuves de la vie professionnelle et sociale courante

Le terme de capacité ressort des deux définitions citées précédemment et doit lui aussi être défini.

Il est bien entendu que les compétences détenues par un employé et ses capacités à mener

Définition I.13 Capacité [Pieron, 2005]

Une capacité représente la possibilité de réussite dans l'exécution d'une tâche, ou l'exercice d'une profession. Elle peut être l'objet d'une évaluation directe, sous réserve d'une volonté de mise en oeuvre de la part de celui dont on veut apprécier la capacité

à bien une tâche dépendent de sa formation et de ses qualifications. Nous complétons ces définitions par celle de la qualification.

Définition I.14 Qualification [D'Anvers, n.d.]

La notion de qualification doit être entendue au sens large : loin de se réduire au savoir technique mis en oeuvre dans le process de travail, elle ne se sépare pas de la question du statut et des conditions sociales du travail. Il convient donc de distinguer les qualifications réelles et les qualifications conventionnelles, des écarts sensibles apparaissent entre ces deux réalités. Il convient de distinguer :

- la qualification acquise par la formation, attestée par la formation d'un diplôme ou d'un examen ;
 - la qualification du poste de travail, définie, d'une façon négociée ou non, dans la branche ou l'entreprise ;
 - la qualification de chaque personne comprise comme capacité individuelle opératoire pour occuper un poste de travail.
-

Ces différentes ressources ne sont donc réunies que dans l'objectif d'améliorer la disponibilité des équipements dans l'entreprise.

De par leur formation, ces ressources disposent d'un large champ de compétences. Des formations telles que celle proposée par le département de Maintenance Industrielle de l'Institut Universitaire de Valenciennes (IUT), ou encore les Sections de Techniciens Supérieurs en maintenance industrielle (STS) de certains lycée techniques, c'est la volonté de polyvalance qui a structuré les formations [Monchy, 2000]. Les enseignements techniques sont très diversifiés : automatismes, électronique, mécanique, électrotechnique, thermique,... Ceux-ci sont bien entendu complétés par des stages dans l'industrie.

I.2 De la maintenance à la e-maintenance

Les compétences, la polyvalance et le savoir faire sont les aspects qui caractérisent le personnel de maintenance. Cependant, ce personnel est en nombre limité dans les entreprises. Dans le but de lui donner, le plus rapidement possible, accès à une expertise extérieure, les nouvelles formes de maintenance tendent à permettre au personnel l'accès aux informations, à distance. Toutefois, si ces informations ne suffisent pas à résoudre

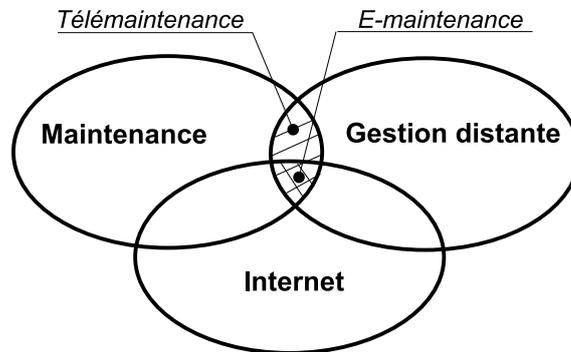


FIG. I.2 – Nouvelles formes de maintenance.

les problèmes, il devient possible de bénéficier directement de l'assistance d'experts à distance.

L'utilisation des technologies de l'information a permis ces dernières années la mutation de l'activité de maintenance vers la e-maintenance. La figure I.2 [Tararykyne, 2005] présente le positionnement de la télémaintenance et de la e-maintenance. La e-maintenance est alors l'intersection de différentes composantes dans le but de permettre au personnel d'accéder à distance à des outils intelligents. Nous allons introduire ce positionnement dans les parties suivantes.

I.2.1 La maintenance à distance

I.2.1.1 La télémaintenance

Afin d'optimiser les coûts et de permettre un meilleur contrôle de l'état de fonctionnement des équipements, les entreprises utilisent de plus en plus des moyens de contrôle et de maintenance à distance. Ce concept est appelé la télémaintenance dont la norme AFNOR précise la définition :

Définition I.15 Télémaintenance [AFNOR, 2001]

Maintenance d'un bien exécutée sans accès physique du personnel au bien

Un système de télémaintenance est toujours composé d'au moins deux parties distinctes [Ivanov *et al.*, 2003] :

- Le centre expert de maintenance, appelé aussi le centre de compétence ;
- Les sites à maintenir.

Ces entités ne sont pas forcément les seules mais cela dépend de l'organisation de l'entre-

prise. Il s'agira donc de surveiller les équipements de plusieurs sites et, en cas de panne, d'affecter la meilleure compétence en fonction de la maintenance à réaliser, afin d'optimiser les coûts d'intervention. La télémaintenance a donc pour objectif de permettre d'effectuer, rapidement et à distance, un grand nombre d'opération. Cette gestion "réactive" des tâches de maintenance a pour but de maximiser la disponibilité des équipements ainsi que le coût de leur maintenance [Adjallah *et al.*, 2005].

Le composant principal d'un système de télémaintenance est le réseau sur lequel il s'appuie pour la circulation de l'information. L'utilisation du réseau *Internet* à un réel intérêt pour faciliter l'accès à distance des équipements à maintenir. Afin de permettre au personnel, qui ne disposerait pas de suffisamment d'information pour résoudre ses problèmes de maintenance, le réseau peut lui permettre d'accéder à des outils intelligents tel que le CBR (Case Based Reasoning). Lorsque via le système de télémaintenance des outils intelligents sont utilisés, on parle alors de *e-maintenance*.

I.2.1.2 La e-maintenance

La e-maintenance est donc une forme intelligente de télémaintenance.

Chatelet et Jouga ont présenté deux solutions de e-maintenance qui résument les travaux dans ce domaine [Chatelet *et al.*, 1999]. La première est composée généralement d'un ordinateur doté d'un serveur web ou d'un automate programmable possédant un coupleur web, appelé *communicateur Internet*. C'est le seul équipement qui peut dialoguer avec l'équipement distant. Il concentre toutes les informations provenant des capteurs contrôlant le processus. Il a pour fonctions principales :

- Le contrôle des accès et la protection contre les intrusions.
- La "présentation" des équipements du système qui doivent être visibles depuis le navigateur web du poste distant. Il doit aussi gérer la "vue" globale de l'état du système sous la forme d'une base de données.
- Avoir une connaissance complète de la configuration des éléments du système et des verrouillages possibles, afin de permettre le téléchargement, la téléconfiguration ou la modification de paramètres.

La deuxième solution consiste à donner l'accès directe à des équipements, ils deviennent alors des serveurs web enfouis. Une connection internet est alors nécessaire sur les équipements.

Tout au long du processus de maintenance, il est possible d'accéder à de l'information. Le système de e-maintenance peut aussi comprendre des modules supplémentaires tel que *la détection*, *le diagnostic* ou encore *la surveillance* dont nous allons donner les définitions.

Définition I.16 Détection [Tararykyne, 2005]

Génération de caractères distinctifs d'un état de fonctionnement anormal à partir des observations

La détection consiste donc à classer les différents états de fonctionnement que peut prendre un équipement comme étant normaux ou anormaux.

Définition I.17 Diagnostic [Tararykyne, 2005]

Détermination des composants ou organes caractérisés par un fonctionnement anormal, en précisant les causes de cette anomalie

En cas de défaillance d'un équipement, le diagnostic permet donc de *localiser* le composant qui en est à l'origine. Il permet ensuite d'en *identifier* la cause. Le diagnostic est donc un élément clé du bon fonctionnement d'un service de télémaintenance.

Sefiane *et al.* ont développé la notion de *diagnostic prédictif* qui permet de vérifier le niveau de performance des fonctions de base de l'équipement et de déterminer ses besoins de remise dans un état spécifié. Alors que le diagnostic s'applique de manière corrective (après la panne) pour déterminer les causes probables, le diagnostic prédictif s'applique de manière préventive [Sefiane *et al.*, 2005].

Définition I.18 Surveillance [Tararykyne, 2005]

Module permettant la détection et le diagnostic d'un état de fonctionnement anormal

La surveillance est alors définissable comme étant un dispositif capable de détecter les dysfonctionnements des systèmes. Elle permet ensuite de les diagnostiquer en localisant les composants à l'origine de la défaillance et en identifiant les causes de celle-ci. La e-maintenance ne se limite donc pas à l'acquisition et au traitement de données à distance, mais devient alors une solution plus complète appelée *plate-forme de e-maintenance*.

I.2.1.3 La plate-forme e-maintenance

Une plate-forme de e-maintenance a été présentée dans le projet européen PROTEUS¹. L'objectif de celui-ci était de concevoir une plate-forme générique de e-maintenance [PROTEUS, 2003]. Celle-ci est composée de trois parties principales :

1. La télésurveillance de l'équipement durant son cycle de vie.
2. La gestion du processus de maintenance et de réparation (partie logistique d'accès aux bases de documents techniques et de connaissances, aux outils d'aide à la décision ainsi qu'aux ressources humaines).
3. La présentation complète et synthétique des différentes données, comprenant le niveau de surveillance et de décision, les tableaux de bord, ainsi que les différents contrats de maintenance.

¹<http://www.proteus-iteaproject.com/>

La mise en place d'une telle plate-forme peut permettre d'accroître considérablement l'efficacité des centres de e-maintenance. Elle apporte en effet des solutions de maintenance notamment dans les organisations *distribuées*.

I.2.2 Organisation des services de maintenance

Dans les paragraphes précédents, nous avons présenté les différentes stratégies de maintenance. Puis nous avons étudié, à travers les ressources, la composition des services de maintenance. Nous nous intéressons maintenant aux différentes formes d'organisation des services de maintenance dans les entreprises.

Si la maintenance n'est pas prise en charge par l'entreprise elle-même, celle-ci est alors sous-traitée. La surveillance ainsi que la maintenance préventive et corrective peuvent donc être confiées directement au fabricant de l'équipement (expert sur ce type d'équipement) ou à une entreprise spécialisée dans la maintenance industrielle (experte dans le domaine de la surveillance et de la maintenance à distance mais généraliste quant aux équipements surveillés). Les équipements peuvent être eux aussi en location, et si la maintenance n'est pas non plus prise en charge par l'entreprise utilisatrice, celle-ci peut aussi être sous-traitée de la même façon. On rencontre différentes organisations de la maintenance : organisation centralisée, décentralisée ou encore un mélange des deux. Mais elle peut être aussi sous-traitée ou encore distribuée. Dans les paragraphes suivants, nous décrivons ces différentes formes d'organisations.

I.2.2.1 La maintenance décentralisée

L'organisation décentralisée des services de maintenance se caractérise par le fait qu'une partie de la maintenance est réalisée par le service de production et que l'autre est réalisée par le service de maintenance. Dans une telle organisation, la maintenance et la production sont situées au même endroit. C'est donc le personnel appartenant au service de production qui effectue les diagnostics, passe les commandes, supervise les travaux de maintenance et gère les améliorations.

Ce type d'organisation permet principalement de maîtriser le processus de dégradation ainsi qu'une bonne prévention car le personnel de production est en contact régulier avec les équipements. Cependant la maîtrise technique étant répartie entre les services de production et de maintenance, des procédures de coordination doivent être répétées pour éviter une redondance des interventions.

I.2.2.2 La maintenance centralisée

La maintenance centralisée est la forme la plus commune d'organisation. Le service maintenance est distinct de la production. C'est lui qui regroupe les différents services techniques de l'entreprise mais il ne s'occupe pas des problèmes liés à la production. Le

personnel de ce service est indispensable à la bonne conduite des événements, mais le cloisonnement de chaque service dans sa fonction nécessite une communication accrue. En effet, le personnel de production peut être trop occupé pour s'attarder sur des tâches de maintenance de bas niveau et rien ne le signale au service maintenance. Le personnel de maintenance peut aussi avoir reçu des formations spécifiques et très techniques sur des équipements particuliers, ou encore travailler sur des installations présentant des risques pour la sécurité, ce qui rend certaines activités irréalisables pour le personnel de production. Un système de maintenance centralisé peut, grâce à la mise en place d'atelier de maintenance mobile, gérer les activités de maintenance dans un contexte multi-sites [Simeu-Abazi *et al.*, 2006]. Alors que l'atelier de maintenance central gère les réparations des équipements sur les différents sites ainsi que la maintenance préventive, l'atelier mobile effectue les inspections et les remplacements.

I.2.2.3 Les organisations mixtes

L'organisation mixte impose à tout le personnel une bonne connaissance technique des équipements. Les opérateurs doivent être capables d'assurer des opérations techniques ou encore de trouver et de disposer des informations nécessaires à la réalisation de tâches de maintenance. Tandis que la production gère la partie logistique, le service de maintenance assure en outre les activités "courantes" de maintenance. Une organisation mixte permet en outre de bénéficier des avantages des deux systèmes mais nécessite un bon niveau technique des opérateurs de maintenance qui doivent être en mesure d'interpréter et de réaliser des diagnostics.

I.2.2.4 La politique de l'activité

Quel que soit le mode d'organisation de l'activité de maintenance au sein de l'entreprise, celle-ci peut décider de la gérer de façon différente. Si elle n'est pas gérée en interne, elle peut être confiée à des sous-traitants et/ou gérée de manière distribuée.

a) La maintenance sous-traitée

Il est possible de sous-traiter la totalité ou seulement une partie des activités de maintenance. L'intérêt d'une sous-traitance totale réside dans la diminution du nombre d'interface que rencontre l'entreprise. De plus le personnel d'un service de maintenance externe n'a pas d'habitudes du à l'historique de l'entreprise. Il n'y a donc pas d'inertie lors de la mise en place une nouvelle politique de maintenance. Le service de maintenance de l'entreprise doit disposer de bonnes compétences organisationnelles. Celles-ci seront complétées par les compétences techniques des sous-traitants spécialisés. Il est en outre responsable de la détection des dysfonctionnements, de la mise en place de la maintenance préventive et de l'appel aux sous-traitants. L'inconvénient majeur de ce type d'organisation est que l'entreprise risque de perdre la maîtrise d'une certaine technique

au profit de sous-traitants. De plus, l'importance que l'on donne à l'aspect confidentiel de l'équipement peut conduire à vouloir tout gérer en interne.

b) La maintenance distribuée

Le concept de maintenance distribuée utilise les connaissances de la maintenance et s'appuie sur une organisation en réseau. Le choix de faire, faire-faire ou de faire-ensemble peut donc être étayé sur l'analyse des processus grâce à l'approche réseau. Selon Kaffel, deux possibilités sont envisageables pour une entreprise :

- Le partage :
L'entreprise fait partie d'un réseau d'entreprises qui se partagent les services d'une unité de maintenance ;
- Le partage et la collaboration :
En plus du partage évoqué précédemment, la collaboration entre les entreprises en lien avec l'unité de maintenance crée un réseau dynamique de maintenance dont tous les membres interagissent et communiquent entre eux.

L'aspect distribué est donc basé sur le fonctionnement en réseau des différents éléments entrant en ligne de compte. Les états des équipements sont détectés sur place grâce à des capteurs, puis acheminés via un réseau et transmis au destinataire concerné. Lorsque le personnel de maintenance se déplace du centre expert ou d'un site, celui-ci doit être au préalable informé de l'intervention qu'il va devoir réaliser, ainsi que sur le matériel (outil, consommable, pièce de rechange) qu'il devra déplacer ou faire déplacer. C'est la notion de "Kit d'intervention" préparé en fonction des données sur la panne qu'il est intéressant de préciser [Kaffel, 2001], car cela peut faire gagner beaucoup de temps. De plus, il faut ajouter au temps d'intervention, les temps de déplacement vers le site où a lieu l'occurrence, et par la-même ajouter à ces coûts, les différents coûts des trajets, heures supplémentaires, heures de nuits, variation du coût en fonction de la qualification de la ressource (même si ces compétences n'étaient pas requises). En effet, parfois, il est plus intéressant d'utiliser une ressource sur-qualifiée se trouvant sur place que de déplacer une personne dont les compétences sont "juste" adéquates par rapport au cas à traiter. Une fourchette économique doit donc être définie en fonction de l'éloignement des sites afin de statuer rapidement sur le cas de figure qui se présente.

L'un des intérêts d'une entreprise distribuée est la mise en commun des ressources, afin de diminuer les coûts individuels. On retrouve ce principe dans les grandes sociétés ou encore dans des regroupements en coopérative de plus petites entreprises.

Cependant, dans un système distribué les principaux points posant problème, sont effectivement la distance entre les sites, qui sont coûteux en temps de déplacement ainsi que la localisation des ressources, qui sont bien entendu limitées et qui peuvent être dans un lieu différent de celui des pannes. Les ressources humaines ne sont pas les seules à pouvoir être distribuées. D'autres ressources matérielles, telles que les pièces de rechange, peuvent être situées dans le magasin de stockage d'un autre site de l'entreprise, voire

chez le fournisseur. Des outils particuliers ou coûteux peuvent eux aussi avoir été achetés en quantité limitée et être répartis sur les différents sites de l'entreprise.

Ce principe peut donc aussi être appliqué aux pièces de rechange de sorte qu'un niveau de stock optimal global permette une diminution des stocks de chacune des entités. Dans ce but, Benaouda et *al.* [Benaouda *et al.*, 2005] proposent une modélisation basée sur les systèmes multi-agents représentant un système distribué en parties autonomes. Ces agents logiciels sont des algorithmes qui s'implémentent. Ceux-ci communiquent entre eux via des réseaux locaux ou par internet. Les fournisseurs ainsi que les différents utilisateurs d'articles doivent être identifiés et il doit être possible d'avoir accès à leurs données via le réseau. Selon la fréquence d'utilisation des pièces de rechange, il est important de s'intéresser en premier lieu aux articles à rotation rapide qui, en général, ne sont pas chers mais dont le volume global (lié à la forte quantité consommée) les rend très coûteux afin de les rendre disponibles à tous les utilisateurs et d'en déterminer une quantité optimale de réapprovisionnement. Chacun des sites reste bien entendu autonome mais leurs interactions permettent un équilibrage des quantités de cette ressource. Il doivent donc coopérer de manière dynamique et continue dans le temps. C'est pourquoi ils se basent sur l'utilisation d'une plate-forme de e-maintenance fonctionnant avec la technologie des web-services.

I.3 Décomposition fonctionnelle des services de maintenance

Après avoir introduit les notions de base de la maintenance ainsi que les différentes formes d'organisation des services de maintenance. Nous nous intéressons ici, plus en détail à son fonctionnement. La conception de la plupart des systèmes d'information s'appuie sur la pyramide de Herbert A. Simon [Simon, 1947]. Celle-ci reprend le schéma classique d'organisation à trois niveaux stratégique / tactique / opérationnel.

Le niveau supérieur concerne l'élaboration de décisions non programmables qui sont des décisions difficile à prendre et pour lesquelles les variables sont qualitatives et nombreuses. Ce niveau stratégique est celui de la définition continue des buts et des objectifs de l'entreprise ou des services, ainsi que du contrôle de l'ensemble de l'activité. Au niveau médian, se prennent les décisions programmables. Elles sont transmises pour exécution au niveau inférieur. Le schéma, de la figure I.3, peut permettre de représenter le fonctionnement des systèmes de maintenance. En effet le niveau stratégique regroupera, au niveau de la gestion d'un service de maintenance, la gestion des engagements du service (il peut s'agir de contrats dans le cadre de sous-traitance ou plus généralement d'objectifs de disponibilités pour les équipements concernés) et la définition de la politique de maintenance. Le niveau tactique comprendra la gestion du processus de maintenance et la gestion des ressources humaines. Le niveau opérationnel correspond à l'exécution des décisions prises dans les niveaux supérieurs et, dans notre cas, à l'affectation des tâches aux ressources. Ces trois niveaux seront donc présentés plus en détail dans les paragraphes suivants.

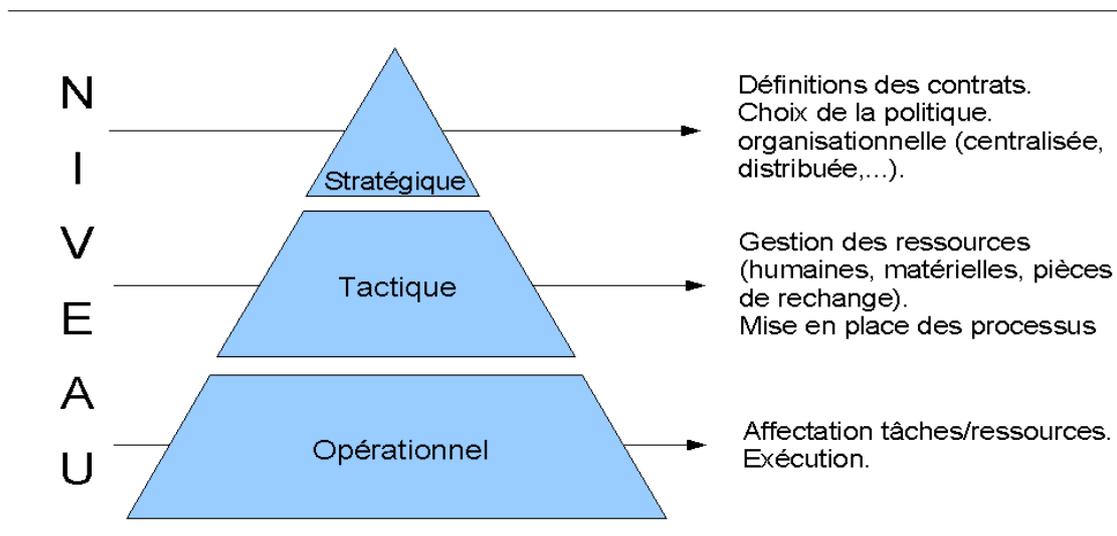


FIG. I.3 – Décomposition du fonctionnement de services.

Chacun de ces niveaux peut être décomposé par une description de ses composantes principales [Berchet, 2000] : le système décisionnel, le système d'information et le système physique. La figure I.4 en décrit les différentes parties. *Le système décisionnel* est aussi appelé système de conduite ou système de pilotage. Il a pour but de piloter et de prendre des décisions en fonction de l'état du système physique, de l'environnement et de ses objectifs. *Le système d'information* a pour objectifs principalement de collecter, traiter, transmettre et mémoriser les informations en provenance de l'environnement ou du système lui-même. Il sert de liaison entre le système de décision et le système physique. Bien souvent, dans un service de maintenance, c'est la GMAO (Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur) qui sert de support informatique pour les flux informationnels. *Le système physique* est aussi appelé le système opérant ou système technologique. C'est généralement des opérateurs qui interviennent pour agir sur le système en effectuant des transformations, des contrôles ou encore des opérations de manutention.

I.3.1 Une organisation stratégique des activités de maintenance

En décomposant le niveau stratégique suivant le schéma évoqué précédemment, figure I.4, on s'aperçoit que le système décisionnel a besoin d'information pour assurer le pilotage. En effet, le pilotage s'appuie notamment sur les comparaisons entre contrats qui découlent, des politiques de maintenance mises en place. Mais il a besoin aussi des flux d'informations, provenant du système informationnel, qui transmettent des données mesurant l'état des indicateurs. Ces évaluations à proprement dit sont réalisées dans le système physique. C'est donc la comparaison entre les données contractualisées et les informations remontant du terrain qui permettent de prendre les décisions.

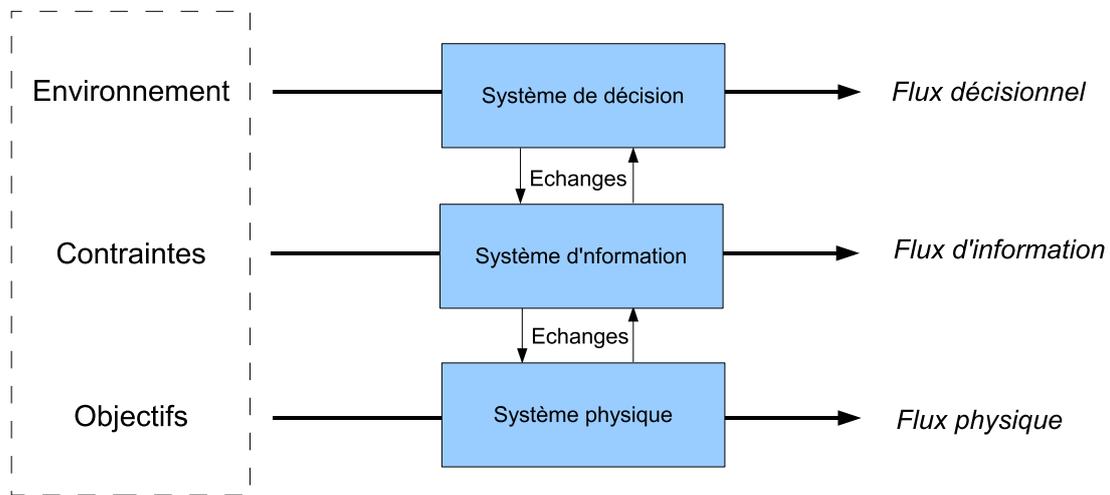


FIG. I.4 – Représentation de l'organisation de services.

I.3.1.1 Politique de maintenance

Dans beaucoup de domaines comme par exemple l'aéronautique, la maintenance est l'un des plus importants centre de coûts [Ghelam-Allah *et al.*, 2005]. Les principaux axes de recherche et de développement de ce secteur sont l'amélioration de la disponibilité des appareils ainsi que la diminution des coûts de maintenance tout au long de leurs vie. À l'heure actuelle, la sécurité est l'aspect prioritaire qui incombe à la maintenance. La logique de la maintenance est tout d'abord d'assurer un bon niveau de fiabilité des appareils, puis de les remettre en fonctionnement afin d'assurer une bonne disponibilité et, enfin, de minimiser les coûts de la mise en oeuvre des actions de maintenance. Cette politique de fonctionnement doit évoluer avec la technologie. L'électronique a pris une place très importante dans des systèmes tels que les avions, il est donc nécessaire d'adapter la politique de gestion de la maintenance et de la faire évoluer avec l'activité maintenue.

La politique de maintenance est divisible en deux niveaux : un niveau macro qui est celui de l'entreprise et un niveau micro qui est celui des équipements ou des machines.

- le niveau global de l'entreprise, où l'on définit une politique de maintenance générique qui cadre les activités de maintenance. Elle permet aux différents acteurs ainsi qu'aux services qui travaillent avec le service de maintenance de s'organiser.
- le niveau des équipements ou des machines, pour lequel on définit le type de maintenance en fonction de critères économiques, stratégiques, etc. Cette politique permet d'ajuster le type de maintenance, ainsi que les ressources en fonction de l'importance de l'équipement.

Le choix de la politique de maintenance peut être différent d'un équipement à un autre

[Kaffel, 2001], suivant la stratégie choisie : de faire, faire faire ou faire ensemble.

- Faire : Ce choix signifie que la politique de gestion veut que les différents aspects d'une activité donnée soient traités, résolus et gérés en interne sans aide ni intervention extérieure.
- Faire-faire : Correspond à confier tout ou partie d'une activité à une entreprise externe. Cela permet de bénéficier de coûts réduits dans certains cas mais aussi de technologie dont l'entreprise ne dispose pas.
- Faire ensemble : Cela repose sur l'idée de la complémentarité des ressources, des technologies et du savoir-faire [Butera, 1991]. Cela réside en un accord de coopération qui mise sur la participation active des deux partenaires. Cela peut permettre de mener à bien un grand nombre d'actions.

Le choix de faire ou faire-faire doit être justifié de manière économique [Bouchriha *et al.*, 2003]. Ce choix permet entre autres soit de libérer de la main d'oeuvre, pour la recentrer sur l'activité principale de l'entreprise, soit de ne pas augmenter le nombre d'employés lors de l'augmentation de la charge.

Il s'agit donc de déterminer s'il faut exécuter soi-même une tâche ou s'il vaut mieux la confier en tout ou partie à une entreprise externe dans une logique de performance [Ounnar *et al.*, 2003]. Cette approche est fondée sur la décentralisation des processus de décision, et permet un accroissement de l'autonomie dans la prise de décision. Elle nécessite en outre une très bonne communication entre les différents services responsables de la maintenance et les entreprises externes, pour que les décisions soient prises rapidement.

Sur le terrain, pour déterminer au mieux les dates de contrôles, une stratégie d'inspection des équipements de production a été mise en place [Isaac *et al.*, 2003]. Au cours de celle-ci, les états de fonctionnement en mode normal ou dégradé sont détectés. Ce n'est qu'après la détection que ces états sont diagnostiqués et que les réparations nécessaires sont réalisées. Dans un système de maintenance distribuée, il faut que des contrôles de routine ainsi que la maintenance préventive soient réalisés. Certains équipements n'étant pas forcément dotés de capteur d'état, c'est uniquement un contrôle réalisé par le service maintenance qui peut diagnostiquer un fonctionnement correct ou en mode dégradé. C'est donc l'intervalle de temps le mieux adapté, entre deux contrôles, que permet d'obtenir le modèle proposé [Kaffel, 2001].

Suivant l'importance des équipements, et surtout de leur état de bon fonctionnement, les arrêts ne sont pas admissibles. La maintenance préventive permet alors de ne pas subir les arrêts intempestifs dus aux pannes. Cependant, ces arrêts pour la maintenance préventive influencent le taux de défaillance de l'équipement sur lequel elle a été effectuée, en fonction de sa périodicité et de son importance. Les arrêts pour la réalisation de la maintenance préventive doivent être suffisants pour éviter toutes pannes, mais cependant pas trop fréquents afin de ne pas dégrader la disponibilité de l'équipement. La diminution de la fréquence des interventions de maintenance préventive ne doit cependant pas modifier les risques pour l'entourage de l'équipement [Messaoudi *et al.*, 2005]. Elle ne doit pas non

plus augmenter le nombre de pannes et/ou la durée des arrêts lors des pannes et donc ne pas diminuer la disponibilité de l'équipement. L'impact de l'espacement des arrêts pour la maintenance est observable sur l'évolution du taux de défaillance des équipements.

De la politique de maintenance en place dans l'entreprise découleront ses relations avec les entités externe, notamment dans la réalisation des différents engagements destinés à encadrer les activités de maintenance.

I.3.1.2 Définition et utilisation du cadre contractuel

Le choix de la politique va conduire à définir un cadre contractuel. Dans le cadre d'une relation interne à une entreprise, la notion d'engagement pourra donc être retenue. Dans le cadre d'une relation avec une entreprise extérieure, c'est la notion de contrat qui signifie ces engagements. Les cas qui posent problème et qui nécessitent réflexion sont bien entendu ceux dans lesquels il y a plus de tâches à traiter que de ressources disponibles. Lorsque des pannes ou des ordres d'intervention de maintenance préventive apparaissent simultanément, il s'agit de définir des niveaux de priorité entre chacune d'entre elles afin de dégager un ordre de priorité de traitement. Les services de maintenance, se plaçant à disposition de plusieurs entités de production différentes, ont un rôle similaire (ce qui peut aussi être réellement le cas) de celui d'un sous-traitant. Celui-ci effectue les activités de maintenance en tant qu'activité première et donc commerciale. C'est par le biais des contrats réalisés que va être déduit le premier aperçu d'une planification du traitement des pannes. La définition suivante introduit la notion de contrat :

Définition I.19 Contrat *Dictionnaire Larousse*

Convention juridique par laquelle une ou plusieurs personnes personnes s'engagent envers d'autres personnes à faire ou ne pas faire quelque-chose.

Le contrat n'est donc pas seulement un système de coordination, mais une référence destinée à organiser la coordination technique. Il permet aussi de garantir la réalisation des engagements, de partager les risques à des hauteurs préétablies et d'inciter les membres à réellement effectuer les tâches pour lesquelles ils perçoivent des contreparties.

Différents types de contrats maintenance peuvent alors être réalisés. Un contrat peut alors s'apparenter à un cahier des charges relatif à un équipement particulier. Le prestataire devra alors réaliser sur l'équipement les exigences inscrites dans le cahier des charges pouvant comporter la fourniture des pièces de rechange. Un contrat de maintenance peut aussi englober la maintenance préventive et/ou la maintenance corrective sur un équipement ou un ensemble d'équipements. Le prestataire s'engage donc sur l'amélioration de la disponibilité des équipements en prenant en charge la main d'oeuvre et les pièces de rechange liées aux interventions. Le plan de maintenance préventive comprend donc les échanges standards de composants ainsi que les contrôles réguliers à réaliser. La périodicité des interventions est préalablement définie et intégrée dans le plan de production.

Le nombre et la nature des équipements à maintenir sont spécifiés dans le contrat ainsi que le taux de disponibilité sur lequel le prestataire de maintenance s'est engagé.

Francastel définit d'une manière générale les contrats de maintenance [Francastel, 2001]. Tout contrat commence par une page de garde présentant les parties ou entreprises engagées dans la relation contractuelle et le rôle (de client ou prestataire) joué dans celui-ci. L'objet du contrat contient quant à lui ce que le client confie au prestataire et ce que le prestataire s'engage à faire (taux de disponibilité à garantir par exemple). C'est dans l'objet qu'il faut donc préciser s'il s'agit d'une obligation de moyen seulement ou si des résultats sont attendus du prestataire. Généralement tout n'est pas inclus dans le document rédigé, le contrat comporte aussi des annexes comprenant tous les documents constituant l'accord contractuel (règlement intérieur, l'offre du prestataire,...). De même que pour la qualité ou les méthodes, lors de la rédaction de contrat de maintenance, les normes NF ou ISO permettent une rédaction en des termes clairs et précis. Chacune des dérogations ou nouvelles clauses ajoutées au contrat devra de plus faire l'objet d'avenants qui seront signés par les parties concernées.

Quelque soit la forme du contrat, des obligations sont attendues de la part du prestataire. Celles-ci peuvent être de moyens ou de résultats vis à vis de la qualité et de la sécurité mais aussi de la productivité et de la disponibilité. Le contrat précise aussi les moyens à mettre en oeuvre par le prestataire ou fournis par le client pour assurer la prestation requise. Ceci comprend le personnel avec ses qualifications, ses compétences et son expérience mais aussi son régime de travail, la réactivité attendue. La mise à disposition du matériel tel que l'outillage individuel ou collectif, les moyens de manutention, l'outillage plus spécifique est aussi précisé dans le contrat. Les pièces de rechange, ou consommables non fournies par le client et à la charge du prestataire doivent aussi être listées. De même, les moyens informatiques pour la gestion de la prestation ainsi que le retour d'expérience et les moyens logistiques mis à la disposition par le client ou à fournir par le prestataire doivent y figurer. Les limites de la prestation doivent aussi être précisées, celles-ci pouvant être de nature géographique, technologique. Les conditions financières sont aussi à expliciter clairement. Elles comprennent la rémunération des prestations qui comprend le forfait défini initialement dans le contrat mais aussi les sommes pouvant résulter de prestations supplémentaires. On y retrouve aussi les variations de prix pouvant être appliquées en fin de période. Et bien entendu sur le contrat, figure sa durée.

La disponibilité garantie correspond à un pourcentage du temps d'ouverture. Celui-ci étant défini pour chaque équipement, on obtient la disponibilité réelle par la formule suivante :

$$\text{Disponibilité (\%)} = \frac{\text{Temps d'ouverture} - \text{Temps d'arrêt maintenance}}{\text{Temps d'ouverture}}$$

Dans le cas d'atelier comprenant des groupes d'équipement similaire, il est possible de définir une disponibilité moyenne pour l'ensemble de ces machines. Tout comme pour une machine seule, celle-ci sera mesurée et comparée avec l'engagement pris pour ce groupe.

Pour obtenir les données nécessaires au suivi de l'activité de maintenance, un support

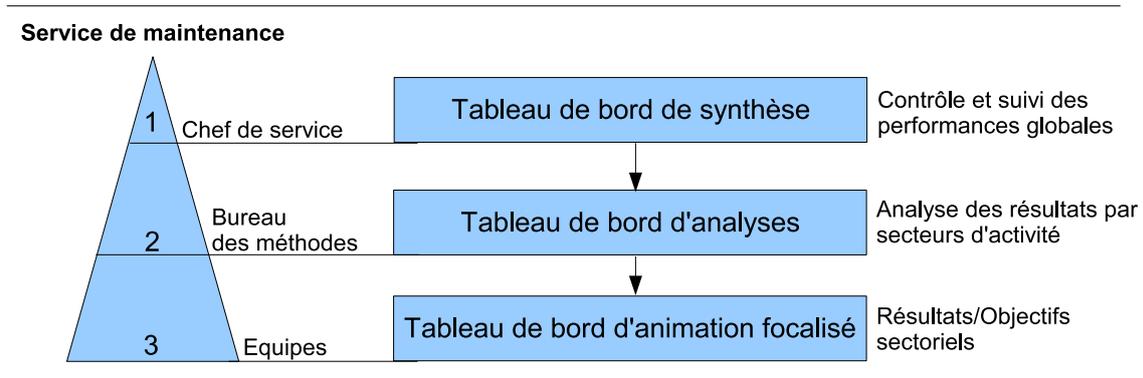


FIG. I.5 – Hiérarchisation des tableaux de bords

informationnel doit être mis en place dans l'entreprise. On retrouvera notamment les historiques d'arrêts de fonctionnement des équipements de production et les données concernant les ressources dont dispose le service de maintenance.

I.3.1.3 La GMAO : un support stratégique pour de l'information

La gestion des différentes ressources du service de maintenance est l'un des aspects les plus importants qui font son efficacité. Cette gestion est aujourd'hui réalisée presque systématiquement de manière informatique. Le système informatique des entreprises est souvent lié à l'histoire de leur informatisation. La mise en réseau des différents ordinateurs et l'installation progressive de logiciels pour les fonctions de l'entreprise font que des différences existent dans leur gestion. De plus, la mise en place d'un tel système comporte des risques d'échecs. Selon Monchy [Monchy, 2000] la première cause d'échec dans l'exploitation d'une GMAO est contenue dans l'attente d'un "investissement miracle".

Cependant si celle-ci est mise en place dans un service structuré et organisé, la GMAO deviendra rapidement indispensable. Elle deviendra la mémoire du service et permettra, grâce à ses possibilités de traitement d'information, une meilleure réactivité. Son partage des données supprimera la "personne indispensable". En outre elle permet une traçabilité des procédures et des actions de qualité et un suivi des coûts. Elle peut s'interfacer avec la comptabilité, les achats, les logiciels de GPAO (Gestion de la Production Assisté par Ordinateur), etc. ce qui facilite les échanges transversaux entre les services.

Chacun des différents niveaux hiérarchiques doit pouvoir bénéficier du tableau de bord les concernant [Monchy, 2000] tel que c'est décrit sur la figure I.5.

La gestion informatique de la base de données permet l'extrapolation temporelle des résultats pour obtenir des prévisions. Ces résultats sont analysés grâce à la mise en place d'indicateurs cohérents.

I.3.1.4 Indicateurs et objectifs

Afin d'observer périodiquement le système et d'en retirer les informations clés pour en évaluer la performance, la norme AFNOR présente un ensemble d'indicateurs de coût de maintenance, de disponibilité, de niveau de sécurité et de coût de défaillance [AFNOR, 1995]. Pour faciliter la gestion et éviter les confusions, le nombre d'indicateur doit rester limité. Cependant, ils doivent permettre d'évaluer l'impact de la maintenance sur le système en fonction d'objectifs préalablement définis. Pour piloter le système de maintenance, l'utilisation d'un tableau de bord permet de guider le service à travers des objectifs vers les niveaux de disponibilité des équipements définis. En outre, cela permet de réduire les coûts grâce à une connaissance des événements et à travers une analyse de la situation. Des plans d'action sont donc mis en place, les résultats suivis et l'efficacité évaluée. Puis, afin de faciliter la compréhension des résultats atteints, ils sont présentés sous la forme d'indicateurs. Le tableau de bord est donc un outil d'analyse objective des résultats obtenus [Monchy, 2000]. Ces indicateurs sont donc ramenés à des ratios liés à la rentabilité tel les coûts de maintenance sur la valeur du bien maintenu. Mais on retrouve aussi des indicateurs pour obtenir des informations sur ce que rapporte la maintenance tel que la disponibilité et bien entendu des indicateurs liés à la sécurité [Glade, 2005]. Selon Monchy, la qualité d'un indicateur est jugée suivant sa pertinence, c'est à dire suivant le fait qu'il permette une interprétation facile des événements étudiés et que la prise de décision soit facilitée. Cependant un indicateur doit aussi renvoyer fidèlement sans modification les données des événements. Il doit être juste et cette justesse doit être répétable dans le temps. L'échelle d'observation doit aussi être sensible aux variations et doit présenter lisiblement les modifications de l'indicateur.

Chaque activité dispose de ses propres indicateurs personnalisés. Certains sont des indicateurs permanents et permettent de gérer les activités courantes. D'autres sont liées à des projets et permettent le suivi de l'avancement à travers les résultats obtenus et à atteindre. De même des indicateurs d'axe de progrès peuvent être temporairement mis en place pour observer les résultats d'un effort ciblé. On retrouve aussi des indicateurs plus spécifiques liés au suivi d'une fonction particulière telle que la gestion d'un projet défini. L'efficacité à proprement parlé d'un service de maintenance peut être mesurée de manière interne. Différents indicateurs peuvent donc être mis en place :

- Afin d'évaluer l'efficacité des mesures préventives en place, on utilise le ratio "*Heure de dépannage/Heure totale d'activité*". Il est basé sur la part du dépannage dans l'activité et son niveau est généralement inférieur à 30% dans de nombreux secteurs.
- Afin d'évaluer l'efficacité, logistique et organisationnelle du service, on utilise le ratio "*Heure effective de travail/Temps de présence*". Cela permet de juger des gaspillages de temps liés aux déplacements, aux attentes et aux recherches de ressources.
- La réactivité est, quant à elle, évaluée par la qualité de l'ordonnancement des tâches et la réactivité face aux urgences à travers "*Délai de réponse aux demandes de travail/Délai moyen*".
- Les indicateurs des coûts de maintenance, de la performance des équipements et de

l'efficacité du service de maintenance doivent pouvoir fournir des informations suivant différentes périodicité afin de déterminer des tendances (annuelle, trimestrielle, mensuelle, hebdomadaire ou encore quotidienne) afin de pouvoir rapidement observer, analyser et expliquer toute dérive.

Parmi les différents points suivis pour évaluer l'activité du service maintenance, le nombre d'arrêts imprévus est relevé sur la période d'évaluation. Celui-ci est bien entendu comparé aux références (années ou mois antérieurs ou de référence) pour observer l'évolution par rapport aux engagements pris. L'évolution du coût total des pièces de rechange est comparé au budget objectif. Les coûts mensuels (pièces et mains d'oeuvre) de maintenance corrective sont aussi comparés à l'historique pour chaque équipement et le nombre ainsi que la durée totale d'interventions sont relevés. Pour les équipements pour lesquels le coût de maintenance est le plus important, il peut aussi être demandé au prestataire d'identifier les causes techniques de ces coûts et peut avoir à proposer des modifications à effectuer, ou les éventuels investissements à réaliser.

Dès lors qu'il y a plus d'actions à réaliser que de moyens pour les traiter, ce n'est plus le fait qu'une tâche ait été programmée qui compte. C'est l'importance qu'a son traitement par rapport aux niveaux de disponibilité garantis dans le contrat relatif à l'équipement sur lequel elle se produit, qui permet de déterminer un ordre de traitement.

Des pénalités pouvant être engendrées par un franchissement du seuil garanti, les priorités évoluent donc en fonction du temps, de la date, de la disponibilité actuelle de l'équipement et de celle des autres.

La priorité entre deux tâches de maintenance est donc calculée de la même manière qu'elle soit de type préventive ou corrective. C'est l'impact qu'a comparativement le fait de traiter telle ou telle tâche en premier sur la disponibilité des équipements qui fera que des tâches seront prioritaires par rapport à d'autres. Les priorités sont alors le reflet des disponibilités des équipements, elle est alors le facteur origine du placement des tâches lors de la réalisation d'un ordonnancement. Elle se traduit à travers la nécessité d'avoir une intervention rapide. Celle-ci n'est, évidemment pas la même, si l'on se place du point de vue du prestataire de maintenance ou du service de production. La nécessité d'intervention pour le service de maintenance dépend du niveau de disponibilité de l'équipement considéré, tandis que pour le service de production elle dépend de l'importance des ordres de fabrication en cours sur l'équipement. On parle alors de la *criticité* de l'intervention du point de vue du service de maintenance et d'*urgence* à proprement parler du point de vue du service de production.

Dans la littérature, la disponibilité est évoquée comme contraintes temporelles [Baptiste *et al.*, 2001] pour le positionnement de tâches lors de la réalisation d'un ordonnancement. Elles signifient que l'équipement est en fait occupé sur certaines périodes par des activités comme de la maintenance [Aggoune, 2003]. Ou encore, l'indisponibilité est liée aux ressources afin de signifier qu'elles ne peuvent intervenir entre certaines dates [Adzakpa *et al.*, 2003a]. A notre connaissance, la notion de disponibilité, ou plutôt, de taux de disponibilité d'un équipement n'a pas été utilisée, dans la littérature, comme indice

d'urgence pour affecter des priorités lors de la réalisation d'ordonnancement.

I.3.2 La programmation tactique des activités de maintenance

Le niveau tactique se décompose aussi suivant le schéma de la figure I.4. Tout comme les activités de production, les activités de maintenance sont structurées. Les différentes étapes sont définies à travers le processus de maintenance. Un lien entre la maintenance et la production peut cependant s'avérer indispensable dans certaine structure. La GMAO permet alors de faire le lien entre les différents systèmes de gestion informatisée. Les décideurs du service de maintenance s'appuient sur les données concernant les ressources humaines, pour développer des relations contractuelles. C'est principalement sur leurs compétences qu'ils se basent pour prendre les décisions.

I.3.2.1 Le processus de maintenance

Afin de garantir une efficacité et donc minimiser les pertes de disponibilité, l'enchaînement des tâches à effectuer au cours d'une intervention de maintenance sont défini dans *le processus de maintenance*. Spadoni donne une définition du processus de maintenance :

Définition I.20 Le processus de maintenance [Spadoni, 2004]

Le processus de maintenance est un enchaînement d'activités contrôlées ou interactives

Les différentes activités enchaînées au cours du processus de maintenance sont décrites dans la thèse d'Ivana Rasovska [Rasovska, 2006] :

La demande est la première étape qui enclenche le processus. C'est la formulation du besoin du client envers le prestataire de service de maintenance.

Le déclenchement est la signalisation de la défaillance ou de la panne. C'est une requête, généralement automatique, que l'on appelle demande d'intervention. Elle peut être déclenchée en externe par le client pour une intervention de maintenance corrective, ou en interne par la GMAO comme c'est le cas pour de la maintenance préventive.

La préparation est basée sur l'AMDEC (Analyse de Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) ou sur une étude spécifique à l'équipement. Elle permet d'avoir la stratégie de maintenance la mieux adaptée à l'équipement voire de pouvoir améliorer son fonctionnement ou sa disponibilité.

La validation et la correction interviennent après la réception de la demande. Celle-ci est revue par le prestataire puis renvoyée au client qui confirme les dates d'intervention.

La planification et le lancement de l'intervention sont réalisés suivant les disponibilités de l'opérateur qui dispose des compétences pour la mener à bien. Les compétences requises sont identifiées dans la demande d'intervention. Le planning de production permet de définir la disponibilité de l'équipement pour l'intervention. La demande d'intervention est donc complétée par la date d'intervention puis transmise à l'opérateur sous la forme d'un ordre de travail.

L'ordonnancement et l'approvisionnement en pièce de rechange et outils permettent de compléter les ordres de travail. La date de l'intervention est donc fixée en fonction des délais d'intervention.

La prise en compte de l'intervention dans les données de la maintenance est importante pour la mise à jour des indicateurs de suivi et pour l'exploitation du retour d'expérience.

Le diagnostic et l'expertise de la panne concernent la localisation, l'identification de la cause de celle-ci et les actions à mettre en oeuvre.

L'approvisionnement en outils et pièces de rechanges est dans certains cas à réaliser à nouveau. Ceci est dû à un manque d'informations ou à l'identification d'un nouveau besoin.

L'intervention est composée de l'activité de maintenance sur l'équipement mais elle consiste aussi, pour l'opérateur, à remplir un rapport d'intervention. Celui-ci est nécessaire pour l'exploitation de retour d'expérience et le suivi des activités de maintenance.

Le contrôle et la restitution de l'équipement sont réalisés conjointement par l'opérateur de maintenance et le client. Au cours de cette étape, ils vérifient le bon fonctionnement de l'équipement.

I.3.2.2 Lien entre la maintenance et la production

Cette succession d'étapes se déroule dans le milieu de la production et doit en tenir compte. La GMAO peut s'interfacer avec des logiciels tel que la GPAO afin de faciliter les échanges entre les services maintenance et de production. Une politique commune (gestion de la production et de la maintenance) peut alors être mise en place. Son objectif est d'obtenir le meilleur compromis entre les coûts des services et la disponibilité des équipements obtenue. Dans ce sens, *Boshian et al.* [Boschian *et al.*, 2005] ont développé une politique qui permet de déterminer simultanément les instants de réalisation de la maintenance préventive et les niveaux de stocks intermédiaires.

Les activités de maintenances et de production ne pouvant pas être effectuées simultanément,

ment sur le même équipement, il devient alors nécessaire de réaliser des ordonnancements conjoints. En ordonnancement conjoint (ordonnancement composé de tâches de maintenance et de production) comme en maintenance seule, il n'est pas facile de résoudre les différents problèmes de manière analytique. La simulation permet de déterminer de manière explicite et démonstrative les critères et l'amélioration apportée par telle ou telle politique. Pour obtenir une bonne représentativité du système, on associe, dans la simulation, des fonctions de densité aux durées de vie et des lois aux actions de maintenances correctives ou préventives. Les différents facteurs qui permettent d'optimiser les coûts et la disponibilité ne sont pas forcément les mêmes, et peuvent souvent s'avérer antagonistes. L'impact des tâches de maintenance sur les ordonnancements conjoints provoque effectivement une perte de performance. Cependant, celle-ci se retrouve profitable pour la robustesse de ce dernier face aux perturbations [Benbouzid *et al.*, 2005].

Dans les différentes approches observées, la production n'est pas la seule activité ordonnée simultanément à la maintenance. Allaoui *et al.* ont travaillé sur l'ordonnancement conjoint entre la maintenance et la qualité. Ils observent l'effet de la variation des stratégies de maintenance préventive sur l'aspect économique et sur la qualité des produits [Allaoui *et al.*, 2005]. En effet, la maintenance préventive diminue la disponibilité des équipements au profit de la qualité.

Le principal lien entre la maintenance et la production est la disponibilité garantie de l'équipement. Elle correspond donc à une période pendant laquelle la production doit pouvoir disposer de l'équipement. Nous considérons que lorsque la maintenance est requise pour du préventif, l'équipement sera libéré à l'arrivée de l'équipe, tandis que, lorsqu'une action corrective sera requise, l'équipement sera arrêté à l'arrivée de la panne. Un fonctionnement en mode dégradé assure, quant à lui, un pourcentage de la disponibilité réalisée en fonctionnement nominal jusqu'à la réparation de l'équipement.

I.3.2.3 Les ressources humaines et leurs compétences

L'étape de l'intervention, du processus de maintenance, fait principalement référence à l'activité du personnel de maintenance. Celui-ci s'appuie sur ses compétences pour traiter les tâches. Dans le domaine de la gestion des compétences, Kane *et al.* [Kane *et al.*, 2003b] s'intéressent au découplage du personnel de production et de maintenance de leurs activités respectives. De cette façon, chacun peut être utilisé en tant que ressource humaine dans le domaine qui n'est pas du ressort de sa compétence primaire. Ils supposent que les employés disposent d'une grande compétence dans leur domaine de qualification : 100% de productivité contre 50% dans le domaine qui n'est pas le leur.

La gestion des compétences représente un enjeu stratégique pour beaucoup d'entreprise. Il ne suffit plus d'avoir connaissance des compétences disponibles au sein de l'entreprise, il faut être en mesure de déterminer les besoins (recrutement, formations,...) [Harzallah *et al.*, 2001]. 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** : Elles peuvent être utilisées dans différentes situations professionnelles,
- **Les compétences spécifiques** : Celles-ci sont liées au domaine d'activité ou au secteur 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.

On retrouve dans la littérature plusieurs types de compétences [Tchommo *et al.*, 2003] :

- **Les compétences par rapport aux tâches** : Les employés savent faire un type de tâche bien particulier, qui ne dépend pas de l'équipement sur lequel il se trouve.
- **Les compétences par rapport aux machines** : Le personnel est qualifié pour effectuer tout type de travail sur des machines bien précises [Crocil *et al.*, 2000]. Ceux-ci changeront donc peu de poste ce qui facilitera la gestion.
- **Les compétences mixtes** : Cela correspond à des personnes qui possèdent les qualifications pour réaliser des tâches différentes et opérer sur des équipements différents. Cela permet de répondre plus facilement et plus rapidement aux changements de production [lassi G.L Vairaktarakis *et al.*, 2002], [Kher, 2000].
- **Les compétences hiérarchisées** : Ces compétences sont triées et classées en fonction de leur importance et de leur type, un ordre hiérarchique leur est affecté. Puis on considère qu'un employé plus qualifié qu'un autre peut prendre sa place mais que l'inverse n'est pas possible [Hung, 1994], [Billionnet, 1999].

La hiérarchisation des activités stratégiques [CEDIP, 1999], quant à elle, consiste à identifier les activités qui sont primordiales (c'est-à-dire celles qui, si elles étaient mal réalisées, déboucheraient sur les conséquences les plus graves et celles sur lesquelles le service est d'abord évalué). Cela permet de définir trois grandes catégories de compétences :

- les compétences « essentielles ». Ce sont celles qui sont absolument nécessaires pour l'efficacité et la performance du service.
- les compétences « utiles ». Elles sont importantes pour la qualité des résultats obtenus. Cependant les résultats peuvent être atteints sans elles ;
- les compétences « complémentaires » ou secondaires. Ce sont celles qui ne sont pas indispensables, mais qui restent malgré tout nécessaires pour atteindre un niveau de performance nécessaire.

Cette hiérarchisation est très utile en particulier pour définir les priorités dans les processus de gestion des compétences (recrutement, formation...).

- **Les compétences par équipe de travailleurs** : Une équipe est composée de personnel, dont la somme des compétences de chacun compte pour un ensemble global de compétences au groupe [Grabot *et al.*, 2000].
- **Les compétences par contrats** : Elles correspondent aux compétences nécessaires pour répondre aux besoins des clients vitaux de l'entreprise [Kher, 2000].

La compétence, c'est tout d'abord la capacité d'agir et de réagir avec la pertinence requise

en situation de travail [Boumane *et al.*, 2005b]. En effet, Boumane *et al.* s'intéressent à l'identification des compétences nécessaires, passent en revue les limites et insuffisances des pratiques actuelles dans le domaine de la gestion des compétences. Ils présentent et étudient aussi les différents points pour identifier les compétences requises. Il s'agit en outre de permettre aux entreprises d'acquérir plus facilement le personnel ayant les compétences adéquates aux besoins mais aussi de faire en sorte qu'elles les acquièrent au bon moment. La gestion des compétences doit donc se situer au centre des stratégies de développement. Cette gestion prend en compte les savoir, savoir-faire, le potentiel de chacun ainsi que l'expérience du personnel afin de pouvoir intervenir quand il faut et de la manière nécessaire. Grand nombre d'entreprises affichent cependant les principes de la gestion des compétences, mais en réalité très peu les appliquent. 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 : la première est l'identification des compétences nécessaires pour l'entreprise en fonction de son métier, de ses activités et du développement future de celle-ci. La deuxième étape consiste évidemment à identifier celles dont dispose réellement la société. La troisième étape vise à analyser la différence entre les compétences détenues et celles qu'il faudrait pour que l'entreprise fonctionne de manière optimum. La quatrième étape est celle des actions mises en place afin d'obtenir les compétences manquantes (recrutement, formation,...). Et 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. L'un des aspects primordial dans une telle démarche est l'adhésion du personnel à tous les niveaux. La méthodologie d'identification des compétences requises, définie par Boumane *et al.*, a été appliquée à l'activité de régulation [Boumane *et al.*, 2005a]

L'autonomie, l'initiative et la responsabilité des salariés dans l'utilisation et le développement de leurs compétences sont les bases de l'efficacité des systèmes modernes [Thomas, 2005]. Cela s'appuie notamment sur un dialogue et une communication renforcée au sein de l'entreprise. Afin de donner le maximum de flexibilité et de réactivité à l'organisation, il faut donner de l'autonomie aux équipes et les responsabiliser sur l'impact de leur travail dans la performance et la pérennisation de l'entreprise [Bauchet, 2005]. C'est donc la performance du système de maintenance qui donnera au système de production les meilleures conditions pour l'exercice de ses fonctions.

I.3.3 La maintenance du point de vue opérationnel

Le niveau opérationnel est aussi décomposable. C'est à ce niveau que les décisions concernant les priorités données aux différentes tâches à traiter sont prises. L'importance de la rapidité du traitement d'une tâche n'est pas forcément la même du point de vue du service de production ou du service de maintenance. Les flux d'informations représentant les différentes données concernant les ressources et les tâches sont gérées par la GMAO. Elle permet une transmission des informations concernant le personnel de terrains. A la vue de ces données, l'affectation et l'ordonnancement des tâches est alors réellement

réalisé.

I.3.3.1 Engagements et pénalités

Les conditions financières définies à travers les engagements pris par le service de maintenance, sont généralement complétées par les sanctions financières, les pénalités et/ou les bonifications apportées ou supportées par les factures du prestataire.

Pour inciter le prestataire à intervenir consciencieusement, dans le cas de gains de productivité obtenus par des efforts conjoints, le bonus peut être réparti entre les partis. Bien que la nature des problèmes liés à la qualité du service puisse être très variée, des pénalités peuvent s'appliquer si le nombre d'anomalies constatées dépasse l'objectif contractuel. Celles-ci seront fonction du dépassement du seuil de tolérance fixé. Concernant la sécurité des interventions, le prestataire peut non seulement se voir pénaliser par une augmentation coût de ses assurances, mais aussi par une pénalité infligée par le client. Des indicateurs permettent de suivre l'évolution de la disponibilité des équipements. Dans le cas d'un engagement avec obligation de résultat, le service de maintenance garantit un taux de disponibilité. Celui-ci se situe dans une fourchette, « une classe » (entre 98 et 100% par exemple). Si, pour une machine ou pour un groupe de machines, l'objectif de disponibilité n'est pas atteint, celui-ci sera considéré comme étant de la classe inférieure et une ristourne liée au basculement de classe sera accordée en guise de pénalité par le prestataire au client (Coût de maintenance corrective, préventive, et le niveau de pièces détachées cible). La pénalisation du service de maintenance en fonction du taux de disponibilité d'un bien confié l'implique dans la productivité de l'entreprise. Lorsque le service de maintenance a la maîtrise de la sûreté de fonctionnement de l'équipement, celui-ci doit donc prendre toutes les précautions pour éviter toute faute opératoire. Ceci est beaucoup plus difficile pour des équipements ou des procédés dans lesquels les manoeuvres opératoires ont une forte influence sur la fiabilité.

Le suivi des indicateurs a aussi pour but de rendre plus réaliste les contrats des années suivantes. Pour calculer le niveau de disponibilité qui sera éventuellement garanti dans le prochain contrat, le sous-traitant ne s'appuie pas sur le taux obtenu l'année précédente mais sur celui qui aurait dû être atteint.

Le schéma suivant (figure I.6) présente l'évolution de la disponibilité en fonction du temps d'arrêts et de remises en route. Une perte de disponibilité est observable suite aux arrêts et une stabilisation suite aux remises en route. Celle-ci évolue sur une période donnée et pour laquelle un seuil à été défini dans les engagements.

Ces informations sont nécessaires pour le pilotage de l'activité de maintenance. La communication et la mise à disposition des données doivent être possibles au sein du service de maintenance lui même mais aussi entre les différents services avec lesquels il est en relation. C'est donc la GMAO qui permet ces communications internes au service maintenance mais aussi transverses entre services.

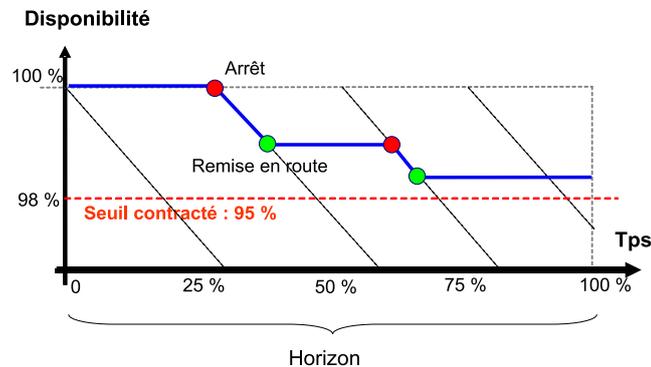


FIG. I.6 – Exemple d'évolution de la disponibilité

I.3.3.2 Support informatique de gestion des ressources et des activités

La GMAO est caractérisée par quatre fonctionnalités :

- La gestion de la maintenance c'est-à-dire des interventions préventives et curatives sur les machines,
- La gestion du personnel de maintenance : planning, affectations aux personnes, gestion des formations (peu usité),
- La gestion des stocks de pièces détachées : contrôle des stocks en magasin, alertes sur seuil, réception de pièces,
- La gestion des achats : Edition des commandes, gestion des fournisseurs et de leur prix, facturation.

Elle intègre des fonctions d'échanges avec les standards des logiciels d'entreprise ou Progiciel de Gestion Intégré (PGI) aussi appelé ERP (Enterprise Resource Planning).

La GMAO s'inscrit dans un projet d'amélioration de productivité à travers principalement les points suivants :

- l'amélioration de la disponibilité des équipements,
- la prolongation de la durée de vie des machines,
- l'amélioration du taux de charge de l'équipe maintenance,
- l'amélioration du partage de l'information, suppression de la "personne indispensable",
- l'amélioration de la sécurité des équipements,
- la maîtrise des coûts de maintenance.

Un système de gestion de la maintenance adapté aux besoins de l'entreprise manufacturière peut lui permettre de rester compétitive. Pour cela, il doit avoir été implanté correctement en fonction de l'infrastructure de l'entreprise, des ressources (humaines et matérielles), des pratiques de gestion existante (pièces de rechange, stock, etc.) et la sécurité à travers celle du fonctionnement des équipements et de l'entretien des bâtiments. Un programme de gestion de la maintenance ne peut atteindre les résultats voulus sans

la préparation du terrain et sans l'implication du personnel. Ces deux conditions sont importantes pour la réussite de l'implantation d'un système de gestion de la maintenance. L'influence se fera ressentir sur des critères de compétitivité de l'entreprise, telle que la qualité, les coûts de revient, les temps de fabrication, la flexibilité, le service et la réputation de l'entreprise.

La GMAO permet une gestion du personnel de maintenance avec notamment la communication des plannings et de l'affectation des tâches aux personnes. Les problèmes d'affectation ne sont pas simples. En effet, ceux-ci doivent tenir compte des caractéristiques des tâches mais aussi des ressources.

I.3.3.3 Affectation tâches/ressources

Dans le domaine de la maintenance industrielle, les compétences, les connaissances et les qualifications sont les outils de travail de chaque opérateur. Même si, en général, il a une certaine polyvalence, c'est réellement de leurs compétences que dépendent les affectations.

La bonne gestion de l'activité de chacun des membres du service de maintenance permet dans certains cas de réaliser plus de tâches sur une même période que des affectations hasardeuses. Elle peut aussi permettre de limiter le nombre de ressources pour rendre économiquement compétitif le service. Elle permet donc principalement de réaliser, dans les délais requis, des tâches qui, sans une gestion de l'activité ainsi qu'une prise en compte de l'évolution des taux de disponibilité, se retrouveraient hors délai. La détermination de la meilleure séquence d'enchaînement de ces tâches dépend de plusieurs choses : de la tâche elle-même et de la période pendant laquelle il est économiquement préférable qu'elle soit traitée, mais aussi du personnel requis en fonction de ses compétences.

Chaque tâche est caractérisée par une compétence requise. Du choix de la ressource, dépend la performance de la maintenance. La résolution du problème d'affectation et d'ordonnancement nous conduira donc à trouver la bonne ressource et la bonne date de traitement de la tâche.

I.4 Conclusion

La maintenance est l'une des composantes qui influence les performances de l'entreprise. De nos jours, elle permet non seulement l'identification réactive des éléments défaillants, mais aussi la prévision des pannes. Les services de maintenance réalisent principalement deux types de tâches : les tâches de maintenance corrective et de maintenance préventive [AFNOR, 2001]. Ces tâches ont pour principale différence que les tâches préventives sont connues pour un horizon déterminé alors que l'arrivée des tâches correctives n'est pas prévue. Elles ont cependant pour point commun de requérir l'intervention de ressources humaines compétentes [AFNOR, 2002]. Ces ressources sont organisées

dans le service de maintenance. Celui-ci assure le maintien et la remise en état de bon fonctionnement d'équipements. Il prend des engagements auprès des exploitants de ces équipements [Francastel, 2001]. Ces ressources humaines sont, en règle générale, polyvalentes [Monchy, 2000] mais suivant leur parcours et leur expérience professionnelle leur efficacité peut varier.

Dans ce chapitre, nous avons présenté la fonction de maintenance avec notamment les différentes stratégies de maintenance et les ressources. Cette fonction ayant évolué, nous avons présenté les différentes formes et organisations de la maintenance que l'on peut rencontrer dans les entreprises. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons réalisé une décomposition fonctionnelle des services de maintenance, suivant le schéma classique d'organisation à trois niveaux stratégique / tactique / opérationnel. L'objectif de ce chapitre est de permettre de situer le service maintenance dans l'entreprise ainsi que d'en comprendre l'importance pour l'entreprise. Il ressort donc de cette étude que les ressources humaines sont plus que jamais acteur de l'efficacité du service et qu'une organisation performante de leurs activités de travail peut permettre d'accroître la compétitivité du service et donc de l'entreprise.

L'affectation des tâches ainsi que l'organisation dans le temps de l'activité des ressources humaines du service de maintenance permet au service de maintenance de gagner en efficacité. Cela signifie qu'il peut être capable d'absorber une charge plus importante sur une même période, qu'en l'absence d'organisation. Dans certain cas, il pourra aussi tenir ses engagements de disponibilité, là où sans organisation, cela ne serait pas possible.

Cette problématique, rencontrée par les services de maintenance, concerne l'affectation et l'ordonnancement des tâches de maintenance aux ressources humaines. Nous la détaillerons dans les chapitres suivants, avec tout d'abord l'état des travaux de recherche dans ce domaine, puis la proposition de nouvelles approches que nous avons développées.

Chapitre II

Ordonnancement des activités de maintenance

L'environnement concurrentiel dans lequel évoluent les entreprises, les soumet à des exigences de plus en plus fortes en terme de coût, de délais, et de qualité. De par son action, le service de maintenance a une influence sur chacun de ces axes. Des équipements de production, dont l'entretien est suivi, permettent en effet de réduire le coût de la maintenance réparti sur la production. Cela permet aussi de tenir des délais pour lesquels l'entreprise s'engage, en s'affranchissant d'arrêts de production imprévus. Avoir des équipements de production qui fonctionnent correctement est aussi une garantie qualité. Le service de maintenance intervient alors dans un contexte très exigeant. L'organisation de ce service doit donc non seulement intégrer les contraintes propres au service, mais aussi prendre en compte celle de l'entreprise telle que la disponibilité des équipements.

Le service de maintenance organise l'activité de ses ressources humaines afin de répondre à l'attente de ses "clients" qui sont les services de production. L'apport d'une solution efficace à ce problème d'ordonnancement constitue un enjeu économique important. Il existe un grand nombre de problèmes génériques pour lesquels des approches de résolutions sont associées. La recherche et l'identification de ces problèmes peut permettre de mettre en évidence la nécessité de nouvelles approches.

Comme dans tout autre service, les ressources humaines qui composent le service de maintenance, disposent de compétences. La notion de compétence est la capacité permettant d'exercer convenablement une fonction ou une activité. Les compétences des ressources influent sur la durée des tâches. La durée d'une tâche n'est alors plus une donnée, mais une variable dépendant de la ressource qui est en charge de son traitement. Une tâche ayant un temps de traitement plus court que prévu, entraîne une perte de productivité du service car l'opérateur aurait pu éventuellement réaliser d'autres tâches. Cependant, si la tâche nécessite plus de temps pour son traitement, ce sont toutes les tâches suivantes qui seront décalées dans le temps. Les approches d'affectation et d'ordonnancement doivent donc tenir compte du niveau de compétence des ressources. Ceci

particulièrement dans le domaine de la maintenance où les différentes connaissances et qualifications sont les outils de travail du personnel. L'objectif de ce chapitre est de présenter l'ordonnancement des activités de maintenance et ses spécificités.

Ce chapitre commence donc par une présentation des notions de base d'ordonnancement. Puis, nous ferons le lien avec le chapitre précédent à travers l'ordonnancement des activités de maintenance. Dans une troisième partie, nous présenterons les incertitudes inhérentes à l'activité de maintenance et la nécessité de les prendre en compte lors de la construction des solutions d'ordonnancement. Enfin, nous présenterons la problématique de nos travaux ainsi que nos objectifs.

II.1 Introduction aux problèmes d'ordonnancement

L'ordonnancement est une activité que tout le monde pratique et bien souvent sans s'en rendre compte. Faire couler le café le matin pendant que l'on prend une douche est un exemple très simple mais qui met en évidence que l'organisation dans le temps des tâches permet de gagner du temps. Ce temps gagné peut, en revanche, s'avérer très précieux puisque pour une entreprise il peut représenter de la productivité et donc de l'argent. Nous présentons, dans ce chapitre, les notions d'ordonnancement et l'utilité de telles méthodes dans des problématiques de gestion d'activités de maintenance.

II.1.1 Définitions

L'ordonnancement a pour but d'aider au pilotage des systèmes et donc d'aider à prendre des décisions permettant d'atteindre un ou plusieurs objectifs.

De nombreuses définitions de l'ordonnancement sont proposées dans la littérature. Nous avons choisi de retenir la suivante :

Définition II.1 Ordonnancement [Esquirol *et al.*, 1999]

Le problème d'ordonnancement consiste à organiser dans le temps la réalisation de tâches, compte tenu de contraintes temporelles (délais, contraintes d'enchaînement,...) et de contraintes portant sur l'utilisation et la disponibilité de ressources requises

Par abus de langage, le terme "ordonnancement" est utilisé pour désigner la solution d'un problème d'ordonnancement. La solution d'un problème d'ordonnancement présente pour chaque tâche du problème les dates du début de leur exécution et les ressources auxquelles elles seront affectées. Un problème d'ordonnancement peut être traité en fonction d'un ou plusieurs objectifs ou critères de performance (durée des tâches, somme des retards, équilibrage de la charge,...). La définition II.2 précise la notion de tâche et ses propriétés.

Définition II.2 Les tâches ordonnancées [Esquirol *et al.*, 2001a]

Une tâche est une entité élémentaire de travail localisée dans le temps par une date de début t_i ou de fin c_i , dont la réalisation est caractérisée par une durée p_i (on a $c_i = t_i + p_i$) et par l'intensité a_i^k avec laquelle elle consomme certains moyens k , ou ressources. Pour simplifier, on supposera que pour chaque ressource requise, cette intensité est constante durant l'exécution de la tâche

Pour que leur traitement soit mené à bien, les tâches peuvent requérir l'emploi de ressources. Ce que nous entendons, ici, par ressource est précisé dans la définition II.3.

Définition II.3 Les ressources d'un ordonnancement [Esquirol *et al.*, 2001a]

Une ressource k est un moyen technique ou humain requis pour la réalisation d'une tâche et disponible en quantité limitée, sa capacité c_k (supposé constante)

Une ressource peut être renouvelable, comme c'est le cas pour les hommes, les machines, l'outillage,..., c'est à dire qu'elle peut être utilisée et qu'une fois la tâche terminée, elle est à nouveau disponible. Mais elle peut aussi ne pas l'être, on parle alors de ressource consommable telle que la matière première, les produits d'entretien ou encore les budgets. Une ressource est de plus *doublement contrainte* si son utilisation instantanée et sa consommation globale sont limitées. Si une ressource ne peut exécuter qu'une seule tâche à la fois elle est dite *disjonctive* (ou non partageable) comme c'est le cas pour une machine outil ou un robot manipulateur. Dans le cas où une ressource pourrait être utilisée dans le traitement de plusieurs tâches simultanément, comme dans le cas où plusieurs ressources soit utilisées pour la même tâche, on parle de ressource cumulative (ou partageable) [Esquirol *et al.*, 2001a].

II.1.2 Notations

L'ordonnancement consiste donc à organiser dans le temps la réalisation de tâches sur des ressources appelés machines. Par convention, une tâche est numérotée par j et une machine est numérotée par i . Les notations en référence à une tâche j , que nous utilisons dans ce travail, sont celles que l'on retrouve couramment dans la littérature. La présentation de celles-ci est nécessaire pour la compréhension de la suite.

Les notations font référence à des données :

- $p_{i,j}$: durée de la tâche j sur la machine i ,
- r_j : date de disponibilité de la tâche j (*release date*). Elle correspond à la date avant laquelle la tâche ne peut pas commencer,
- d_j : date d'achèvement souhaitée de la tâche j (*due date*),

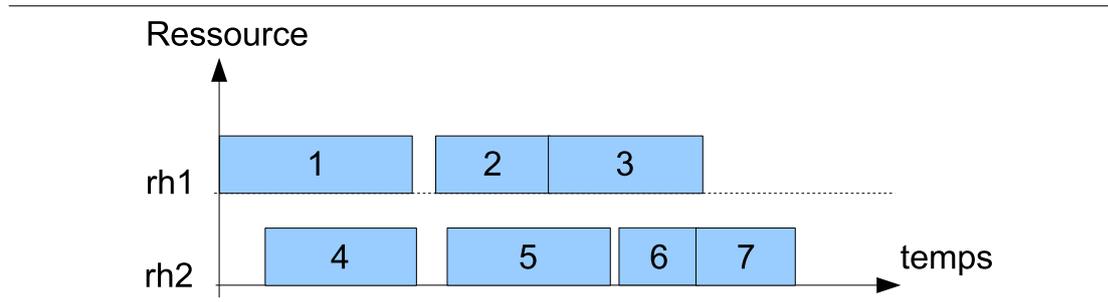


FIG. II.1 – Exemple de diagramme de Gantt

- w_j : poids de la tâche j (*weight*).

Mais aussi à des variables qui sont les suivantes :

- t_j ($j = 1...n$) : date de début de traitement de la tâche j (aussi appelée date de planification),
- C_j ($j = 1...n$) : date de fin d'exécution de la tâche j (*completion time*),
- T_j ($j = 1...n$) : retard de la tâche j (*tardiness*), $T_j = \max\{0, C_j - d_j\}$,
- U_j ($j = 1...n$) : Booléen indiquant de retard de la tâche j , $U_j = 0$ si $C_j < d_j$, $U_j = 1$ sinon.

La façon la plus courante et la plus simple de représenter un ordonnancement est d'utiliser un diagramme de Gantt, c'est ce que nous allons décrire dans la partie suivante.

II.1.3 Représentations

Le diagramme de Gantt est un outil qui a été proposé en 1917 et qui permet de représenter la planification de tâches nécessaires à la réalisation d'ordonnancement. Pour un atelier, celui-ci sera composé de plusieurs lignes horizontales, représentant chacune un équipement ou une machine. L'axe horizontal représente le temps. Les tâches seront quant à elles représentées par des barres d'une longueur proportionnelle à leur durée et seront positionnées sur la ligne correspondant à l'équipement sur lequel elles se dérouleront. On observera donc sur le diagramme l'occupation des machines, l'enchaînement des tâches sur celles-ci ainsi que les dates de début et de fin de chaque opération.

L'exemple donné sur la figure II.1 représente des tâches affectées non pas à des équipements mais à des ressources humaines. Cela correspond à ce que l'on pourrait observer dans le cadre d'un atelier de maintenance où trois tâches sont affectées à la ressource 1 (rh1) et quatre tâches sont affectées à la ressource 2 (rh2). Les dates de début et de fin des différentes tâches sont donc lisibles sur l'axe des abscisses.

II.1.4 Typologie des problèmes

Les différents problèmes que l'on rencontre en ordonnancement dépendent principalement des machines et de l'enchaînement des opérations. Implicitement, le premier type de problème rencontré est alors le problème à une machine. Pinedo illustre ces différents problèmes dans [Pinedo, 1995].

II.1.4.1 Les problèmes à une machine

Ce type de problème se caractérise par le fait que l'on ne dispose que d'une ressource pour traiter un ensemble de tâches. Cette ressource ne peut effectuer le traitement que d'une tâche à un instant donné. Chaque tâche n'est, quant à elle, composée que d'une opération. Ce type de problème consiste à déterminer la séquence optimale de passage de n tâches sur une machine afin d'obtenir des résultats au regard d'un critère donné. Parmi les problèmes rencontrés dans un environnement à une machine, on peut citer les problèmes de minimisation du retard maximum, du nombre de tâches en retard, de la somme des retards,... Dans la pratique, les problèmes sont souvent plus compliqués et peuvent suivant le cas être simplifiés par une décomposition en problèmes à une machine. Dans ce cas, on essaiera de résoudre les problèmes par rapport à la machine la plus critique (présentant un goulet d'étranglement par exemple). Les résultats alors obtenus pourront servir de base à la construction d'ordonnements complets faisant intervenir toutes les machines.

Dans le cas où l'on souhaite rester dans un cadre multi-machine, il est possible de développer des heuristiques. En effet, dans de nombreux ateliers, on retrouve des problématiques faisant intervenir plusieurs machines. Celles-ci peuvent alors être agencées en parallèle.

II.1.4.2 Les problèmes à machines parallèles

Ce type de problème consiste à ordonnancer un ensemble de tâches, sur un ensemble de ressources en parallèle. On distingue cependant trois sous-classes de problèmes.

- **Machines identiques (P)** : il y a m machines identiques en parallèle. Une tâche j requiert une opération unique qui peut être réalisée sur n'importe laquelle des m machines. Le temps d'exécution est, dans ce cas, le même quelque soit la machine.
- **Machines uniformes (Q)** : ce type de problème est toujours basé sur m machines en parallèle. Une tâche j requiert toujours une opération unique qui peut être réalisée sur n'importe laquelle des m machines. Cependant, la durée p_{ij} de la tâche j sur la machine i sera différente suivant la machine employée. Les machines sont cependant identiques d'une tâche à une autre et ne dépendent pas de la tâche traitée.
- **Machines indépendantes (R)** : cet environnement est une généralisation du précédent. Il y a m machines différentes en parallèle. La durée p_{ij} de la tâche j sur la machine i sera différente suivant la machine employée. Les machines sont, de plus, dif-

férentes d'une tâche à une autre. Une machine pourra donc être la plus efficace pour le traitement d'une tâche donnée, cependant pour le traitement d'une autre tâche elle ne sera pas forcément la plus rapide.

Dans cette partie, les tâches ne sont composées que d'une opération. Or, dans la réalité, les tâches peuvent requérir une succession d'étapes de traitement sur différentes machines. On parle alors de problèmes d'atelier multi-machines.

II.1.4.3 Les problèmes d'atelier multi-machines

Les ateliers considéré ici sont composés d'un ensemble de m machines. Dans ces ateliers doivent être réalisés des travaux (aussi appelé *job*). Chacun de ces travaux peut être décomposé en tâches. Ce sont les opérations réalisées successivement sur les différentes machines. Chaque machine a une spécialité, et ne peut donc, à elle seule, réaliser l'ensemble des opérations. En fonction des modes de passage sur les différentes machines, il sera possible d'identifier trois types d'ateliers :

- **Flow Shop (F)** : dans ce problème d'ordonnancement d'atelier qui correspond à un atelier à cheminement unique, n tâches utilisent les m machines qui le composent. Chaque tâche passe tour à tour sur chaque machine dans le même ordre.
- **Job Shop (J)** : les n tâches utilisent les m machines qui composent l'atelier. Cependant, dans cet atelier, le cheminement est multiple et il est donc propre à chaque type de job.
- **Open Shop (O)** : ce type d'atelier est à cheminement libre. L'ordre des opérations n'est pas fixé, à priori.

II.1.5 Contraintes

Les contraintes expriment des restrictions sur les valeurs que peuvent prendre certaines variables. On distingue deux types de contraintes : les contraintes temporelles et les contraintes de ressources [Esquirol *et al.*, 2001a], [Billaut *et al.*, 2005]. Les contraintes temporelles comprennent les contraintes de temps alloué, qui correspondent généralement aux impératifs liés aux tâches (délai de livraison par exemple) ou encore à la durée totale d'un ordonnancement. Elles comprennent les contraintes d'antériorité ou de précédence qui correspondent à des contraintes de cohérence technologique qui positionnent les tâches les unes par rapport aux autres. Elles comprennent aussi les contraintes de calendrier qui correspondent, par exemple, aux plages horaires de travail, etc. Les contraintes de ressources, quant à elles, traduisent la disponibilité des ressources et le fait qu'elle soit en quantité limitée. Deux types de contraintes de ressource, liées à la nature cumulative ou disjonctive des ressources, peuvent alors être distingués. Les ressources disjonctives ne peuvent être utilisées que par une tâche à la fois. Les ressources cumulatives, quant à elles, peuvent être utilisées par plusieurs tâches simultanément, comme dans le cas d'un ensemble de ressources, par exemple.

II.1.6 Objectifs et critères d'évaluations

La résolution de problèmes d'ordonnancement se fait, soit en cherchant à atteindre un optimal par rapport à un ou plusieurs critères, soit en recherchant l'admissibilité vis à vis de contraintes. L'approche par optimisation suppose que la solution puisse être évaluée suivant les critères retenus. On cherchera alors, soit à minimiser, soit à maximiser un critère correspondant à une amélioration suivant au moins l'une des branches du tryptique coût, qualité et délais. Ceux-ci peuvent alors être liés au temps, par exemple le temps total d'exécution telle que la minimisation de la durée de l'ordonnancement ($\min(C_{max})$) ou encore la minimisation de la somme des durées des retards ($\min \sum T_j$). Ils peuvent aussi être liés aux ressources, on pourra alors s'intéresser au nombre de ressources nécessaires pour réaliser un ensemble de tâche, ou encore s'intéresser à leur charge. Enfin, les critères pourront être des critères de coût tel que des coûts de stockage, de production, de transport,...

Dans les cas où il est impossible de traduire les objectifs de résolution par des critères numériques, il est possible d'utiliser une approche par *satisfaction de contraintes*. L'ensemble des contraintes regroupe alors les contraintes intrinsèques au problème (telles que les cadences de production, les tailles de lots,...) et des objectifs de type seuil à atteindre ou à ne pas dépasser (durées maximales, niveaux de stocks,...). Il sera alors possible de se contenter d'une solution admissible.

II.1.7 Approches de résolution

Une méthode optimisant un critère donné est *exacte* si elle garantit que la solution obtenue est optimale. Sinon, si l'on cherche à obtenir une bonne solution, la méthode est dite *heuristique* (par abus de langage une méthode heuristique est dite heuristique). Si l'objectif consiste simplement à respecter un ensemble de contraintes, la méthode sera dite exacte ou "saine" dans le cas où effectivement toutes les contraintes sont respectées. Enfin, une méthode est dite complète si, quelque soit le problème abordé, on peut prouver en un temps raisonnable que le problème admet ou non des solutions [Esquirol *et al.*, 2001a].

Le choix de la méthode de résolution est conditionné par la taille des problèmes combinatoires. Le fait que la résolution par une méthode exacte ait souvent un coût très élevé en temps de calcul ou en taille de mémoire, justifie l'utilisation de méthodes approchées.

II.1.7.1 Les approches exactes

Parmi les approches exactes, on peut distinguer les méthodes optimales efficaces et les méthodes énumératives.

a) les méthodes optimales efficaces

Ces méthodes garantissent, pour un problème et un critère donné, la détermination d'une solution optimale en un temps polynomial (fonction du nombre de tâches et de ressources). Ces méthodes n'existent cependant que pour des classes réduites de problèmes d'ordonnancement [Trung, 2005]. Parmi les plus connues, nous pouvons citer les règles suivantes :

- SPT (*Shortest Processing Time*) pour le problème $1||\sum C_j$. La règle SPT consiste à trier les tâches suivant leur p_j croissant.
- WSPT (*Weighted Shortest Processing Time*) qui est optimale pour le problème $1||\sum w_j C_j$. Cette règle consiste à trier les tâches par rapport à leur p_j/w_j croissant.
- Ainsi que la règle EDD (*Earliest Due Date*) pour le problème $1|d_j|L_{max}$. Dans cette règle, les tâches sont triées par leur d_j croissant.

b) les méthodes optimales énumératives

Parmi les méthodes de résolutions énumératives, il est possible de distinguer les procédures par séparation et évaluation et les techniques de programmation mathématique telles que la programmation linéaire ou la programmation dynamique. Les procédures par séparation et évaluation (PSE ou *branch and bound*) explorent par énumération l'ensemble des solutions [Lawler *et al.*, 1966]. Cependant, l'analyse des propriétés du problème permet d'éviter l'énumération des classes de mauvaises solutions. Un bon algorithme par séparation et évaluation, énumère donc seulement les solutions potentiellement intéressantes.

La programmation linéaire 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 Simplexe et la méthode des points intérieurs. S'il est nécessaire d'utiliser des variables discrètes dans la modélisation du problème, on parle alors de programmation linéaire en nombres entiers (PLNE). L'inconvénient majeur réside dans le nombre important de variables et de contraintes nécessaires. Par ailleurs, il n'existe pas d'algorithme polynomial pour la résolution de tel problème.

La programmation dynamique, inventée par Bellmann [Bellmann *et al.*, 1974], permet de déduire la solution optimale d'un problème à partir d'une solution optimale d'un sous problème. Il est cependant nécessaire que le critère présente des propriétés particulières telle qu'une forme additive. Bien que la taille des problèmes que l'on peut aborder avec cette méthode soit limitée il est possible d'appliquer des résultats de dominance et de construire des algorithmes pseudo-polynomiaux.

II.1.7.2 Les méthodes approchées

Ces approches, aussi appelées heuristiques, permettent de fournir des solutions d'excellente qualité en un temps raisonnable. Elles sont généralement utilisées quand les méthodes optimales ne permettent pas de résoudre le problème en un temps acceptable. Ces méthodes sont généralement classées en trois types.

1. Les algorithmes gloutons permettent de construire progressivement une solution. Dans la construction de solutions, les décisions sont prises grâce à des règles de priorités simples (SPT, EDD, ...). Elles ne sont alors jamais remises en cause.
2. Les méthodes de recherche locale qui partent d'une solution initiale et explorent un voisinage pour améliorer la solution. Lors du déroulement de ces méthodes, il est parfois possible que des solutions de moins bonne qualité soient acceptées afin d'en obtenir de meilleures par la suite. Parmi ces méthodes, on peut citer la méthode tabou, le recuit simulé ou encore les algorithmes génétiques. La méthode tabou a été introduite par Glover [Glover, 1986]. C'est une méthode itérative générale d'optimisation combinatoire qui se montre très performante sur un grand nombre de problèmes et particulièrement sur des problèmes d'ordonnancement [Widmer *et al.*, 2001]. La méthode de recuit simulé, quant à elle, a été appliquée à des problèmes d'optimisation combinatoire pour la première fois par Kirkpatrick *et al.* [Kirkpatrick *et al.*, 1983] et par Cerny [Cerny, 1985]. Partant d'une configuration aléatoire, elle simule numériquement une opération de recuit thermique. Les algorithmes génétiques quant à eux, sont des méthodes évolutives basées sur les principes de sélection et d'évolution naturelle [McLay *et al.*, 2005].
3. Et les méthodes de recherche arborescente tronquée qui sont proches des PSE (présentées précédemment) à la différence que l'arbre de recherche est volontairement réduit, même si cela peut faire passer à côté de solutions optimales, dans le but de gagner du temps de calcul.

Ces méthodes sont donc utilisables pour l'ordonnancement de problèmes complexes faisant intervenir un grand nombre de données, contraintes et variables. C'est le cas de l'ordonnancement des activités de maintenance que nous allons présenter dans la partie suivante.

II.2 Les spécificités de l'ordonnancement en maintenance

La première des spécificités liées à la maintenance est d'affecter des tâches à des ressources humaines. Celles-ci étant différentes et leurs différences provenant de leurs compétences, nous évoquerons, donc, dans un premier temps la façon dont celles-ci sont prises en compte et le besoin de cette prise en compte. Enfin, concernant les tâches de maintenance, lors de la réalisation d'un ordonnancement, celles-ci ne sont pas nécessairement toutes connues. Nous étudierons donc la notion d'horizon et son impact sur la

manière d'ordonnancer les tâches. Nous aborderons ensuite la notion d'urgence suivant les tâches. L'évaluation d'un ordonnancement est réalisée suivant un ou plusieurs critères. Ces critères, spécifiques à l'activités de maintenance seront donc présenté dans la dernière partie.

II.2.1 L'ordonnancement et les ressources humaines

Si un grand nombre de travaux fait référence à l'ordonnancement des ressources humaines, peu d'études prennent en compte les compétences de celles-ci. Dans une première partie nous réaliserons un court état de l'art sur la prise en compte des ressources humaines. Dans un second temps nous nous intéresserons aux approches ayant traitées de la prise en comptes des compétences de ces ressources.

II.2.1.1 La prise en compte des ressources humaines

Tchommo *et al.* [Tchommo *et al.*, 2003] ont réalisé une synthèse bibliographique sur l'ordonnancement simultané de moyens de production et des ressources humaines. Il ressort de cette étude un manque dans la prise en compte des ressources humaines en ordonnancement. Selon eux, il est difficile d'appliquer les résultats de recherche sur le terrain, ce qui s'explique par l'absence de prise en compte simultané des deux aspects de cette problématique d'ordonnancement.

Toujours selon cette synthèse, les différents problèmes rencontrés en atelier de production sont les suivant :

- Le "Shift Scheduling" qui correspond à l'assignation journalière des ouvriers aux équipes de travail. Cette problématique doit permettre de trouver le nombre d'ouvriers nécessaires pour un fonctionnement optimal du service.
- Le "Day-off Scheduling" qui vise à gérer les congés des employés. L'horizon de travail est en général de plus d'une semaine. Ces problèmes intègrent les contraintes de durée légale ou statutaire, journalière, hebdomadaire et annuelle de travail des employés.
- Le "Tour Scheduling" qui cherche à déterminer les cycles d'intervention de chaque employé. L'horizon de travail est en général un horizon hebdomadaire.

Mais, les opérateurs de production peuvent être utilisés pour certaines tâches de maintenance afin d'améliorer la flexibilité des systèmes. Un modèle de planification des ressources humaines a été créé [Kane *et al.*, 2003b]. Ce modèle permet de calculer, dans un service donné, le nombre d'employés nécessaires à la réalisation de leur activité primaire ainsi qu'à celle de maintenance.

Cependant, la mutualisation des ressources dans le cadre de l'optimisation de leur utilisation entraîne souvent des problèmes de gestion [Trilling *et al.*, 2005]. Les ressources mutualisées peuvent être matérielles ou humaines. Le domaine hospitalier est l'exemple même dans lequel l'adaptation peut engendrer un coût en temps improductif très impor-

tant. Il faut donc limiter les adaptations trop fréquentes qu'engendre la mise à disposition, entre différentes entreprises ou différents services, des ressources humaines. Il n'est parfois pas évident pour un employé de réaliser son travail dans un nouveau contexte, même s'il est très bon dans son domaine.

Une approche de gestion des ressources humaines à travers leur coût a été développée par Kane *et al.*. La diminution du coût des actions peut alors passer par la diminution de la quantité de main d'oeuvre, et donc de faire en sorte que les capacités s'adaptent à la charge. L'ajustement des capacités à la charge [Kane *et al.*, 2003a] nécessite alors d'optimiser l'utilisation des heures supplémentaires ainsi que le recours à l'intérim.

Au sein du service de maintenance, le personnel dispose de compétences différentes et de niveaux de compétences différents. La rapidité de traitement dépendra du choix du personnel qui sera affecté. Selon [Tchommo *et al.*, 2003], l'intégration de l'ordonnancement des tâches et des ressources humaines n'est pas un sujet très présent dans la littérature et, en ordonnancement classique, le personnel est peu pris en compte. Les quelques articles proposent principalement deux courants d'idées :

- **Les ordonnancements séquentiels.** Les ordonnancements séquentiels sont les ordonnancements réalisés en plusieurs étapes [Ernst *et al.*, 2004]. Par exemple dans 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 conjoints.** Ces ordonnancements sont réalisés en une seule phase et prennent en compte les informations disponibles sur les employés lors de la réalisation du planning. Grabot *et al.* prennent en compte l'ordonnancement des tâches de production et comme information sur les travailleurs, la productivité relative des opérateurs [Grabot *et al.*, 2000].

Cependant, même si l'ordonnancement tient compte des compétences des travailleurs, les différents logiciels d'ordonnancement de la production ont posé comme hypothèse que les durées des tâches sont connues [Tchommo *et al.*, 2003]. Ces approches sont généralement liées à la production et non à la gestion des activités de maintenance. L'application à la maintenance de méthode d'ordonnancement et d'affectation de tâche doit, pour être réaliste, tenir compte des compétences et niveaux de compétences des ressources (et donc de durées variables) qui vont les exécuter.

II.2.1.2 La prise en compte des compétences

Au cours de sa thèse, Agnès Letouzey a effectué une étude auprès de dix-neuf entreprises pour avoir leur opinion sur le problème d'affectation des opérateurs [Letouzey, 2001]. Les points qui en ressortent et qui nous intéressent montrent que la gestion des opérateurs en fonction de leur compétence est importante pour les industriels et qu'il n'existe pas d'outil de gestion de production ou d'ordonnancement le prenant en compte. 79% des entreprises trouvent que la gestion des opérateurs est utile ou indispensable en ordon-

nancement. Dans le domaine de la gestion de production, le problème de l'affectation opérateur/affectation machine n'est pas résolu. Un souhait ressort concernant l'affichage des logiciels puisque 73% des entreprises souhaiteraient pouvoir visualiser la capacité par type de compétence. Alors que dans les logiciels actuels la durée opératoire est fixe, pour les industriels, la prise en compte de la qualification d'un opérateur est très importante pour déterminer son affectation, car pour eux, le niveau de qualification a une influence sur la durée de réalisation de la tâche (parfois pour 47% d'entre eux et toujours pour 27% d'entre eux). Il en ressort des besoins d'approfondissement au niveau du lien entre la compétence de la ressource humaine et la durée opératoire ainsi que dans la détermination du potentiel de l'entreprise. Les décisions sont le plus souvent prises par rapport à un niveau opérationnel (ce que peuvent faire les meilleurs employés), plutôt que par rapport à une vision globale de l'atelier. Ceci peut s'expliquer par les difficultés que 33% d'entre elles éprouvent pour mettre au point une stratégie d'affectation des tâches à des ressources bien précises.

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 à qui les tâches sont affectées 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. Pour permettre d'obtenir des temps de calcul rapides lors des affectations (comparé à des études exhaustives), Bennour et al. présentent une approche dichotomique pour déterminer si la ressource est capable ou non de réaliser la tâche concernée [Bennour *et al.*, 2003]. On retrouvera aussi ce type d'approche 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. Dans le domaine de la gestion de projet, dont la particularité est d'avoir des contraintes de précédence et leur aspect cumulatif. Bellenguez-Morineau [Bellenguez-Morineau, 2006] se sont intéressés à la gestion de projet avec prise en compte de compétences multiples (un problème noté MSPSP pour Multi-skill Project Scheduling Problem). Pour ce problème elle cherche à minimiser la date d'achèvement global (C_{max}) du projet sachant que chaque ressource possède un certain nombre des compétences utilisées dans le problème.

La notion de degré de compétence pour représenter la rapidité d'une personne expérimentée par rapport à une autre est peu utilisée et peu prise en compte dans le but d'équilibrer la charge entre les ressources et de trouver le couple ressources/tâches le plus adéquat. Dans le cadre de l'étude d'une entreprise de fabrication de produit d'ameublement, Gruat La Forme et al. [Gruat-La-Forme *et al.*, 2007b] ont développé une approche prenant en compte les compétences afin de mieux répartir la charge de travail. Cette approche considère les niveaux de compétence des employés de production sous la forme de rendement par modèle. Dans leur approche, la répartition des travaux se fait aussi en prenant en compte la nécessité de donner de l'expérience ou de maintenir un niveau d'expérience du personnel. Les tâches ne sont donc pas systématiquement affectées aux ressources les plus efficaces. L'approche de résolution développée est une approche

mono-critère réalisé suivant des critères de productivité, d'équilibrage de la charge et de diversité dans la répartition des travaux. L'optimisation a été menée suivant chacun de ces critères placé tour à tour en fonction objectif, et les solutions ont été évaluées suivant l'ensemble de ceux-ci. Le problème a alors été résolu par programmation linéaire en nombre entier. Cela permet d'observer la dégradation des résultats sur les critères non optimisés et donc de mettre en évidence les limites d'une approche mono-critère.

II.2.2 L'ordonnancement suivant l'horizon

L'ordonnancement des activités de maintenance présente un grand nombre de problèmes différents à résoudre. Les tâches devant être affectées à des ressources. On trouve, par exemple des problèmes de dimensionnement, des problèmes d'affectation et de choix du couple tâche/ressource. De plus, il existe plusieurs types de tâches de maintenance et différents horizons de planification, et en fonction de ces paramètres, la technique utilisée ne sera pas la même. L'ordonnancement des activités de maintenance est donc composé d'un ensemble de problèmes différents d'ordonnancement. Nous allons tout d'abord détailler la différence entre l'ordonnancement et la planification. Puis, dans un second temps, nous mettrons en évidence l'intérêt des différentes manières d'ordonner.

II.2.2.1 Ordonnancement et planification

Dans cette partie, nous allons approfondir les notions d'ordonnancement et de planification. Alors que ces termes sont souvent assimilés ou confondus, il existe des différences bien réelles. Celles-ci découlent principalement de l'horizon sur lequel nous travaillons. La finalité de telles activités étant de transmettre au personnel l'ensemble des ordres de travail, sous la forme de planning. Nous mettrons donc en avant, dans une première partie, les différences existantes entre l'ordonnancement et la planification. Puis nous les étayerons par une présentation des différents horizons avant d'aborder les différents plannings obtenus qui sont la finalité perceptible, par le personnel, du travail d'ordonnancement.

a) Des différences entre l'ordonnancement et la planification

Tandis que la planification consiste à affecter des ressources (finie ou infinie) à des intervalles de temps donné, l'ordonnancement, quant à lui, consiste à affecter des tâches identifiées à des ressources déterminées, sur des périodes de temps réservées.

L'ordonnancement comprend différents niveaux en fonction de la taille de l'entreprise. Elle comprend la réalisation de *l'ordonnancement théorique* qui est le déroulement d'un cycle de travail (généralement une année). Celui-ci est équitable mais pas forcément réalisable. Il est donc nécessaire de réaliser *l'ordonnancement théorique ajusté* qui tient compte des absences prévues. A partir de cet ordonnancement et en tenant compte des aléas et des imprévus, on réalise *l'ordonnancement prévisionnel*.

Un ordonnancement est facile à réaliser, la réalisation d'un bon ordonnancement est moins évidente. Étant donné que l'on gère des ressources, ce n'est pas seulement la somme des coûts horaires des ressources qui est importante, il faut tenir compte de la satisfaction des employés qui agit directement sur leur motivation et leur productivité. L'obtention d'un bon planning nécessite donc la négociation entre l'ordonnanceur et les différents employés.

Le responsable d'entreprise considérera qu'un bon ordonnancement lui permettra de dimensionner ses effectifs au plus juste afin d'obtenir le meilleur compromis entre les services et le coût de celui-ci. Ce qui signifie que toute variation de la charge doit pouvoir être répartie et que le nombre d'heures supplémentaires ainsi que de ressources temporaires (intérimaires par exemple) soient minimisés, alors que la personne chargée de réaliser les ordonnancements aura besoin de respecter les différents impératifs liés à la productivité et souhaitera disposer d'une souplesse maximum en main d'oeuvre pour répondre aux différents aléas. Le commercial cherche à obtenir pour ses différents clients une qualité de service irréprochable et un respect des délais. Ce qui peut être très contradictoire par rapport à ce que va rechercher le salarié qui, lui, vise une satisfaction sociale. Celle-ci passe par une satisfaction de ses préférences ou encore par l'équité de traitement entre les salariés et limitera les planning "atypiques".

La planification, quant à elle, peut être *anonyme* ou *individuelle*. La planification anonyme considère les employés comme similaires au sein de groupes identifiés. La planification individuelle, quant à elle, s'appuie sur les différences de chaque ressource notamment au niveau des compétences. Mais elle peut prendre en compte aussi des différences telles que les contrats, les préférences sur les horaires ou encore l'historique du planning pour assurer un équilibrage de la charge.

La planification peut alors être définie sous la forme de fonctions mathématiques qui associent un salarié à un intervalle de temps afin que chaque besoin soit couvert et que les contraintes soient satisfaites [Chan-Yew-Cheong, 2002]. Celle-ci comprend différentes phases. *La phase de conception* gère les activités sur le long terme, c'est pendant cette phase que l'on détermine la capacité qui sera nécessaire pour l'activité globale. On retrouve ensuite la *phase d'ordonnement* sur laquelle sont déterminés les plannings prévisionnels à court et moyen terme. Vient enfin la *phase de réaction* qui consiste à vérifier l'adéquation entre le planning prévisionnel et la charge réelle. Les différentes données telles que les absences, les horaires seront archivées pour la gestion de la paie ainsi que pour l'inspection du travail. Cette phase est importante et nécessite une informatique distribuée pour la collecte et la gestion des données.

L'ordonnement est alors une phase de la planification. La différence vient donc de la notion d'horizon qu'il convient alors de préciser.

b) Précisions sur la notion d'horizon

Les procédures utilisant des horizons de planification le font généralement à travers des horizons glissants. On les retrouve dans de nombreuses études en lien avec la planification de la production [Hétreux, 1996], [Fontan *et al.*, 2001], [Thierry, 2003]. Pour permettre une gestion du temps et une modélisation des problèmes de production, le temps (ou plutôt l'ensemble du calendrier) est généralement découpé en périodes. Nous pouvons alors étudier les événements sur des intervalles de temps et non plus sur une échelle de temps continu. Les données sont donc réparties sur les périodes qui deviennent alors l'unité de référence, et les décisions se prennent par rapport à ces périodes. La longueur des périodes ainsi que leur nombre dépendent de la situation et des capacités que l'on souhaite modéliser. On retrouve deux types d'horizon dans une planification de ce type :

- **L'horizon de planification** correspond à l'ensemble des périodes étudiées, dans lesquelles les données seront prises en compte afin de prendre les décisions (pour l'établissement d'un plan de production par exemple). Celui-ci doit être suffisamment long pour que les données qui se situent au-delà, qui ne sont donc pas prises en compte, n'aient pas encore de réelle importance pour l'ordonnancement. Mais il doit être aussi assez court pour que les données prises en compte soient suffisamment fiables. Le compromis n'est cependant pas toujours évident à obtenir de manière théorique et la longueur de l'horizon utilisée n'est pas forcément optimale.
- **L'horizon de décision** correspond généralement aux premières périodes de l'horizon de planification. C'est sur cet horizon (à court terme) que les actions sont décidées, appliquées. Ces périodes sont généralement "gelées" ou "figées" afin de ne pas être remises en cause lors d'un re-ordonnancement ultérieur et perturber le moins possible le personnel.

La périodicité de re-planification représente la période de temps entre deux planifications successives. Elle est souvent le fruit d'un compromis entre la nécessité d'actualisation des données et la problématique qu'engendre les perturbations d'un re-ordonnancement trop fréquent. La périodicité maximale de planification ne peut être plus longue que l'horizon de planification, et généralement elle se rapproche de celle de l'horizon de décision afin de pouvoir réagir en fonction des perturbations. Cependant, des modifications trop fréquentes de planning peuvent générer une gêne pour le personnel. Le choix de la position d'insertion d'une nouvelle tâche de maintenance ne se réduit donc pas uniquement à prendre en compte les contraintes intrinsèques aux tâches. Il existe alors différentes façons de réaliser un ordonnancement en fonction de l'horizon dans lequel le problème se situe.

II.2.2.2 Ordonnancement statique et dynamique

En fonction de l'horizon sur lequel l'ordonnancement des tâches sera réalisé, les méthodologies employées seront différentes. L'ordonnancement pourra être réalisé de manière statique ou dynamique. Nous présenterons donc ici ces notions d'ordonnancement statique et dynamique.

Un algorithme d'ordonnement est dit statique lorsque l'ordonnement est prévisible avant la mise en fonctionnement du système, il faut pour cela connaître les tâches a priori. Étant donné que pour une approche statique, il faut connaître à priori l'ensemble des tâches et leurs caractéristiques, cette approche ne peut s'appliquer que pour l'ordonnement de tâches connues pour une période ainsi que des tâches périodiques telles que les tâches de maintenance préventive. Cette approche est hautement prédictible mais n'est pas flexible : un changement sur une des tâches ou une de ses caractéristiques entraîne la reconstruction complète de l'ordonnement [Ramamritham *et al.*, 1994].

Un algorithme d'ordonnement est dit dynamique lorsque l'ordonnement est créé au fur et à mesure de l'arrivée d'événements dont on peut ne rien connaître a priori. Un ordonnement statique est donc plus fiable et moins flexible qu'un ordonnement dynamique [Parashkevov, 1994]. La détection d'une panne entraîne une nouvelle tâche. En fonction de son importance, un nouvel ordonnement comprenant cette nouvelle tâche peut être réalisé directement. Cela correspond à l'insertion d'une tâche de maintenance corrective, dont on ne connaît les caractéristiques qu'après l'apparition, dans un ordonnement existant et connu. L'insertion peut alors se faire par le biais d'un ordonnement statique. L'ensemble des tâches seront alors "désaffectées" et un nouvel ordonnement indépendant du précédent, et comprenant la nouvelle tâche, sera réalisé. Mais les remises en cause potentielles des affectations ainsi que le temps mis pour le calcul du nouvel ordonnement peuvent conduire à préférer une insertion dynamique.

Les problèmes dans lesquels réside une part d'aléa, tel que lorsque de nouvelles tâches surviennent, sont dit problème stochastiques. Nous abordons, dans le paragraphe suivant, cet aspect très présent dans le domaine la maintenance.

II.2.2.3 L'aspect stochastique des activités de maintenance

De nombreux paramètres liés aux tâches et aux ressources sont sujets à des incertitudes. Celles-ci peuvent provenir des variations de la demande d'intervention qui change d'un mois à l'autre, aux dates d'arrivée des demandes, au contenu de ces demandes, aux durées de traitement nécessaires, aux disponibilités des équipements et des pièces détachées liées aux interventions, ...

L'ordonnement des tâches mais aussi la caractérisation de la capacité requise ou plus précisément le nombre de ressources humaines d'un service de maintenance est alors rendu difficile ([Drumm *et al.*, 1988], [Braun, 1995] cité par Mjema, 2002) [Mjema, 2002].

Duffuaa *et al.* [Duffuaa *et al.*, 1999] ont développé un modèle stochastique pour l'ordonnement du personnel de maintenance. Au début d'un horizon considéré, un ensemble de tâches connues (tel que de la maintenance préventive) doivent être ordonnancées. Ensuite, pendant que ces tâches sont en train d'être traitées, il y a un degré de probabilité que des tâches nouvelles et urgentes surviennent. A chaque fois qu'une nouvelle tâche survient, l'ordonnement doit être révisé pour l'inclure. Les données stochastiques intégrées par celui-ci sont les dates de fin de traitement des nouvelles tâches ainsi que leurs

durées, la disponibilité des équipements pour la réalisation de la maintenance ainsi que les dates de livraison des pièces détachées (toujours considérées comme disponibles), sur les lieux de l'intervention. Le modèle de programmation stochastique proposé est comparé avec l'approche déterministe [Roberts *et al.*, 1983] sur lequel il est basé et présente une amélioration de 10% du nombre de tâches terminées sur un horizon donné. L'approche déterministe de Roberts et al. vise à ordonnancer, à l'aide de la programmation linéaire, un ensemble connu de tâches affectées à un ensemble de personnel dont la disponibilité est connue. La solution stochastique quant à elle permet alors d'obtenir une réserve de main d'oeuvre en anticipant l'arrivée de nouvelles tâches.

Cette notion de fin de traitement incertaine rend compliquée la détermination des priorités de traitement des tâches. Étant donné qu'il est difficile d'évaluer la durée réelle d'une tâche, il n'est pas facile de réaliser un ordonnancement précis. Il est alors difficile, pour le service maintenance, de déterminer s'il est urgent ou non de débiter une intervention.

II.2.3 La prise en compte de l'urgence des tâches

En fonction des engagements pris ainsi que de l'état des indicateurs, les tâches de maintenance ont des niveaux d'urgence différents. Cette notion d'urgence ressort nécessairement dans la prise en compte des tâches. Nous pourrions, dans cette partie, constater les similitudes existantes avec le secteur hospitalier ainsi qu'étudié comment cet aspect de la maintenance est pris en compte, à travers un état de l'art.

II.2.3.1 Ordonnancement et prise en compte de l'urgence

Les équipes de maintenance peuvent être comparées à des blocs opératoires mobiles, là où dans le cas de l'hôpital, ce sont les patients qui se déplacent. Il s'agira donc, dans ce cas, de gérer les urgences parmi les urgences avec les moyens disponibles : les équipes de maintenance avec des dépenses minimisées.

Toujours en lien avec cette notion d'urgence, Jebali [Jebali *et al.*, 2003a] propose une heuristique pour la réalisation d'un programme opératoire. Cette méthode permet de calculer le nombre de lits nécessaires pour un programme opératoire centré sur la salle d'opération. Le calcul du nombre de lits peut être apparenté à un calcul du nombre de personnel de maintenance et un programme de réparation ordonnancerait les activités des techniciens ou experts.

Jebali et al. présentent aussi une méthode pour la planification des admissions centrée sur le processus de soin que doit suivre le patient [Jebali *et al.*, 2003b]. Une vue globale du système montre la logique d'enchaînement des activités du processus et une vue de l'utilisation des ressources détaille l'utilisation des ressources critiques durant le processus de soin. Les ressources critiques considérées sont les lits d'hospitalisation, de réanimation ainsi que le bloc opératoire. Le nombre d'infirmières, aides soignantes et de médecins est supposé bien dimensionné par rapport aux lits. L'algorithme développé permet de

déterminer les dates au plus tôt et au plus tard de l'hospitalisation d'un patient. Un programme linéaire permet de calculer les disponibilités résiduelles des ressources.

Toutes les pannes qui se produisent n'ont pas le même degré d'importance et ne produiront pas les mêmes effets sur la disponibilité de l'atelier. Dans la littérature, de nombreux articles traitent de l'arrivée des patients dans les hôpitaux et de nombreuses similitudes peuvent être observées. Lors de l'arrivée d'une panne, le traitement de celle-ci est à sa manière urgent. Le rapprochement peut être fait avec l'arrivée de cas urgents en salle d'opération [Hammami *et al.*, 2003] où les décideurs doivent l'accepter en fonction de son niveau d'urgence par rapport aux cas déjà pris en compte dans le planning. Il faut donc équilibrer la charge suivant les blocs opératoires afin de minimiser les coûts. Hammami *et al.* ont réalisé une approche multi-objectifs en deux phases. La première vise à insérer l'urgence (ou la tâche) dans l'ordonnancement existant en fonction de son niveau d'urgence et en décalant les tâches moins urgentes dans le temps. La deuxième phase vise à réaffecter les interventions aux salles d'opérations avec pour double objectif d'équilibre la charge entre les salles (les ressources) et de minimiser les coût d'introduction de la nouvelle tâche. La méthode utilisée dans la première phase correspond à l'algorithme développé dans [Jebali *et al.*, 2003b] et évoquée précédemment. La deuxième phase a été résolue par un programme linéaire. L'étude de l'impact économique et organisationnel a montré qu'il était possible d'optimiser ces deux aspects simultanément.

II.2.3.2 Occupation et disponibilité des équipements

Pour une machine, le fait d'être occupé par une activité de production ou par une activité de maintenance la rend indisponible pour l'autre activité. En effet, lorsqu'elle produit, elle se retrouve indisponible pour la réalisation d'entretien et quand elle est arrêtée et en cours de révision ou d'entretien, il n'est pas possible de lancer une production. Même si la production est le rôle principal d'une machine, celle-ci peut être perçue comme une contrainte, lors de la réalisation d'un ordonnancement de tâches de maintenance. Ce sont donc des activités qui peuvent être représentées d'une même façon, sur un planning, en terme d'occupation de la machine. Si les opérations dites "préventives" sont prévues à l'avance avec une marge de sécurité, il reste néanmoins possible de modifier l'ordonnancement de ces activités en fonction d'urgences.

Dans cette même optique, [Sloan *et al.*, 2000] et [Brandolese *et al.*, 1996] ont travaillé sur un ordonnancement conjoint et simultané des tâches de production et de maintenance. Cela permet de ne pas créer de situations conflictuelles comme dans le cas d'un ordonnancement séparé [Bembla, 2002] où le planning des activités de maintenance est réalisé séparément et sans tenir compte de celui de la production. Avec un tel fonctionnement, il faut qu'un système de communication très performant soit en place entre les services. L'ordonnancement séquentiel [Aggoune, 2002] permet aussi de traiter les tâches des deux activités sans qu'il y ait de conflit. Il consiste à réaliser l'un des deux ordonnancements (celui de la production ou celui de la maintenance) et ensuite à se servir de celui-ci comme contrainte pour réaliser le suivant. En général, celui de la maintenance

préventive est réalisé en premier, impliquant pour la production des contraintes de forte indisponibilité.

Dans la majorité des cas, l'arrivée d'une panne à une date t rend la machine indisponible pour la production dans des conditions correctes. Elle crée donc d'elle-même une fenêtre de temps libre, pour la remise en fonctionnement, en bousculant l'ordonnancement des tâches liées à cette machine et prévues à $t-1$. Deux points découlent donc de cette interruption de fonctionnement :

- La remise en fonctionnement le plus rapidement possible de l'équipement en fonction des priorités de production et des disponibilités contractualisées.
- La création d'un nouvel ordonnancement en maintenance, comme en production, en tenant compte des nouvelles priorités liées à l'arrêt de la machine ainsi qu'à l'intervention.

II.2.3.3 Remise en fonctionnement selon les priorités et l'urgence

Sur la base des coûts et des manques à gagner, il faut évaluer si une remise en route immédiate est nécessaire. Celle-ci peut en effet mobiliser des ressources pour un coût plus élevé que si l'on attendait quelques temps. Ce rapport gain, dû aux bénéfices et associé à tous les composants l'affectant, par rapport aux coûts de remise en production "immédiate", peut être inférieur à 1 et donc imposer l'attente de meilleures conditions de coûts pour l'intervention. L'algorithme d'ordonnancement à priorités dynamiques le plus répandue est ED (Earliest Deadline) [Ivanov *et al.*, 2003] dans lequel la priorité d'une tâche est inversement proportionnelle à sa latence.

Dans le modèle présenté par [Jebali *et al.*, 2003b], nous pouvons assimiler la planification des entrées dans un service hospitalier à la réception de demande d'intervention d'un service maintenance. A l'arrivée d'une panne, une date au plus tôt ainsi qu'une date au plus tard de début d'intervention peut être donnée au client (le responsable du service où survient la panne). La date au plus tôt peut être reculée mais pas la date au plus tard. La date au plus tôt ($J_{tôt}$) correspond donc à la date t où se produit la panne, allongée du délai de préparation (k) des différentes ressources, k étant compris entre k_{min} et k_{max} . Mais aussi du délai x , qui peut être lié à l'occurrence d'une nouvelle tâche "plus urgente", x étant compris entre x_{min} et x_{max} . La date au plus tard correspondra donc à $J_{tard} = \max(J_{tôt}) = t + k_{max} + x_{max}$. Cependant, x est composé de la même façon que j , nous pouvons donc obtenir un enchâssement quasiment infini de pannes rendant la date J_{tard} très lointaine et montrant la difficulté qu'il y a pour la déterminer et la transmettre au client. Il faut donc que le niveau d'urgence des tâches augmente avec le temps, si les dates de traitements sont reculées, afin de faire en sorte qu'elles soient traitées un jour.

Pour pouvoir déterminer un ordre de traitement lorsque plusieurs pannes surviennent en même temps, [Chelbi *et al.*, 2003] abordent la problématique du classement des équipements en fonction de la nécessité d'une intervention de maintenance. Ce classement est

réalisé sur la base de neuf critères. Parmi les critères présentés, on relève principalement celui où une panne a une influence sur la sécurité du personnel et qui rend, par là même, les pannes présentant cette spécificité là, prioritaires sur les autres. D'autres pannes ne seront pas prises en compte dans la procédure de rangement par priorité, ce sont celles présentes sur des installations de secours (équipements capables de les remplacer de manière identique).

Cependant, si l'on dispose d'un niveau d'urgence qui augmente avec le temps, c'est que la disponibilité de l'équipement diminue. Il est alors possible d'estimer le niveau de disponibilité après intervention, au moment de la remise en fonctionnement.

Il est intéressant d'utiliser les prévisions des disponibilités après réparation pour décider de l'affectation des priorités. En effet, entre deux tâches à traiter, il faut agir sur celle qui est la plus urgente. Les temps de traitement de chacune d'entre-elles étant différents, il s'agit de connaître, après traitement de la panne, les hypothétiques niveaux de disponibilité des équipements concernés et d'en déduire un ordre de priorité.

Pour chaque équipement, il s'agit donc de calculer l'écart de disponibilité entre celle contractualisée et la disponibilité potentielle de l'équipement après traitement. Cet écart permet de voir quelle tâche est la plus urgente à traiter. Il peut, dans certains cas, s'avérer négatif ce qui signifie qu'il y aura un retard dans le traitement.

Cependant, même si la perte de disponibilité d'un équipement, lié à une tâche de maintenance en attente, est prépondérant pour déterminer sa place dans un ordonnancement, ce n'est pas le seul aspect à considérer.

II.2.4 Un problème multi-critère

Le problème que nous abordons est par nature multi-critère. Thierry Coudert [Coudert, 2000] hiérarchise les différents objectifs du services de maintenance en objectifs interne et externe. Les objectifs internes sont relatifs aux différents coûts de la maintenance, à l'optimisation de l'utilisation des ressources de maintenance ainsi qu'aux règles de sécurités. Les objectifs externes quant à eux font références aux performances des équipements maintenu ainsi qu'à leur fiabilité.

Voici donc les critères que nous avons retenus. L'ordonnancement des activités de maintenance est destiné principalement à affecter les tâches à des ressources et à les localiser dans le temps. Il paraît donc logique que celui-ci soit réalisé de sorte que le moins de tâches possibles voient leur traitement se terminer après leurs *due-dates*. Mais le retard des tâches n'est pas le seul aspect important à prendre en compte lorsque l'on crée ou modifie un ordonnancement d'activités de maintenance.

Étant donné qu'un nombre très important de tâches même faiblement en retard, peut avoir un impact négatif sur le service de maintenance, il faut faire en sorte que le moins de tâches possibles se termine en retard. De plus, les tâches représentent du travail à répartir entre l'ensemble des ressources du service de maintenance, la charge de travail doit

être équilibrée entre elles. Ces ressources devant s'organiser pour rejoindre les lieux d'intervention et rassembler le matériel nécessaire au traitement des tâches, l'arrivée d'une nouvelle tâche ne doit pas conduire à une remise en cause complète de l'ordonnancement existant. Les modifications apportées devront être alors limitées le plus possible.

Le fait que l'ensemble des tâches soit connues lorsque l'ordonnancement est réalisé rend possible le fait de les ordonnancer dans une même procédure. On parle alors d'un ordonnancement *statique*. En revanche, si les tâches sont connues de manière progressive, et que celles-ci sont intégrées au fur et à mesure de leur arrivée, l'ordonnancement sera alors *dynamique*. Les données des tâches (durées, date pour laquelle elle doit être terminée,...) peuvent être connues ou non, le problème sera alors *déterministe* ou *stochastique* si il y a une part d'aléatoire. Le nombre de critères suivant lesquels les solutions du problème seront évaluées rend le problème différent. Celui-ci peut alors être *mono-critère* ou *multi-critère*. Ces différents éléments reflètent la nécessité d'avoir des approches différentes, adaptées et complémentaires. Cependant, la réalité industrielle présente un autre aspect évoqué au paragraphe II.2.2.3, qui précise que les données prises en compte sont incertaines. Il convient alors, lorsque l'on propose des solutions d'ordonnancement, de fournir la solution la plus flexible possible mais aussi d'en évaluer la robustesse.

II.2.5 Synthèse bibliographique

L'ordonnancement de la production, sur des ressources humaines, fait l'objet de nombreuses études [Tchommo *et al.*, 2003]. Cependant, comme le souligne Agnès Letouzey dans sa thèse [Letouzey, 2001], peu d'approches prennent en compte les niveaux de compétence des ressources.

Dans le contexte de la maintenance industrielle, Adzakpa *et al.* [Adzakpa *et al.*, 2003b] s'intéresse à l'ordonnancement des tâches de maintenance préventive. Dans leur modèle, les ressources sont identiques, cela signifie que le choix de la ressource n'influence pas sur la durée de la tâche. Kane *et al.* prennent en compte les taux de compétences avec une diminution de 50% si la compétence utilisée n'est pas la compétence primaire [Kane *et al.*, 2003b]. Ceci dans le but de dimensionner le service. Un cloisonnement des compétences en deux types (dans ce cas : compétence primaire ou secondaire) n'est cependant pas représentatif de la réalité du service de maintenance. Les différences de niveau de compétence entre les ressources humaines sont beaucoup plus fines. Des travaux se positionnent sur l'insertion dynamique de tâches dans un ordonnancement courant. Duffuaa *et al.* [Duffuaa *et al.*, 1999] prennent en compte des tâches déjà ordonnancées et de nouvelles tâches de nature stochastiques. Leur modèle, est bâti sur le fait qu'une ressource correspond à une compétence (par exemple : un mécanicien ou un plombier). La notion de polyvalence ne se retrouve donc pas dans leur approche alors que selon Monchy [Monchy, 2000] la formation de base du personnel de maintenance les rend polyvalente.

Dans un contexte de gestion de la production Gruat La Forme *et al.*, quant à eux, [Gruat-La-Forme *et al.*, 2007b] prennent bien en compte les niveaux de compétence des

employés dans l'ordonnancement. Dans leur modèle, ce niveau de compétence n'est pas fonction d'une compétence déterminée, mais du type de produit sur lequel la ressource travaille. Ils parlent, en effet, de productivité par modèle. Ces travaux sont cependant une approche statique uniquement alors que dans notre contexte certaines tâches doivent être prise en compte dynamiquement. De plus, les tâches de maintenance ont lieu sur des équipements qui, en fonction de la production, ont des dates de disponibilité différentes pour les interventions.

Le contexte hospitalier présente des similitudes avec celui de la maintenance, notamment à travers la gestion de l'arrivée des patients entraînant un processus de soin dans les hôpitaux qui peut être comparé à l'arrivée d'évènements aléatoires déclenchant des tâches de maintenance corrective. La prise en compte des patients déjà en cours de traitement, peut s'apparenter à des tâches de maintenance déjà ordonnancées. La charge des blocs opératoires doit être équilibrée, tout comme celle des opérateurs de maintenance. Certains cas sont plus urgents que d'autres et leur traitement doit être prioritaire, de la même façon que certaines tâches de maintenance, suivant les engagements pris et de la disponibilité courante. Hammami *et al.* [Hammami *et al.*, 2003] ont ainsi développé une approche multi-objectifs dont les objectifs sont d'insérer les tâches en fonction de leur urgence, d'équilibrer la charge et de minimiser le coût de la prise en compte de patients. Cependant, ils considèrent que chaque bloc opératoire à des durées identiques, ce qui n'est pas le cas des ressources du service de maintenance. De plus, ils s'autorisent le droit de refuser une urgence alors qu'en maintenance industrielle, toutes les tâches doivent être traitées.

II.3 La robustesse des ordonnancements de maintenance

En ordonnancement classique, les différentes données prises en compte sont généralement fixes et supposées connues. Cependant, la réalité du monde du travail ne vérifie pas ces hypothèses car, en plus des aléas pouvant survenir, de nombreuses données prises en compte ne sont que des prévisions. Des solutions optimales à des problèmes d'ordonnancement basées sur des données figées, qui ne sont pas représentatives de la réalité et n'auront que guère de chance d'être applicables car sujettes à des remises en cause ultérieures.

II.3.1 La robustesse en ordonnancement

Les données sur lesquelles est basée la réalisation d'un ordonnancement sont généralement incertaines. Les données réelles sont ainsi connue avec précision à posteriori. Par exemple, la date réelle de fin d'une tâche ne sera qu'estimée tant que celle-ci ne sera pas terminée. Un ordonnancement réalisé à partir de données estimées peut ne pas avoir la performance requise. Afin d'introduire cette section sur la prise en compte des incertitudes en ordonnancement, nous préciserons dans un premier temps d'où elles proviennent

dans un système industriel.

II.3.1.1 Les sources d'incertitudes dans l'industrie

Les solutions initiales d'ordonnement ne sont généralement jamais appliquées, car modifiées en permanence par les perturbations pouvant survenir dans les ateliers [Tahon *et al.*, 1994].

Billaut *et al.* ont réalisé un ouvrage consacré à la flexibilité et à la robustesse en ordonnancement [Billaut *et al.*, 2005]. Les durées d'exécution des tâches y sont évoquées comme sources d'incertitudes dans les problèmes d'ordonnement. Elles dépendent notamment des ressources humaines dont les performances sont incertaines. Un ordonnancement est structuré par les dates qui dépendent, pour certaines, des tâches et, pour d'autres, des événements extérieurs. L'arrivée de nouvelles tâches à ajouter dans un ordonnancement existant peut modifier l'enchaînement de celui-ci. Il dépend donc de tous les aléas et se doit d'être révisable et souple, tout en satisfaisant les contraintes réglementaires ainsi que les exigences du métier. Les problèmes de gestion du personnel classique (*Shift Scheduling Problem*, *Days-Off Scheduling Problem* et *Tour Scheduling Problem*) qui ont pour objet la détermination du nombre optimal de personnel à affecter [Drezet *et al.*, 2004b] ne prennent pas en compte ces incertitudes. Pour être plus proche de la réalité, et répondre aux attentes des ressources, le problème de *Modification of Employees Timetable* (MET), vise à minimiser le nombre de plannings modifiés en cas d'aléas. Un modèle mathématique du MET a été réalisé sur la base des contraintes légales et des impératifs de la demande.[Drezet *et al.*, 2004a].

La réalisation d'un ordonnancement est réalisé généralement en considérant comme déterminé la présence des ressources ou l'urgence des ordres de travail. Cependant, dans l'industrie, des incertitudes nécessite de réaliser modifications dans les ordonnancement alors que ceux-ci sont théoriquement encore valide. La principale cause est l'absentéisme des employés et la seconde est l'imprévisibilité de l'urgence des commandes [Drezet *et al.*, 2004c]. Deux méthodes sont alors proposées, toutes deux basées sur la généralisation des problèmes de flot avec capacité minimale et maximale. La première est un algorithme glouton pour laquelle chaque période est considérée indépendamment. La deuxième permet de trouver une solution faisable au problème et qui ne prend pas en compte le nombre de changement d'activité des employés. D'un point de vue organisationnel, l'objectif de la modification d'une planification déjà réalisée est de minimiser le nombre d'employés ayant leur planning modifié dans le but de minimiser la gêne occasionnée envers les employés par ces changements.

Un ordonnancement de maintenance est réalisé en partir d'un ensemble de tâches. Cependant, la nature des pannes pouvant survenir sur les équipements, fait que les tâches de maintenance corrective sont imprévisibles. Ceci traduit donc par la nécessité d'insérer de nouvelle tâches dans l'ordonnement courant mais aussi par le fait qu'à priori on ne peut pas être certain du nombre de tâches que comprendra l'ordonnement.

II.3.1.2 Les incertitudes en maintenance

Pour aborder le problème de la robustesse en maintenance, il est nécessaire d'identifier les sources d'incertitudes liées à l'ordonnancement et à l'affectation dans les activités d'un service de maintenance. Un ordonnancement d'activité de maintenance est structuré par les dates qui dépendent, pour certaines, des tâches elles mêmes et, pour d'autres, des événements extérieurs (tels que la disponibilité d'un équipement, sur lequel une action de maintenance doit être réalisée).

a) Incertitudes sur les caractéristiques des tâches

Dans le domaine de la maintenance industrielle, il existe différents types d'activité de maintenance. On retrouve principalement les activités préventives et correctives. Comme on peut l'observer sur la figure II.2, les incertitudes ne sont pas les mêmes d'une tâche préventive (et préventive conditionnelle) à une tâche du type correctif.

1. Les incertitudes des tâches de maintenance préventive

■ La date de début de traitement

On considère en effet que les tâches préventives ont une date de début qui dépend de l'utilisation de l'équipement par la production. En effet la fin de traitement d'un ordre de fabrication n'est jamais une date d'une extrême précision.

■ Sa date de fin requise

Sa date de fin requise est aussi incertaine puisque la maintenance doit être réalisée avant que l'équipement ne tombe en panne. Cependant, même si l'on sait que la probabilité d'une panne augmente au fil du temps, si une opération d'entretien n'est pas faite dans les temps, il n'est pas possible de prévoir réellement quand la panne arrivera.

■ La durée de traitement

Même si les opérations de maintenance préventive sont des opérations courantes et connues, il est toujours possible qu'elle implique plus de travail qu'initialement prévu. La durée de l'intervention peut donc aussi être sujette à variations.

2. Les incertitudes des tâches de maintenance corrective

■ La durée prévue de la tâche dépend du diagnostic réalisé

Il est très difficile de prédire la durée réelle d'une tâche de maintenance corrective. De plus, celle-ci dépendra des compétences de la ressource qui interviendra et de son expérience.

b) Incertitudes sur l'occurrence des tâches

La principale incertitude à laquelle est soumis un ordonnancement d'activité de maintenance est l'arrivée de nouvelles tâches à insérer. En effet, non seulement elles ne sont pas prévisibles, mais elles peuvent générer d'importantes perturbations dans l'ordonnancement. La date de disponibilité, correspondra donc à la date d'arrivée de la tâche puisque

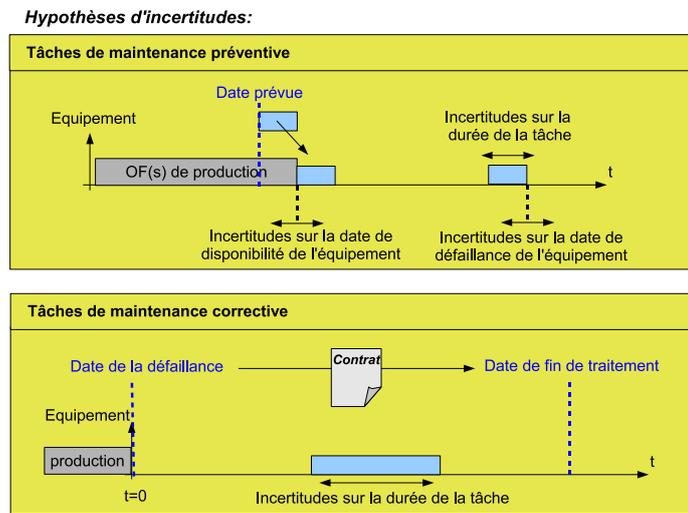


FIG. II.2 – Incertitudes en fonction du type de tâche de maintenance

l'on considère que l'équipement est arrêté suite à l'arrivée d'une panne. Sa date de fin de traitement requise est, quant à elle, obtenue grâce à la connaissance de l'engagement pris et au niveau de disponibilité de l'équipement au moment où l'équipement est arrêté.

c) Incertitudes sur les ressources annexes

Afin de mener à bien une intervention de maintenance, le personnel peut avoir besoin d'outillage particulier ou encore de pièces de rechanges. L'intervention ne pourra donc débuter que lorsque toutes les ressources seront réunies. Or, il peut arriver que les outillages spécifiques (en quantité limitée) soient déjà utilisés pour l'exécution d'une tâche dont la date de fin est incertaine. Concernant les pièces de rechange, un mauvais renseignement des stocks ou la nécessité d'une commande peuvent en rendre la date d'obtention incertaine.

II.3.1.3 Flexibilité et robustesse

Billaut *et al.* ont proposé une définition pour caractériser la robustesse d'un ordonnancement :

Définition II.4 La robustesse d'un ordonnancement [Billaut *et al.*, 2005]

Un ordonnancement est robuste si sa performance est peu sensible à l'incertitude des données et aux aléas

Le fait est qu'avant d'être utilisée pour caractériser un ordonnancement, la robustesse a

été utilisée dans de nombreux domaines. De nombreux auteurs en ont adapté les définitions. On en retrouve les principales dans la thèse de Trung [Trung, 2005]. Cependant, l'application de la robustesse à des problèmes d'ordonnancement a été réalisée de manière différentes selon les travaux et engendre aussi des mesures différentes.

Le terme de flexibilité a, quant à lui, été beaucoup utilisé en gestion de production pour représenter les degrés de liberté pour la construction d'ordonnancement. Une définition de la flexibilité a été proposée par le groupe Gotha :

Définition II.5 Flexibilité en ordonnancement [Gotha, 2002]

La flexibilité d'une solution d'un problème d'ordonnancement peut-être définie comme l'existence de modifications possibles sur la solution entraînant, éventuellement, une perte de performance acceptable

Cette définition présente la flexibilité sous une forme qui peut être qualifiée de statique [Artigues *et al.*, 2002]. Selon Erschler et De Terssac, la flexibilité recouvre généralement deux aspects complémentaires [Erschler *et al.*, 1983]. Le premier est un aspect interne, lié à une capacité de changement, de déformation et à une variété d'états possibles. Le deuxième est un aspect externe qui caractérise une capacité d'adaptation à des modifications de l'environnement, à des perturbations. Sa capacité d'adaptation peut donc être mesurée indépendamment de l'environnement dans lequel il évolue. La flexibilité peut donc être reliée à la notion de robustesse.

Cette flexibilité peut prendre différentes formes, les principales sont les suivantes :

- elle peut agir sur le temps et dénoter une flexibilité temporelle des dates de début d'exécution. C'est à travers cette flexibilité que l'on autorise certaines opérations à se décaler dans le temps.
- elle peut intervenir sur l'ordre des tâches et exprimer une flexibilité séquentielle. On autorise alors la modification de l'ordre dans lequel doivent se succéder les tâches. Cela suppose bien entendu une flexibilité temporelle.
- on peut aussi, dans certains cas, confier l'exécution d'une tâche à une autre ressource qu'initialement prévue dans l'ordonnancement. On joue alors sur le changement d'affectation et donc la flexibilité d'affectation. Cela peut effectivement être très utile au cas où une ressource serait subitement indisponible.

La flexibilité dynamique, quant à elle, se distingue par la capacité réactive de l'algorithme. Elle se base sur la flexibilité statique initiale introduite proactivement et vise à satisfaire ses objectifs lorsqu'il y a des variations dans les contraintes [Aloulou, 2002]. Elle utilise principalement la flexibilité sur les affectations et sur les séquences.

Maximiser la flexibilité d'une solution consiste à maximiser la faisabilité du plus grand nombre de scénarios. Nous passons donc à ce stade d'une flexibilité constatée à une flexibilité choisie car plus la flexibilité accordée est grande plus il sera facile de proposer une solution robuste. Cette flexibilité peut être suivie au moyen d'indicateurs. Ces indicateurs pourront alors aussi servir d'indicateurs de robustesse. Il sera toutefois très utile

de le coupler à un indicateur de performance afin de rechercher le meilleur compromis possible [Billaut *et al.*, 2005]. C'est cette recherche de compromis qui fait l'objet d'un certain nombre de travaux [Bertsimas *et al.*, 2004] [La *et al.*, 2005].

II.3.2 Les différentes approches d'ordonnement robuste

Parmi les modèles existants prenant en compte les incertitudes, il existe principalement celui de Mehta et Uzsoy [Mehta *et al.*, 1999] qui classifient les approches en 4 catégories : les approches totalement réactives, les approches prédictives réactives, les approches robustes et les approches à base de connaissances. Davenport et Beck présentent également 3 approches : l'approche proactive, l'approche réactive et l'approche proactive-réactive [Davenport *et al.*, 2000]. Selon Aloulou, l'approche de Davenport et Beck est plus complète et recouvre toutes les approches de gestion de données incertaines en ordonnancement [Aloulou, 2002]. Les approches réactives et prédictives de Mehta et Uzsoy correspondent aux approches réactives de Davenport et Beck, et se basent sur des informations mises à jour en temps réel. De plus, la classification de Mehta et Uzsoy ne permet pas de répertorier certaines approches telles que les approches proactives-réactives. Les approches à base de connaissances sont considérées comme des approches réactives où l'algorithme consiste à sélectionner la règle de ré-ordonnement ou de séquençement, lors de la prise de décision.

II.3.2.1 Les approches réactives

Les approches réactives se déroulent durant la phase d'ordonnement, Davenport et Beck ont écrit la définition II.6.

Définition II.6 Approche réactives [Davenport *et al.*, 2000]

Les approches réactives se déroulent lors de la réalisation de l'ordonnement. Elles se basent sur des informations mises à jour concernant l'état du système et éventuellement sur un ordonnancement prédictif initial, elles décident quand et où les activités doivent être exécutées.

Il est alors possible de distinguer les approches totalement réactives, qui ne sont pas basées sur un ordonnancement prédictif initial, des approches prédictives réactives qui utilisent à la fois un ordonnancement initial qui ne tient pas compte des variations et un algorithme réactif qui calcule de nouvelles solutions chaque fois qu'un aléa a lieu.

Les approches totalement réactives ne sont donc basées sur aucun ordonnancement initial, les décisions sont prises localement, généralement en utilisant des règles de priorité telle que LPT ou SPT (*Longest* ou *Shortest Processing Time*), ..., que l'on peut retrouver en détail dans [Pinedo, 1995]. Ces règles de priorité sont classées en règles statiques et en règles dynamiques. Les règles statiques ne dépendent pas du temps mais des données

associées aux tâches ou aux ressources (telles que la règle *Weighted Shortest Processing Time* ou WSPT). A l'inverse, les règles dynamiques dépendent du temps et donc les décisions d'ordonnancement sont prises en utilisant des règles telles que MST (*Minimum Slack Time*).

Ces méthodes permettent de construire en temps réel une solution faisable. Elles permettent de prendre en compte des variations importantes telles que des variations de durée, des variations sur les dates de début au plus tôt ou au plus tard, l'arrivée de nouvelles tâches,... Cependant les performances de l'ordonnancement obtenu sont relativement faibles car il n'est connu qu'une fois réalisé.

Les approches prédictives-réactives sont basées sur un ordonnancement déterministe qui ne tient pas compte de futurs aléas. Il servira à guider les futures décisions grâce à des adaptations en temps réel pour tenir compte des perturbations. Ce type d'approche pallie aux inconvénients des approches réactives puisque l'ordonnancement initial peut être adapté. Celui-ci est mis en place une fois réalisé, et en présence d'aléas, il est soit remplacé par un autre, voire modifié et réparé, soit recalculé à partir des nouvelles données, on parle alors de ré-ordonnancement. Selon Mehta et Uzsoy [Mehta *et al.*, 1999], la particularité de cette approche est la réponse aux questions quand et comment réordonnancer.

En ce qui concerne la première question, on distingue trois types de ré-ordonnancement : le ré-ordonnancement continu, le ré-ordonnancement périodique et le ré-ordonnancement événementiel.

- Le *ré-ordonnancement continu* consiste à réordonnancer à chaque fois que l'ordonnancement initial est rendu infaisable par des variations. Il nécessite cependant beaucoup de ressource de calcul et un changement répétitif de planning peut perturber le personnel dont les plannings seraient trop souvent modifiés. Mackay et al. ont désigné cette gêne envers le personnel par la nervosité de l'atelier [Mackay *et al.*, 1989].
- Le *ré-ordonnancement périodique* consiste à réordonnancer régulièrement à la fin de chaque période, à intervalles réguliers. Les performances de ce type de ré-ordonnancement peuvent être de mauvaise qualité si une ou plusieurs perturbations importantes surviennent entre deux ré-ordonnements. Cette technique est cependant moins gourmande en ressource de calcul que la précédente.
- Le *ré-ordonnancement événementiel* est un compromis entre les deux techniques précédentes. Le ré-ordonnancement périodique est toujours réalisé, cependant lors d'une perturbation importante il est aussi possible de réordonnancer. Cela peut correspondre à la mise en place d'un seuil mais nécessite une bonne analyse ou connaissance de la situation.

Quant à la deuxième question : comment ré-ordonnancer ? Cela dépend de l'objectif de ré-ordonnancement choisi. En effet, des objectifs de performance tels que la durée totale de l'ordonnancement ou encore la somme des retards pondérés sont antagonistes avec un objectif de stabilité et de prédictibilité.

- *La méthode de décalage à droite* consiste à retarder l'exécution des tâches posant problème en conservant l'ordre des opérations. Elle s'effectue au prix d'une dégradation des performances mais apporte une certaine stabilité à l'atelier.
- Le *ré-ordonnement total* consiste à prendre en compte les nouvelles tâches ainsi que les données concernant l'atelier et à construire un nouvel ordonnancement. Ce qui permet d'obtenir une très bonne performance de l'ordonnement mais peut provoquer l'instabilité de l'atelier.
- Le *ré-ordonnement multi-objectif* s'intéresse à la recherche d'un compromis entre la stabilité de l'atelier et la performance du nouvel ordonnancement.
- Le *ré-ordonnement par retour vers l'ordonnement initial* (appelé aussi *match-up rescheduling*) consiste à modifier l'ordonnement uniquement sur une période de temps.

II.3.2.2 Les approches proactives

La proactivité est le fait d'anticiper les perturbations avant qu'elles n'apparaissent réellement.

Définition II.7 Approches proactives [Davenport *et al.*, 2000]

L'objectif des approches proactives est de prendre en compte l'incertitude lors de la réalisation de l'ordonnement initial. Elle est utilisée pour rendre l'ordonnement prédictif plus robuste.

La solution ou les solutions construites initialement prennent donc en considération les possibles variations. Un modèle stochastique peut conduire à une approche proactive, l'incertitude étant prise en compte dans le calcul d'un ordonnancement de référence [Billaut *et al.*, 2005].

II.3.2.3 Les approches proactives-réactives

Les approches proactives-réactives combinent les deux techniques précédentes. En effet, il est généralement impossible de prendre en compte tous les aléas possibles durant une phase statique d'ordonnement. Il est alors nécessaire de compléter l'approche par une phase dynamique.

Définition II.8 Approches proactives-réactives [Davenport *et al.*, 2000]

Un système d'ordonnement qui est capable de traiter les incertitudes utilise certainement une combinaison d'approche proactives et réactives

Il est possible à travers la phase hors ligne, de construire une famille flexible de solutions afin d'absorber au mieux les aléas. Cette flexibilité peut être temporelle ou encore séquentielle [Trung, 2005] et permet de disposer d'un large choix de solutions.

II.4 Conclusion

De cet état de l'art, il ressort principalement que les niveaux de compétences des ressources humaines sont peu intégrées dans les modèles. La modélisation la plus proche est celle de Gruat La Forme et *al.*, qui utilisent des taux de productivité. Cet état de l'art montre que cette problématique n'est pas uniquement liée au contexte de la maintenance, mais se retrouve plus généralement dans une problématique d'affectation et d'ordonnement d'activités de service.

Le service de maintenance doit traiter des tâches de maintenance préventives et correctives. Une approche réaliste d'ordonnement de la maintenance intègre donc ces deux types de tâches. Or, nous avons pu constater dans la littérature que même pris séparément, peu d'approches s'intéressent à l'ordonnement de ce type d'activité. De plus, les approches trouvées n'intègrent pas les niveaux de compétence.

Les critères ne peuvent pas être hiérarchisés à travers des préférences ou agrégés en une seule fonction objectif. Ceux-ci doivent être pris en compte mais c'est uniquement le décideur qui, avec sa vision du contexte fera le choix d'une solution qui pourra être plus favorable pour certains critères que d'autres. La problématique d'affectation et d'ordonnement des activités de maintenance apparaît multi-critère.

Certaines données présentent des incertitudes ou des imprécisions. Le service de maintenance prend cependant des engagements. Pour refléter au mieux la réalité, le modèle doit donc tenir compte de l'incertitude du contexte. Les solutions doivent alors être robustes.

Un modèle réaliste intègre pour chacune de ses ressources, non seulement ses compétences, mais aussi ses niveaux de compétence. Concernant les tâches de maintenance, le modèle doit prendre en compte leurs caractéristiques. La maintenance préventive a lieu sur des équipements en état de bon fonctionnement. Elle doit s'insérer entre des ordres de fabrication. La date à laquelle ce type de tâche peut être réalisé dépend donc de la disponibilité de l'équipement. À l'inverse, les tâches de maintenance corrective peuvent être réalisées dès la fin de leur diagnostic. Le modèle doit prendre en compte des critères concernant les tâches mais aussi les ressources. La modélisation doit aussi permettre de prendre en compte le côté incertain du contexte.

Le problème d'ordonnement ne consiste alors plus seulement à prendre en compte les différentes contraintes liées aux tâches lors de la répartition de la charge de travail entre les ressources humaines. Celui-ci doit, en plus, considérer les différences de niveau de compétences des ressources, les différences entre les types de tâches, prendre en compte un ensemble de critères ainsi que les incertitudes du contexte.

Nous limitons le cadre de ce problème à la prise en compte des ressources humaines, les ressources matérielles ne seront pas considérées. La durée des tâches comprendra l'ensemble des différentes actions et déplacements nécessaires. Nous supposons aussi que chaque tâche ne nécessite pour être traitée qu'une seule ressource et que ces tâches ne sont pas sécables. Concernant les ressources humaines, elles sont supposées toujours présentes.

Afin de mieux aborder le problème dans sa globalité, nous allons dans un premier temps le modéliser sous forme simplifiée. Ceci dans le but d'identifier des problèmes d'ordonnement de référence desquels dérive notre cas. Nous proposons une approche de résolution à un problème d'affectation et d'ordonnement des tâches de maintenance préventive et corrective pour minimiser la somme pondérée des retards.

Chapitre III

Heuristiques pour l'ordonnancement et l'affectation des activités de maintenance

- Cas de la somme pondérée des retards -

Le service de maintenance gère les interventions de maintenance pour un parc d'équipements pour lesquels des objectifs de productivité ont été préalablement définis. Ceux-ci se traduisent le plus souvent par des engagements sur des niveaux de disponibilité pour ces équipements. Ce service est composé de ressources humaines qui vont devoir traiter différents types de tâches de maintenance. Pour un horizon considéré, l'ensemble des tâches de maintenance préventive est connu, alors que les tâches de maintenance corrective ne sont connues que lorsque leur diagnostic est terminé. Chacune d'entre elles doit être prise en compte, affectée à une ressource et ordonnancée pour être traitée à une date déterminée.

Dans la littérature, il est possible de trouver des approches traitant de problème dans des contextes similaires. Certains auteurs traitent des problèmes d'insertion dynamique [Duffuaa *et al.*, 1999] de tâches, dans un ordonnancement existant. Cependant, ils ne prennent pas en compte les différences existant entre les ressources. Dans le domaine de la production, des approches prennent en compte les différences existant entre les ressources humaines [Gruat-La-Forme *et al.*, 2007b]. Cependant, ces approches ne sont pas dynamiques et ne prennent pas en compte les dates de disponibilité différentes. A notre connaissance, le problème de l'ordonnancement des tâches de maintenance préventives et correctives, n'a pas été résolu à travers une même approche.

Le problème que nous traitons consiste à affecter et à ordonnancer des tâches de maintenance préventives et correctives à un ensemble de ressources humaines différentes. L'approche de résolution doit tenir compte des dates de disponibilité des équipements sur lesquels auront lieu les tâches. Nous poserons aussi comme hypothèse, que les paramètres des tâches sont précis (ne présentent pas d'approximation). Des pénalités de

retard, sous la forme de pondérations sont prévues, nous chercherons donc à minimiser la somme pondérée des retards.

Dans ce contexte, nous nous intéresserons d'abord à l'ordonnancement des activités de maintenance préventive. Ces tâches sont non seulement connues, mais aussi bien maîtrisées. Nous développerons une approche d'ordonnancement statique pour affecter un ensemble de tâches à un ensemble de ressources et les ordonnancer. Des événements aléatoires peuvent cependant faire quitter aux équipements leur état de bon fonctionnement. Pour corriger cet état, des tâches de maintenance corrective doivent être réalisées. Ces tâches doivent alors être affectées et ordonnancées dynamiquement au moment où leur diagnostic est terminé. Nous complétons donc l'approche statique permettant de réaliser un ordonnancement à partir d'un ensemble de tâches par une approche dynamique permettant d'insérer une nouvelle tâche dans un ordonnancement existant.

L'objectif de ce chapitre est de présenter nos propositions d'approche de résolution à ce problème d'ordonnancement mono-critère. Nous présenterons dans un premier temps le modèle que nous proposons. Celui-ci prend en compte le fait que les ressources humaines, en charge de leur traitement, sont différentes. Puis nous présenterons les approches proposées avant d'en valider l'apport par la comparaison de nos résultats avec un algorithme issu de la littérature.

III.1 Ordonnancement et affectation statique

Le problème initial que nous abordons est composé d'un ensemble de tâches, caractérisées par des compétences requises pour leur traitement, et d'un ensemble de ressources, caractérisées par un profil de compétences. Ce sont donc les ressources qui traiteront ces différentes tâches. Le service de maintenance s'est engagé sur des niveaux de disponibilité. Le retard dans le traitement des tâches provoque une diminution imprévue de ce niveau de disponibilité. Des pénalités sont alors attribuées lorsque des tâches sont terminées en retard. Celles-ci sont fonction de la durée du retard et d'une pondération reflétant l'importance de l'engagement. Le total de ces pénalités est appelé : somme pondérée des retards. Notre objectif, dans ce chapitre, sera de minimiser la somme pondérée des retards.

Les tâches ne sont pas sécables et de plus nous posons comme hypothèse que toutes les données concernant ces activités de maintenance sont connues. Ce problème déterministe consiste alors à affecter et à ordonnancer un ensemble de tâches à un ensemble de ressources humaines.

En maintenance industrielle il est possible de comparer la résolution de ce type de problème, qui est une résolution statique, à l'ordonnancement des tâches de maintenance préventive, qui est réalisé périodiquement sur des horizons définis.

III.1.1 Modélisation

Nous décrivons ici les notations nécessaires pour l'explication du modèle. Nous commençons donc par modéliser les tâches traitées dans le problème.

III.1.1.1 Les tâches

Pour chaque tâche j nous utilisons les notations suivantes :

- p_j : durée de base de la tâche j (la durée réelle sera différente en fonction de la ressource à laquelle elle sera affectée),
- r_j : date de disponibilité (*release date*) de la tâche j . Elle dépend de données relatives à l'équipement sur laquelle elle aura lieu,
- d_j : *due-date* de la tâche j . Cette valeur est calculée à partir des engagements,
- cr_j : compétence requise pour la tâche j . Il est obligatoire que la ressource qui devra traiter la tâche j dispose de cette compétence.
- w_j : pondération de la tâche j . Elle est prévue pour différencier les tâches en fonction de leur importance.

III.1.1.2 Les ressources humaines

Le service de maintenance est composé de m ressources humaines présentes et disponibles en permanence (et qui coûtent donc de l'argent à l'entreprise). Chacune de ces ressources est caractérisée par un profil de compétence. Leur rapidité de traitement ne dépend pas seulement de la tâche. Chaque ressource dispose d'un niveau de qualification pour chacune des compétences requises par les tâches. Les opérateurs réaliseront plus ou moins rapidement le traitement d'une tâche. La durée réelle de la tâche j par la ressource humaine i est alors notée p_{ij} . Avec :

$$p_{ij} = f(p_j, Comp_{i,cr_j}), \forall i \in \{1, \dots, m\} \quad (\text{III.1})$$

Dans laquelle $Comp_{i,cr_j}$ est le taux de compétence de la ressource i , pour la compétence requise, pour la tâche j , cr_j .

L'approche proposée est indépendante de la forme de f . Cependant par mesure de simplicité f sera une fonction affine dans notre cas telle que :

$$p_{ij} = p_j * Comp_{i,cr_j}, \forall i \in \{1, \dots, m\} \quad (\text{III.2})$$

Pour exemple, une tâche j avec $p_j = 5$ (unité de temps) traité par une ressource i ayant un taux de compétence de $Comp_{i,cr_j} = 1,2$ aura une durée effective de traitement de $p_{ij} = p_j * Comp_{i,cr_j} = 5 * 1,2 = 6$.

L'ensemble des taux de compétences des ressources peut être représenté par une matrice, dans laquelle, pour chaque tâche la compétence requise peut être trouvée.

$$\begin{array}{c}
 \text{Comp}_{cr_1} \quad \cdots \quad \text{Comp}_{cr_n} \\
 \begin{array}{c}
 op_1 \\
 \vdots \\
 op_m
 \end{array}
 \left[\begin{array}{ccc}
 \text{Comp}_{1,1} & \cdots & \text{Comp}_{1,cr_n} \\
 \vdots & \ddots & \vdots \\
 \text{Comp}_{m,1} & \cdots & \text{Comp}_{m,cr_n}
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

Les niveaux de compétence sont indépendants d'une opération à une autre. Un opérateur peut donc être le plus performant pour un type de tâche, et le moins efficace pour un autre.

III.1.1.3 Variables

Les variables de notre problème sont les suivantes, pour chaque tâche j :

- t_j ($j = 1 \dots n$) : date de début planifiée de la tâche j ,
- C_j ($j = 1 \dots n$) : date d'achèvement de la tâche j ,
- x_{ij} ($j = 1 \dots n$ et $i = 1 \dots m$) : booléen indiquant l'affectation de la tâche. $x_{ij} = 1$ si la tâche j est affectée à la ressource i , autrement $x_{ij} = 0$,
- $a_{ij}(t)$ ($j = 1 \dots n$ et $i = 1 \dots m$) : booléen indiquant la consommation de la ressource i par la tâche j à l'instant t . $a_{ij}(t) = 1$ si la tâche j est traité par la ressource i à l'instant t , autrement $a_{ij} = 0$,

III.1.1.4 Contraintes

Chaque tâche doit être affectée à une seule ressource :

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \forall i \in \{1, \dots, m\} \quad (\text{III.3})$$

La tâche j ne peut pas être planifiée sur l'équipement avant que celui-ci ne soit disponible :

$$\forall j, t_j \geq r_j \quad (\text{III.4})$$

Les ressources sont disjonctives. Cela signifie que les ressources ne peuvent être utilisées que par une tâche à la fois. Tout couple de tâches (j_1, j_2) utilisant la même ressource est associée la paire de disjonction $(j_1 \prec j_2) \vee (j_2 \prec j_1)$ [Esquirol *et al.*, 2001b]. Cela se traduit par un séquençement total des tâches utilisant la même ressource et par une disjonction entre deux inégalités de potentiel :

$$(t_{j_1} - t_{j_2} \geq p_{j_2}) \vee (t_{j_2} - t_{j_1} \geq p_{j_1}) \quad (\text{III.5})$$

et donc :

$$\forall t, \forall i, \sum_{j=1}^n a_{ij}(t) \leq 1 \quad (\text{III.6})$$

III.1.1.5 Objectif

Afin de respecter ses engagements, les délais de traitement doivent être minimisés. Cependant, en raison des pénalités prévues en cas de retard, a durée de retard égale, il sera plus urgent de remettre en état de fonctionnement l'équipement dont le coefficient de pénalité (w_j) est le plus important. Notre objectif est donc de minimiser la somme pondérée des retards (ou somme des pénalités).

$$\min \sum_{j=1}^n w_j T_j, \quad (\text{III.7})$$

Où T_j est le retard de la tâche j .

III.1.1.6 Modèle mathématique

Nous proposons une approche statique du problème qui consiste à affecter et à ordonner un ensemble de tâches (non sécables) à un ensemble de ressources humaines. En maintenance industrielle, les tâches de maintenance préventive sont connues pour un horizon déterminé. Il est alors possible de comparer la résolution de ce type de problème, à l'ordonnancement des activités de maintenance préventive.

Pour des raisons de performance du service de maintenance, les tâches sont prioritairement affectées aux ressources les plus efficaces. Cependant, ces affectations de tâches ont trait à de l'activité humaine, et les ressources sont toujours présentes, il est donc nécessaire d'équilibrer la charge entre elles.

Nous abordons ce problème, par une approche de résolution composée de deux phases où deux problèmes mono-critères successifs sont résolus. La première phase correspond à l'affectation des tâches aux ressources en équilibrant la charge de travail entre les ressources humaines mais aussi en cherchant à la minimiser. Dans cette première phase, nous *relaxons les contraintes de disponibilité* III.4. La deuxième répond à l'objectif de notre travail, qui est de minimiser la somme pondérée des retards en prenant en compte les contraintes intrinsèques des tâches telles que la contrainte de disponibilité et la priorité w_j des tâches.

La première phase de notre problème est alors comparable au problème de minimisation de la durée de l'ordonnancement (C_{max}) sur des machines parallèles différentes (R). Ce type de problème se note de la façon suivante : $R||C_{max}$ et peut être résumé de la façon

s suivante :

$$\min C_{max} = \max_{i=1\dots m} \left(\sum_{j=1}^n x_{ij} p_{ij} \right),$$

$$\text{Sachant que } \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \forall i \in \{1, \dots, m\},$$

$$\text{et que } p_{ij} = \sum_{j=1}^n x_{ij} * f(p_j, \text{comp}_{i,cr_j}).$$

La deuxième phase est la phase d'ordonnancement à proprement parlé. Les contraintes temporelles sont prises en compte et le problème d'optimisation peut alors être résumé de la façon suivante :

$$\min \sum_{j=1}^n w_j T_j,$$

De sorte que :

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \forall i \in \{1, \dots, m\},$$

$$t_j \geq r_j, \forall j \in \{1, \dots, n\},$$

$$\forall t, \forall i, \sum_{j=1}^n a_{ij}(t) \leq 1,$$

$$\text{avec } T_j = \max(O, C_j - d_j) \text{ et } C_j = t_j + p_{ij},$$

$$\text{avec } p_{ij} = \sum_{j=1}^n x_{ij} * f(p_j, \text{comp}_{i,cr_j}).$$

III.1.2 Affectation des tâches de maintenance

Dans cette partie nous présenterons dans un premier temps un algorithme, issue de la littérature, auquel nous comparerons notre approche. Ensuite nous présenterons la première phase de l'approche que nous avons développé. Cette phase consiste à équilibrer la charge et à la répartir entre les ressources en fonction de leurs compétences. Elle correspond à la résolution du problème de minimisation de la durée de l'ordonnancement (C_{max}) réalisé sur des machines parallèles différentes (R) et noté : $R||C_{max}$. Ce problème est NP-difficile [Pfund *et al.*, 2004], nous orientons donc notre approche vers une heuristique. Pour résoudre ce problème, les contraintes correspondants aux r_i (contraintes III.4) seront, dans un premier temps, relaxées pour traiter ce problème d'affectation seul.

III.1.2.1 Algorithme de référence

La comparaison des résultats obtenus s'effectuera avec l'algorithme d'Ibarra [Ibarra *et al.*, 1977]. Nous avons choisi d'utiliser un tel algorithme, pour répondre à notre problème, car celui-ci est fréquemment utilisé dans la littérature pour ce type de problème. Cet

algorithme est appelé ECT : Earliest Completion Time et il s'agit d'un algorithme de liste. C'est à dire que les données sont triées dans un ordre puis sont traitées dans cet ordre.

```

L = { Tâches rangées par ordre décroissant de leur durée maximale  $p_{ij}$  };
 $\bar{L} = \emptyset$ ;
Tant que ((L  $\neq \emptyset$ )) faire
    k  $\leftarrow$  première tâche de L;
    trouve la ressource l telle que :  $\min_{l=1\dots n} \sum_{j \in \bar{L}} p_{lj} x_{lj} + p_{lk}$ ;
    affecter k à l;
    L  $\leftarrow$  L - k;
Fait

```

Algorithme 1: Algorithme *ECT*

Il existe aussi des approches exactes de ce problème [Mokotoff *et al.*, 2002], [Martello *et al.*, 1997], [de Velde, 1993]. Cependant notre objectif n'est pas d'obtenir la solution optimale au problème mais une bonne solution. D'autre part le coût en temps de calcul des méthodes exactes pour des problèmes de grande taille limiterait leur applicabilité dans des cas réels.

III.1.2.2 Résolution du problème $R||C_{max}$

Dans cette partie nous allons chercher à affecter les tâches aux ressources les plus efficaces pour leur traitement. Le choix de l'affectation d'une ressource à une tâche s'effectue en fonction du niveau de compétence de celle-ci, dans la compétence requise pour effectuer le traitement de la tâche. Le niveau de compétence de la ressource influe directement sur la durée réelle de la tâche. Si l'on veut minimiser la durée totale de travail, il convient alors d'affecter chaque tâche à la ressource la plus performante.

Cependant, la charge de travail doit être répartie entre les ressources humaines. Chacune des tâches ne peut donc pas, dans la majorité des cas, être systématiquement affectée à la ressource la plus performante pour son traitement. C'est pourquoi une borne inférieure a été définie, afin de pouvoir à la fois affecter le maximum de tâches à la meilleure ressource correspondante sans compromettre la possibilité d'équilibrer la charge entre les ressources.

a) Borne inférieure

Nous présentons ici la borne inférieure que nous avons utilisé dans notre heuristique. La définition d'une borne inférieure est la suivante :

Définition III.1 Borne inférieure [Bourbaki, 2007]

Dans un ensemble ordonné E , la borne inférieure d'une partie minorée F de E est, s'il existe, le plus grand minorant de F .

Nous utilisons une borne inférieure qui est la limite la plus simple pour un problème du type $Rm \parallel C_{\max}$. Celle-ci est rencontrée en particulier dans les travaux de Mokotoff et Chrétienne [Mokotoff *et al.*, 2002]. Elle consiste à prendre pour chacune des n tâches, la plus performante des m ressources et d'en déduire sa durée p_{ij} la plus courte. Nous obtenons ensuite la borne inférieure par le calcul suivant :

$$BI(C_{\max}) = \max \left\{ \left[\frac{1}{m} \sum_{j=1}^n p_j^{\min} \right]; \max_{j \in \{1, \dots, n\}} p_j^{\min} \right\} \quad (\text{III.8})$$

avec :

$$p_j^{\min} = \min p_{ij}, j \in \{1, \dots, n\} \quad (\text{III.9})$$

p_j^{\min} correspond au temps que mettrait la ressource la plus performante pour effectuer le traitement de la tâche j . Étant donné que nous cherchons à équilibrer la charge entre les ressources, il ne sera réellement possible d'affecter chaque tâche à la ressource la plus efficace que dans des cas rares et particuliers. Le rapport obtenu dans le calcul de $LB(C_{\max})$ correspond donc à une valeur rarement atteignable et toujours inférieure ou égale au résultat que l'on obtiendra.

Cette borne inférieure est ensuite tout naturellement utilisée dans l'algorithme d'affectation des tâches pour orienter l'affectation des tâches vers les ressources les plus efficaces.

b) Heuristique d'affectation des tâches

L'algorithme d'affectation des tâches est composé d'une partie principale et d'une partie de prise en compte des cas dans lesquels la ressource proposée au traitement d'une tâche est la moins efficace (pires cas).

Dans un premier temps, les tâches sont triées dans une liste par ordre décroissant de leur durée maximale (LPT) de p_{ij}^{\min} à p_{ij}^{\max} .

Pour tendre vers la Borne Inférieure (BI), il convient naturellement d'affecter le maximum de tâches aux ressources qui sont les plus efficaces. Cependant nous devons minimiser C_{\max} , donc cette affectation se déroule jusqu'à ce que la somme des durées des tâches affectées à une ressource atteigne la borne inférieure.

Pour équilibrer la charge, nous allons donc chercher à repousser le plus tard possible le dépassement de BI (III.8). Le dépassement de la Borne Inférieure et l'affectation de tâches à des ressources peu efficaces induisent un éloignement du C_{\max} idéal : $C_{\max}^* = BI(C_{\max})$. Cependant, la BI est calculée à partir des temps mis par les ressources les plus

```

L = { Tâches rangées par ordre décroissant de leur durée maximale  $p_{ij}$  };
 $\bar{L} = \emptyset$ ;
Tant que (L  $\neq \emptyset$ ) Alors
k  $\leftarrow$  première tâche de L ;
i  $\leftarrow$  ressource la plus efficace pour le traitement de k ;
Si ( $\sum_{j \in \bar{L}} p_{ij}x_{ij} + p_{ik} \leq LB$ ) Alors
    |  $x_{ik} \leftarrow 1$  ;  $x_{ak} \leftarrow 0$ , for  $a = 1 \dots n$  and  $a \neq i$  ;
    |  $\bar{L} \leftarrow \bar{L} + k$  ; L  $\leftarrow$  L - k ;
Si non
    | Essaie d'affecter la tâche k à la ressource la plus efficace l,
    | avec  $l = 1 \dots n$  and  $l \neq i$  pire cas
    | qui respecte  $\sum_{j \in \bar{L}} p_{lj}x_{lj} + p_{lk} \leq LB$  ;
    | Si (l pas trouvé) Alors
    | | trouve la ressource l telle que :  $\min_{l=1 \dots n} \sum_{j \in \bar{L}} p_{lj}x_{lj} + p_{lk}$ 
    | | Si (l = pire cas) Alors
    | | | Exception Algo. 2 ;
    | | Fin Si
    | Fin Si
    |  $x_{lk} \leftarrow 1$  ;  $x_{ak} \leftarrow 0$ , pour  $a = 1 \dots n$  et  $a \neq l$  ;
    |  $\bar{L} \leftarrow \bar{L} + k$  ; L  $\leftarrow$  L - k ;
Fin Si
Fin Tant que

```

Algorithme 2: Algorithme principal

efficaces pour chaque type de tâche, l'imprévisibilité des compétences requises ajoutée à la non-sécabilité des tâches rendent le plus souvent cet objectif non-atteignable. En effet, si lors de l'insertion d'une tâche, alors que toutes les tâches préalablement affectées, le sont à leur ressource la plus efficace, une tâche ne peut être affectée à sa ressource la plus efficace sans entraîner un dépassement de la Borne Inférieure, cela signifie que par définition cette borne inférieure n'était pas atteignable pour ce problème.

Prenons pour exemple simple trois tâches équivalentes d'une durée réelle de 2 unités de temps (u.t.). Et deux ressources identiques. La borne inférieure aura pour résultat $BI = (2 + 2 + 2)/2 = 3$. Cependant, étant donné que les tâches ne sont pas sécables, l'affectation de la troisième tâche entraînera un dépassement inévitable de BI . L'une des ressources aura un ordonnancement de 2 u.t. et l'autre de 4 u.t. ce qui est supérieur à C_{max}^* .

Pour ne pas franchir BI et avoir un total des durées affectées le plus faible possible (minimiser l'augmentation du ratio $\sum x_{ij}p_{ij}/m$ avec m le nombre de ressources), il s'agit

d'affecter la tâche et de $\text{maximiser}\{BI - \max_{i \in \{1...m\}} \sum x_{ij} p_{ij}\}$ qui représente le total de temps disponible sous BI .

Le premier schéma de la figure III.1 représente un ordonnancement encours de construction. Trois ressources humaines ont chacune des tâches affectées (zones grisées). BI n'est pas encore atteinte et la zone hachurée représente le total de temps disponible sous la BI .

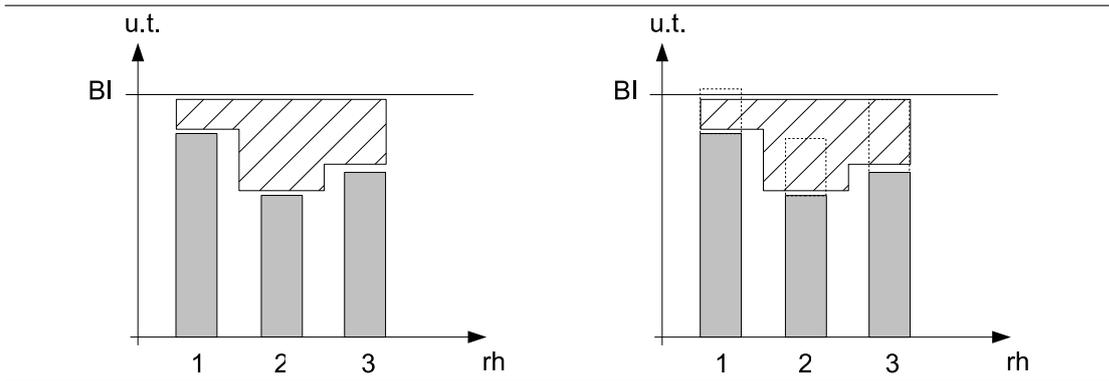


FIG. III.1 – volume de temps disponible sans franchissement de BI

Lors de l'insertion d'une tâche, pour $\text{maximiser}\{BI - \max_{i \in \{1...m\}} \sum x_{ij} p_{ij}\}$ sans dépasser BI , il est optimal de trier par ordre décroissant d'efficacité les ressources suivant le type de compétence requise et d'affecter la tâche à la ressource la plus efficace suivante qui ne dépasse pas BI .

Pour l'exemple, sur le deuxième schéma de la figure III.1, une nouvelle tâche j doit être ajoutée. Celle-ci a été représentée en pointillée à la suite des affectations de chaque ressource. Les trois ressources sont classées par ordre d'efficacité décroissante. $rh1$ est plus efficace que les deux autres et $rh2$ que $rh3$, ce qui peut s'observer au niveau de la durée de la nouvelle tâche. On s'aperçoit que l'affectation à $rh1$ (qui est la plus efficace) entraîne un dépassement de BI . Étant donné que $p_{2,j} < p_{3,j}$ et que l'affectation à l'un ou l'autre de ces deux ressources n'entraîne pas de dépassement de BI , pour $\text{maximiser}\{BI - \max_{i \in \{1...m\}} \sum x_{ij} p_{ij}\}$ sans dépasser BI l'affectation se fera à la $rh2$.

Cependant, lorsque la seule ressource qui ne dépasse pas BI est la moins efficace des ressources pour ce type de tâche, cela représente le pire des cas pour minimiser l'augmentation du ratio $\sum x_{ij} p_{ij} / m, \forall i \in \{1...m\}$. La tâche est alors reculée dans la liste des tâches restant à affecter. Si BI est dépassée quelque soit le choix de la ressource, cela signifie que BI ne permet plus de minimiser C_{max} et d'atteindre BI . En effet, en affectant une tâche à sa ressource la moins performante, l'espace temps occupé par la tâche sera très important par rapport à celui qu'elle aurait occupé si elle avait été affectée à une ressource plus efficace. Ce surplus d'occupation est de l'espace temps perdu pour

l'affectation d'autres tâches. On affectera alors la tâche à la ressource qui minimisera le C_{max} sans se préoccuper de BI . Si cette ressource est à nouveau le pire cas, on applique l'algorithme d'exception.

Insère en tête de liste la première tâche qui ne serait pas traitée par la ressource la moins performante.
Si (toutes les tâches $\in L$ vérifient $p_j^{\max} = \max p_{ij}$) **Alors**
 | Affecte la première tâche sans se préoccuper du fait que ce soit à la moins performante des ressources
Fin Si

Algorithme 3: Exception

Les solutions sont performantes si un maximum de tâches est affecté aux ressources qui sont efficaces. Nous avons expliqué précédemment qu'il était rarement possible d'affecter toutes les tâches à la plus efficace ressource correspondante. Cet aspect est aggravé par le fait que l'algorithme de liste développé, propose les tâches pour affectation, dans un certain ordre. Cet ordre déterministe proposé peut conduire à une solution peu performante (affectation à la pire des ressources). Nous avons donc développé un algorithme qui modifie cet ordre (Algorithme d'exception). Celui-ci avance en tête de la liste la première des tâches qui ne serait pas traitée par la moins performante des ressources. Cela peut permettre d'éviter l'affectation de tâche à la ressource la moins compétente. S'il est impossible de faire autrement, l'affectation de la première tâche de la liste à la moins performante des ressources est tout de même réalisée.

Dans cette partie, nous avons pour objectif de minimiser le C_{max} . Nous avons utilisé deux algorithmes différents pour affecter les tâches et équilibrer la charge entre les ressources humaines. La minimisation de la durée totale de l'ordonnancement conduit à choisir la ressource la plus efficace pour le traitement des différentes tâches. Dans l'annexe A, nous avons réalisé un exemple simple qui déroule l'application de cette phase d'affectation.

L'objectif de la phase suivante est de minimiser la somme pondérée des retards. A partir de ces affectations, les tâches seront ordonnancées afin de respecter cet objectif.

III.1.3 Ordonnancement des tâches

Nous développons maintenant la deuxième phase de cette approche, qui consiste à minimiser la somme pondérée des retards. Pour cela, les contraintes temporelles liées aux tâches (contraintes III.4), les due-dates ou encore les pondérations doivent être prises en compte afin d'ordonnancer les tâches.

L'ordre déterministe proposé initialement dans l'heuristique développée pour trier les tâches en vue de leur prise en compte dans l'heuristique est un tri *LPT*. C'est celui qui

était utilisé initialement dans l'heuristique *ECT*. Cette règle de priorité permet de placer d'abord les tâches très longues et de conserver les plus courtes pour la fin de l'algorithme afin de permettre un équilibrage plus fin de la charge. Smith [Smith, 1956] à présenté une règle permettant de minimiser les temps moyens pondérés de séjour. Cette règle, appelée *WSPT* (Weighted Shortest Processing Time first) ou règle de Smith, consiste à trier les tâches dans l'ordre croissant de leur rapport p_j/w_j . Le classement par ordre croissant des durées permet de minimiser le retard algébrique moyen. De plus, cette règle est optimale pour le problème $1||\sum w_j C_j$ [Trung, 2005]. Nous allons donc étudier l'effet du remplacement de la règle *LPT*, initialement implémenté, par la règle *WSPT* sur ce problème et sur les solutions au problème de la minimisation des retards pondérés.

Les heuristiques proposées seront alors appelées *LPT-H* (les tâches sont triées suivant la règle *LPT* puis affectée en utilisant l'heuristique développée) et *WSPT-H* (les tâches sont triées suivant l'algorithme *WSPT* puis affectées en utilisant l'heuristique développée).

Il y a différentes méthodes pour prendre en compte le retard dans le traitement des tâches. Dans l'algorithme présenté précédemment, nous avons cherché à réduire le plus possible la date de fin de l'ordonnancement (C_{max}) et de trouver la ressource qui assumera le traitement de chaque tâche. Cependant dans cette première phase, nous ne prenons pas en compte les disponibilités r_j ou encore les *due-dates* d_j des tâches. Une fois les tâches validées, le problème se ramène alors à m problèmes à une machine dont la fonction objectif est $\min \sum w_j T_j$, en respectant les contraintes de disponibilité, noté $1|r_j|\sum w_j T_j$. Le problème $1||\sum w_j T_j$ est NP-difficile [Lenstra *et al.*, 1977]. Lawler a montré que le problème de minimisation de la somme pondérée des retards sur une machine est NP-difficile au sens fort [Lawler, 1977]. Ce même problème avec des dates de disponibilité (noté $1|r_j|\sum w_j T_j$) l'est alors aussi ainsi que celui sur machines parallèles différentes aussi (noté $R|r_j|\sum w_j T_j$). Un algorithme de type branch and bound a été développé par Potts [Potts *et al.*, 1985] cependant comme le précise Congram *et al.* [Congram *et al.*, 1998] celui-ci n'est pas utilisable pour des instances de plus de 50 tâches. Lawler a développé un FPTAS (Fully Polynomial time Approximation Scheme) [Lawler, 1982] qui a été repris et amélioré par Kovalyov [Kovalyov, 1991][Angel *et al.*, 2005].

La règle *EDD* (*Earliest Due Date*) ou règle de Jackson [Jackson, 1955] quant à elle est optimale pour le problème $1|r_j|L_{max}$ (minimisation du retard maximum sur une machine avec contrainte de date de disponibilité). Pour des raisons de rapidité de temps de calcul, lié au cumul de complexité de ce problème et du problème traité en première phase, nous allons donc ordonnancer les tâches affectées à chaque ressource en suivant la règle de tri *EDD*. Nous comparerons donc les résultats de l'affectation réalisée en première phase (obtenus par les trois méthodes : *ECT* et les deux heuristiques proposées) ordonnancée avec un tri suivant leur date d'échéance la plus proche croissante.

L'approche *ECT* sera donc rebaptisée *ECT-EDD* et de même pour *LPT-H* et *WSPT-H* qui seront alors appelées : *LPT-H-EDD* et *WSPT-H-EDD*.

L'exemple simple, sur l'affectation de tâches, entamé dans l'annexe A est poursuivi dans l'annexe B, avec l'application de cette phase d'ordonnancement.

III.1.4 Applications

Dans cette partie nous développons des jeux d'exemples afin d'étayer les approches développées.

III.1.4.1 Génération des données

Les valeurs des durées effectives des tâches sont calculées en faisant le produit de la durée de base des tâches, et le taux de compétence de la ressource dans la compétence requise pour le traitement de cette tâche. La durée de base des tâches est un entier obtenu suivant une distribution uniforme comprise dans l'intervalle $[1, 7200]$ (variant entre une seconde et deux heures). Pour chaque tâche, le type de compétence requise est déterminé aléatoirement par un entier prenant pour valeur 1, 2 ou 3 (sous entendu il y a trois compétences). Elle se réfère à un taux de compétence, que possède chacune des ressources, qui est un réel obtenu suivant une distribution uniforme dans l'intervalle $[1.01, 2.00]$. les dates de disponibilité (r_j) sont générées suivant une distribution uniforme dans l'intervalle $[0, 86400]$ (entre la date de lancement de l'approche t et $t + 24$ heures). Les pénalités sont déterminées par un entier obtenu suivant une distribution uniforme dans l'intervalle $[1, 10]$. Nous avons utilisé cet algorithme dans deux états de charges différentes (faibles et élevées). Ces conditions sont déterminées lors de la génération des *due dates* qui sont générées dans un futur plus ou moins éloigné. En effet un même nombre de tâches devant être réalisée dans un espace temporel plus court génère un niveau de charge plus élevé. Pour être sur que les tâches soient réalisables dans les temps, les *due dates* ne peuvent pas être fixées avant $t = r_j + p_j * 2$, avec $0 < r_j < 86400$. Pour réguler la charge nous modifions la date maximale t_2 que peut avoir les *due-dates*. Celles-ci sont alors obtenues comme des réels suivant une distribution uniforme dans l'intervalle $[t, t_2]$ avec pour un niveau de charge faible $t_2 = t + p_j * 4,5$ et pour un niveau de charge élevé $t_2 = t + p_j * 3,5$.

III.1.4.2 Algorithme d'affectation

Les résultats obtenus par l'algorithme d'affectation proposé et par ECT sont présentés dans le tableau III.1. Les résultats présentés sont des moyennes obtenues à travers la résolution de 20 problèmes différents. Le nombre de tâches (n) et le nombre d'opérateurs de maintenance (m) ont été choisis pour être représentatifs de la réalité. La colonne C_{max} contient les résultats correspondant à la durée totale de l'ordonnancement obtenu pour chaque algorithme. La colonne σ correspond à l'écart type de la charge entre les ressources pour chaque solution. La dernière colonne donne le temps mis pour obtenir chacune des solutions. Nous avons réalisé ces tests sur un Pentium IV 3.00GHz.

Le tableau montre les performances de l'heuristique (LPT-H) comparées à ECT. Pour chacun des jeux de données obtenus aléatoirement, notre algorithme donne de meilleurs résultats qu'ECT au regard de la durée totale de l'ordonnancement (*makespan*). Concer-

nant la déviation obtenue par rapport à BI, les solutions que nous obtenons varient de 5%, pour un problème à deux ressources et vingt tâches, à 12% pour un problème à huit ressources et deux cents tâches. Notre heuristique présente une amélioration de 8% par rapport à ECT pour le problème à huit ressources et deux cents tâches qui est un problème de grande taille.

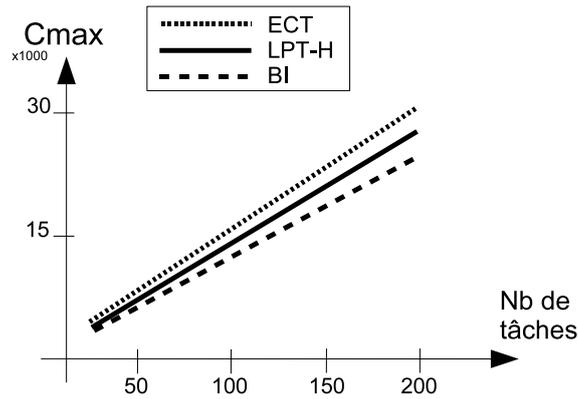


FIG. III.2 – Évolution du C_{max} pour un problème à 5 ressources humaines

La figure III.2 montre l'évolution des écarts entre les solutions fournies par les deux algorithmes et la borne inférieure en fonction de la charge pour un problème à cinq ressources. Le temps de traitement, quant à lui, est un peu augmenté avec notre algorithme. Il nécessite 12 ms pour résoudre le problème à deux ressources et vingt tâches contre 268 ms pour un problème à huit ressources et deux cents tâches ce qui reste très rapide même pour un problème de grande taille.

Notre problème consiste à affecter des tâches à des ressources humaines. Il est alors important, pour des raisons économiques, que la charge de travail soit équilibrée entre elles. Le tableau III.1 montre aussi l'écart type moyen σ de la répartition de la charge entre les ressources. Étant donné que ET est faible (par rapport à la durée des tâches), nous pouvons déduire que chaque ressource a une charge proche de la valeur du C_{max} . Dans le cas d'un C_{max} identique entre deux solutions, plus l'écart type est important, plus les ressources (qui ne sont pas concernées par le C_{max} et donc les moins chargées) ont de temps libre pour d'éventuelles nouvelles tâches.

Ces premiers résultats nous permettent donc d'obtenir des solutions au problème d'affectation des tâches. Cependant l'objectif du problème traité dans ce chapitre est de minimiser la somme pondérée des retards. Nous développons dans le prochain paragraphe les résultats obtenus suivant ce critère, et donc avec la deuxième phase de notre approche.

m	n	LPT-H			ECT		
		C_{max} (u.t.)	σ	temps (ms)	C_{max} (u.t.)	σ	temps (ms)
2	20	7564	62	12.55	7998	31.6	0.80
	30	11470	35	11.65	11780	27.9	1.50
	50	18786	25	19.45	19592	26.6	1.55
	100	36890	22.3	43.85	38750	24.8	7.80
	200	75888	20.4	138.35	79360	13.64	32.20
5	20	2790	74.4	8.65	2914	76.26	1.55
	30	4154	59.5	10.15	4340	44.6	2.35
	50	7130	41.5	18.80	7440	33.4	2.35
	100	13950	31.6	34.60	15128	29.1	12.50
	200	27590	31	83.60	30132	26	36.75
8	20	1736	73.1	9.50	1736	66.3	2.35
	30	2604	71.3	10.20	2604	53.9	0.80
	50	4340	42.7	13.25	4445	43.2	5.35
	100	8618	34.7	36.05	9114	31	14.85
	200	16616	26	79.85	18042	27.9	43.70

TAB. III.1 – Résultats des algorithmes d'affectation

III.1.4.3 Prise en compte du critère des retards pondérés

Nous présentons ici les résultats du problème de minimisation de la somme pondérée des retards dans les deux conditions de charge (faible et élevée) explicitées précédemment. Dans chacun de ces cas, nous avons généré aléatoirement dix problèmes et les résultats présentés en sont les moyennes.

Les deux premières colonnes de tableau III.2 comportent respectivement le nombre de ressources et le nombre de tâches du problème. La troisième colonne présente le niveau de charge. Les colonnes suivantes présentent les résultats obtenus par les heuristiques.

Nous rappelons que l'heuristique *LPT-H-EDD* débute par un tri des tâches suivant la règle LPT (*Longest Processing Time First*). L'algorithme d'affectation est ensuite appliqué sur la liste obtenue. Ensuite, les tâches affectées à chaque ressource sont réorganisées suivant la règle EDD (*Earliest Due Date*). De même pour l'heuristique *WSPT-H-EDD* dont seule la première étape diffère. En effet, cette heuristique débute par un tri suivant la règle WSPT (*Weighted Shortest Processing Time*) en remplacement de la règle LPT.

Globalement, les solutions obtenues avec les heuristiques LPT-H-EDD et WSPT-H-EDD ont des sommes pondérées des retards inférieures à ECT-EDD. Dans le cas de faibles charges, l'heuristique *LPT-H-EDD* présente en moyenne de meilleurs résultats concernant le critère $\sum_{j=1}^n w_j T_j$, tandis que, dans un contexte de fortes charges, ce sont les solutions obtenues par l'heuristique *WSPT-H-EDD* qui sont meilleures. Prenons l'exemple des problèmes d'ordonnements avec $m=8$ et $n=150$. Sur la moyenne des tests réalisés, en contexte de faible charge, les solutions de l'heuristique LPT-H-EDD présentent une réduction de 66% de la somme pondérée des retards, par rapport à celle de l'heuristique WSPT-H-EDD. Elle présente aussi une réduction de 83% par rapport à ECT-EDD. A

m	n	Charge	LPT-H-EDD	WSPT-H-EDD	ECT-EDD
2	30	Faible	54	120	122
		Forte	257	53	307
	50	Faible	1256	1681	1862
		Forte	1208	984	1415
5	50	Faible	256	396	422
		Forte	836	672	932
	100	Faible	586	563	808
		Forte	940	770	1518
8	70	Faible	96	133	217
		Forte	368	265	382
	150	Faible	140	402	822
		Forte	1025	517	772

TAB. III.2 – $\sum w_j T_j$ obtenu avec les heuristiques

l'inverse en contexte de fortes charges, c'est WSPT-H-EDD qui présente une réduction de 50% par rapport à LPT-H-EDD et de 44% par rapport à ECT-EDD.

Il est important de noter que les résultats présentés ici sont des moyennes réalisées sur un certain nombre de tests. Bien qu'en moyenne, les deux heuristiques introduites ici présentent de meilleurs résultats que ECT-EDD, il arrive, dans certain cas, que les résultats de celle-ci soient de meilleure qualité. De plus, si globalement l'une est plus efficace que l'autre, en fonction de la charge, dans certains problèmes les résultats des deux heuristiques sont similaires voire même légèrement inversés.

Sur la figure III.3, nous développons l'exemple basé sur un ordonnancement courant de 8 ressources. Celle-ci présente la somme pondérée des retards obtenue à partir des heuristiques ECT-EDD, LPT-H-EDD et WSPT-H-EDD pour des ordonnancements courants composés de 50, 100, 150 et 200 tâches.

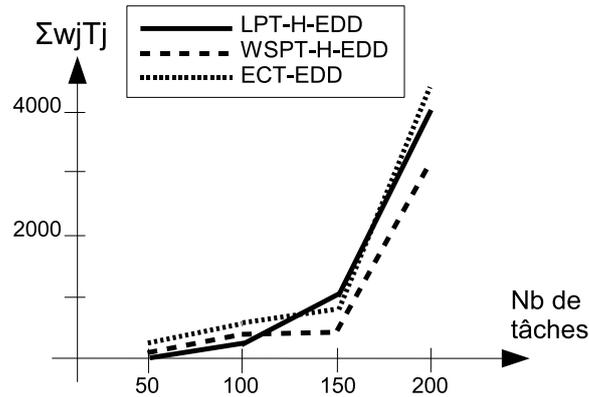


FIG. III.3 – Évolution de $\sum w_j T_j$

Nous nous plaçons volontairement dans des instances pour lesquelles des tâches sont terminées avec du retard. L'augmentation de la charge dû à l'augmentation du nombre de tâches se traduit dans toutes les solutions par une augmentation de la somme pondérée des retards. Il est ainsi possible d'observer le fait que l'heuristique LPT-H-EDD présente de meilleurs résultats lorsque la charge est relativement faible et que, lorsqu'elle augmente, c'est WSPT-H-EDD qui propose les meilleures solutions.

III.1.5 Synthèse des tests

Une bonne stratégie d'affectation des tâches de maintenance prend en compte les compétences de chacun afin de déterminer l'ordonnancement pour l'ensemble des ressources. Cette approche d'ordonnancement statique a été réalisée pour l'ordonnancement des tâches de maintenance préventive. Cette partie est étayée par des exemples qui montrent l'efficacité des heuristiques *LPT-H-EDD* et *WSPT-H-EDD*.

On observe à travers les exemples que l'algorithme *LPT-H* est le plus efficace sur la minimisation de la durée de l'ordonnancement. L'algorithme *LPT-H-EDD* présente les meilleurs résultats concernant la durée totale de l'ordonnancement. Dans un contexte de faibles charges, on s'aperçoit que l'heuristique *LPT-H-EDD* donne les meilleurs résultats concernant la somme pondérée des retards ($\sum w_j T_j$), tandis que, dans un contexte de fortes charges, c'est l'heuristique *WSPT-H-EDD* qui est la plus efficace. La charge a donc une influence sur les résultats et donc sur l'heuristique à choisir.

Concernant le temps de calcul, celui-ci dépend de la taille des problèmes. Les résultats de ces heuristiques sont obtenus quasiment instantanément même pour les plus conséquents des problèmes traités.

L'ordonnancement ainsi réalisé sera appelé *ordonnancement courant*. C'est dans l'ordonnancement courant que viendront s'insérer de nouvelles tâches notamment des tâches de maintenance corrective. L'ordonnancement sera alors dynamique.

III.2 Ordonnancement et affectation dynamique

Parmi les perturbations que peuvent subir un ordonnancement courant, l'arrivée d'une nouvelle tâche devant être insérée est la plus contraignante (figure III.5). Généralement, dans un ordonnancement d'activités de maintenance, les tâches devant être insérées sont de type correctif ou préventif conditionnel (modélisées et traitées de manière similaire dans cette étude). Les données concernant les interventions requises régulièrement telles le préventif sont théoriquement connues à l'avance et généralement déjà ordonnancées dans ce que l'on appellera *l'ordonnancement courant*. La figure III.4 représente l'arrivée de quelques tâches au cours du temps. Nous supposons que l'intervalle de temps entre leurs arrivées est suffisamment grand pour appliquer une approche d'affectation et d'ordonnancement dynamique.

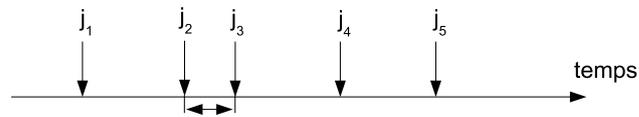


FIG. III.4 – Arrivées stochastiques de tâches

III.2.1 Modélisation de l'ordonnancement courant

L'ordonnancement courant peut être modélisé sous la forme d'un graphe potentiel tâche, afin de permettre de connaître, pour chacune des tâches qui le compose, celles qui la précèdent et celles qui lui succèdent. Dans un problème d'ordonnancement tel que le notre, un graphe permet de représenter la structure et les connexions qui existent dans l'organisation des tâches. La modélisation de ce problème à l'aide de la théorie des graphes nous permet de structurer notre problème afin de pouvoir utiliser des outils informatiques existants (un algorithme par exemple) ayant déjà fait leur preuve dans la résolution de certains problèmes.

Le graphe de l'ordonnancement courant (figure III.6) est composé de noeuds, qui représentent les tâches, et d'arcs, qui sont les contraintes temporelles potentielles entre les tâches (contraintes de précédence). La valuation des arcs correspond à la durée des tâches. Les tâches sont placées entre une tâche fictive de début B (*Begin*) et une tâche fictive de fin E (*End*). La contrainte III.4 peut être modélisée par l'ajout d'arc entre le noeud B et chacun des autres noeuds comme présenté sur la figure III.7.

La modélisation du problème statique peut être reprise dans ce problème. Cependant, la notion de dynamique signifie que l'ordonnancement peut être modifié. Pour chaque tâche j nous aurons donc la possibilité de faire varier sa date de début entre les dates de début au plus tôt et au plus tard :

- ES_j ($j = 1...n$) : la date de début au plus tôt de la tâche j (Earliest Starting date),
- LS_j ($j = 1...n$) : la date de début au plus tard de la tâche j (Latest Starting date).

Les dates de début au plus tôt et au plus tard correspondent aux extrémités d'une période dans laquelle le début du traitement de la tâche peut être planifié afin qu'elle

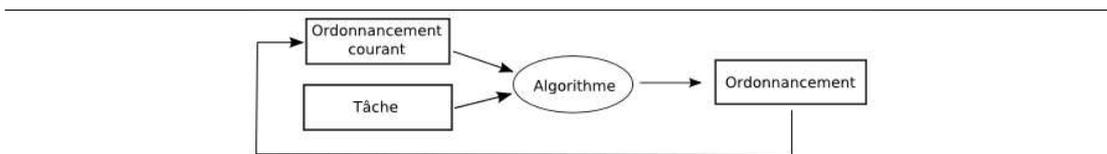


FIG. III.5 – Principe de l'ordonnancement dynamique

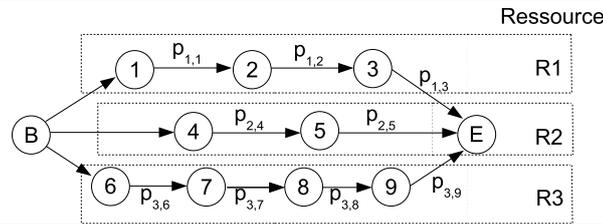


FIG. III.6 – Graphe utilisé dans notre problème d’ordonnancement

ne se termine pas en retard, qu’elle ne viole pas la contrainte de sa date de disponibilité mais aussi qu’elle ne provoque pas de retard sur un successeur.

Cela nous permet de définir la notion de *fenêtre d’insertion*. L’insertion dynamique de tâches s’effectue, dans l’ordonnancement d’une ressource i , dans l’espace disponible entre $ES_j + p_{ij}$ et $LS_{succ(j)}$ de deux tâches successives (j et son successeur $succ(j)$ et j tel que $x_{ij} = 1$) de l’ordonnancement courant. Nous obtenons alors le temps disponible entre les deux tâches tel que $F_{j,succ(j)} = LS_{succ(j)} - (ES_j + p_{ij})$. On parle alors de *fenêtre d’insertion*. Le schéma présenté sur la figure III.8 décrit le cas classique d’une fenêtre d’insertion, où une nouvelle tâche pourrait être insérée.

III.2.1.1 Calcul des dates de début au plus tôt

Pour pouvoir connaître toutes les fenêtres d’insertions d’un ordonnancement il est nécessaire de pouvoir calculer toutes les dates de début au plus tôt (ES_j) et au plus tard (LS_j) pour toutes les tâches j de l’ordonnancement.

L’algorithme du chemin le plus long de Bellmann peut alors être utilisé pour obtenir les dates de début au plus tôt de chaque tâche (graphe "Graphe des dates de début au plus tôt" de la figure III.9).

Dans un ordonnancement représenté sous la forme d’un graphe potentiel-tâche tel que le graphe de la figure III.7, la recherche de la durée minimale de celui-ci passe par la

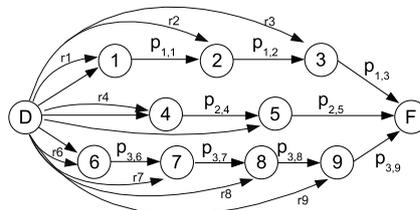


FIG. III.7 – Graphe complété par les contraintes de disponibilités

recherche des dates de début au plus tôt de chacune des tâches qui le composent. Cela consiste à rechercher le chemin le plus long dans le graphe. L'algorithme de Bellmann est alors le mieux adapté pour réaliser cette recherche.

```

Pour x de 1 à N faire
  |  $\lambda_x \leftarrow +\infty$ ;
  |  $\pi_x \leftarrow +\infty$ ;
Fin Pour
 $\lambda_1 \leftarrow 0$ ;
Tant que ( $\exists x \in X / x$  est non fixe) faire
  | Choisir  $y \in X / \forall z \in \Gamma(y)$  fixe( $z$ ) == Vrai;
  | fixe( $y$ )  $\leftarrow$  Vrai;
  | Pour (tous  $z \in \Gamma^+(y)$ ) faire
  | | Si ( $\lambda_z < \lambda_y + I_{yz}$  OU  $\lambda_{iz} = +\infty$ ) Alors
  | | |  $\lambda_z \leftarrow \lambda_y + I_{yz}$ ;
  | | |  $\pi_z \leftarrow y$ ;
  | | Fin Si
  | Fin Pour
Fait

```

Algorithme 4: Algorithme de Bellmann

L'insertion d'une tâche dans un ordonnancement courant modélisé par un graphe correspond à l'ajout d'un noeud entre deux noeuds. Pour savoir si la nouvelle tâche peut être insérée il faut connaître la date de début au plus tard du noeud successeur.

III.2.1.2 Calcul des dates de début au plus tard

Une technique classique en ordonnancement, pour prendre en compte les *due dates* dans une modélisation par graphe potentiel-tâche, consiste à créer des arcs à valuation négative. Ces arcs ont pour effet de borner la date au plus tard de réalisation d'une tâche.

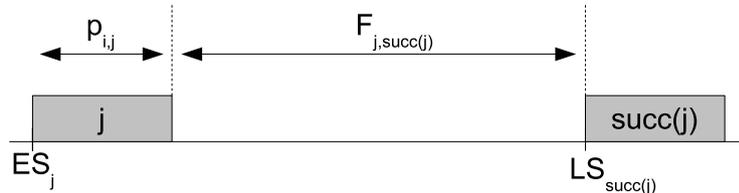


FIG. III.8 – Fenêtre d'insertion

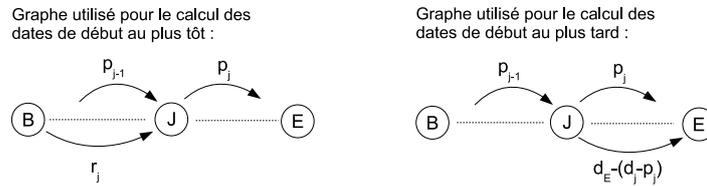
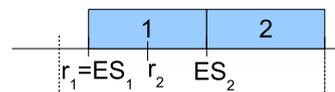


FIG. III.9 – Graphes utilisés dans notre problème d’ordonnancement

Cependant, ceci est possible uniquement dans le cas où aucun retard (aucune violation des *due-dates*) n’est permis. Dans notre problème, il est possible que certaines tâches soient en retard. Cette situation serait conflictuelle pour des situations telle que celle présenté sur le schéma III.10 ou les dates de début au plus tard des tâches sont avant leurs dates de début au plus tôt.

C’est pourquoi, nous proposons de construire un deuxième graphe (figure III.11), dans lequel les noeuds représentant les tâches et les arcs représentant les durées sont conservés. Nous ajoutons cependant des arcs entre chacune des tâches et la tâche fictive de fin E . Ce nouveau lien est valué, pour chaque tâche j , par la différence entre la *due date* de la dernière tâche de la branche (d_E) et $d_j - p_{ij}$ (où i est la ressource affectée à la tâche j considérée). Ensuite, une adaptation de l’algorithme de Bellman (en mode inverse) permet de trouver la date de fin au plus tard relative LS_j^E , pour chaque tâche j de l’ordonnancement. On emploie le terme de "relative" car pour une ressource i , cela représente la durée entre la date de fin de la dernière tâche affectée à i et la date de début de la tâche j .

Dates de début au plus tôt :



Date de début au plus tard relative :

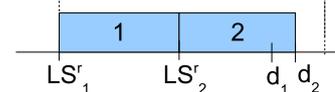


FIG. III.10 – Exemple de situation conflictuelle

```

Pour  $x$  de 1 à  $N$  faire
  |  $\lambda_x \leftarrow -\infty$ ;
  |  $\pi_x \leftarrow -\infty$ ;
Fin Pour
 $\lambda_1 \leftarrow 0$ ;
Tant que  $(\exists x \in X / x \text{ est non fixe})$  faire
  | Choisir  $y \in X / \forall z \in \Gamma(y) \text{ fixe}(z) == \text{Vrai}$ ;
  |  $\text{fixe}(y) \leftarrow \text{Vrai}$ ;
  | Pour (tous  $z \in \Gamma^+(y)$ ) faire
  | | Si  $(\lambda_z > \lambda_y - I_{yz} \text{ OU } \lambda_{ij} = -\infty)$  Alors
  | | |  $\lambda_z \leftarrow \lambda_y - I_{yz}$ ;
  | | |  $\pi_z \leftarrow y$ ;
  | | Fin Si
  | Fin Pour
Fait

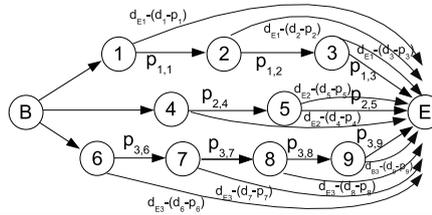
```

Algorithme 5: Algorithme de Bellmann inverse

Dans les deux graphes présentés dans la figure III.9, nous ne pouvons pas avoir de circuits positifs et, s'il y a un retard, nous ne pouvons l'observer. Cependant, la différence entre les résultats obtenus sur chacun d'entre eux nous permet tout de même de savoir s'il y a une ou des tâches en retard. Il est possible que la date de début au plus tôt ES_j d'une tâche j se retrouve après sa date de début au plus tard relative. Une tâche ne pouvant pas commencer avant sa date de disponibilité, sa date de début au plus tard réelle LS_j sera alors obtenue de la manière suivante (comme on peut l'observer sur la figure III.12) :

$$LS_j^E > ES_j \rightarrow LS_j = LS_j^E \quad (\text{III.10})$$

$$ES_j > LS_j^E \rightarrow LS_j = ES_j \quad (\text{III.11})$$

FIG. III.11 – Second graphe complété par les contraintes de *due dates*

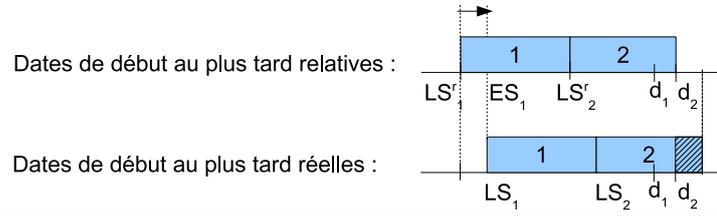


FIG. III.12 – Exemple de date de début au plus tard réelle

III.2.2 Heuristique d'insertion dynamique

La modélisation de l'ordonnancement courant étant faite, nous pouvons nous intéresser à l'heuristique d'insertion dynamique. Soit i une ressource et S l'ordonnancement composé de n tâches de cette ressource. Soit k une tâche devant être insérée dynamiquement dans S . Le fait que son insertion n'entraîne pas de retard dans les tâches de l'ordonnancement se vérifie par l'équation III.12.

$$\sum_{j=1}^n w_j T_j + w_k T_k = \sum w_j T_j \quad (\text{III.12})$$

L'égalité présentée dans l'équation III.12, se vérifie si la fenêtre d'insertion choisie entre deux tâches j et $\text{succ}(j)$ vérifie :

$$F_{j,\text{succ}(j)} \geq p_{ik} \quad (\text{III.13})$$

Et :

$$LS_{\text{succ}(j)} - p_{ik} \geq r_k \quad (\text{III.14})$$

Et pour ne pas générer de retard sur la nouvelle tâche :

$$ES_j + p_{ij} + p_{ik} \leq d_k \quad (\text{III.15})$$

Pour rechercher de telles fenêtres d'insertion, nous avons développé l'approche décrite sur la figure III.13. La première étape de cette approche consiste à lister, pour un ordonnancement S , l'ensemble des fenêtres $F \in S$, satisfaisant les trois conditions des équations III.13, III.14 et III.15. Pour équilibrer la charge entre les ressources et privilégier en même temps les ressources qui minimisent p_{ik} , la ressource choisie sera alors celle qui minimisera l'écart type de la charge des ressources.

Dans une utilisation dynamique, l'ordonnancement obtenu après une insertion devient alors l'ordonnancement courant. C'est dans celui-ci que de nouvelles tâches viendront s'insérer.

Cependant, si il n'existe pas de fenêtre $F \in S$ satisfaisant les équations III.13, III.14 et III.15, deux solutions sont alors possibles : soit générer de manière statique un nouvel ordonnancement, soit insérer la tâche dans l'ordonnancement courant et celui-ci est alors légèrement modifié afin de donner de meilleurs résultats concernant notre critère de travail. C'est cette méthode que nous exposerons dans la partie suivante.

III.2.3 Amélioration de la solution obtenue

Nous proposons, ici, une méthode de recherche de solutions par voisinage. Elle se base principalement sur des opérateurs de voisinage qui vont nous permettre d'explorer, stochastiquement, de nouvelles solutions.

La méthode d'amélioration présentée ci-dessous est basée sur la méthode kangourou [Fleury *et al.*, 1993] pour éviter tout enfermement dans un optimum local.

L'algorithme utilise les notations suivantes :

- S : solution courante,
- S' : solution sur laquelle la recherche d'amélioration est faite,
- $Initialisation(S)$: réalise la solution initiale. Celle-ci est créée en essayant toutes les possibilités d'insertion de la nouvelle tâche dans l'ordonnancement courant. La solution qui domine est ensuite conservée.
- $Voisin(S)$: retourne un voisin de S en échangeant deux tâches choisies aléatoirement dans S ,
- $Saut(S)$: retourne une solution après avoir réalisé trois échanges consécutifs de tâches choisies aléatoirement dans S ,

Les paramètres de la méthode sont les suivants :

- $nb_recherche_max$: le nombre de recherche de l'algorithme,
- $nb_descente_max$: le nombre maximum de recherches locales sans amélioration,
- nb_saut_max : le nombre de sauts.

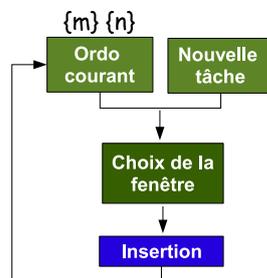


FIG. III.13 – Méthode d'insertion dynamique de tâches

La méthode de recherche d'une solution de meilleure qualité, par rapport à notre critère, est décrite par l'algorithme 6. Un nombre de recherche maximum doit être défini pour limiter la recherche de solution dans le temps. Celui-ci est principalement composé de deux blocs : le premier correspond à une recherche de solutions plus performante dans un voisinage local. Cette recherche de meilleures solutions consiste à permuter deux tâches choisie de manière stochastique. Lorsqu'au bout d'un certain nombre de tentatives de permutations on se rend compte que la solution ne s'améliore pas, on élargie le voisinage de recherche à l'aide d'un saut. Ce deuxième bloc correspond à rechercher une solution dans un voisinage plus large afin de sortir d'un minima local dans lequel la recherche locale a pu s'enfermer.

```

Initialisation (S);
Tant que ((nb_recherche ≤ nb_recherche_max)) faire
    nb_recherche ++;
    nb_descente ← 0;
    Tant que ((nb_descente ≤ nb_descente_max)) faire
        nb_descente ++;
        S' ← Voisin(S);
        Si (S' < S) Alors
            nb_descente ← 0;
            S ← S';
        Fin Si
    Fait
    Tant que ((nb_saut ≤ nb_saut_max) OU (trouve == faux)) faire
        Nb_saut ++;
        S' ← Saut(S);
        Si (S' < S) Alors
            S ← S';
            nb_saut ← 0;
            trouve ← vrai;
        Fin Si
    Fait
Fait

```

Algorithme 6: Algorithme de recherche mono-critère

Pour décrire l'intérêt de cet algorithme, dans la section suivante, nous allons appliquer cet algorithme sur un ensemble d'exemples. Le lecteur pourra cependant retrouver dans l'annexe C l'application de cette approche d'ordonnancement dynamique sur l'exemple déjà évoqué dans les annexes A et B.

III.2.4 Validation de notre approche

Au cours de ces tests, nous présenterons l'insertion dynamique d'une tâche, afin de montrer la performance des algorithmes pour minimiser la somme pondérée des retards. Puis, dans un deuxième temps, nous réaliserons des successions d'insertion de dix nouvelles tâches, aléatoirement générées. Nous pourrions ainsi étudier l'évolution des solutions et leurs évaluations au fur et à mesure des insertions.

III.2.4.1 Insertion d'une tâche

Le tableau III.3 présente les résultats de l'insertion dynamique d'une tâche au regard de la somme pondérée de retards. Ces résultats sont la moyenne de l'évaluation de solutions à dix problèmes aléatoirement générés. Nous avons fait varier la charge des problèmes (régulée par la proximité entre les dates de disponibilités et les *due-dates*) indifféremment, le but n'étant pas de comparer les résultats des heuristiques statiques, mais bien de montrer que la méthode d'insertion dynamique est l'approche la plus efficace au regard de la somme pondérée des retards.

m	n	Insertion dynamique		LPT-H-EDD	WSPT-H-EDD
		Solution initiale	Après amélioration		
2	30	116	71	207	405
	50	2000	883	2060	2407
5	50	628	3	118	276
	100	786	209	1203	1552
8	70	1022	351	1300	1304
	150	2353	1677	2667	2257

TAB. III.3 – $\sum w_j T_j$ après insertion d'une nouvelle tâche

Le tableau III.3 présente les évaluations des solutions aux problèmes d'insertion d'une nouvelle tâche dans des ordonnancements courants composés de m ressources et n tâches. La troisième colonne du tableau présente les solutions initiales de la méthode d'insertion dynamique. Celles-ci sont obtenues en essayant toutes les possibilités d'insertion dans l'ordonnancement et en ne retenant que la meilleure. La quatrième colonne correspond aux résultats obtenus après la phase d'amélioration. Dans un premier temps, il est possible d'observer le gain obtenu sur la somme pondérée des retards, après la phase d'amélioration. Dans tous les cas, les solutions initiales d'ordonnancement sont modifiées et la somme pondérée des retards réduite. Dans le cas du problème à 8 ressources et 150 tâches, nous avons eu en moyenne, sur l'ensemble de ces problèmes, 29% de réduction. Les deux dernières colonnes présentent les résultats obtenus par les deux heuristiques d'ordonnancement statique. Pour insérer dynamiquement une tâche avec ces deux heuristiques, on désaffecte complètement les tâches de l'ordonnancement courant et on réalise un nouvel ordonnancement en ajoutant la nouvelle tâche à l'ensemble des tâches à ré-ordonnancer. Les évaluations suivant la somme pondérée des retards des solutions fournies par l'approche d'insertion dynamique sont toujours inférieures à celles

que l'on obtient avec les heuristiques statiques. Ceci se vérifie quelle que soit la taille du problème et quel que soit son niveau de charge. Toujours dans le cas du problème à 8 ressources et 150 tâches, la réduction de la somme pondérée des retards est en moyenne de 26% comparée à la solution de l'heuristique WSPT-H-EDD (qui elle-même donne de meilleurs résultats que l'heuristique LPT-H-EDD sur ce problème).

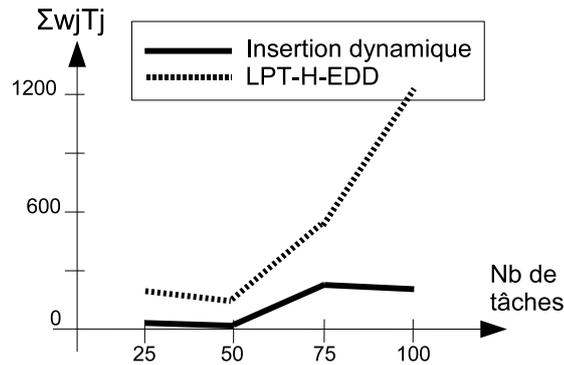


FIG. III.14 – Insertion dynamique d'une tâche

L'exemple du planning courant composé de 5 ressources a été développé sur le graphique de la figure III.14. Pour ces tests, LPT-H-EDD était la plus efficace des deux heuristiques statiques. Pour une meilleure clarté, nous n'avons fait figurer que celle-ci sur le graphique. Une tâche est insérée dynamiquement dans des ordonnancements courants de 25, 50, 75 et 100 tâches. Les résultats sont toujours des moyennes réalisées sur dix jeux de tests. L'approche d'insertion dynamique est toujours plus performante. Pour l'exemple de l'ordonnancement courant de 100 tâches, l'amélioration est en moyenne de 83%.

Pour vérifier que la qualité des solutions obtenues soient conservée au cours de la vie de l'ordonnancement, nous réaliserons dans le paragraphe suivant des successions d'insertion de tâches.

III.2.4.2 Insertions successives de tâches

Le tableau III.4 présente les résultats obtenus suite à des insertions dynamiques successives, de nouvelles tâches, au regard de la somme pondérée de retards. Ces résultats sont la moyenne de l'évaluation de solutions à dix problèmes aléatoirement générés.

La troisième colonne du tableau précise après quelle insertion sont relevés les résultats. Pour montrer l'évolution de la somme pondérée des retards, nous présentons les résultats après la première insertion et après la dixième. Les résultats de l'insertion dynamique, présentés dans la quatrième colonne, sont ceux obtenus après la phase d'amélioration. Les deux dernières colonnes présentent les résultats obtenus en appliquant respectivement les heuristiques statiques LPT-H-EDD et WSPT-H-EDD. Sur chaque jeu de tests, les so-

m	n	Insertion	Insertion dynamique	LPT-H-EDD	WSPT-H-EDD
2	30	1	2487	7004	8216
		10	3890	10013	12430
5	50	1	1393	2898	2881
		10	2068	3543	3536
8	70	1	1971	6144	5182
		10	3078	6389	5778

TABLE III.4 – $\sum w_j T_j$ après insertion de 10 nouvelles tâches

lutions obtenues avec l'approche d'insertion dynamique présentent une somme pondérée des retards nettement inférieure à celle obtenue avec les heuristiques statiques. Après dix insertions, les solutions de l'approche d'insertion dynamique gardent toute leur qualité. Dans le cas des problèmes d'ordonnancement comportant 8 ressources et 70 tâches, l'heuristique WSPT-H-EDD présente de meilleurs résultats que l'heuristique LPT-H-EDD. Par rapport à LPT-H-EDD, l'approche d'insertion présente une réduction de la somme pondérée des retards de 62% après la première insertion. Après la dixième insertion, cette réduction est toujours de 53%. Les solutions ne se dégradent donc pas au fur et à mesure des insertions de tâches.

La figure III.15 présente l'évolution de la somme pondérée des retards, lors de l'insertion de dix nouvelles tâches, dans le cas de l'ordonnancement courant de 5 ressources et 50 tâches. Ces résultats sont la moyenne de dix problèmes aléatoirement générés et correspondent aux résultats présentés dans le tableau III.4. A chaque insertion, il est possible d'observer la somme pondérée des retards obtenue lors de l'insertion seule, puis après la phase d'amélioration.

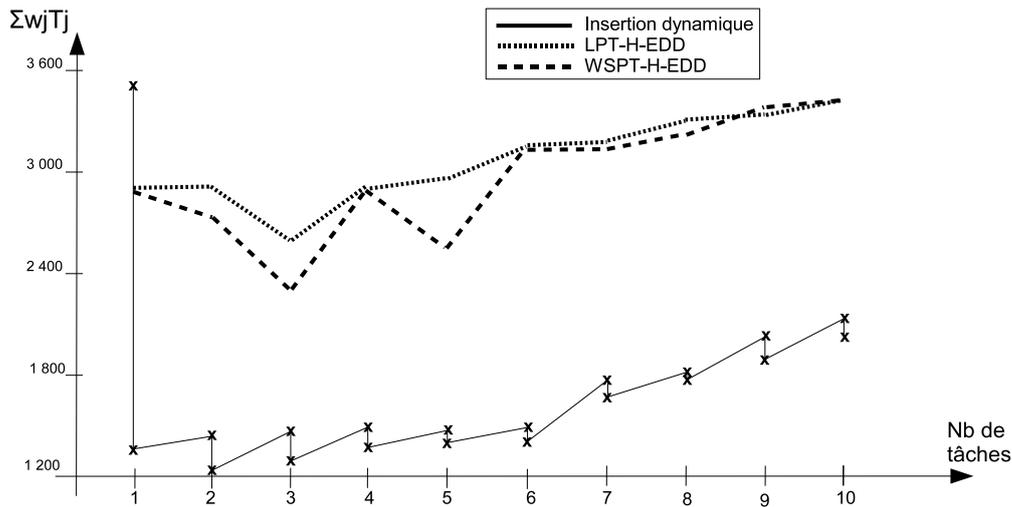


FIG. III.15 – Insertion dynamique de 10 nouvelles tâches

Sur ce schéma figure l'évolution de la somme pondérée des retards des solutions obtenues avec les deux heuristiques d'ordonnancement statiques et l'approche d'insertion dynamique. La somme pondérée des retards, comme cela est décrit dans le tableau précédent, est très nettement inférieure pour les solutions de l'approche dynamique. Intéressons nous maintenant à l'évolution de l'évaluation de la solution de l'approche dynamique au fur et à mesure des insertions. On remarque que la solution initiale de la première insertion présente une somme pondérée des retards très élevée. Cela s'explique par le fait que l'ordonnancement courant ($m=5$ et $n=50$) a été réalisé à partir de l'heuristique LPT-H-EDD. C'est dans celui-ci que la première tâche est insérée. Suite à l'insertion, la somme pondérée des retards chute brusquement. C'est la phase d'amélioration de l'algorithme d'insertion dynamique. On peut observer cette phase suite à chaque insertion.

Parallèlement, la figure III.16 il est possible d'observer le fonctionnement de l'approche d'insertion dynamique. La courbe représente l'évolution de la somme pondérée des retards de la solution au fur et à mesure des insertions et en fonction des itérations de l'algorithme. Chaque insertion est suivie de la phase d'amélioration durant laquelle la somme pondérée des retards diminue.

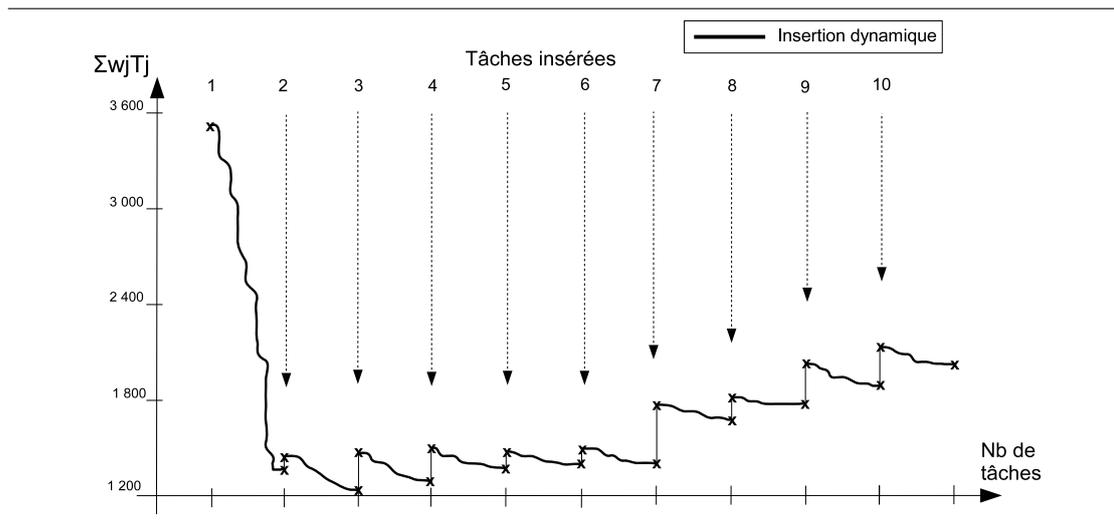


FIG. III.16 – Observation des phases d'amélioration

Les solutions proposées par l'approche d'insertion dynamique présentent des sommes pondérées des retards nettement inférieures aux solutions obtenues à partir des heuristiques d'ordonnancement statique. En revanche, cela se fait au détriment du temps de calcul qui est allongé. Alors qu'avec les heuristiques statiques les résultats sont obtenus quasi-immédiatement, pour des classes de problèmes simples tels qu'une insertion dans un ordonnancement courant tels que $m=2$ et $n=20$, pour un contexte de faible charge, la résolution durera moins d'une minute. Un problème plus compliqué, tel que $m=8$ et $n=150$ pourra nécessiter une quinzaine de minutes.

Il est important cependant de savoir que le programme n'a pas été optimisé au niveau de la rapidité d'exécution. Ceci est en parti dû à l'affichage des résultats.

III.3 Conclusion

Le problème abordé au cours de ce chapitre est un problème d'ordonnancement d'activités de maintenance. Les ressources du service de maintenance réalisent des tâches de maintenance préventives et correctives. Pour un horizon déterminé, les tâches de maintenance préventives sont connues. L'affectation et l'ordonnancement peuvent être réalisés à chaque début de période sur un horizon donné. Les tâches de maintenance correctives sont, quant à elles, requises par des événements aléatoires (une défaillance d'un équipement par exemple). L'affectation et l'ordonnancement de ces tâches se fait lorsque leur diagnostic est terminé. Les ressources ont des niveaux de compétences différents. Le choix de la ressource pour le traitement d'une tâche influence sa durée. Du retard dans le traitement des tâches impliquant des pénalités proportionnelles à celui-ci, nous prenons comme critère la somme pondérée des retards. Cependant, si l'on considère le cas d'un service dans lequel il n'y a qu'une ressource, Lawler a montré que le problème de minimisation de la somme pondérée des retards sur une machine est NP-difficile au sens fort [Lawler, 1977]. Par extension, le même problème avec des dates de disponibilité l'est aussi [Akturk *et al.*, 2000]. Les approches proposées à ces problèmes sont des approches d'ordonnancement statique qui ne prennent pas en compte l'arrivée dynamique de nouvelles tâches. De plus, ceux-ci ne concernent que les problèmes à une ressource. Or, le service de maintenance est le plus souvent composé d'un ensemble de ressources. Ces approches ne sont donc pas applicables pour notre problème.

Notre problème est composé de deux sous-problèmes consistant à affecter et ordonnancer les tâches préventives, d'une part, et les tâches correctives, d'autre part. Les ressources sur lesquelles les tâches sont affectées et ordonnancées sont différentes. Pour aborder ce problème, nous avons tout d'abord posé deux hypothèses. La première est que le seul critère qui est important pour l'évaluation d'un ordonnancement est celui qui reflète les engagements de disponibilité : la somme pondérée des retards. Nous avons aussi supposé que les données des tâches sont précises (ne présentent pas d'approximation).

Pour résoudre ce problème d'ordonnancement et d'affectation, nous proposons une approche de résolution adaptée à chaque sous-problème. Les tâches de maintenance préventives sont connues pour un horizon déterminé. Nous proposons dans un premier temps, une approche d'ordonnancement statique. Celle-ci affecte et ordonnance un ensemble de tâches connues sur un ensemble de ressources. Nous proposons deux heuristiques pour la résolution du problème d'ordonnancement statique : l'heuristique LPT-H-EDD et l'heuristique WSPT-H-EDD. Ces approches sont décomposées en deux phases. La première consiste à affecter les tâches aux ressources en faisant abstraction de leurs contraintes de disponibilité. Puis, dans une deuxième phase, les tâches sont organisées dans le temps en prenant en compte cette fois, les différentes contraintes.

Des évènements aléatoires (tel que des défaillances) font quitter aux équipements leur état de bon fonctionnement. Ces équipements requièrent des interventions de maintenance corrective. Nous proposons donc une approche permettant d'insérer dynamiquement ces nouvelles tâches dans un ordonnancement courant. Nous proposons aussi une approche d'amélioration par modification partielle de l'ordonnancement, inspirée de la méthode du kangourou. Cette approche permet de proposer des solutions à des problèmes de grande taille tel que 8 ressources et 150 tâches.

Différents critères tels que, le nombre de tâches en retard, l'équilibrage de la charge entre les ressources humaines et le nombre de modifications effectuées pour insérer une tâche dans un ordonnancement permettent d'évaluer une solution. Nous proposons donc, dans le chapitre suivant, d'étendre l'approche de résolution développée, au problème d'ordonnancement multi-critère des activités de maintenance.

Chapitre IV

Approche de résolution dynamique pour le problème multi-critère d'affectation et d'ordonnancement des activités de maintenance

Dans sa thèse Coudert [Coudert, 2000] structure les différents objectifs du service de maintenance en objectifs internes suivant des critères tels que les coûts de la maintenance ou encore l'utilisation des ressources et en objectifs externes avec des critères tels que les performances des équipements maintenus ou leur fiabilité. Le problème d'ordonnancement des activités de maintenance est donc multi-critère.

Le problème d'ordonnancement sur une machine avec pour critère la somme pondérée des retards est NP-difficile au sens fort [Lawler, 1977]. Dans une version multi-critère, les approches de résolution sont peu nombreuses. L'approche issue de la littérature se rapprochant le plus de notre problématique n'est cependant pas dans le contexte de la maintenance mais celui de l'ordonnancement de la production. Il s'agit de Gruat La Forme *et al.* [Gruat-La-Forme *et al.*, 2007a] qui s'intéressent à ce problème d'ordonnancement sur machines parallèles différentes. Ils proposent une approche de résolution statique à un problème d'ordonnancement multi-critère. Cette approche réalise de l'optimisation mono-critère sur un critère principal choisi de sorte que les évaluations de la solution obtenue ne soit pas trop dégradées suivant des critères secondaires. Cependant, dans notre contexte de maintenance, il n'est pas possible de prévoir, à priori, qu'un critère devra être privilégié. C'est au décideur, en fonction de sa connaissance du contexte et sa perception de prendre les décisions. L'approche proposée ne prend pas non plus en compte les dates de disponibilité différentes.

La somme pondérée des retards prend en compte une pondération qui représente l'importance des tâches. Cependant, elle peut être faible alors qu'un nombre important de

tâches présentent du retard. Un grand nombre de tâches terminées avec du retard peut être synonyme d'une mauvaise organisation du service. Cette information peut donner des indications sur la capacité du service de maintenance à tenir ses engagements. À travers l'ordonnancement, le service de maintenance organise dans le temps l'activité de ses ressources. Dès lors que les ressources humaines sont disponibles, elles doivent être rentabilisées. Les différentes tâches ne doivent alors pas être systématiquement affectées à la ressource la plus performante pour ce type de tâches. La charge doit donc être répartie entre les ressources. Dans le chapitre précédent, nous proposons une approche de résolution à ce problème en ne prenant qu'un critère : la somme pondérée des retards. Lorsqu'une nouvelle tâche est insérée dynamiquement dans un ordonnancement, un nombre important de modifications peuvent être réalisées. La solution intégrant la nouvelle tâche peut au final être totalement différente de la solution dans laquelle elle a été intégrée. Il s'agit cependant de l'ordonnancement de l'activité de ressources humaines. Celles-ci auront bien souvent de l'outillage à préparer, des équipements à réserver ou encore des pièces détachées à commander. Leurs plannings ne doivent pas être modifiés trop fréquemment.

Le problème consiste alors à réaliser dynamiquement, à partir d'un ordonnancement comprenant n tâches affectées à m ressources humaines et d'une nouvelle tâche j , un nouvel ordonnancement. Les données concernant les tâches sont supposées connues avec précision. Les fonctions objectifs de ce problème sont de minimiser la somme pondérée des retards, le nombre de tâches en retard, le nombre de modifications de l'ordonnancement courant lors de l'insertion mais aussi d'équilibrer la charge.

Les approches d'optimisation classiques fournissent comme résultat une unique solution pour un problème donné. Dans le cas où plusieurs critères sont à prendre en compte, une solution unique ne permet pas de répondre à des critères antagonistes. Il nous semble plus intéressant, de par la nature multi-critère de notre problème, de fournir au décideur un ensemble de solutions avec leurs évaluations suivant les différents critères pris en compte.

Nous débutons donc ce chapitre par la justification de la nécessité d'une approche multi-critère. Cette approche sera ensuite présentée dans la seconde partie puis validée sur des séries d'exemples.

IV.1 Justification d'une approche multi-critère

Le domaine de la maintenance est représentatif des problématiques multi-critères. En effet, les méthodes du type *coût-bénéfices* ne sont pas adéquates pour traiter les problèmes complexes auxquels le décideur est confronté. Avant l'apparition de l'analyse multi-critère, les problèmes de décision se ramenaient le plus souvent à l'optimisation d'une fonction économique [Mena, 2000]. Celle-ci avait le mérite de déboucher sur des problèmes mathématiques bien posés mais qui n'étaient pas toujours représentatifs de la réalité. Ceci pour plusieurs raisons :

- la comparaison de plusieurs actions possibles est rarement faite en fonction d'un seul critère,
- il est difficile de modéliser les préférences entre les critères par une seule fonction,
- et lorsqu'il y a plusieurs objectifs, généralement antagonistes, il est impossible de les atteindre tous à la fois.

De plus, de telles optimisations se basent sur des hypothèses très fortes. La première, dite de globalité, suppose qu'à travers la recherche d'une solution optimale, il est possible de désigner une action unique comme étant la meilleure. Cela suppose que toutes les actions potentielles comprennent tous les aspects de la question et qu'il n'y ait aucun lien entre les différents critères. Cependant, les solutions sont souvent complémentaires, partielles et rarement globales. Choisir d'optimiser, c'est implicitement se situer dans une approche à critère unique. Comme nous l'avons évoqué au paragraphe II.2.4, le problème d'ordonnancement d'activité de maintenance est par nature multi-critère.

Dans cette section, nous situons la problématique multi-critère à laquelle nous sommes confrontée. Dans un premier temps, nous présenterons les différentes méthodes de recherche multi-critères. Dans un deuxième temps, nous présenterons quelques travaux du domaine.

IV.1.1 Les différentes méthodes multi-critères

Dans sa thèse, Hammami [Hammami, 2003] dresse un panorama des méthodes multi-critères. celles-ci sont réparties en trois catégories :

- les méthodes élémentaires,
- les méthodes d'optimisation mathématique,
- les méthodes d'aide à la décision multi-critère.

Nous allons en préciser rapidement les spécificités dans les parties suivantes.

IV.1.1.1 Les méthodes élémentaires

a) La méthode catégorique

Cette méthode consiste à évaluer les performances de chaque action suivant les différents critères en affectant une évaluation simple du type : bon, neutre ou insatisfaisant [Timmerman, 1986]. Puis, pour chaque action, on effectue la somme des évaluations, en attachant la même importance pour chaque critère, afin d'obtenir une note globale. C'est une méthode très simple pour traiter les problèmes de sélection mais qui fait, cependant, appel au jugement basé sur l'expérience du décideur.

b) La méthode de la somme pondérée

La méthode de la somme pondérée (*linear averaging method* ou *weighted point method*) consiste à fixer un ensemble de critères auxquels on affecte un poids puis à les classer suivant une somme pondérée [Timmerman, 1986]. C'est l'une des méthodes les plus utilisées car elle présente l'avantage d'être facile à mettre en oeuvre. La difficulté réside cependant dans l'affectation de poids représentatifs de la réalité.

c) La méthode lexicographique

La méthode lexicographique s'applique dans certaines situations pour lesquelles il est possible d'établir une relation de dominance entre les critères [Clas *et al.*, 1995]. Il n'est donc pas nécessaire d'utiliser de pondération suivant les critères. Les critères les moins importants ne seront donc pris en compte que dans les cas où les plus importants ne permettent pas de hiérarchiser les solutions.

d) Les méthodes conjonctive et disjonctive

La méthode conjonctive fixe des niveaux minimum d'acceptation sur chacun des critères et rejette les solutions qui ne les respectent pas [Cazenave, 1996]. Cette méthode permet donc de sélectionner un ensemble de solutions jugées satisfaisantes parmi l'ensemble des solutions possibles mais ne compare pas ces solutions entre elles. Cette méthode mène généralement à l'obtention d'un ensemble de solutions, il peut donc être nécessaire d'appliquer une méthode de sélection supplémentaire.

La méthode disjonctive, quant à elle consiste à fixer des niveaux de satisfaction souhaités pour chacun des critères. Les solutions qui seront retenues seront celles qui ont les meilleurs résultats suivant chaque critère et qui satisferont les exigences de niveau sur toutes les autres. Étant donné qu'il est rare qu'une solution soit la meilleure suivant chaque critère, le résultat est souvent un ensemble de solution.

e) La méthode du Maxmin

Cette méthode est utilisée pour choisir la *meilleure* solution parmi un ensemble de solutions. Cette procédure vise à sélectionner le maximum (solution) du minimum (critère), Ce qui correspond à la plus forte valeur suivant le critère ayant les plus faibles évaluations. Il faut, cependant, pour cela que les critères d'évaluation soient comparables.

IV.1.1.2 Les méthodes d'optimisation mathématique

Ce sont les méthodes les plus utilisées dans le domaine de la recherche scientifique. Les problèmes sont souvent modélisés sous la forme de fonctions objectifs et de contraintes

à respecter. Suivant le problème à modéliser, les modèles peuvent être linéaires, linéaires avec variables entières, linéaires mixte, non linéaires, ... Les méthodes d'optimisation mathématique ont généralement une étape de modélisation destinée à formaliser le problème en modèle d'optimisation suivie d'une étape de résolution destinée à résoudre le modèle proposé [Hillier *et al.*, 2005]. Les critères peuvent être pris en compte de trois manières :

- en agrégeant les critères en une seule fonction objectif à l'aide de méthodes telles que la *Goal Programming*, la *Compromise Programming* ou encore la méthode du critère global.
- en optimisant un critère dans la fonction objectif et en intégrant les autres sous la forme de contraintes avec une méthode appelée ε -*Constraint Method*,
- en formulant le problème en un programme mathématique à objectifs multiples.

Nous allons maintenant décrire rapidement les méthodes que nous venons d'évoquer.

a) **Goal Programming**

La méthode du *Goal Programming* consiste à satisfaire des objectifs fixés suivant chaque critère. Il en existe trois variantes. La première vise à minimiser la somme des valeurs absolues des écarts avec les objectifs [Charnes *et al.*, 1961]. La seconde consiste à minimiser l'écart maximum par rapport aux objectifs [Flavell, 1976]. La troisième consiste à minimiser la somme des écarts par rapport aux objectifs de manière lexicographique [Ijiri, 1965]. Ces méthodes abordent donc les problèmes de façon à satisfaire des objectifs de performance et non rechercher une solution optimale.

b) **Compromise Programming et La méthode du critère global**

La méthode du *Compromise Programming* a pour principe de fonctionnement la minimisation des écarts avec la solution idéale en fixant a priori des préférences. La résolution de problème est cependant difficile dans les cas où l'on travail suivant un ensemble de critères.

La méthode du critère global, quant à elle, a aussi pour principe de fonctionnement la minimisation des écarts avec la solution idéale mais sans fixer à priori de préférences [Vincke, 1989].

c) ε -*Constraint Method*

La ε -*Constraint Method* consiste à transformer un problème d'optimisation multi-objectif en un problème d'optimisation mono-objectif ayant des contraintes supplémentaires. Les objectifs qui ne seront pas retenus en tant que tels seront donc convertis en contraintes. Le principal inconvénient de cette méthode est de nécessiter un important temps de calcul s'il y a beaucoup de contraintes.

d) Programme mathématique à objectifs multiples

Un programme mathématique à objectifs multiples prend en compte un ensemble de fonctions objectifs. Elles ont toutes une solution optimale qui est généralement différente de celle des autres. Une solution optimale n'existe donc pas puisque ce qui est optimal pour un critère ne l'est pas suivant les autres. Il faudra alors trouver une solution compromise qui soit satisfaisante. Cette méthode détermine dans un premier temps un ensemble de solutions efficaces qui correspond à un ensemble de solutions non dominées. Il est difficile de trouver cet ensemble, hormis pour les cas où le modèle est linéaire car sinon, peu de méthodes permettent de déterminer les solutions optimales au sens pareto. La définition de l'optimum de Pareto est la suivante :

Définition IV.1 Optimum de pareto [Pareto, 1909]

Un optimum de Pareto est un état dans lequel on ne peut pas améliorer le bien-être d'un individu sans détériorer celui d'un autre.

La méthode de résolution pour un problème mathématique dépend du modèle obtenu. En effet, pour des modèles mono-objectifs linéaires, la méthode du simplexe, génère une ou plusieurs solutions optimales selon le domaine réalisable. Pour des modèles mono-objectifs linéaires mixte, des méthodes du type *Branch & Bound* permettent d'obtenir une solution optimale. Pour certains modèles mono-objectifs non linéaires la solution optimale peut être parfois très difficile à obtenir. Cependant dans certains cas il existe des méthodes qui permettent de la trouver. En cas de difficultés, il est intéressant d'utiliser des heuristiques telles que le recuit simulé, les algorithmes génétiques,... Pour les modèles multi-objectifs, les méthodes de résolution optimale au sens pareto sont très rares, on se dirige alors plus vers des solutions efficaces au sens pareto.

e) Comment choisir sa méthode

Hammami [Hammami, 2003] présente une procédure de choix de la méthode à utiliser pour un problème d'optimisation mathématique. Cette procédure est détaillée dans la figure IV.1. Il est important de préciser que, pour certains problèmes, les solutions optimales ne sont pas atteignables.

Les méthodes de programmation mathématique permettent donc de résoudre un problème multi-critère et de sélectionner une solution parmi un ensemble qui n'est pas connu a priori. Il arrive cependant que cet ensemble de solutions soit connu. Ce sont alors les méthodes d'aide à la décision multi-critères qui permettent de faire le choix de la meilleure solution.

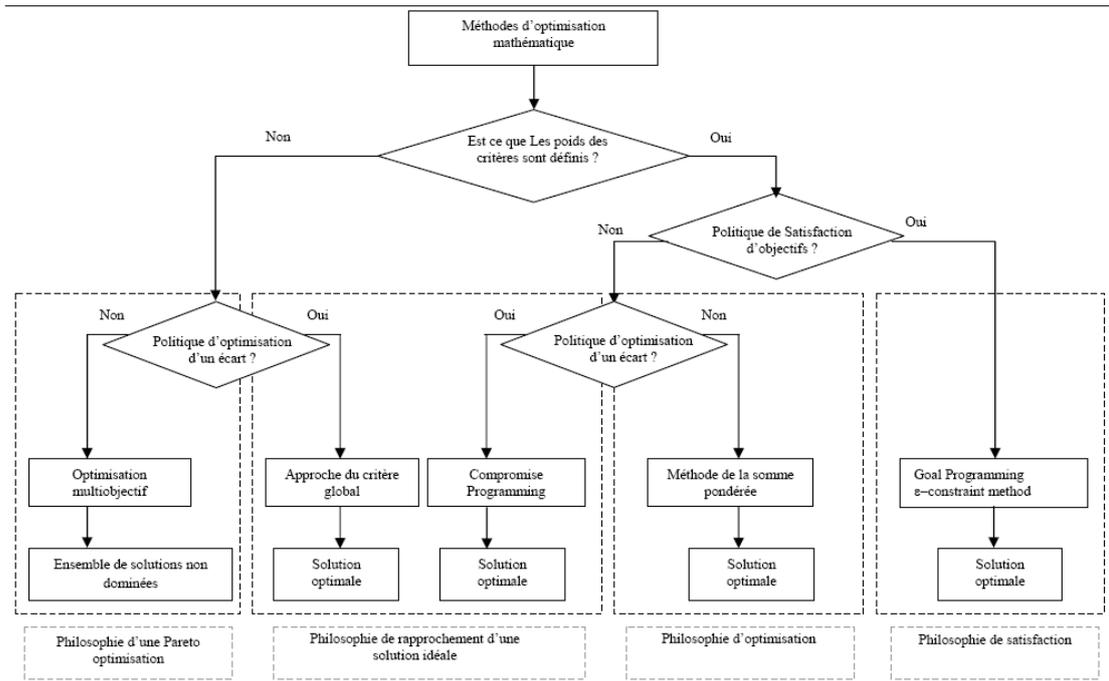


FIG. IV.1 – Procédure de choix d'une méthode d'optimisation mathématique

IV.1.1.3 Les méthodes d'aide à la décision multi-critères

Dans cette partie, nous présentons les concepts de cette méthodes pour des problèmes de sélection. Puis, dans une seconde partie, nous présenterons les approches les plus utilisées.

a) Présentation

Le processus d'aide à la décision multi-critère est généralement perçu comme processus itératif composé de cinq phases [Hwang *et al.*, 1980] [Guitouni, 1998] :

1. La structuration du problème de décision

La structuration du problème consiste tout d'abord à déterminer le type de problématique à résoudre. En effet, le problème peut être une problématique de choix, de tri ou de rangement. Puis, il faut cerner l'ensemble des solutions à étudier et déterminer les critères suivant lesquels elles seront évaluées. En dernier lieu, il s'agit d'évaluer chacune des solutions suivant chaque critère.

2. La modélisation des préférences

La modélisation des préférences consiste à définir les différents types de critère (vrai critère, pseudo critère,...). Puis à en définir l'ordre d'importance et éventuellement

une pondération.

3. L'agrégation des préférences locales pour obtenir des préférences globales
L'agrégation des préférences locales consiste à exploiter les évaluations partielles des solutions suivant les différents critères afin d'obtenir une évaluation globale.
4. L'exploitation de cette agrégation
La phase d'exploitation consiste à exploiter les résultats de la phase d'agrégation pour choisir, ranger ou trier les solutions.
5. La recommandation d'une solution.

b) Les différentes approches

Suivant le contexte décisionnel, il est nécessaire de modéliser les préférences du décideur. Il est possible de distinguer trois approches [Roy, 1985] :

1. L'approche du critère unique de synthèse
Cette approche consiste à ne pas laisser d'incomparabilité possible entre deux solutions. En effet, le décideur peut préférer une solution par rapport à une autre mais peut aussi être indifférent. On citera sans rentrer dans le détail la méthode TOPSIS (*Technic for Order by Similarity to Ideal Solution*) détaillée dans [Hwang *et al.*, 1981], la méthode SMART (*Simple Multi-Attribute Rating Technique*) [Edwards, 1971], la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) [Saaty, 1980]...
2. L'approche du sur-classement de synthèse
Ces méthodes produisent des systèmes relationnels de préférence qui incorporent l'incomparabilité et permettent de nuancer l'expression des préférences individuelles. De plus, elles mettent en œuvre des principes de démocratie qui sont valorisés dans un contexte de décision de groupe [Jabeur *et al.*, 2005]. On peut citer la méthode PROMETHEE [Edwards, 1971], l'approche d'aide à la décision Macbeth [Bana e Costa *et al.*, 1995] ou encore les méthodes Electre I à IV [Roy *et al.*, 1993].
3. L'approche du jugement local interactif
Cette approche se caractérise par une interaction qui fait s'alterner des étapes de calcul et des étapes de dialogue avec le décideur. Une solution est proposée au décideur, qui réagit en apportant des informations supplémentaires sur ses préférences. A partir de ces données, une nouvelle solution est proposée. De cette manière, le décideur participe à la construction de la solution et plus seulement à la définition du problème [Vincke, 1989]. On peut citer la méthode STEM (*STEp Method*) [Benayoun *et al.*, 1971], la méthode du point de référence [Wierzbicki, 1980] ou encore la méthode de Vanderpooten [Vanderpooten, 1988]...

IV.1.2 Optimisation multi-critère en ordonnancement

On retrouve de nombreuses études portant sur de l'optimisation multi-critère, en ordonnancement, dans la littérature. Nous allons présenter ici quelques un des travaux récents dans ce domaine.

Concernant la résolution de problème multi-critère sur une machine, Lee et *al.* [Lee et *al.*, 2002] ont proposé une approche qui utilise des valeurs linguistiques pour l'évaluation de chaque critère (très mauvais, mauvais, moyen, bon et très bon) et pour représenter les pondérations (sans importance, peu important, moyennement important, important et très important). La méthode Tabou a été utilisée comme technique d'optimisation pour trouver une solution proche de l'optimal avec une fonction objectif agrégée floue. Une approche pour résoudre un problème d'ordonnancement multi-objectif, flous cette fois-ci, sur une machine a été développé par Duenas et *al.* [Duenas et *al.*, 2004]. Cette approche n'a pas seulement un ensemble d'objectifs flous, mais aussi des paramètres flous, tels que les due-dates qui sont modélisées par un ensemble flou dont la fonction d'appartenance représente le degré de satisfaction du décideur. Par conséquent, les fonctions objectifs sont définies en utilisant des fonctions d'appartenance et sont agrégées en utilisant l'opérateur standard *min*. L'opérateur d'agrégation permet de considérer simultanément un ensemble d'objectifs flous et permet de définir la fonction d'appartenance de décision. Finalement, un modèle hybride combinant un algorithme génétique avec une recherche locale est utilisé pour trouver une solution qui maximise le degré de satisfaction pour tous les objectifs. Cette approche à été appliquée à un problème réel dans une entreprise de poterie.

Le problème d'ordonnancement multi-critère sur des ressources parallèle identique a été abordé par Ruiz et *al.* [Ruiz-Torres et *al.*, 2006]. Ils ont présenté une approche d'ordonnancement dans un contexte de ressources internes travaillant en parallèle (et identiques) et de ressources sous-traitées. Cette sous-traitance permet en effet de disposer d'une capacité supplémentaire sans investissement de capital ou de recrutement de personnel. Le problème étudié ici consiste à faire traiter un ensemble de tâches insécables avec due-date, sur un ensemble de machines parallèles. Ils ont dans cette étude deux objectifs : minimiser le nombre de tâches en retard et minimiser la durée totale sous-traitée. Pour résoudre ce problème ils proposent une comparaison de quatre heuristiques. Les tests montrent qu'en fonction du problème, les meilleurs résultats ne sont pas obtenus par la même heuristique. D'autre part, ils préconisent de générer des solutions avec les trois meilleurs algorithmes présentés pour être sûr d'obtenir une solution qui sera performante dans toutes les conditions.

Le problème d'ordonnancement multi-critère sur des machines parallèles différentes à été abordé par Gruat La Forme et *al.* [Gruat-La-Forme et *al.*, 2007a]. Ils proposent une approche de résolution statique au problème multi-critère d'ordonnancement de la production. L'horizon sur lequel ils travaillent est une journée de production. Il prennent en compte les différences de productivité existant, entre les ressources humaines, en fonction du type de produits réalisés. Les critères pris en compte sont la productivité,

la polyvalence du personnel à travers la mixité de la production à réaliser, et leur taux d'occupation. L'approche proposée réalise de l'optimisation mono-critère sur un critère principal choisi de sorte que les évaluations de la solution obtenue ne soit pas trop dégradée suivant des critères secondaires. Étant donné que l'ordonnancement réalisé est destiné à affecter et ordonnancer les tâches de la journée de production qui débute, celles-ci n'ont pas de date de disponibilité.

Les problèmes de type RCPSP (*Resource Constraint Project Scheduling Problem*) multi-objectifs ont aussi été abordé dans la littérature. Belfares et al. [Belfares et al., 2007] ont développé un algorithme de recherche multi-objectifs basé lui aussi sur la méthode Tabou pour résoudre un problème de RCPSP avec contrainte de fenêtre de temps. Cette méthode explore l'espace de recherche pour trouver une solution potentiellement performante sans agrégation des différents objectifs en une seule fonction objectif. Les fonctions objectifs prise en compte sont alors : minimiser la somme des coûts, maximiser la probabilité de succès de la mission, maximiser la fiabilité des ressources. Cette méthode permet la réalisation de compromis entre les différentes solutions efficaces puisque les règles de dominances utilisées entraînent l'obtention d'un ensemble de solutions. Toujours concernant un problème de RCPSP multi-critères, Abbasi et al. [Abbasi et al., 2006], ont développé un algorithme basé sur la méthode du recuit simulé qui permet d'obtenir un optimum global ou, tout du moins, satisfaisant au moins un critère. Deux objectifs sont retenus dans cette étude : le premier consiste à minimiser la durée de l'ordonnancement et le deuxième à maximiser la robustesse pour rendre l'ordonnancement plus fiable. La fonction d'évaluation utilisée est une combinaison de la durée totale de l'ordonnancement et de la somme des durées variables dans une fonction linéaire.

Enfin, des chercheur se sont aussi lancer sur le problème de type job-shop multi-objectif. Berkoune et Mesghouni [Berkoune et al., 2007], ont développé une approche basée sur des algorithmes génétiques pour traiter un problème de job-shop multi-objectif. Le problème traité consiste à ordonnancer une liste de jobs dont certains sont fermes et d'autres seulement prévisibles. Les fonctions objectifs sont alors de minimiser la durée de l'ordonnancement ainsi que les coûts de production. L'algorithme génétique fournit un ordonnancement réalisé à partir des jobs fermes. Les deux critères (durée de l'ordonnancement et coûts de production) sont agrégés et des pondérations sont utilisées en fonction de leur importance. Une procédure d'insertion est utilisée pour ordonnancer les jobs seulement prévisibles. Le problème multi-objectif est donc transformé en un problème dans lequel les différentes fonctions de coûts sont combinées en une unique fonction objectif. Lors de cette combinaison, des priorités seront données de manière dynamique aux composantes dont les valeurs moyennes obtenues sont loin de l'optimal. Les algorithmes qui ne sont cependant pas basés sur des préférences sont généralement plus intéressants car ils permettent de donner un ensemble de solutions au responsable qui effectuera lui même son propre choix suivant sa propre perception mais aussi car la détermination des priorités à donner est très difficile même avec une bonne connaissance du problème.

IV.2 Présentation de l'approche développée

Le problème d'optimisation multi-critère que nous allons traiter ici est un problème d'ordonnancement sur machines parallèles différentes. Il est possible que suivant la situation, un critère puisse être jugé plus important qu'un autre. Il peut être aussi très difficile de choisir entre favoriser un critère plutôt qu'un autre. Ces choix ou préférences sont alors difficilement modélisables surtout qu'une modification du contexte entraînerait une modification des préférences. Plutôt que d'effectuer une modélisation ou d'appliquer une méthode qui entraînerait le choix d'une solution comme étant meilleure que les autres, il devient logique de laisser un tel choix à un acteur qui soit capable de ressentir ces changements de contexte. Dans cette étude, nous nous intéressons à l'ordonnancement des activités de maintenance. La personne la mieux à même de prendre en considération ces différents paramètres est le responsable des activités de maintenance. Pour que celui-ci puisse réaliser un choix, ce n'est pas une solution au problème d'ordonnancement des activités de maintenance que nous allons proposer au responsable de maintenance, mais un ensemble de solutions.

Si l'on se réfère à la procédure proposée par Hammami [Hammami, 2003] et qui est détaillée dans la figure IV.1, nous pouvons essayer de déterminer le type d'approche qui convient à la résolution de notre problème. Nous venons d'évoquer le fait qu'il soit difficile de privilégier un critère plutôt qu'un autre, aucun poids n'est donc définissable entre les critères. De plus, il est difficile d'estimer une solution idéale, atteignable en un temps raisonnable, il n'est donc pas envisageable de mettre en place une politique d'optimisation d'écart (avec une solution idéale). Nous sommes donc en présence d'un problème multi-objectif qui mène à l'obtention d'un ensemble de solutions suivant la philosophie d'une Pareto optimisation. Cependant, les critères pris en compte dans ce problème d'ordonnancement des activités de maintenance généreraient individuellement des problèmes d'optimisation très compliqués et très longs à résoudre. De plus, lorsque le responsable de maintenance a besoin de solution à son problème d'ordonnancement, c'est pour transmettre des ordres de travail à son personnel. Il a donc besoin rapidement de réponse et c'est pourquoi ce ne sera pas un ensemble de solutions dit pareto optimale mais un ensemble de solutions efficaces que nous lui proposerons.

Il n'est cependant pas utile de présenter au responsable des affectations et de l'ordonnancement toutes les solutions existantes pour ce problème. Nous ne conserverons donc que celles qui présentent un intérêt et les résultats les plus intéressants suivant les différents critères, ce qui correspondrait à un ensemble de solutions *pareto efficaces*. Étant donné que les solutions obtenues présentent des résultats sur plusieurs critères, des relations de dominance seront utilisées pour déterminer lesquelles seront à conserver. En général, le terme de dominance est utilisé pour signifier qu'une solution en domine une autre sur tous les critères considérés. Une solution qui dominerait l'ensemble des solutions n'a cependant que peu de chance d'exister étant donné l'antagonisme des critères. De plus, si une telle solution existe, la trouver peut nécessiter un temps de calcul très important. Nous utiliserons donc la relation de non dominance entre deux solutions X1 et X2, qui

signifie qu'il existe au moins un critère sur lequel une solution X_1 n'est pas dominée par X_2 ou que celles-ci soient identiques, pour conserver les solutions et leurs évaluations suivant chacun des critères. $\exists j \in [1, N_{objectifs}] \Rightarrow f_j(X_1) < f_j(X_2)$ implique donc que X_1 n'est pas dominée par X_2 noté $X_1! \prec X_2$.

IV.2.1 Les critères étudiés

Les activités de maintenance sont officialisées par des engagements de disponibilité des équipements. Bien souvent ces niveaux permettent une légère marge de manœuvre et de réaction au prestataire. Dans le cas où le niveau de disponibilité n'est pas atteint et proportionnellement au retard pris par le service de maintenance dans la remise en fonctionnement d'un système, des pénalités sont prévues. Cela permet de définir les différents objectifs du responsable de maintenance. Celui-ci devra en effet :

- minimiser la somme des pénalités.
Le responsable de maintenance devra organiser les activités de son service afin de minimiser la somme de ces retards pondérés. En effet ceux-ci peuvent représenter des indemnités que le prestataire de maintenance devra verser à son client en mesure de compensation pour ne pas avoir tenu ses engagements.
- minimiser le nombre de tâches finies hors délais.
Un nombre très important de tâches se terminant avec un faible retard peut ne pas impacter fortement la somme pondérée des retards évoquée précédemment. Cependant, il peut avoir un impact négatif sur l'image et la réputation du service de maintenance. Il est ainsi nécessaire que le moins de tâches possibles se terminent en retard.
- répartir la charge de travail entre les ressources.
Les tâches représentent du travail à répartir parmi un ensemble de ressources au sein du service de maintenance. Ces ressources représentent une charge fixe pour le service. Elles doivent donc être toutes exploitées et la personne en charge des affectations doit essayer de tirer parti des compétences de chacune. La charge de travail doit donc être équilibrée entre elles.
- limiter les modifications des ordonnancements existants.
Les ressources devant s'organiser pour rejoindre les lieux d'intervention, réserver et rassembler le matériel nécessaire au traitement des tâches, les plannings ne doivent pas être constamment modifiés. L'arrivée d'une nouvelle tâche ne doit donc pas conduire à une remise en cause complète de l'ordonnement existant. Le nombre de modifications apportées devra être alors minimiser.

Les critères à prendre en compte seront alors la somme pondérée des retards, le nombre de tâches en retard, l'équilibrage de la charge des ressources du service de maintenance et les modifications apportées à l'ordonnement existant. Avant de détailler les différentes fonctions objectives qui en découlent, nous allons présenter dans le paragraphe suivant, la modélisation adoptée.

IV.2.2 Modélisation

Pour obtenir un modèle de problème plus proche de la réalité, nous proposons une extension de celui discuté au paragraphe III.1.1. Soit pour une tâche j :

- U_j ($j = 1...n$) : booléen indiquant le retard de la tâche j . $U_j = 1$ si la tâche se termine en retard, sinon $U_j = 0$,
- mod_j ($j = 1...n$) : représente le nombre de modifications faites sur l'ordonnancement des ressources humaines. mod_j est incrémenté à chaque fois que l'affectation x_{ij} d'une tâche j est modifiée,
- $\sigma(S)$: l'écart type de la charge des ressources d'un ordonnancement S .

Avec :

$$\sigma(S) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (PL_i - \overline{PL_i})^2} \quad (IV.1)$$

Dans laquelle :

- PL_i ($i = 1...m$) : charge potentielle affectée à la ressource humaine i . Elle correspond à la somme des durées des tâches affectées à i .

Avec :

$$PL_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} * p_{ij} \quad (IV.2)$$

Cette modélisation nous permet alors d'écrire les différentes fonctions objectifs présentées dans la partie suivante.

IV.2.3 Fonctions objectifs

Les fonctions objectifs liées à l'ordonnancement, suivant les critères précédemment cités, sont alors les suivantes :

Minimiser la somme pondérée des retards :

$$\min \sum_{j=1}^n w_j T_j, \quad (IV.3)$$

Minimiser le nombre de tâches en retard :

$$\min \sum_{j=1}^n U_j, \quad (IV.4)$$

Équilibrer et réduire la charge en minimisant l'écart type de la charge entre les ressources, soit pour un ordonnancement S :

$$\min \sigma(S) = \min \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (PL_i - \overline{PL}_i)^2} \quad (\text{IV.5})$$

Minimiser les modifications de l'ordonnancement initial à travers les changements d'affectation des tâches :

$$\min \sum_{j=1}^n \text{mod}_j, \quad (\text{IV.6})$$

Chacun de ces critères étant important, il n'est pas possible d'en privilégier un par rapport aux autres. Nous proposons de rechercher, non pas une solution unique, mais un ensemble de solutions. Le modèle synthétisé peut alors être étendu afin de prendre en compte les différents critères.

IV.2.4 Modèle mathématique

Dans un ordonnancement courant comprenant les tâches 1 à n , nous insérons dynamiquement une nouvelle tâche $n+1$. Le problème peut donc être synthétisé de la façon suivante :

$$\min \sum_{j=1}^n w_j T_j, \sum_{j=1}^n U_j, \sigma(S), \sum_{j=1}^n \text{mod}_j,$$

De sorte que :

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \forall i \in \{1, \dots, m\},$$

$$t_j \geq r_j, \forall j \in \{1, \dots, n\},$$

$$\forall t, \forall i, \sum_{j=1}^n a_{ij}(t) \leq 1,$$

avec $T_j = \max(O, C_j - d_j)$ et $C_j = t_j + p_{ij}$,

avec $p_{ij} = \sum_{j=1}^n x_{ij} * f(p_j, \text{comp}_{i, cr_j})$,

avec $U_j = 1$ si $C_j - d_j > 0$, sinon $U_j = 0$,

avec $\sigma(S) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (PL_i - \overline{PL}_i)^2}$, sachant que $PL_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} * p_{ij}$,

avec $\text{mod}_j = 1$ si $x_{ij}^{S(t-1)} \neq x_{ij}^{S(t)} \forall i \in \{1, \dots, m\}$ et $\forall j \in \{1, \dots, n\}$.

$S(t-1)$ est l'ordonnancement courant composé par les tâches 1 à n et réalisé à l'instant $t-1$. $S(t)$ est l'ordonnancement obtenu après insertion, à l'instant t et composé par les tâches 1 à $n+1$.

IV.2.5 Heuristique d'insertion dynamique

L'extension du problème d'ordonnancement mono-critère au problème multi-critère implique que les approches de résolution soient repensées. Une telle approche devra donc prendre pas en considération la gêne que peut occasionner l'insertion d'une nouvelle tâche, pour le personnel dont le planning a été modifié. Le planning courant ne doit, en effet, pas être remis totalement en cause lors de l'insertion. Une méthode d'ordonnancement de type statique ne peut être envisagée car elle ne prendrait pas en compte les affectations initiales. Nous adapterons alors la méthode d'insertion dynamique développée dans le chapitre précédent à la problématique multi-critère.

Nous proposons une méthode de recherche de solutions par voisinage. Contrairement à la version mono-critère précédemment exposé, cette méthode, qui en est dérivée, permet d'obtenir non pas une solution dominante, mais un ensemble de solutions *ES* non dominées parmi lesquelles le décideur pourra choisir. Cette heuristique développée est décrite par l'algorithme 7. Tout comme la version mono-critère, elle est basée sur la méthode kangourou.

Étant donné que le principe de fonctionnement de cette heuristique présente de nombreuses similitudes avec celle dont elle est dérivée (chapitre précédent), nous allons seulement nous attarder sur les différences qu'elle présente :

- *Initialisation(ES)* : réalise l'ensemble des solutions initiales non dominées. C'est la première étape de l'heuristique. Celui-ci est créé en essayant toutes les possibilités d'insertion de la nouvelle tâche dans l'ordonnancement courant. Ces solutions (ou ordonnancements) sont ensuite comparées et seules les solutions non dominées sont conservées.
- *Choix_aleatoire(ES)* : choisi aléatoirement une solution de *ES*. C'est cette solution qui sera travaillée par la suite.
- *Evaluation(S)* : retourne l'évaluation, suivant chacun des critères, de la solution *S*,
- *Suppression_solutions_dominées(ES)* : supprime les solutions dominées de *ES*, seules les solutions non dominées sont conservées.

Bien que généralement l'équilibrage de la charge s'évalue sur la durée totale des tâches affectées, le fait de procéder stochastiquement à des échanges de tâches (permutation de deux tâches) plutôt qu'à des déplacements stochastiques de tâche d'une ressource vers une autre (changement d'affectation d'une tâche), permet de garder un certain équilibrage de celle-ci.

Nous présentons en annexe (annexe D) une application simple de l'heuristique qui permet d'en illustrer le fonctionnement avant l'application des tests plus conséquents de la partie suivante.

```

Initialisation (ES);
Tant que ((nb_search ≤ nb_search_max)) faire
    nb_recherche ++;
    S ← Choix_aleatoire(ES);
    Eval ← Evaluation(S);
    nb_descente ← 0;
    Tant que ((nb_descent ≤ nb_descente_max)) faire
        nb_descente ++;
        S' ← Voisin(S);
        Si (S' ≺ S) Alors
            nb_descente ← 0;
            S ← S';
            Si (S' ≺ ES) Alors
                ES ← S';
            Fin Si
            Suppression_solutions_dominees(ES);
        Fin Si
    Fait
    Tant que ((nb_saut ≤ nb_saut_max) OU (trouve == faux)) faire
        Nb_saut ++;
        S' ← Saut(S);
        Si (S' ≺ S) Alors
            nb_saut ← 0;
            S ← S';
            Si (S' ≺ ES) Alors
                ES ← S';
                trouve ← vrai;
            Fin Si
            Suppression_solutions_dominees(ES);
        Fin Si
    Fait
Fait

```

Algorithme 7: Algorithme de recherche multi-critère

IV.3 Validation de notre approche

A travers ce chapitre nous avons introduit la nécessité pour un ordonnancement de maintenance d'être multi-critère. L'ajout de critères supplémentaire ne doit cependant pas se faire au détriment de la qualité des solutions concernant le critère initial. Au cours de ces tests, nous étudierons l'insertion dynamique de nouvelles tâches dans différents

ordonnements en appliquant l'approche d'ordonnement multi-critère développée.

IV.3.1 Impact de l'ajout de critères supplémentaires

Le tableau IV.1 présente comparativement, pour les mêmes jeux de tests, les résultats obtenus par les approches mono-critère et multi-critère. Les résultats présentés sont les moyennes de dix instances aléatoirement générées. Nous étudions l'insertion dynamique d'une tâche dans des ordonnements courants de différentes tailles.

m	n	Approche	$\sum U_j$	$\sum w_j T_j$	σ	$\sum mod_j$
2	30	mono	10	315103	3992	8
		multi	7	25077	3	0
5	50	mono	2	55954	15040	13
		multi	6	91614	223	0
8	70	mono	3	96003	11953	21
		multi	8	59259	694	0

TAB. IV.1 – $\sum w_j T_j$ après insertion de 10 nouvelles tâches

Les deux premières colonnes présentent la taille des ordonnements courant des différents problèmes. la troisième présente le type d'approche appliquée. Les lignes de résultats de l'approche mono-critère correspondent à la solution fournie par cette approche. L'approche multi-critère fourni un ensemble de solution. Cet ensemble doit permettre au décideur, en fonction du contexte, de privilégier un critère ou de choisir un compromis. L'ensemble de solution doit donc contenir des solutions présentant des résultats suivant chacun des critères. Les résultats de l'approche multi-critère correspondent donc aux meilleures évaluations, parmi l'ensemble des solutions fournies, suivant chacun des critères.

Concernant la somme pondérée, il est surprenant à première vue, de voir que l'approche multi-critère fournisse des solutions meilleures suivant ce critère que l'approche mono-critère. En effet l'approche mono-critère n'optimise que ce critère, alors que l'approche multi-critère s'intéresse à un ensemble de critère. Nous expliquons cela par le fait que le choix aléatoire d'une solution dans un ensemble de solution donne des points de départ différent à l'approche d'ordonnement. Ces points de départs permettent, grâce à une optimisation consécutive de critères différents, d'atteindre des espaces de solutions inatteignable avec les opérateurs et le temps laisser à l'approche mono-critère. La recherche multi-critère permet donc d'explorer des solutions qui ne l'étaient pas avec l'approche mono-critère.

En revanche l'effet inverse est aussi possible. En partant d'un ensemble de solutions dans lequel on choisi aléatoirement une solution de départ, pour la méthode d'amélioration, tous les espaces de solutions atteignables ne sont pas nécessairement explorés. De bonnes solutions peuvent alors échapper à l'approche de recherche. Cela se vérifie puisque, même si l'inverse n'est pas nécessairement vrai, l'approche multi-critère, quant elle, à peut

explorer toutes les solutions atteignables par l'approche mono-critère.

Concernant le nombre de modifications de l'ordonnancement courant, on constate que l'approche mono-critère réalise toujours un nombre important de changement d'affectation. L'approche multi-critère propose toujours au moins une solution sans modification.

La figure IV.2 présente l'exemple d'un ordonnancement de 3 ressources et 30 tâches dans lequel est insérée une tâche. Sur cet exemple ont été appliquée l'approche d'insertion dynamique mono-critère développée au chapitre précédent. La solution de cette approche est représenté en pointillé. Nous avons pour le même problème appliqué l'approche multi-critère. Nous avons fait une sélection de trois solutions parmi celles de l'ensemble des solutions.

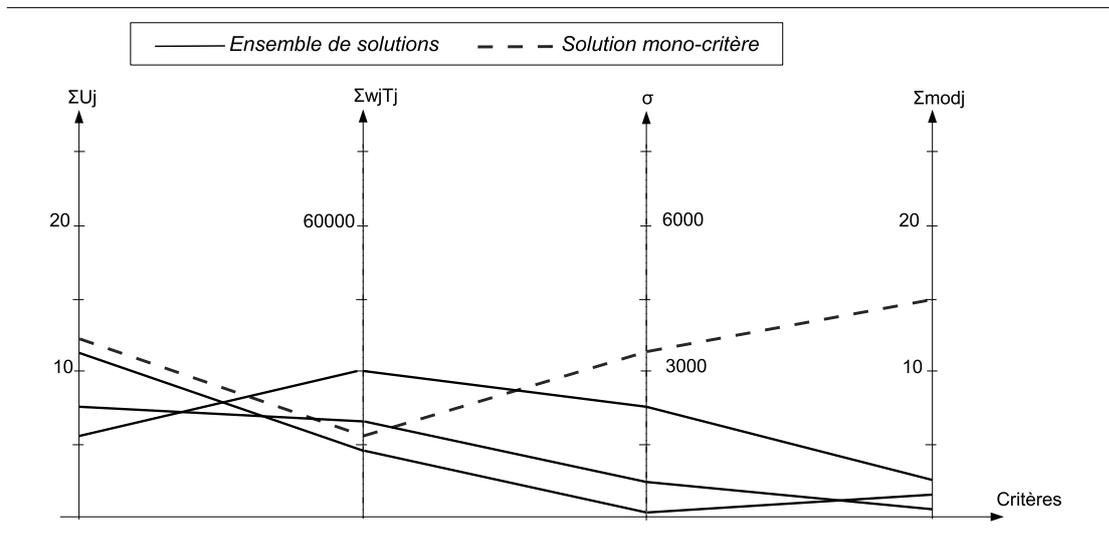


FIG. IV.2 – Solutions des approches mono et multi-critères

Il est possible d'observer que l'une des solutions de l'approche multi-critère domine complètement la solution mono-critère. Les deux autres solutions représentées, de l'approche multi-critère, dominent les autres sur au moins un critère. La solution mono-critère présente cependant une somme pondérée des retards moins élevée que les deux solutions que nous venons d'évoquer.

IV.3.2 Impact du choix de la solution courante

Pour savoir si les solutions obtenues gardent leur performance au fur et à mesure des évolutions de l'ordonnancement, Nous allons étudier une succession d'insertions de nouvelles tâches. Dans un ensemble de solutions, c'est le décideur du service de maintenance qui choisi celle qu'il veut conserver et mettre en application. Cependant, en vue d'automatiser nos applications dynamiques, suite à la réalisation d'un ensemble de solutions,

une question se pose : laquelle choisir ?

Nous émettons, dans un premier temps, l'hypothèse que le décideur conserverait la solution qui minimise la somme pondérée des retards dans chaque ensemble de solutions intermédiaires. Si les solutions sont évaluées suivant un ensemble de critères, ce n'est pas pour réduire le choix à un critère en particulier. En effet, si, en raison d'un contexte particulier, un critère est privilégié par rapport aux autres lors d'une insertion, il peut en être tout autrement lors de l'insertion suivante. Nous allons donc étudier, pour un même ordonnancement de départ, et pour une même série de nouvelles tâches successivement insérées, l'effet sur les résultats du choix du critère de sélection.

Le tableau IV.2 présente l'évaluation des solutions après l'insertion de 10 nouvelles tâches. Ces résultats sont la moyenne de cinq successions d'insertions dans un ordonnancement courant composé de 5 ressources et de 50 tâches.

m	n	Approche	Critère	$\sum w_j T_j$	$\sum U_j$	σ	$\sum mod_j$
5	50	mono	$\sum w_j T_j$	1205	4	993	5
		multi	$\sum U_j$	1003	3	715	0
		//	$\sum w_j T_j$	1405	5	428	0
		//	σ	6047	10	439	0
		//	$\sum mod_j$	10043	18	130	0

TAB. IV.2 – Évaluations après insertion de 10 nouvelles tâches

La troisième colonne de ce tableau présente la politique choisie pour l'insertion de la tâche. Seule la première ligne des résultats a été obtenue avec l'approche mono-critère. La quatrième colonne présente le critère de préférence pour choisir quelle solution de l'ensemble deviendrait l'ordonnancement courant pour l'insertion de la nouvelle tâche suivante. L'approche mono-critère a donc été appliquée en préférant la $\sum w_j T_j$ la plus faible et l'approche multi-critère a été appliquée, en préférant successivement chacun des critères.

L'approche mono-critère fournissant une unique solution, c'est donc l'évaluation d'une solution que l'on peut observer. Dans le cas de l'application de l'approche multi-critère, ce sont uniquement les meilleurs résultats suivant chacun des critères qui sont retenus. Ceux-ci permettent de savoir si l'ensemble des solutions contient de bonnes solutions suivant chaque critère.

Au bout de dix insertions, nous pouvons constater que le fait de préférer les solutions avec les écarts type les plus faibles et le nombre de modifications le plus faible (une simple insertion), conduit en moyenne à de mauvais résultats concernant le nombre de tâches en retard ainsi que la somme pondérée des retards.

Nous pouvons aussi constater que préférer un critère ne mène pas nécessairement à la meilleure solution suivant ce même critère. Avec, par exemple, l'écart type dont la meilleure valeur est trouvée dans l'ensemble de solution réalisée en préférant le nombre de modifications et non l'écart type lui-même.

L'approche mono-critère donne de bon résultats suivant la somme pondérée des retards et le nombre de tâches en retard. Cependant, les autres critères et, notamment l'équilibrage de la charge, étant négligés, les résultats le reflètent.

Bien que n'étant pas la plus performante des approches concernant le nombre de retards et la somme pondérée des retards, l'approche multi-critère préférant la somme pondérée des retards semble être un bon compromis. Celle-ci présente en effet une réduction de la charge d'environ 50% par rapport à l'approche mono-critère. Nous pouvons suivre l'évolution des meilleures évaluations suivant chaque critère fournis par cette approche sur la figure IV.3.

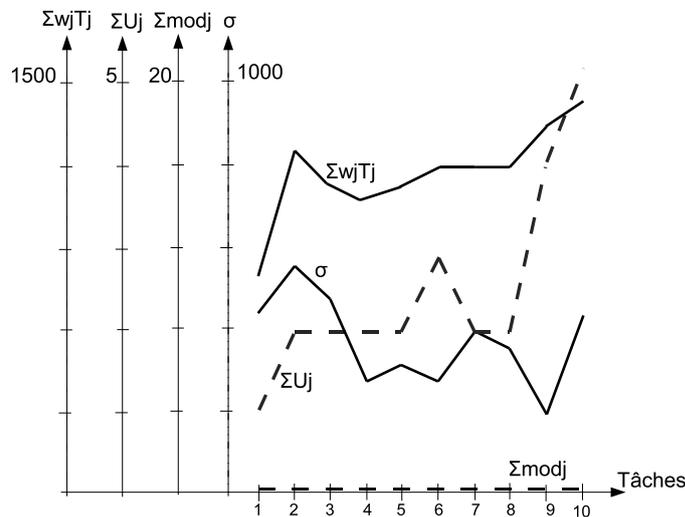


FIG. IV.3 – Evolution des solutions de l'approche multi-critère

Sur cette figure, il est possible de voir que le nombre de modifications reste à zéro. C'est du au fait que, dans l'ensemble de solutions, il y a toujours des solutions proposant une simple insertion. L'intérêt de ces solutions est bien de permettre au décideur de pouvoir intégrer la nouvelle tâche sans perturber l'ordonnancement courant.

On constate aussi que lorsque l'on ajoute une tâche et que la charge augmente, il est possible de trouver encore des solutions réduisant la somme pondérée des retards. Le même phénomène peut être observé concernant le nombre de tâches en retard. L'ensemble de l'espace des solutions n'avait donc pas été exploré. On observe cependant une tendance générale à la hausse montrant que ce phénomène n'est pas constant. Contrairement à cela, l'écart type présente logiquement une évolution semblant paraître aléatoire.

IV.4 Conclusion

Le problème d'ordonnancement que nous abordons dans ce chapitre est un problème d'ordonnancement multi-critère des activités de maintenance. Les problèmes d'ordonnancement des services de maintenance peuvent être assimilés à des problèmes d'ordonnancement sur machines parallèles indépendantes. Nous nous intéressons plus particulièrement à l'affectation et à l'ordonnancement dynamique de tâches de maintenance corrective.

Dans la littérature, on retrouve des approches multi-critères d'ordonnancement sur machines parallèles, telles que celles développées par Ruiz et *al.* [Ruiz-Torres *et al.*, 2006]. Les différences de taux de compétence entre les ressources ne sont cependant pas prises en compte et les tâches n'ont pas de date de disponibilité. Il existe quelques travaux d'ordonnancement sur machines parallèles différentes. Gruat La Forme et *al.* [Gruat-La-Forme *et al.*, 2007a] proposent une approche de résolution statique à un problème d'ordonnancement multi-critère de la production. Cette approche réalise de l'optimisation mono-critère sur un critère principal choisi de sorte que les évaluations de la solution obtenue ne soit pas trop dégradée suivant des critères secondaires. Il n'est cependant pas possible dans notre contexte de privilégier un critère et dans leur modèle les tâches n'ont pas non plus de date de disponibilité.

Le problème que nous traitons dans ce chapitre consiste à réaliser dynamiquement, à partir d'un ordonnancement courant et d'une nouvelle tâche, un nouvel ordonnancement. Les ressources sont différentes et l'ensemble des données concernant les tâches sont supposées connues avec précision. Les fonctions objectifs de ce problème sont de minimiser la somme pondérée des retards, le nombre de tâches en retard, le nombre de modification de l'ordonnancement courant lors de l'insertion mais aussi d'équilibrer la charge.

Nous proposons, dans ce chapitre, une approche de résolution à un problème d'ordonnancement dynamique, multi-critère des activités de maintenance. L'approche proposée est une extension au multi-critère de l'approche développée au cours du chapitre précédent. Nous proposons alors une adaptation de la méthode du kangourou au multi-critère. Nous fournissons ainsi au décideur un ensemble de solutions pareto efficaces au problème d'ordonnancement ainsi que l'évaluation de chacune de ces solutions suivant chacun des critères évoqués.

Pour valider cette approche, nous avons effectué, dans un premier temps, un comparatif avec l'approche mono-critère dont la fonction objectif était de minimiser la somme pondérée des retards. Cela nous a permis de valider le fait que l'ajout de critère n'entraînait pas de détérioration des solutions suivant le critère considéré dans l'approche mono-critère. De plus, l'ajout de critères peut permettre d'atteindre de nouvelles solutions, plus performantes suivant la somme pondérée des retards.

Dans notre approche, nous nous sommes limités à quatre critères. Le décideur peut cependant accorder de l'importance à d'autres critères que ceux-ci. Il est relativement simple dans cette approche de résolution d'ajouter ou de retirer des critères. Dans le

contexte de maintenance industrielle, les données des différentes tâches peuvent être des estimations. Notre approche de résolution ne prend cependant en compte que des données précises.

Les activités de maintenance ont, suivant leur nature, des caractéristiques qui peuvent présenter des imprécisions. Pour construire une solution, il est possible que les décideurs doivent utiliser des données qui ne soit que des estimations. Cette problématique réside alors dans le fait de fournir une solution au problème d'ordonnancement, qui soit peu sensible à l'incertitude des données. En d'autres termes, l'efficacité de la solution fournie est conservée même si les données réelles présentent des différences par rapport à celles utilisées dans la résolution du problème. On parle alors de *robustesse* et nous nous intéresserons donc, dans le chapitre suivant, à cette robustesse des ordonnancements de maintenance. Nous aborderons dans un premier temps les sources d'incertitudes dans l'ordonnancement de la maintenance et les différentes approches, issues de la littérature, prenant en compte l'incertain. Puis nous présenterons l'approche que nous proposons pour ce problème et la méthode employée pour la valider.

Chapitre V

Approche de résolution proactive pour le problème d'affectation et d'ordonnancement des activités de maintenance en contexte incertain

Les différents problèmes d'ordonnancement et d'affectation des tâches de maintenance, pour lesquels nous avons proposés des approches de résolution, au cours des chapitres précédents, ne prennent en compte que des données connues avec précision. Un aspect très important et inhérent aux activités de maintenance n'a cependant pas encore été pris en compte. Certaines tâches ont des caractéristiques qui ne sont que des estimations (provenant d'un diagnostic par exemple). Dans un cadre tel que la maintenance, où les responsables prennent des engagements sur des dates de remise en fonctionnement pour des équipements, il apparaît nécessaire de pouvoir prendre en compte les variations possibles en les anticipant.

Étant donné que le service de maintenance s'engage sur des niveaux de disponibilité. Il est important que les incertitudes des données ne provoquent pas de dérives par rapport aux engagements. Dans l'approche multi-critère développée précédemment, le critère représentant ces engagements est la somme pondérée des retards.

Billaut [Billaut *et al.*, 2005] a défini comme étant robuste les solutions d'ordonnancement qui sont peu sensibles à l'incertitude des données. Les solutions à notre problème d'ordonnancement doivent donc être robuste. Davenport et Beck [Davenport *et al.*, 2000] classifient les différentes approches, prenant en compte les incertitudes, en approches réactives, proactives ou proactive-réactives. L'approche que nous présentons dans ce chapitre anticipe les incertitudes lors de la réalisation de l'ordonnancement. Nous proposons donc une méthode *proactive*. La logique floue est déjà largement utilisée dans la littérature, pour modéliser les environnements incertains. Différents auteurs l'utilisent pour modéliser les

paramètres flous des tâches tels que les *due-dates* ou encore les durées [Guiffrida *et al.*, 1998]. Des approches utilisent déjà la logique floue dans le domaine de la maintenance. Dahal *et al.* [Dahal *et al.*, 1999] ont développé un algorithme génétique utilisant une fonction d'évaluation floue des solutions obtenues. L'évaluation se fait sur la quantité d'énergie produite, la réponse à la demande en énergie et la rupture de disponibilité de ressources humaines pour la maintenance. D'autres types de problèmes ont été modélisés en utilisant la logique floue tels que des problèmes de satisfaction de contraintes [Dubois *et al.*, 1995] où l'évaluation se fait en agrégeant la satisfaction de contraintes locales. Des problèmes tels que le job-shop [Petrovic *et al.*, 2006] ont été abordés en prenant des durées opératoires fixes et dans lequel les différents objectifs sont agrégés en une unique fonction de décision. Dans notre problème, les différents critères ne sont pas comparable et ne peuvent être sommé afin d'obtenir une seule évaluation. En effet, en fonction du contexte, le décideur peut être amené à en privilégier un par rapport aux autres, sans qu'*a priori*, il soit possible de savoir lequel et donc de leur donner une importance les uns par rapport aux autres.

Nous reprenons le problème du chapitre précédent en intégrant la notion d'incertitudes. Nous proposons une approche proactive utilisant la logique floue pour modéliser les incertitudes. La modélisation que nous développons nous permet d'évaluer la robustesse d'un ordonnancement de maintenance par rapport à la somme pondérée des retards. Nous proposons aussi son intégration, en tant que critère dans l'approche dynamique et multi-critère, développée dans le chapitre précédent en remplacement du critère de la somme pondérée des retards.

Nous présentons dans ce chapitre comment nous avons pu trouver des solutions robustes à un problème d'ordonnancement d'activités de maintenance. Ce chapitre commence donc par la présentation de travaux réalisés en contexte incertain. Dans un second temps, nous présenterons l'approche que nous proposons et qui est basée sur l'utilisation de la logique floue. Celle-ci sera détaillée par un exemple simple pour en illustrer le fonctionnement. Puis, pour valider cette approche, nous développerons des jeux de tests plus conséquents afin de mettre en avant les performances de la méthodes proposées.

V.1 Les sources d'incertitudes en maintenance

Certaines tâches de maintenance sont des évènement stochastiques (exemple : maintenance corrective). Il n'est pas possible de d'être certain de leur arrivée. Il n'est donc pas possible d'être certain du nombre de tâche que comptera alors l'ordonnancement dans un futur même très proche. Le contexte dans lequel est réalisé l'ordonnancement est alors globalement incertain [Kallen *et al.*, 2005].

Des tâches de maintenance peuvent être considérées comme des données certaines car elle sont connues et l'on sait avec certitudes qu'elles auront lieux (exemple : maintenance préventive). Leurs caractéristiques, quant à elle, héritent de cette certitude. En revanche, si l'on sait qu'une tâche va avoir lieu, ses caractéristiques telle que la durée

d'une tâche [Fortemps, 1997], ne sont pas précises. Cette notion d'imprécis reflète évidemment le manque de précision de la connaissance que l'on a de la donnée, mais aussi le caractère approximatif qui est connu. Il est possible de trouver dans la littérature des travaux qui utilisent la notion d'incertain pour signifier cette imprécision, par exemple : "des durées probablement incertaines de tâches" [Dubois *et al.*, 1995].

Les définitions que nous retiendrons seront alors les suivantes :

- Données certaines / données incertaines : Relatif à un événement ou une décision, qui peut ou ne peut pas être déterminé à l'avance.
- Données imprécises / imprécises : Relatif à une caractéristique d'un événement certain, signifie le caractère approximatif de la donnée.

Suivant le type de tâche, des incertitudes subsistent sur des paramètres intrinsèques différents. En référence au paragraphe II.3.1.2, nous reprécisons ici les sources d'incertitudes et d'imprécisions que nous prendrons en considération dans ce chapitre.

- Les tâches de maintenance préventive
 - Date de disponibilité : Il arrive qu'il soit difficile d'estimer avec précision la date à laquelle l'équipement sera libéré pour effectuer une opération de maintenance préventive.
 - *Due date* : La date à partir de laquelle l'équipement tomberait en panne et ferait chuter sa disponibilité, si la maintenance préventive n'est pas réalisée, est difficilement estimable avec précision.

Les tâches de maintenance préventive sont bien connues, bien documentées et donc bien maîtrisées, leurs durées de base sont donc supposées déterministes.

- Les de maintenance corrective
 - Durée de base : Contrairement aux tâches de maintenance préventive, la durée des tâches de maintenance corrective peut juste être estimée sur la base d'un diagnostic correct.

Leur date de disponibilité peut être considérée comme connue et immédiate, puisque les tâches de maintenance corrective sont généralement nécessitées à la suite de pannes. La disponibilité de l'équipement chutant à partir de la date d'arrêt de celui-ci, il est alors possible de connaître à partir des engagements pris par le service de maintenance, la *due-date* de la tâche.

Les tâches de maintenance préventive conditionnelle ne sont pas planifiables à long terme. Elles dépendent de l'évolution de l'état du matériel et d'un contrôle. Leur arrivée est donc peu prévisible. Nous les considérerons, les modéliserons et les traiterons telle des tâches de maintenance corrective.

- Les ressources humaines
 - Les taux de compétences : La quantification du taux de compétence est généralement très approximative. L'aspect réducteur que l'on donne en fixant les limites d'une compétence ainsi que l'éventail de tâches faisant appel à une même compétence

font que le taux utilisé n'est pas nécessairement approprié à toutes les tâches pour lesquelles il est utilisé. De plus celui-ci évolue constamment ; il augmente lorsque de telles tâches sont fréquemment réalisées et il diminue lorsque elles sont rares.

Avant de présenter l'approche que nous proposons pour répondre au problème d'ordonnement des activités de maintenance, nous présentons dans un premier temps quelques travaux en contexte incertain. Deux types d'outils sont souvent utilisés, dans la littérature, pour prendre en compte de l'incertain. il s'agit de la simulation et de la logique floue. Dans les paragraphes suivant, nous allons présenter quelques uns des travaux existants notamment en ordonnancement.

V.1.1 La simulation dans la littérature

De nombreux travaux utilisent des techniques basées sur la simulation pour modéliser des incertitudes, observer leurs impacts ou encore évaluer la robustesse des ordonnancements. Au final, la simulation permet de réaliser des comparatifs sur un grand nombre de solutions et de ne conserver que le meilleur compromis. Nous allons présenter ici quelques travaux faisant appel à la simulation dans des environnement incertain.

On appelle méthode de Monte-Carlo toute méthode visant à calculer une valeur numérique, et utilisant des procédés aléatoires, c'est-à-dire des techniques probabilistes. Le nom de ces méthodes fait allusion aux jeux de hasard pratiqués à Monte-Carlo [Léger, n.d.].

La méthode de simulation de Monte-Carlo permet aussi d'introduire une approche statistique du risque dans une décision. Elle consiste à isoler un certain nombre de variables-clés du projet telles que le chiffre d'affaires ou la marge... et à leur affecter une distribution de probabilités. Pour chacun de ces facteurs, on effectue un grand nombre de tirages aléatoires dans les distributions de probabilité déterminées précédemment, afin de déterminer la probabilité d'occurrence de chacun des résultats. L'utilisation de modèle de simulation basée sur la méthode Monte-Carlo se retrouve dans des approches tel que l'ordonnement par lot en environnement incertain. Mignon et al. [Mignon *et al.*, 1995] l'on appliquée pour implémenter des paramètres (tels que le temps d'arrivée des ordres de travail, la taille des lots,...) dans lesquels il y a des variations de nature stochastiques. Ce type de modèle de simulation est aussi utilisé pour vérifier si une solution générée, satisfait toujours les objectifs fixés, une fois exposées à des incertitudes. Yang et al. [Yang *et al.*, 2005] on appliquée cette méthode de simulation pour valider une solution initialement obtenue par une approche probabiliste. Celle-ci concerne le déroulement d'un projet de tunnel pour lequel il y a des incertitudes sur le fait que les ressources seront trouvées.

L simulation a également été utilisée pour des problèmes d'arrivé de nouvelles tâches dans des flow-shops. Swaminathan et al. [Swaminathan *et al.*, 2007] ont utilisé la simulation pour faire varier les poids des tâches mais surtout pour générer de l'incertitude sur la durée de tâches. Trois type d'approches différentes ont été développés. La première

consiste à réaliser des permutations dans l'ordonnancement, la deuxième à effectuer des décalages dans l'ordonnancement et la troisième à répartir les séquences de tâches. La simulation leur permet alors de tester la performance, de ces approches, par rapport à la minimisation de la somme pondérée des retards.

La simulation peut aussi être utilisée pour valider le fait qu'une approche proactive-réactive réalise bien des ordonnancements robustes. L'approche étudiée par Esswein et al. est décomposable en deux phases. Elle est issue, pour l'algorithme proactif, de la méthode AMORFE (Approche Multi-critère pour l'ORdonnancement Flexible) [Esswein, 2003] et pour de l'algorithme réactif, de la méthode ORABAID (ORdonnancement d'Atelier Basé sur l'Aide à la Décision) [Billaut *et al.*, 1996]. L'élément important de cette approche est la notion de groupes d'opérations permutables. Un "groupe" est défini comme étant un ensemble d'opérations exécutées successivement sur une machine mais dont l'ordre ne sera fixé que dans la phase réactive. Un ordonnancement de groupe correspondra alors à une séquence de groupe définie sur chaque machine. L'étude de la robustesse sera réalisé en comparant la qualité d'ordonnancement de groupe avec celle d'ordonnancement sans groupe et sans flexibilité. La simulation porte sur des problèmes à une machine comportant des dates de disponibilités, et des *due dates*. Les incertitudes simulées concernent des variations portant sur la durée opératoire des tâches, sur les dates de disponibilité et sur les *due dates*. Ils utilisent une loi de probabilité pour décider si une tâche est sujette ou non à des variations. En conclusion, quelque soit le type d'incertitudes, l'utilisation d'ordonnancement de groupe permet d'obtenir des solutions de meilleure qualité et plus robuste suivant différents critères étudiés [Esswein *et al.*, 2004].

Dans le domaine de la maintenance, on retrouve par exemple, les approches suivantes.

On peut évoquer les travaux de Allaoui et Artiba [Allaoui *et al.*, 2004], concernant un problème de flow-shop hybride avec des contraintes liées à la maintenance. En effet, ils utilisent la simulation pour gérer les arrivées d'événements discrets, construire un ordonnancement ou encore évaluer l'ordonnancement obtenu. Ces simulations sont couplées avec un algorithme utilisant les règles *SPT*, *LPT* et *EDD* fournissant des solutions de base à un algorithme de recuit simulé, afin de résoudre leur problème d'optimisation.

Gharbi et Kenné [Gharbi *et al.*, 2005] ont développé une approche pour le problème d'ordonnancement de la production et de tâches de maintenance préventive sur des machines différentes. Un modèle de simulation a été réalisé pour décrire le coté dynamique des systèmes de production. L'approche de résolution proposée combine les simulations et les méthodes statistiques pour donner une estimation du coût de la solution proposée.

On retrouve aussi la simulation dans des approches d'ordonnancement multi-objectifs. En effet, Lee et al. [Lee *et al.*, 2007] ont développé un algorithme génétique multi-objectif pour l'ordonnancement dans le domaine de l'aviation. L'ordonnancement dans l'aviation prend en compte les activités de maintenance, mais aussi les rotations des avions, l'affectation des équipes,... Les problèmes sont ainsi très complexes. Une fois que l'algorithme génétique a proposé des solutions, elles sont évaluées à l'aide de SIMAIR 2.0, un logiciel de simulation pour les opérations aériennes.

V.1.2 La logique floue dans la littérature

Une autre approche est rencontrée dans la littérature, parallèlement à la simulation. Cette approche utilise la logique floue pour modéliser les environnements incertains. La logique floue a été introduite par Zadeh, pour traiter les problèmes dont les données ne sont pas déterministes [Zadeh, 1965]. La théorie des ensembles flous utilise des fonctions à plusieurs valeurs pour représenter la fonction d'appartenance d'un élément à un ensemble plutôt que la notion de vrai ou faux en logique binaire classique. Cela permet de quantifier combien un élément est considéré être dans un ensemble.

Les ensembles flous ont été proposés pour la résolution de problèmes de satisfaction de contraintes (*Constraint Satisfaction Problems* ou CSP), de sorte que la satisfaction partielle des contraintes soit possible. Dubois et al. [Dubois *et al.*, 1995] ont reformulé le problème d'ordonnancement en CSP flou, où les contraintes sont plus ou moins relaxable ou sujettes à préférences. En ordonnancement flou il y a principalement deux types de contraintes : celles qui définissent l'espace des solutions (les dates de disponibilités par exemple) et les contraintes qui caractérisent la qualité de la décision d'ordonnancement (telle que les *due-date* par exemple). La logique floue peut-être utilisé pour modéliser les incertitudes du processus réel, tandis que les contraintes décrivent les préférences de l'utilisateur qui peuvent être relaxées. Quelques contraintes doivent être satisfaites pour que la solution soit valide, alors que d'autres peuvent être "détendues" au besoin. Par conséquent, une bonne solution satisfait des contraintes dures et détend sélectivement des contraintes dites douces pour optimiser la performance.

Guiffrida et Nagi [Guiffrida *et al.*, 1998] ont publié un état de l'art sur l'application de la théorie des ensembles flous dans le domaine de la production. Ces travaux utilisent des données floues pour modéliser les *due dates*, les durées de traitement et, par conséquent, aussi la durée des ordonnancements. Parmi les travaux référencés, on note que la logique floue à été utilisé dans des problèmes de job-shop, de gestion de projet, de planification, d'ordonnancement de la production, de prévision ou encore de gestion de la qualité. Il ressort de cette étude que la logique floue a déjà été appliquée à la plupart des champs de recherche en gestion de la production. De plus, les travaux de recherche en gestion de la production qui s'effectuent sur l'application de la logique floue sont de plus en plus nombreux.

Parmi les approches récentes dans le domaine de la production, le problème de *job-shop* multi-objectif a été abordé. Petrovic et al. [Petrovic *et al.*, 2006] ont en effet développé un algorithme génétique qui prend en considération différents niveaux d'importance pour chaque objectifs en fonction de la perception du décideur. La fonction objectif de l'algorithme est alors définie comme une mesure de vérité de la quantification linguistique de la distance entre le niveau atteint et le niveau souhaité. Un problème réel à ainsi été traité, pour lequel les objectifs pris en compte sont de minimiser le C_{max} , le nombre

de jobs en retard ainsi que la somme des pénalités. En conclusion cet outil a montré une grande flexibilité et peut être appliqué pour mettre en évidence l'effet de différentes orientations sur la qualité de la solution. De plus cet outil permet au décideur d'exprimer des préférences entre les différents objectifs par le biais de variables linguistiques.

Les problèmes de type *flow-shop* ont aussi été abordés, puisque Song et al. [Song *et al.*, 2005] posent le problème de satisfaction de contraintes floues dans un *flow-shop*. Dans ce problème, les contraintes flexibles de date de disponibilité et de *due-date* des jobs ainsi que leurs durées sont modélisées par des ensembles flous. L'approche proposée doit permettre de calculer le degré de satisfaction de la solution obtenue avec le respect des contraintes. l'objectif étant de maximiser ce degré de satisfaction. Leur perspective de travail est, à l'heure actuelle, de développer un algorithme du type recuit simulé avec pour fonction objectif le degré de satisfaction de l'ordonnancement.

La maintenance est là pour assurer un niveau élevée de fiabilité tout en intégrant les différentes incertitudes liées aux ressources humaines. Parmi les approches d'utilisation de la logique floue en contexte de maintenance, on retrouve des approches développées dans des centres de génération d'énergie.

Dahal et al. [Dahal *et al.*, 1999] ont développé un algorithme génétique avec une fonction d'évaluation floue. Cette fonction floue a pour objectifs de maximiser de la fiabilité d'une centrale électrique tout en respectant les contraintes des ressources humaines. Cette fonction a été développée comme étant la combinaison d'une fonction de pénalité déterministe représentant la contrainte de la charge fixe et d'une fonction de pénalité floue pour représenter la main d'œuvre flexible. Un comparatif entre les résultats obtenus à partir de cette fonction et ceux obtenus à partir d'une fonction utilisant des données déterministes, montre que celle-ci donne de meilleurs résultats en terme de fiabilité atteinte.

Toujours, concernant la maintenance des centres de génération d'énergie, El-Sharkh et al. [El-Sharkh *et al.*, 2003] ont aussi été confrontés à des problèmes pour lesquels les modèles traditionnels, permettant d'obtenir des ordonnancements optimaux dans des conditions déterminées, donnaient des solutions inapplicables du fait des incertitudes. Des incertitudes sont présentes sur la charge (+/-5%), le coût de la main d'œuvre et la disponibilité du personnel. L'objectif étant de minimiser les coûts de production, un modèle flou, décomposé en deux sous-problèmes, a été proposé. Celui-ci permet en effet de gérer la maintenance séparément. Les solutions sont données dans des fourchettes floues de valeurs, permettant de refléter le côté incertain.

Un ordonnancement de tâche de maintenance est effectivement un environnement incertain pouvant être modélisé par la logique floue. Suivant le type de tâche considéré, des incertitudes subsistent sur des paramètres différents. Les tâches de maintenance préventive ont des dates de disponibilité et des *due-dates* incertaines alors que pour les tâches de maintenance corrective ce sont les durées qui, basées sur des estimations, sont sujettes aux incertitudes. Le fait que le traitement des différentes tâches soit réalisé par des ressources humaines présente aussi un degré d'incertitudes. La connaissance des niveaux de compétences utilisés est aussi basé sur des estimations. Un ordonnancement est alors en-

tièrement construit avec des tâches soumises, suivant leur nature, à des incertitudes sur leurs durées ou leurs différentes caractéristiques. La totalité des tâches est alors sujette à variation.

Une approche telle que la logique floue se prête donc bien à l'environnement incertain que nous souhaitons modéliser. Dans la section suivante nous présenterons, dans un premier temps, une modélisation de notre problème d'ordonnancement utilisant la logique floue, dans un environnement composé de "machines" parallèles différentes. Dans un deuxième temps, nous présenterons notre proposition d'approche de prise en compte des incertitudes, basée sur l'utilisation de la logique floue.

V.2 Approche basée sur la logique floue

En référence au paragraphe II.3.1.2, les tâches de maintenance présentes des incertitudes sur des données différentes, selon qu'elles sont de type préventive ou corrective. Nous proposons alors une modélisation, par la logique floue, qui sera dépendante du type de tâche.

V.2.1 Notations

L'utilisation de données floues nous impose de définir leurs notations. Par convention une donnée déterministe est notée v , une donnée floue sera quant à elle notée \tilde{v} . Dans le cas où la tâche j serait une tâche de maintenance préventive, ses caractéristiques seront modélisées de la façon suivante (figure V.1) :

- p_j^p : durée de base de la tâche de maintenance préventive j .
- \tilde{r}_j^p : date de disponibilité floue de la tâche de maintenance préventive j . La date de disponibilité floue de l'opération j est modélisée par un ensemble floue \tilde{r}_j ayant une fonction d'appartenance triangulaire donnée par un triplet (r_j^1, r_j^2, r_j^3) .
- \tilde{d}_j^p : due date floue de la tâche de maintenance préventive j . La due date floue de l'opération j est modélisée par un ensemble floue \tilde{d}_j ayant une fonction d'appartenance triangulaire donnée par un triplet (d_j^1, d_j^2, d_j^3) .

Si la tâche j est une tâche de maintenance corrective :

- \tilde{p}_j^c : durée de base floue de la tâche de maintenance corrective j . La durée floue de l'opération j est modélisée par un ensemble flou \tilde{p}_j ayant une fonction d'appartenance trapézoïdale donnée par un quadruplet $(p_j^{c1}, p_j^{c2}, p_j^{c2'}, p_j^{c3})$.
- r_j^c : date de disponibilité de la tâche de maintenance corrective j . Elle correspond généralement à la date à laquelle la panne est survenue.
- d_j^c : due date de la tâche j (Cette date est obtenue en fonction de la disponibilité courante de l'équipement concerné et de la disponibilité contractualisée).

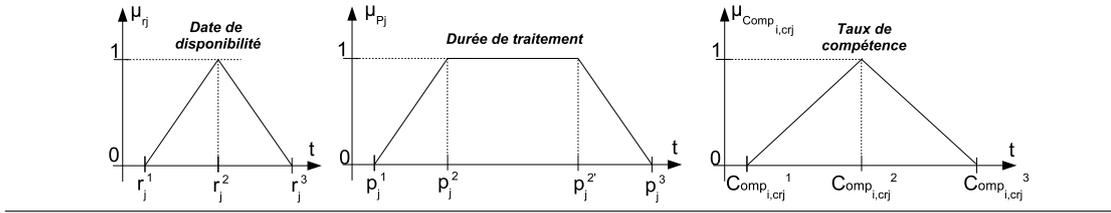


FIG. V.1 – Fonctions d'appartenance

La durée des tâches dépend effectivement de sa durée de base mais aussi de la ressource choisie pour le traitement de celle-ci.

Le service de maintenance est composé de m ressources humaines ($i = 1 \dots m$), caractérisées par un profil de compétences. Chaque ressource humaine à un niveau de qualification floue correspondant à chaque type de tâche. Les opérateurs traiteront alors les tâches plus ou moins rapidement. La durée floue d'une tâche j , par la ressource humaine i est notée par \tilde{p}_{ij} . Elle est obtenue par la fonction suivante :

$$\tilde{p}_{ij} = f \left(\begin{matrix} p_j^p \\ \tilde{p}_j^c \end{matrix}, \tilde{Comp}_{i,cr_j} \right), \forall i \in \{1, \dots, m\} \quad (V.1)$$

Où f , tout comme dans le chapitre III, est une fonction affine basée sur les données floues des durées de bases et des taux de compétence.

Dans laquelle \tilde{Comp}_{i,cr_j} est le taux de compétence floue de la ressource i dans la compétence requise pour le traitement de la tâche j . \tilde{Comp}_{i,cr_j} a une fonction d'appartenance triangulaire donnée par le triplet $(Comp_{i,cr_j}^1, Comp_{i,cr_j}^2, Comp_{i,cr_j}^3)$. L'ensemble des taux de compétences floues des ressources peut être représenté par une matrice, dans laquelle, pour chaque tâche la compétence requise peut être trouvée.

$$\begin{bmatrix} \tilde{Comp}_{1,1} & \cdots & \tilde{Comp}_{1,cr_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{Comp}_{m,1} & \cdots & \tilde{Comp}_{m,cr_n} \end{bmatrix}$$

La forme de la fonction d'appartenance de la durée de base, des dates de disponibilité et du taux de compétence sont présentées sur la figure V.1.

Pour exemple, la figure V.2 permet d'observer pour une tâche de maintenance préventive l'obtention de sa durée floue. Malgré une durée de base de type déterministe, du fait du taux de compétence floue de la ressource, la durée de la tâche sera automatiquement floue. \tilde{p}_{ij} est alors obtenue, suivant le type de tâche, telle que :

$$\tilde{p}_{ij} = \begin{cases} p_j^p \\ \tilde{p}_j^c \end{cases} * \tilde{Comp}_{i,cr_j} \quad (\text{V.2})$$

$$= \begin{cases} p_j^p \\ (p_j^{c1}, p_j^{c2}, p_j^{c3}) \end{cases} * (Comp_{i,cr_j}^1, Comp_{i,cr_j}^2, Comp_{i,cr_j}^3) \quad (\text{V.3})$$

$$= \begin{cases} (p_j^p * Comp_{i,cr_j}^1, p_j^p * Comp_{i,cr_j}^2, p_j^p * Comp_{i,cr_j}^3) \\ (p_j^{c1} * Comp_{i,cr_j}^1, p_j^{c2} * Comp_{i,cr_j}^2, p_j^{c3} * Comp_{i,cr_j}^3) \end{cases} \quad (\text{V.4})$$

$$= (p_{ij}^1, p_{ij}^2, p_{ij}^3) \quad (\text{V.5})$$

V.2.2 Modélisation de l'ordonnancement courant

La robustesse que l'on recherche ici est l'aptitude de l'ordonnancement à être peu sensible aux incertitudes pouvant survenir. On dit qu'un ordonnancement est sensible aux incertitudes si des variations, par rapport à des prévisions, peuvent avoir des répercussions sur l'évaluation de la solution obtenue, suivant le critère considéré. Dans ce problème nous avons choisi d'évaluer cette sensibilité par rapport aux retards pondérés que des variations pourraient engendrer. L'évaluation que l'on obtiendra sera donc un critère orienté vers la minimisation de la somme pondérée des retards. Celle-ci nous permettra donc évaluer et comparer plusieurs solutions pour un problème d'ordonnancement.

Pour pouvoir ainsi évaluer un ordonnancement il faut pouvoir positionner les tâches dans le temps. Cela implique la connaissance des dates de début au plus tôt des tâches. Celles-ci sont alors obtenues par le biais de l'équation V.6 puisque une tâche ne peut commencer avant sa date de disponibilité mais aussi tant que la tâche qui la précède n'est pas terminée. Pour obtenir la date de début au plus tôt floue $\tilde{E}\tilde{S}_{ij}$ d'une tâche j sur une ressource i , nous utilisons l'opérateur flou maximum $\tilde{m}\tilde{a}\tilde{x}$. La figure V.3 permet d'observer l'obtention d'une date de début au plus tôt floue.

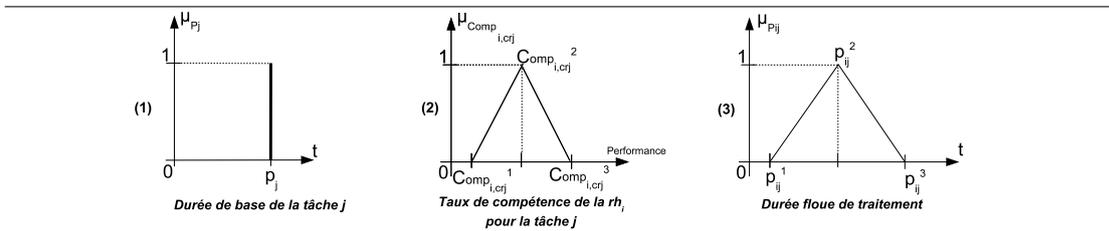


FIG. V.2 – Durée floue d'une tâche j

$$\tilde{ES}_{ij} = \tilde{\max} \left(\tilde{r}_j, \tilde{C}_{i,pred(j)} \right) \quad (V.6)$$

$$= \tilde{\max} \left((r_j^1, r_j^2, r_j^3), (C_{i,pred(j)}^1, C_{i,pred(j)}^2, C_{i,pred(j)}^3) \right) \quad (V.7)$$

$$= (\max(r_j^1, C_{i,pred(j)}^1), \max(r_j^2, C_{i,pred(j)}^2), (r_j^3, \max C_{i,pred(j)}^3)) \quad (V.8)$$

$$= (ES_j^1, ES_j^2, ES_j^3) \quad (V.9)$$

Les dates de fin au plus tôt des tâches de maintenance dépendant soit de date de disponibilité floues (pour une tâche de maintenance préventive), de leur durée floue (pour une tâche de maintenance corrective) ou encore de la date de fin floue d'une tâche précédente, sont naturellement floues.

Pour obtenir la date de fin de traitement floue $\tilde{C}_{i,j}$ (premier schéma de la figure V.4) d'une tâche j , nous utilisons des opérateurs flous. La durée floue d'une tâche ajoutée à sa date de début au plus tôt floue permet d'obtenir l'ensemble flou représentant la date de fin floue.

Nous obtenons donc la date de fin floue avec l'équation V.10 à l'aide de l'opérateur d'addition floue $\tilde{+}$.

$$\tilde{C}_{i,j} = \tilde{ES}_{ij} \tilde{+} \tilde{p}_{i,j} \quad (V.10)$$

$$= (ES_j^1, ES_j^2, ES_j^3) \tilde{+} (p_{i,j}^1, p_{i,j}^2, p_{i,j}^3) \quad (V.11)$$

$$= (ES_j^1 + p_{i,j}^1, ES_j^2 + p_{i,j}^2, ES_j^3 + p_{i,j}^3) \quad (V.12)$$

$$= (C_{i,j}^1, C_{i,j}^2, C_{i,j}^3) \quad (V.13)$$

Le positionnement de la date de fin floue de la tâche par rapport à sa *due-date* floue permet d'évaluer si celle-ci se terminera avec du retard.

Le retard d'une tâche est défini par le fait que la date de fin d'une tâche est atteinte après sa *due-date*. En d'autres termes, si le traitement d'une tâche n'est pas terminé alors

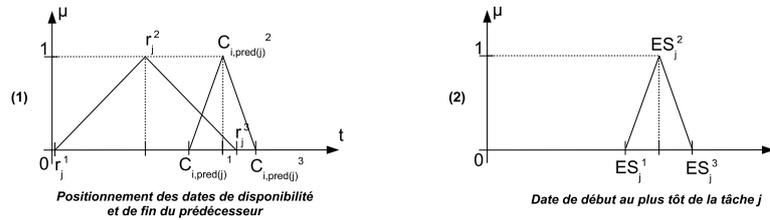
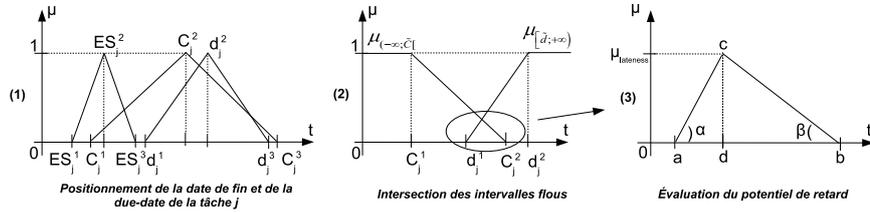


FIG. V.3 – Obtention de la date de début au plus tôt floue de la tâche j

FIG. V.4 – Évaluation potentiel de retard de la tâche j

que sa *due-date* est atteinte, celle-ci se terminera avec du retard. En logique classique, le fait qu'une tâche j ne soit pas finie, signifie que l'instant présent appartient à l'intervalle $(-\infty; C_j[$. Et si celle-ci n'est pas terminée avant l'intervalle $[d_j; +\infty)$, la tâche sera terminée en retard. L'intersection entre ces intervalles est alors signe de retard. En logique floue, la date de fin et la *due-date* d'une tâche j correspondent aux intervalles flous \tilde{C}_j et \tilde{d}_j . Les intervalles précédemment obtenus correspondent respectivement à $(-\infty; \tilde{C}_j[$ et $[\tilde{d}_j; +\infty)$. Leurs fonctions membres seront alors $\mu_{(-\infty; \tilde{C}_j[}$ et $\mu_{[\tilde{d}_j; +\infty)}$ comme on peut l'observer sur le deuxième graphique de la figure V.4 [Dubois *et al.*, 1995].

V.2.3 Évaluation de la robustesse

Pour obtenir un ordonnancement robuste après l'insertion d'une nouvelle tâche, il faut bien choisir l'emplacement dans lequel celle-ci sera insérée. La définition que nous avons retenue pour caractériser un ordonnancement robuste est celle de Billaut [Billaut *et al.*, 2005] que nous avons évoqué au chapitre II : "Un ordonnancement est *robuste* si sa performance est peu sensible à l'incertitude des données et aux aléas". Lorsqu'une tâche est insérée dans un ordonnancement, elle est le plus souvent placée entre deux tâches déjà présentes (sauf si elle est placée en début ou en fin d'ordonnancement). Ces emplacements sont appelés fenêtres d'insertions (comme présenté sur la figure III.8). Dans un problème basé sur des données déterministes, la taille de ces fenêtres est fixe. Cependant, dans le contexte des activités de maintenance, la taille de ces fenêtres peut être différente de celle prévue du fait des données incertaines. La durée de la tâche à insérer peut, elle aussi, varier. Cela signifie que l'on peut insérer une tâche dans une fenêtre, dont la durée est jugée plus grande que celle de la tâche, et que, par le biais de l'incertitude, la durée de la tâche soit, finalement, plus grande que celle de la fenêtre. Finalement, cela générerait nécessairement des retards dans le traitement d'au moins l'une des tâches de l'ordonnancement. Un ordonnancement robuste est défini comme étant peu sensible aux perturbations [Leon *et al.*, 1994].

Wu *et al.* ont développé une méthodologie pour mesurer la robustesse d'un ordonnancement et pour réaliser un ordonnancement robuste en cas d'arrêts dus à des contrôles (qualité par exemple).

Une autre mesure de la robustesse d'un ordonnancement a été définie par Chen and Muraki [Chen *et al.*, 1997] pour l'ordonnancement de lot de production. Celle-ci est utilisée pour l'ordonnancement de lot de production qui se succèdent sur des unités de production. Les durées de traitement peuvent varier. Dans ce contexte, ils utilisent la logique floue pour modéliser les dates de fin de traitement de lots et les dates de début des lots suivants. Les lots de produits peuvent avoir une durée de traitement plus longue sur une machine et le lot suivant, devant être traité sur cette machine peut arriver avant que son traitement ne soit terminé. Cela entraîne alors un conflit qui aura un impact sur la date de fin de l'ordonnancement. Une pondération est utilisée pour caractériser l'importance des conflits. Le contexte de la maintenance est différent. Les tâches ne se succèdent pas sur les différentes ressources. De plus, pour les tâches de maintenance qui se succèdent sur une même ressource, il n'y a pas de question de conflit d'occupation. Dans le contexte de la maintenance, le dépassement des *due-dates* peut être assimilé à un conflit entre la date de fin d'une tâche et sa *due-date*. Une adaptation de cette mesure est définie comme étant la moyenne des degrés de conflit sur les contraintes individuelles entre une tâche et sa contrainte de *due-date*, comme on peut l'observer sur le troisième schéma de la figure V.4, dans laquelle la fonction d'appartenance $\mu_{lateness}(t)$ montre le potentiel de retard.

La fonction d'appartenance $\mu_{lateness}(t)$ est obtenue à partir de l'équation V.14. Cependant, la robustesse représente le fait que la performance soit peu sensible aux incertitudes. Cela correspond à la complémentarité de la fonction $\mu_{lateness}(t)$ que l'on notera $\mu_{in\ time_j}(t)$.

$$\mu_{lateness_j}(t) = \max\left(\min\left\{\mu_{\tilde{C}_{i,j}(t)}, \mu_{\tilde{d}_j(t)}\right\}\right) \quad (\text{V.14})$$

La fonction d'appartenance $\mu_{in\ time_j}(t)$ est alors obtenue par l'équation V.15.

$$\mu_{in\ time_j}(t) = 1 - \mu_{lateness_j}(t) \quad (\text{V.15})$$

Étant donné que cette sensibilité aux incertitudes se répercute sur les retards pondérés et que les contraintes n'ont pas la même importance (respect des différentes *due-dates*), nous introduisons le facteur de pénalité $weight_j$ (décrit dans l'équation V.16) pour pondérer les différents conflits de l'équation V.17. Sa valeur est obtenue à partir des poids déjà évoqué au chapitre III. Sous cette forme la valeur maximum de $weight_j$ étant de 1, il permet de conserver une pondération du conflit allant jusqu'à 1. n représente l'ensemble des conflits présents dans un ordonnancement S et $R(S)$ donnera alors son niveau de robustesse. Un ordonnancement robuste aura alors un niveau de robustesse $R(S) = 1$ contrairement à un ordonnancement très sensible aux variations qui obtiendra $R(S) = 0$.

$$weight_j = w_j / \max_j(w_j) \quad (\text{V.16})$$

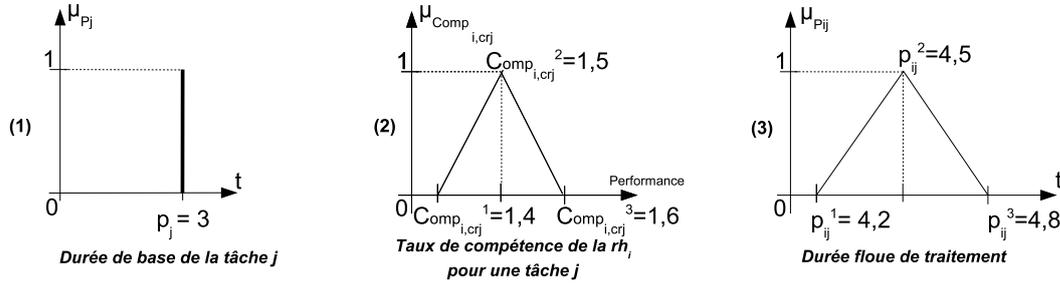


FIG. V.5 – Exemple d'obtention de la durée effective d'une tâche préventive

$$R(S) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \mu_{in\ time_j} * weight_j \quad (V.17)$$

V.2.3.1 Modèle mathématique

Sachant que seule la variable d'objectif $R(S)$ utilise des données floues, le problème multi-critère peut alors être reformulé de la sorte :

$$\min \sum_{j=1}^n U_j, \sigma(S), \sum_{j=1}^n mod_j, \max R(S),$$

De sorte que : $\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \forall i \in \{1, \dots, m\}$, et $\tilde{t}_j \geq \tilde{r}_j, \forall j \in \{1, \dots, n\}$,

avec $\tilde{T}_j = \max(O, \tilde{C}_j - \tilde{d}_j)$ et $\tilde{C}_{i,j} = \max(\tilde{r}_j, \tilde{C}_{i,pred(j)}) + \tilde{p}_{i,j}$.

V.2.3.2 Exemple

Afin d'imager ce que nous avons décrit précédemment, nous allons décrire une application simple, qui consiste à évaluer la robustesse d'un ordonnancement. Nous allons donc reprendre l'exemple de la tâche de maintenance préventive, décrite dans le paragraphe précédent, et mettre des valeurs numériques pour l'expliquer.

Il s'agit donc de la tâche j , affectée à la ressource i . La figure V.5 présente sur le premier schéma la durée de base $p_j = 3$ de cette tâche de maintenance préventive. Sa durée effective (celle que réalisera la ressource de l'exemple) est obtenue par le produit de cette durée de base et du taux de compétence de la ressource, présenté sur le deuxième schéma et défini par le triplet $\tilde{Comp}_{i,crj} = (1,4-1,5-1,6)$. La durée effective floue est alors égale à $p_{ij} = 3 * 1,4; 3 * 1,5; 3 * 1,6 = 4,2; 4,5; 4,8$.

La tâche j présentée en détail précédemment n'est pas la seule tâche affectée à la ressource

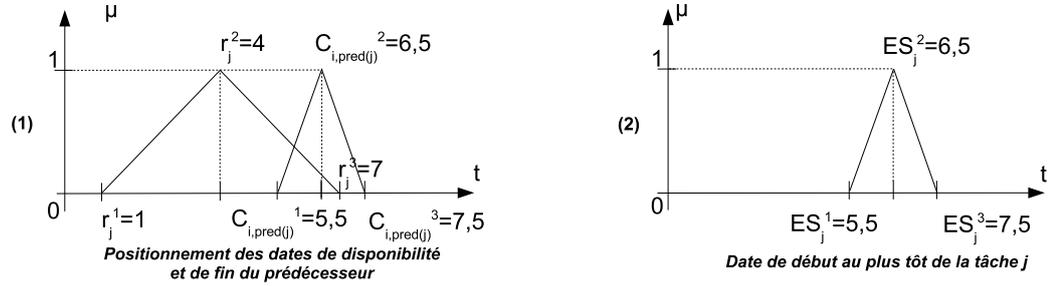


FIG. V.6 – Exemple d'obtention d'une date de début au plus tôt

i. On s'aperçoit sur le premier schéma de la figure V.6 qu'en effet, la tâche j a une tâche qui la précède. La date de fin de cette tâche (ou *completion date*) est alors le triplet $\tilde{C}_{pred(j)} = (5, 5 - 6, 5 - 7, 5)$. La date de début au plus tôt dépend alors de ce prédécesseur mais aussi de sa date de disponibilité correspondant au triplet $\tilde{r}_j = (1 - 4 - 7)$. L'opérateur flou $\tilde{m}ax$ est alors utilisé pour obtenir la date de début au plus tôt de la tâche j ($\tilde{E}S_{ij}$), présentée sur le deuxième schéma de la figure V.6.

$$\begin{aligned}\tilde{E}S_{ij} &= \tilde{m}ax(\tilde{r}_j; \tilde{C}_{i,pred(j)}) \\ \tilde{E}S_{ij} &= \tilde{m}ax((1; 4; 7); (5, 5; 6, 5; 7, 5)) \\ \tilde{E}S_{ij} &= (\tilde{m}ax(1; 5, 5), \tilde{m}ax(4; 6, 5), \tilde{m}ax(7; 7, 5)) \\ \tilde{E}S_{ij} &= (5, 5; 6, 5; 7, 5)\end{aligned}$$

Dès lors que la date de début au plus tôt de la tâche j est établie, nous pouvons obtenir sa date de fin de traitement floue C_j (*Completion date*) et en étudier la position par rapport à sa *due-date*. La date de fin présentée sur le premier schéma de la figure V.7 est obtenue en utilisant l'opérateur d'addition floue $\tilde{+}$.

$$\begin{aligned}\tilde{C}_j &= \tilde{E}S_j \tilde{+} \tilde{p}_{ij} \\ \tilde{C}_j &= (5, 5; 6, 5; 7, 5) \tilde{+} (4, 2; 4, 5; 4, 8) \\ \tilde{C}_j &= (9, 7; 11; 12, 3)\end{aligned}$$

Le deuxième graphique de la figure V.7 permet alors d'observer l'intersection entre les intervalles $(-\infty; \tilde{C}_{ij}]$ et $[\tilde{d}_j; +\infty)$, agrandis sur le troisième schéma.

Nous obtenons alors $\mu_{lateness_j} = 0,3$ (calcul détaillé dans l'annexe E). $\mu_{in\ time_j} = 1 - 0,3 = 0,7$.

Pour l'exemple $w_j = 7, w_{pred(j)} = 5$ Cette tâche ayant le niveau de pondération le plus élevé, $\max_j(w_j) = 7$ donc $weight_j = w_j / \max_j(w_j) = 7/7 = 1$. Le niveau de robustesse de cet ordonnancement S est alors obtenu par la formule suivante :

$$R(S) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \mu_{in\ time_j} * weight_j = \frac{1}{1} \sum_{j=1}^1 0,7 * 1 = 0,7.$$

Le niveau de robustesse de cet ordonnancement suivant le critère des retards pondérés est de 0,7.

V.3 Approche de résolution

Notre problème d'ordonnancement est dynamique et multi-critère. Le service de maintenance prend des engagements de disponibilité pour les équipements dont il assure la maintenance. Pour s'assurer que ses engagements soient réalistes, il doit anticiper les incertitudes et proposer une solution robuste au problème d'ordonnancement. Il doit donc aussi être proactif. Le non respect de ces engagements se traduit par des pénalités en fonction des retards pris. C'est donc par rapport au critère de la somme pondérée des retards que les solutions d'ordonnancement doivent être robuste.

Cette approche est une extension de celle que nous présentons dans le chapitre IV. La différence vient du fait que nous avons remplacé le critère de la somme pondérée des retards par la mesure de la robustesse par rapport à la somme pondérée des retards.

V.4 Validation de notre approche

Dans cette section, nous vérifions dans un premier temps que cette recherche de robustesse va bien dans le sens de la minimisation de la somme pondérée des retards. Puis nous nous assurons de la robustesse des solutions obtenues. Enfin, nous intégrons cette mesure en tant que critère dans notre approche multi-critère.

V.4.1 Mesure de robustesse et somme pondérée des retards

Lorsqu'une nouvelle tâche k est insérée dans un ordonnancement existant, la solution peut être améliorée en réalisant des modifications partielles de celui-ci. Sur la figure V.8,

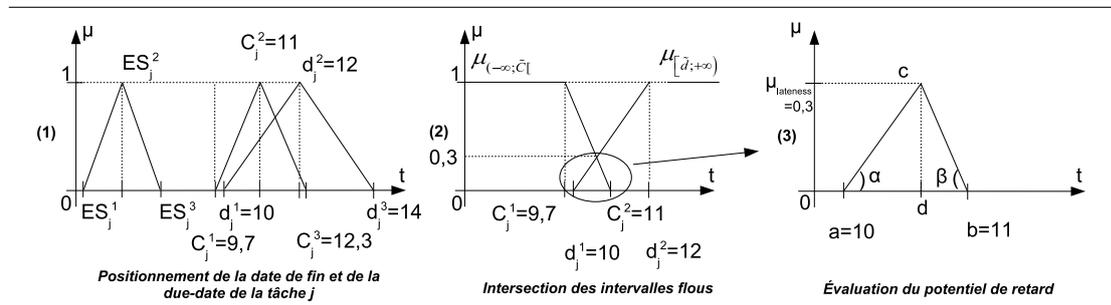
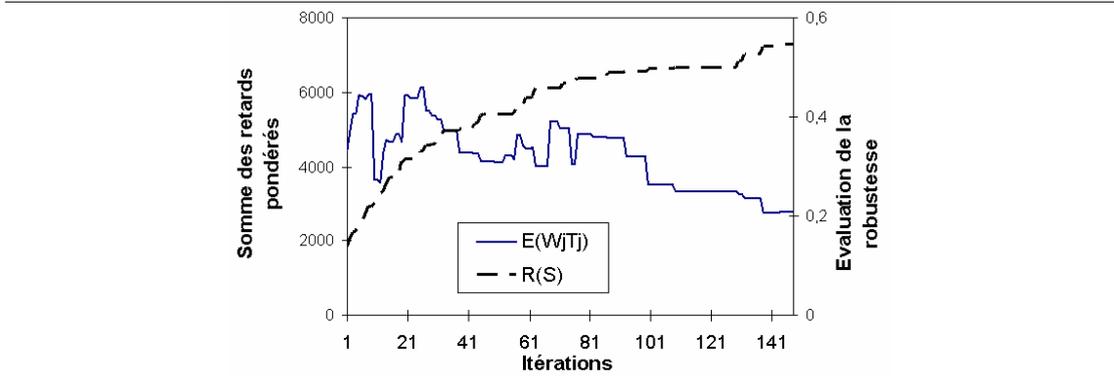


FIG. V.7 – Exemple d'obtention de $\mu_{lateness}$

FIG. V.8 – Évolution de la robustesse au cours de l'algorithme



nous montrons l'évolution de la robustesse durant le déroulement de l'amélioration. Cet exemple se déroule dans le cas d'un ordonnancement de 5 ressources humaines et 60 tâches. Sur la figure, on peut observer, pour chaque itération, l'évolution de l'évaluation de la solution courante. Le critère d'optimisation utilisé est la mesure de robustesse précédemment développée. Parallèlement, chaque évaluation de la robustesse est complétée par la valeur mesurée de la somme pondérée des retards correspondant à la solution évaluée. Cependant, étant donné que la valeur fournie par les calculs de la somme pondérée des retards est une valeur floue, nous en présentons $E(\sum w_j T_j)$ (*Expected value*) qui est la valeur (estimée) qui serait obtenue en contexte déterministe. Celle-ci est obtenue par la moyenne suivante :

- Si \tilde{C}_{ij} est un triplet :

$$w_j T_j = \frac{\max\{0; C_j^3 - d_j^1\} - \max\{0; C_j^1 - d_j^3\}}{2} \quad (\text{V.18})$$

- Si \tilde{C}_{ij} est un quadruplet :

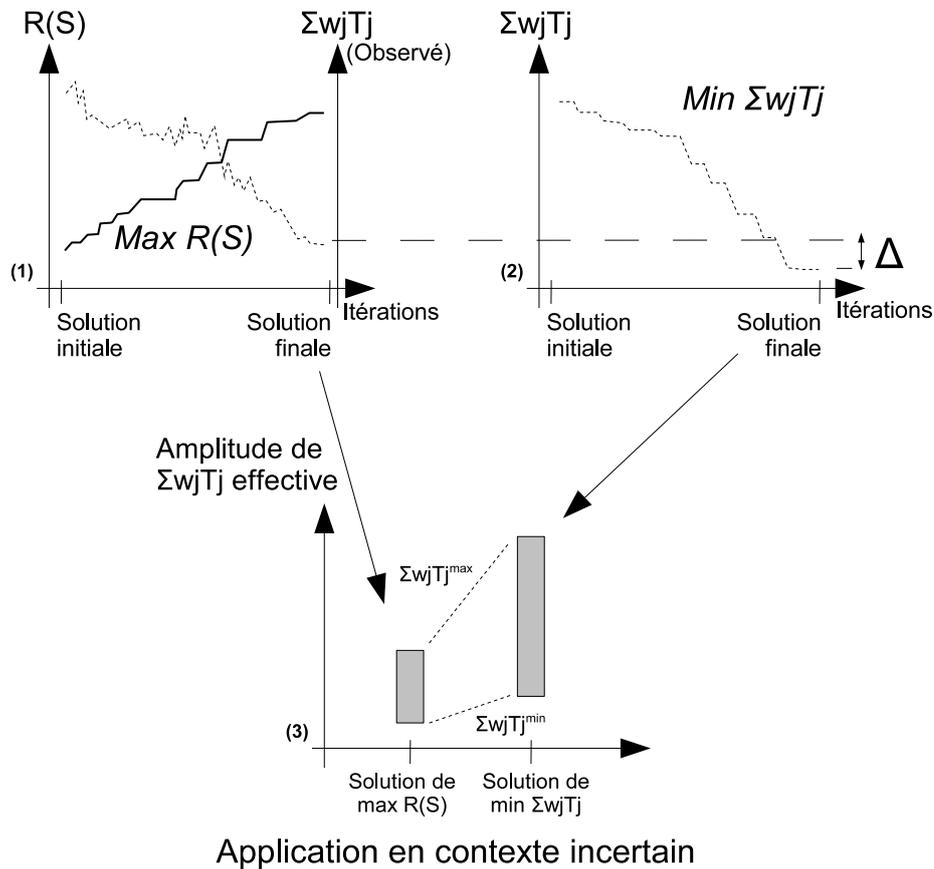
$$w_j T_j = \frac{\max\{0; C_j^4 - d_j^1\} - \max\{0; C_j^1 - d_j^3\}}{2} \quad (\text{V.19})$$

Nous pouvons ainsi observer que, quand la robustesse augmente, la somme pondérée des retards diminue. Il y a donc bien une corrélation entre le fait de maximiser $R(S)$ et minimiser aussi la somme pondérée des retards. Cependant, cette démonstration ne met pas en avant le caractère robuste de la solution obtenue au final.

V.4.2 Validation de l'approche robuste

Dans cette partie, nous mettons en évidence le caractère robuste de la solution obtenue en maximisant $R(S)$. Nous montrons que les incertitudes ont moins d'effet sur la somme pondérée des retards obtenue en maximisant $R(S)$ plutôt que lorsque l'on minimise $\sum w_j T_j$.

FIG. V.9 – Illustration du comparatif de la sensibilité aux incertitudes



V.4.2.1 Méthodologie

La figure V.9 décrit la procédure que nous allons suivre pour valider l'aspect robuste de l'approche.

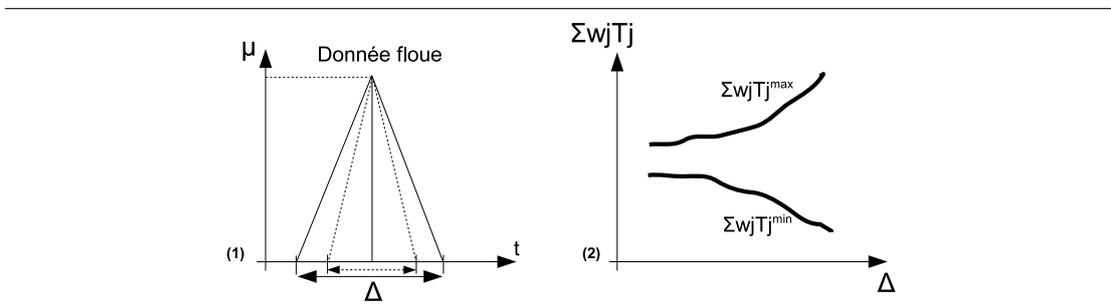
La première étape, que l'on retrouve sur le graphique 1, consiste à maximiser $R(S)$ et à relever les évaluations correspondantes de $\sum w_j T_j$. Nous n'appliquons effectivement qu'un seul critère d'optimisation. L'heuristique mono-critère d'insertion dynamique est alors appliquée avec comme fonction objectif : maximiser $R(S)$. Sur le graphique, nous pouvons observer la valeur de $R(S)$ (trait continu) à l'insertion initiale et la phase d'amélioration se terminant par la valeur de $R(S)$ de la solution finale. Parallèlement, on peut voir la somme pondérée des retards (trait pointillé qui diminue).

La deuxième étape consiste à minimiser $\sum w_j T_j$ en reprenant le même problème. Cette étape se retrouve sur le graphique 2 où l'on peut observer la somme pondérée des retards

qui diminue. Il est à noter que la valeur de la somme pondérée des retards de la solution obtenue est toujours inférieure à celle que l'on nous propose suite à la maximisation de $R(S)$. Cela correspond au Δ qui figure sur le schéma.

La troisième étape consiste à reprendre les solutions obtenues suite à ces deux optimisations et à les appliquer en contexte incertain. Cette étape figure sur le schéma 3. Cette étape consiste à injecter des incertitudes dans les ordonnancements et à calculer l'amplitude de $\sum w_j T_j$. Les données étant alors floues la somme pondérée des retards effective sera alors comprise entre $\sum w_j T_j^{min}$ et $\sum w_j T_j^{max}$.

FIG. V.10 – Variation de l'imprécision



Pour réguler les incertitudes, on joue sur la taille de la plage des valeurs que peuvent prendre les données floues (durée ou date). Cette taille est représentée par Δ sur la figure V.10. Δ représente alors l'incertitude qu'il peut y avoir sur une donnée. Lorsque l'on joue sur la valeur de Δ , il est intéressant de noter que l'on influence en toute logique l'incertitude finale qu'il y a sur l'évaluation de la solution finale. Le schéma numéro 2 montre l'impact que cela a dans notre problème sur la somme pondérée des retards. Lorsque l'on augmente Δ , $\sum w_j T_j^{max}$ croît et $\sum w_j T_j^{min}$ baisse. En augmentant les incertitudes des différentes données de l'ordonnancement, on génère donc une augmentation de la plage dans laquelle pourra se situer la somme pondérée des retards effective.

V.4.2.2 Applications numériques

Le tableau V.1 présente les résultats de l'application de cette procédure de validation. Ce comparatif est réalisé à partir des mêmes ordonnancements courants des mêmes nouvelles tâches lors de l'application des deux approches étudiées. Ces résultats sont la moyenne de dix jeux de tests différents et aléatoires.

La première colonne du tableau V.1 présente le nombre de ressources humaines. La deuxième présente le nombre de tâches de l'ordonnancement courant. La troisième colonne indique le critère d'optimisation choisi. Les deux dernières colonnes présentent les résultats de l'application, en contexte incertain, des solutions obtenues. En référence au schéma 3 de la figure V.9, nous pouvons ainsi observer dans la quatrième colonne l'am-

m	n	Critère	Contexte incertain		
			Amplitude	$\sum w_j T_j^{max}$	
2	30	$\sum w_j T_j$	1863	2131	
		$R(S)$	729	729	
	50	$\sum w_j T_j$	5701	6972	
		$R(S)$	2318	2318	
5	50	$\sum w_j T_j$	1541	2115	
		$R(S)$	299	299	
	100	$\sum w_j T_j$	8049	11012	
		$R(S)$	6122	7240	
	8	70	$\sum w_j T_j$	1412	1412
			$R(S)$	293	293
150		$\sum w_j T_j$	7890	9437	
		$R(S)$	2502	2502	

TAB. V.1 – Apport de la prise en compte de la robustesse

plitude des solutions obtenues avec l'opération $\sum w_j T_j^{max} - \sum w_j T_j^{min}$. Cette amplitude, représente la sensibilité de l'ordonnancement aux incertitudes. Elle est, sur l'ensemble des jeux de test, plus faible pour les solutions obtenues en maximisant $R(S)$. La dernière colonne présente $\sum w_j T_j^{max}$, la valeur maximale que peut avoir la somme pondérée des retards, lors de l'application des solutions en contexte incertain. Sur l'ensemble des tests, on se rend compte que la valeur obtenue de $\sum w_j T_j^{max}$ des solutions en maximisant $R(S)$ est toujours inférieure à celle obtenue en minimisant $\sum w_j T_j$.

Dans le cas du problème à 8 ressources et 150 tâches, nous pouvons observer une réduction moyenne de 60% de la zone dans laquelle peut se situer la somme pondérée des retards effective. De plus, la valeur maximale que pourra avoir la somme pondérée des retards effective est réduite, dans ce même exemple, de 74%. Cette approche proactive permet ainsi de gagner en précision, ce qui n'est pas négligeable pour le décideur, lorsqu'il prend des engagements. Cette approche nous assure aussi de minimiser de la somme pondérée des retards effective.

V.4.3 Prise en compte de l'ensemble des critères

Au cours du chapitre précédent, nous avons mis en évidence que le fait de privilégier de manière répétitive un critère lors de l'insertion avait des conséquences sur les solutions obtenues. Un ensemble de solutions de bonne qualité doit comporter, pour chacun des critères, des solutions présentant de bons résultats. Nous montrons que le fait de maximiser $R(S)$ plutôt que de minimiser $\sum w_j T_j$ n'influence pas la qualité globale de l'ensemble de solutions obtenues.

Pour mettre cela en évidence, nous comparons aux solutions de l'approche multi-critère, développée dans le chapitre précédent, les solutions de l'approche multi-critère dans laquelle nous avons remplacé la fonction objectif *minimiser* $\sum w_j T_j$ par *maximiser* $R(S)$.

Le tableau V.2 présente les résultats de l'application de ces deux approches. Ce com-

paratif est réalisé à partir des mêmes ordonnancements courants lors de l'insertion de même tâches. Ces résultats sont la moyenne de dix jeux de tests différents et aléatoires.

m	n	Selon l'approche		$\sum U_j$	σ	$\sum mod_j$
		$\sum w_j T_j$	$R(S)$			
2	30	-	0,33	11	6	0
		373	-	11	13	0
	50	-	0,17	29	4	0
		3263	-	29	2	0
5	50	-	0,38	5	426	0
		140	-	5	277	0
	100	-	0,21	34	605	0
		3262	-	33	462	0
8	70	-	0,34	21	930	0
		320	-	20	1054	0
	150	-	0,19	45	1184	0
		4128	-	47	1299	0

TAB. V.2 – Impact de la prise en compte de $R(S)$ sur les autres critères

Les deux premières colonnes de ce tableau présente la taille des ordonnancements courants. En fonction de l'approche utilisée, figure en quatrième ou en cinquième colonne la somme pondérée des retards, ou la mesure $R(S)$. L'objectif de ce comparatif est d'étudier les solutions obtenues suivant les autres critères, pour pouvoir analyser l'influence du changement de critère. Ces évaluations sont donc présentées dans les colonnes suivantes.

Concernant le nombre de tâches en retard, les résultats obtenus sont presque identiques. Par rapport à l'écart type de la charge, on note certaines différences. Par exemple, dans le cas de l'ordonnancement courant avec $m=8$ et $n=150$, il est de 1184 unités de temps pour l'approche avec la mesure de $R(S)$ et 1299 pour l'autre. Ramené à la durée effective d'une tâche qui, pour ces problèmes, peut atteindre $p_{ij}^{max}=7200*2=14400$ unités de temps, ces écarts type signifient que la charge est équilibrée puisque l'écart type est inférieur à la durée d'une tâche. Le delta de l'écart type qui est égal à $1299-1184 = 115$ unités de temps paraît donc négligeable. Les deux approches proposent des solutions obtenues avec simplement des insertions. Le fait de remplacer le critère de la somme pondérée des retards par la mesure de la robustesse développée ici n'influe donc pas sur les solutions en provoquant des dérives par rapport aux autres critères.

Nous pouvons donc intégrer la mesure de la robustesse par rapport à la somme pondérée des retards dans notre approche multi-critère. Le tableau V.3 présente les résultats de cette méthode une fois appliquée. Cet exemple a été obtenu lors de l'insertion successive de 10 nouvelles tâches dans un ordonnancement courant de 5 ressources et 50 tâches. Cinq simulations d'insertions successives ont été réalisées. Ces résultats présentent, à chaque insertion, la moyenne correspondant obtenue à travers ces cinq jeux de dix insertions.

Dans ce tableau, nous avons fait figurer pour chaque insertion : la solution *choisie* et la solution "*compromis*". Suite à chaque insertion, nous avons fait l'hypothèse que le choix du décideur se porterait sur la solution qui maximiserait la robustesse au regard

Tâche	Solution	R(S)	$\sum U_j$	σ	$\sum \text{mod}_j$
1	choisie	0,42	11	732	3
	compromis	0,36	10	312	2
2	choisie	0,39	15	735	4
	compromis	0,30	13	393	2
3	choisie	0,44	15	947	3
	compromis	0,33	12	786	1
4	choisie	0,41	19	989	1
	compromis	0,30	16	691	2
5	choisie	0,40	21	502	2
	compromis	0,22	13	164	2
6	choisie	0,41	21	462	5
	compromis	0,18	17	188	2
7	choisie	0,39	16	717	4
	compromis	0,26	13	187	2
8	choisie	0,39	18	738	3
	compromis	0,30	13	326	2
9	choisie	0,37	21	621	3
	compromis	0,32	15	145	1
10	choisie	0,32	22	930	4
	compromis	0,29	20	235	2

TAB. V.3 – Insertions dynamiques et successives de 10 tâches

de la somme pondérée des retards. La solution choisie est donc la solution qui maximise la robustesse parmi l'ensemble des solutions et qui sert d'ordonnement courant pour l'insertion suivante. La solution "compromis" est aussi extraite de l'ensemble de solutions. Elle n'est pas la plus performante suivant R(S) mais donne de bons résultats suivant chacun des critères. La deuxième colonne du tableau permet de savoir à quelle type de solution appartient l'évaluation. Les quatre dernières colonnes donnent les évaluations de chaque solution suivant les quatre critères.

Nous avons fait figurer les solutions choisies sur la figure V.11. Nous pouvons donc y observer la mesure R(S) qui a tendance à baisser avec l'augmentation de la charge. Un certain nombre de modifications sont apportées à la solution courante, pour permettre d'obtenir ce niveau de performance. Pour illustrer le fait que ce nombre de modifications reste intéressant, nous avons appliqué l'heuristique d'ordonnement statique LPT-H-EDD, présentée au chapitre III, à ce même problème d'insertion successive et dans les mêmes conditions. Cette heuristique change d'affectation entre 30 à 50 % des tâches à chaque réordonnement pour insertion. Pour les autres critères, les remarques qui peuvent alors être faites correspondent bien à celles que nous avons fait au chapitre précédent : Un nombre de tâche en retard ayant une tendance à la hausse, et un écart type semblant varier aléatoirement.

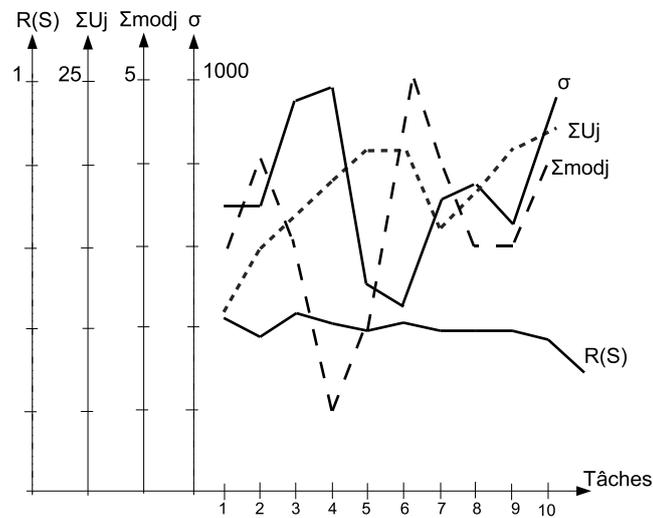


FIG. V.11 – Évolution des solutions de l'approche multi-critère

V.5 Conclusion

Le service de maintenance réalise des tâches de maintenance préventives et correctives. Les caractéristiques de ces différentes tâches sont utilisées pour réaliser l'ordonnancement des activités de maintenance. Certaines de ces caractéristiques sont déterminées par des estimations et peuvent être imprécises. Utiliser des données éloignées de la réalité comme données d'entrée d'une approche d'ordonnancement peut mener à des solutions dont l'efficacité n'est pas celle attendue. Or, le service de maintenance s'engage sur des niveaux de disponibilité pour les équipements dont il assure la maintenance. Les incertitudes ne doivent pas avoir de conséquence sur la tenue de ces engagements. La somme pondérée des retards est le critère que nous utilisons pour modéliser ces engagements. L'ordonnancement doit donc être robuste par rapport à la somme pondérée des retards. Étant donné que les incertitudes ne sont pas connue *a priori*, l'approche de résolution de ce problème d'ordonnancement doit être proactive. Nous avons pu voir que la logique floue fournissait un formalisme capable de modéliser une mesure de robustesse [Chen *et al.*, 1997].

Le problème d'ordonnancement des activités de maintenance que nous rencontrons consiste à réaliser dynamiquement, à partir d'un ordonnancement comprenant n tâches sur m ressources humaines différentes et d'une nouvelle tâche j , un nouvel ordonnancement. Certaines des données concernant les tâches sont précises et d'autres imprécises. Pour que le service de maintenance puisse tenir les engagements de disponibilité fixés, les solutions fournies doivent être robuste par rapport à la somme pondérée des retards. Les fonctions objectifs de ce problème multi-critère sont alors de maximiser la robustesse

vis à vis de ces engagements, minimiser le nombre de tâches en retard, le nombre de modification de l'ordonnancement courant lors de l'insertion mais aussi d'équilibrer la charge.

Pour évaluer la robustesse par rapport à la somme pondérée des retards, nous proposons une approche permettant de la mesurer. Cette mesure utilise la logique floue pour modéliser les données incertaines (comme par exemple un taux de compétence). Elle prend en compte, pour chaque tâche de l'ordonnancement, le dépassement potentiel des *due-dates*, ainsi qu'une pondération représentant l'importance de cette tâche.

Le problème d'ordonnancement des activités de maintenance est multi-critère. Nous proposons de réaliser une extension de l'approche dynamique et multi-critère présentée dans le chapitre précédent. La méthode d'optimisation utilisée reste la même. Nous remplaçons cependant le critère de la somme pondérée des retards par la mesure de la robustesse développée. Cette approche prend en compte les imprécisions concernant les données des tâches par anticipation. Elle est proactive et fournit des solutions robustes par rapport à la somme pondérée des retards. Cette approche propose au décideur un ensemble de solutions avec leurs évaluations suivant chacun des critères. Elle permet ainsi d'insérer dynamiquement une tâche dans un ordonnancement courant.

Pour valider l'apport de l'utilisation de la mesure de la robustesse par rapport à la somme pondérée des retards, nous avons appliqué, dans un premier temps, l'approche dynamique d'optimisation mono-critère présenté au chapitre III en maximisant la mesure de la robustesse à des solutions puis, dans un second temps, en minimisant la somme des retards pondérées. Les solutions obtenues ont été appliquées en contexte incertain et nous avons ainsi montré que l'amplitude de la somme des retards pondérée est plus faible en maximisant la robustesse. Cela signifie que la solution obtenue est moins sensible à l'incertitude des données. De plus, la valeur maximum que pourra prendre la somme pondérée des retards est elle aussi plus faible en maximisant la mesure de la robustesse développée. Nous avons intégré la mesure de la robustesse développée en tant que critère, en substitution à la somme pondérée des retards et avons comparé les résultats obtenus par cette approches multi-critère à celle présenté au chapitre précédent et ainsi pu valider le fait que ce changement de critère n'entraînait pas de détérioration des solutions obtenues suivant les autres critères.

L'approche proposée à ce problème d'ordonnancement multi-critère prend en compte quatre critères. Dans certains contextes, d'autre peuvent sembler intéressants, il est alors facile de les intégrer dans l'approche. Concernant la robustesse des solutions, seule la somme pondérée des retards a été prise en compte car elle représente les manquements du service maintenance à ses engagements.

Chapitre VI

Valorisation des compétences, un nouveau chapitre de thèse

Ce chapitre présente une synthèse des compétences professionnelles que j'ai acquises durant mes trois années de thèse. Cette synthèse a été réalisée dans le cadre de l'exercice de Valorisation des compétences, un nouveau chapitre de thèse proposé par l'association Bernard Gregory.

VI.1 Cadre général et enjeux de ma thèse

VI.1.1 Environnement et contexte local

Mes travaux de recherche se sont déroulés au Laboratoire d'Automatique de Besançon (LAB). Le LAB, dirigé par Nicolas Chaillet, regroupe environ 60 personnes, toutes activités confondues, et est une unité mixte de recherche du CNRS (UMR 6596) liée par une convention tri-partite entre l'Université de Franche-Comté, l'École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques et le CNRS. Les chercheurs sont répartis dans deux équipes de recherche : l'équipe SAMMY (Système Automatisé de Micro-manipulation et Micro-système) et l'équipe COSMI (Conception et Optimisation des Systèmes Micro-mécatroniques), dont je fais parti. L'équipe COSMI travaille autour de 2 thématiques de recherche : la *modélisation et pilotage des activités de conception* et la *Maintenance et sûreté de fonctionnement* qui compte 5 enseignants-chercheurs et 3 doctorants pilotés par Noureddine Zerhouni, mon directeur de thèse. Notre recherche est centrée sur les activités de maintenance. Les problématiques développées sont celles de la détection et du diagnostic à l'aide des réseaux de neurones, du diagnostic à l'aide du raisonnement à partir de cas et de l'ordonnancement des activités de maintenance. C'est dans cette dernière que se situent mes apports scientifiques, et il est intéressant de préciser que mon encadrant et moi-même sommes les seuls de l'équipe à faire de la recherche en ordon-

nancement. Je travaille donc sous la direction de Noureddine Zerhouni et de Christophe Varnier, tous deux enseignants à l'ENSMM (École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques) de Besançon.

VI.1.2 Implication au niveau national

Notre équipe de recherche participe activement au niveau national, dans le cadre du GDR MACS (Groupe De Recherche Modélisation, Analyse et Conduite des Systèmes dynamiques), aux travaux réalisés dans le groupe de travail MACOD (Modélisation et optimisation de la Maintenance Coopérative et Distribuée) qui regroupe des chercheurs venant de laboratoires situés dans des villes telles que Grenoble, Tarbes, Valenciennes, ... Nous participons aussi au groupe de recherche Bermudes (ordonnancement) qui regroupe aussi des chercheurs venant de laboratoires de toute la France (Clermont-Ferrand, Saint-Étienne, Tours, Belfort-Montbéliard,...). Je suis membre de ces deux groupes de travail et participe régulièrement aux réunions organisées par ces groupes.

Afin de partager mes recherches et bénéficier du regard critique d'experts externes au laboratoire, mes travaux ont été présentés au GDR de Valenciennes (Novembre 2006) dans le cadre des réunions des groupes MACOD et BERMUDES.

VI.1.3 Présentation du sujet

Au fur et à mesure que nous avançons dans la résolution des problèmes, le titre et le sujet de ma thèse évoluaient pour aboutir à l'intitulé suivant "Contribution à l'ordonnancement des activités de maintenance sous contrainte de compétence : une approche dynamique, proactive et multicritère". Alors que, dans de nombreux travaux et notamment dans les logiciels courant d'ordonnancement, les durées des tâches sont fixées à l'avance et sont supposées connues, dans ce travail les différences existantes entre les employés sont prises en considération. Une tâche n'aura donc pas la même durée d'un employé de maintenance à un autre, en fonction de leur niveau de compétence.

La gestion de compétences dans l'industrie est l'une des clefs les plus importantes pour obtenir le meilleur des moyens de production, particulièrement dans le domaine de la maintenance où les différentes connaissances et qualifications sont les outils de travail du personnel. Or, la réalisation ou la modification de planning de ressources humaines implique des contraintes différentes de celle que l'on pourrait rencontrer lors de la réalisation d'un ordonnancement de tâches sur une machine. Ce problème est alors caractérisé par plusieurs critères.

- Afin de ne pas perturber le personnel, un planning ne doit pas être modifié trop fréquemment.
- La charge de travail doit être correctement répartie et équilibrée entre le personnel,
- Un ordonnancement doit être construit de sorte que le nombre de tâches en retard soit le plus faible possible.

VI.2 Définition et évolution du sujet

VI.2.1 Choix du sujet

Le choix de ce sujet de thèse provient de différents éléments. Premièrement, il est en adéquation avec mon parcours d'étude. Venant d'un parcours d'ingénieur de "terrain", la recherche purement théorique ne me correspondait pas. Deuxièmement, le lien implicite qui existe entre un tel sujet et la réalité industrielle le rendait très intéressant à mes yeux car, évidemment, justifiable d'un point de vue économique. Ensuite, il me donnait l'opportunité de décrocher une Bourse de Doctorant Ingénieur (BDI). Ce point était tout aussi important que les précédents car d'une manière réaliste, un financement conditionne le bon déroulement d'une thèse. Cependant, cette opportunité s'est présentée alors que je venais de m'inscrire en DEA (Diplôme d'Études Approfondies). Nous y reviendrons dans la partie VI.3.7, mais j'ai donc décidé d'arrêter la formation du DEA et j'ai débuté ma thèse au mois de décembre 2004.

VI.2.2 Évolution du sujet déroulement de la thèse

A mon arrivée, mon sujet s'intitulait *Planification et affectation des activités de maintenance dans un contexte distribué*. Celui-ci tenait sur une demi-feuille A4 et sa problématique était à cheval sur trois thématiques : l'ordonnancement, les activités de maintenance et la gestion des ressources humaines.

Trois grands objectifs ont jalonné chacune de mes trois années de thèse. La première année portait sur l'état de l'art. À ce titre, j'ai réalisé une synthèse bibliographique, présenté mes futurs apports et situé mon travail dans la communauté de recherche nationale et internationale.

Ces thèmes de recherche étant très vastes et le travail de thèse devant être original et justifiable, il m'a fallu environ 10 mois de recherche bibliographique pour cibler les premiers verrous scientifiques (tel que l'affectation de tâches suivant les compétences du personnel ou la prise en compte des différences de temps de traitement suivant l'opérateur choisi) et commencer le traitement.

J'ai bénéficié d'une grande autonomie durant cette première année au cours de laquelle nous planifions régulièrement des réunions avec mon encadrant. La périodicité de ces réunions était mensuelle en première année. Cette façon de procéder me permettait de conclure, avant la réunion, les actions pour lesquelles je souhaitais présenter des résultats, ou alors, de la déclencher lorsque je ressentais la nécessité d'un échange avec mon encadrant direct. Mon encadrant direct était toujours présent et suivant sa disponibilité mon directeur de thèse était là aussi. À l'issue de ces réunions, nous avons validé les avancements, pris des décisions et/ou éclairci les zones de difficultés que je pouvais rencontrer. Mais nous prenions aussi, en commun, les orientations de recherche jusqu'à la réunion suivante.

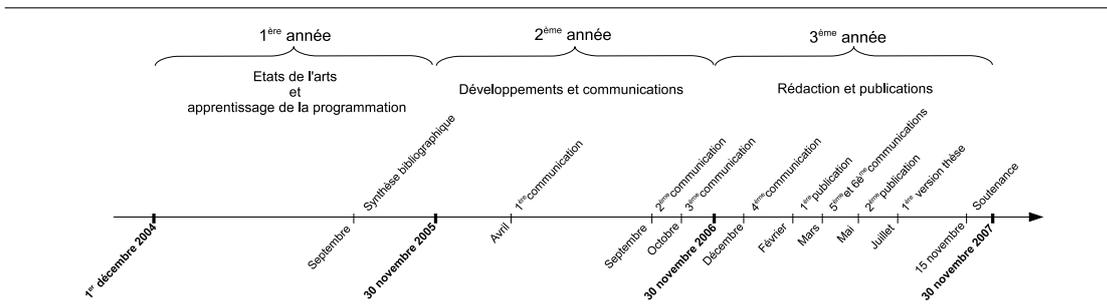


FIG. VI.1 – Phases de la thèse et soumissions pour publications

La deuxième année était consacrée aux développements afin de justifier nos apports scientifiques. Des conférences ont donc été ciblées et les dates limites de soumissions ont alors rythmé la deuxième et le début de la troisième année comme on peut le voir sur la figure VI.1. A partir du milieu de la deuxième année, et en fonction des impératifs liés aux communications, les réunions pouvaient être plus rapprochées.

Les premiers développements ont permis de répondre au problème d'ordonnancement des activités de maintenance préventive. Ces travaux ont donné lieu aux communications 1, 2. Nous avons ensuite traité les problèmes d'insertion dynamique de tâches de maintenance corrective et pris en compte les problèmes d'incertitudes à l'aide de la simulation. Ces travaux ont été publiés dans la communication 3.

Durant la troisième année, je devais terminer les développements, réaliser au moins un article de revue, et bien entendu rédiger le mémoire.

Les développements réalisés cette année-là ont permis d'améliorer les solutions d'ordonnancement suite à une insertion. L'ordonnancement réalisé est alors modifié sans être remis en cause totalement à l'aide d'une méthode d'amélioration locale. L'ensemble des travaux évoqués précédemment a alors été repris pour la réalisation de la première publication. La maintenance étant un environnement multi-critères, cet aspect a donc été pris en compte, et a permis de réaliser la quatrième communication.

Pour réaliser un ordonnancement robuste, nous avons développé une approche basée sur la logique floue. Celle-ci a donné lieu à la soumission de la cinquième communication. L'ensemble de nos approches mono-critères, a ensuite été retravaillé à partir de la logique floue et soumis dans la deuxième publication. Ils ont ensuite été déclinés suivant la problématique multi-critères pour donner lieu à notre sixième communication.

En début de troisième année, une date de soutenance provisoire a été fixée. Cela m'a permis de planifier les différentes échéances de rédaction. Ma première version relue par mon encadrant a donc été réalisée et transmise pour relecture, à mon directeur de thèse, début juillet.

Compte tenu de l'évolution des travaux et de l'approfondissement qui s'est avéré néces-

saire, en contexte non distribué, nous n'avons finalement pas apporté de contribution concernant l'aspect distribué, initialement présent dans le sujet. Cependant, l'ensemble des connaissances que j'ai acquies durant la thèse, couplées aux lectures que j'ai pu faire, m'ont permis de cerner cette problématique. Elle reste donc toujours d'actualité et fait partie des perspectives directes qui seront traitées à l'issue de la thèse.

VI.2.3 Application des travaux

Les résultats et développements réalisés peuvent mener à la réalisation d'un logiciel d'ordonnancement intégrant les ressources humaines et leurs spécificités. Les logiciels courants d'ordonnancement utilisent des durées fixes dans l'affectation de tâches, alors que la réalité industrielle impose la prise en compte des compétences du personnel et des variations possibles. De plus pour que mes développements puissent s'intégrer dans un environnement informatique existant j'ai développé, avec l'aide d'un ingénieur informaticien, une liaison via web-service avec la base de donnée d'une GMAO (Gestion de la Maintenance Assisté par Ordinateur). Le logiciel récupère les demandes d'intervention et leurs caractéristiques (deadline, type de tâche,...) ainsi que les informations concernant les ressources humaines (disponibilité, compétences,...). Les tâches sont alors affectées et ordonnancées puis une planification des tâches est alors injectée dans la base de données sous la forme d'ordres de travail. A l'issue d'une présentation de mes travaux, le responsable des services de maintenance de la Société des eaux du Maroc m'a demandé si l'application que j'avais développée était à vendre. Il est donc envisageable qu'il y ait une place sur le marché pour une application de ce type. J'ai alors transmis sa carte et sa demande à mes encadrants.

VI.2.4 Bilan financier

La recherche en ordonnancement se concrétise par le développement d'applications informatiques. Les principaux postes de frais restent donc mon salaire ainsi que l'encadrement. Pour être un peu plus précis, le tableau VI.1 présente le détail des sommes engagées et le tableau VI.2 le détail de mes frais de déplacement :

Sources de coût	durée (mois)	coût mensuel	total	financeur
1 Bourse de Doctorant Ingénieur	36	1 450€	52 200€	CNRS/Région
2 Encadrants	36	32h/mois * 45€	51 840€	ENSMM
Déplacements			3 736€	LAB/ IP / Ecole doctorale
Frais généraux et secrétariat	36	110€	3 960€	LAB
Téléphone	36	0,15h/mois * 1€	6€	ENSMM
Bureau	36	100€	3 600€	ENSMM
Ordinateur			2 000€	IP
Coût total			117 342€	

TAB. VI.1 – Bilan financier.

IP correspondant à Institut de Productique, GDR à Groupe De Recherche et GT à Groupe de Travail.

Lieu	occasion	frais
Clermont-Ferrant	GDR	125€
Paris	GDR	95€
St-Étienne	GT	127€
Troyes	Conférence	424€
Rabat (Maroc)	Conférence	1 368€
Valenciennes	GDR	117€
Trois-Rivières (Quebec)	Conférence	1 480€
Coût total		3 736 €

TAB. VI.2 – Détail de mes frais de déplacement.

N'ont pas été chiffrés ici les différents enseignements de l'école doctorale, ainsi que l'encadrement pour la réalisation de ce chapitre.

VI.3 Compétences, savoir-faire, qualités professionnelles et personnelles illustrées par des exemples

Durant ces trois années, j'ai acquis des compétences et de l'expérience sur les plans professionnels et personnels.

VI.3.1 Informatique

Sur le plan technique, j'ai notamment appris la programmation avec le langage C/C++ grâce auquel j'ai effectué la majorité de mes développements. J'ai aussi développé des compétences en gestion de flux avec le logiciel Witness. Au cours de mes développements, j'ai notamment pu coupler mes simulations d'atelier développé avec Witness avec mes programmes d'ordonnancement réalisées en C/C++ sous Borland Builder. J'ai également appris à utiliser L^AT_EX pour rédiger mes articles et ma thèse.

VI.3.2 Langue anglaise

Sur le plan linguistique, la grande majorité des publications que j'ai pu lire étaient rédigées en anglais. Cela m'a permis notamment d'améliorer mon anglais technique dans le domaine de l'ordonnancement et de la maintenance industrielle. La rédaction d'articles de conférence et de revue m'a aussi permis d'augmenter la richesse de mon vocabulaire. J'ai assez d'assurance dans la langue maintenant, pour pouvoir expliquer mon travail et avoir des discussions courantes.

VI.3.3 Enseignement

Maîtriser une technique ou des connaissances, et réussir à les transmettre à un groupe d'étudiants ne présente pas les mêmes difficultés et ne nécessite pas les mêmes compétences. De même qu'il existe des différences de difficulté entre la réalisation d'un TP (séance de Travaux Pratiques) et d'un TD (séance de Travaux Dirigés), il est plus dur de concevoir et réaliser un ensemble de séances en intégralité que de reprendre un ensemble de cours existants. De 2004 à 2007 j'ai été vacataire en informatique et gestion de production au sein de l'ENSMM (École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques) de Besançon ainsi qu'à l'Université de Franche-comté dans les Masters Mécatronique et SAPIAA (Systèmes Automatisés de Production dans les Industries Agro-Alimentaires). J'ai effectué des TP d'ordonnancement, de gestion de stocks, de programmation en langage C/C++ et des TP ainsi que des TD de simulation de flux. J'ai réalisé au total 170 heures de TP et 31 heures de TD réparties sur les trois années.

Sur le plan pédagogique, j'ai beaucoup appris puisque, notamment pour la simulation de flux, j'ai eu à passer par toutes les étapes, de la création à la mise en pratique. Une remise en cause est nécessaire pour améliorer continuellement la façon d'enseigner. L'enseignement s'apprend avec le temps et les premières séances sont toujours un peu stressantes. J'arrive à rappeler synthétiquement les connaissances indispensables à la réussite des TD ou des TP et à gérer les délais. Je reste toujours à la disposition des élèves pour répondre à leurs questions durant les heures encadrées ou non.

VI.3.4 Relationnel

Naturellement, j'entretiens de bonnes relations avec les différents membres du laboratoire. Il est toujours intéressant d'échanger des idées de manière informelle et de discuter des problèmes rencontrés par chacun. Je pense qu'il est très important d'avoir de bonnes relations avec ses collègues pour favoriser le travail de chacun. De plus, chaque doctorant perçoit de la même manière la majorité des difficultés rencontrées au cours de la thèse. La réalisation d'une thèse pouvant, par la quantité de travail et sa durée ressembler à une épreuve d'endurance, les discussions et le partage d'expériences sont alors très enrichissants. De plus, il est très important d'être ouvert aux autres, pour réussir à faire passer les messages importants, lors des cours.

VI.3.5 Persévérance

Durant ces trois années de thèse, la persévérance a été l'une des qualités qui m'a été la plus nécessaire. Je ne me laisse pas facilement décourager par un problème dont la solution ne semble pas évidente. Cela se retrouve notamment dans l'apprentissage et l'utilisation de la programmation, car il arrive que ce soit réellement difficile et long de faire fonctionner et de vérifier une solution. Par exemple, le basculement en logique floue de mes développements informatiques n'a pas été simple. A chaque étape, il fallait

être en mesure de vérifier que les résultats du programme correspondaient bien à ce que j'attendais. Et lorsque cela n'était pas le cas, il était possible de passer un nombre important d'heure sans trouver d'où venait l'incohérence. A noter que la logique floue appliquée à l'ordonnancement est peu répandue dans la littérature. On ne trouve pas de cours ou d'exercice pédagogique comme on peut en trouver pour la commande floue en automatique.

VI.3.6 Capacité de synthèse et d'organisation

J'ai réussi à mener plusieurs activités en parallèle (recherche, développement, enseignement,...) et à accéder rapidement aux informations dont j'avais besoin. J'ai donc mené dans les temps impartis les différentes actions en cours sans remettre en cause l'avancement et le déroulement de la thèse.

Par exemple, pendant ma période de rédaction de thèse, j'avais des enseignements à donner, que je devais préparer, et des réunions de travail pour notamment préparer la suite de ma thèse.

Concernant la rédaction, j'ai réalisé, en fin de première année, un gros travail de synthèse regroupant toutes les données bibliographiques lues au cours de cette année. J'ai poursuivi ce travail durant la deuxième et la troisième année et je les ai utilisées au cours de la rédaction de mon mémoire ainsi que pour la préparation des réunions de travail.

Durant l'année 2005, j'ai assuré le secrétariat de l'équipe de recherche productique. Mensuellement, des réunions étaient organisées au sein de l'équipe. Dans ce cadre, j'étais chargé de la planification des réunions, de contacter des participants, de la réalisation et de la diffusion des comptes rendus. Mes travaux ont ainsi été présentés à l'ensemble de l'équipe, tout au long de ma thèse.

Ces capacités me permettent d'être réactif face à de nouveaux problèmes. J'ai ainsi pu, par exemple, préparer un article pour une conférence avec deux semaines de délai seulement alors que j'étais déjà en train d'en finaliser un et d'en préparer un troisième.

VI.3.7 Ouverture d'esprit

Étant curieux et consciencieux, j'ai acquis de solides compétences dans des domaines qui m'étaient auparavant inconnus. Lorsque j'ai eu l'opportunité de me lancer dans cette thèse j'étais déjà diplômé ingénieur mais je n'avais pas passé de DEA. Une dérogation de DEA m'a été faite par le directeur de l'école doctorale pour pouvoir m'inscrire en thèse. Il est évident que l'année "économisée" à ne pas passer ce fameux DEA représente aussi un manque d'expérience, sur le plan scientifique, qu'il a fallu rattraper. La recherche bibliographique, que l'on découvre normalement au cours des six mois de stage de DEA, était une compétence que je n'avais jamais eu l'occasion de développer. De même, sur le plan technique, je n'avais pas réalisé de développement informatique et je n'avais que

très peu de notion en programmation. Je me suis donc investi pour combler ces lacunes en lisant des ouvrages, des articles, en suivant des cours de programmation et en posant des questions aux personnes compétentes. Cette mise à niveau m'a permis de parler le même langage que les "chercheurs en ordonnancement", de mieux cerner les difficultés du problème à résoudre et de pouvoir imaginer des solutions.

VI.4 Résultats et impact de la thèse

VI.4.1 Bilan

Du point de vue recherche, mes travaux de thèse ont fait l'objet de 6 communications internationales, dont 4 anglophones, avec actes édités (International Conference on Service Systems and Service Management (SSSM 06), Industrial Engineering and Systems Management (IESM 07),...). J'ai eu la chance de pouvoir présenter certaines de mes communications dans plusieurs congrès (notamment au Canada) et ainsi d'échanger des idées avec d'autres chercheurs.

Le fait d'effectuer des déplacements (environs trois par an) en conférence ou pour des réunions du groupe de recherche m'a permis de rencontrer de nombreuses personnes ainsi que de nouer un certain nombre de contacts. Ces échanges ont été nécessaires pour situer notre travail par rapport à la communauté ainsi que pour bénéficier du regard critique d'experts dans le domaine et externe à notre laboratoire.

D'un point de vue professionnel et personnel, ma thèse m'a énormément apporté. Elle m'a permis de bien cerner le métier d'enseignant-chercheur qui est un métier très riche, nécessitant d'être polyvalent. C'est justement cette polyvalence et cette gestion de plusieurs activités en parallèle qui le rend très intéressant à mes yeux.

L'expérience acquise en enseignement, m'a conforté sur le fait que j'aime beaucoup le contact avec les élèves, transmettre mes connaissances et répondre à leurs questions. La gestion en parallèle d'activités de recherche et de développement, qui étaient nécessaires pour la thèse, m'a paru tout aussi nécessaire d'un point de vue personnel puisque j'aime aussi être confronté à des problèmes concrets et gérer plusieurs activités en parallèle. L'apprentissage en continu est très important pour moi, et grâce à ces trois années de thèse, j'ai pu acquérir un grand nombre de compétences et de connaissances notamment en génie industriel et informatique.

VI.4.2 Perspectives

Je suis issu d'une formation d'ingénieur par alternance, donc théoriquement destiné à exercer un métier tel que responsable de projet à la sortie de l'école. Le choix de faire une thèse ne vient cependant pas d'une volonté de rester dans un univers scolaire mais bien d'élargir mon champ de compétence à la recherche, d'acquérir des connaissances

qu'il m'aurait été impossible d'acquérir en rentrant directement dans un emploi suite à ma formation et peut-être de profiter d'un tremplin pour accéder à un niveau de responsabilité différente voir plus élevée. Durant les trois années de thèse, le doctorant gère, comme on l'a évoqué précédemment, un ensemble d'actions en parallèle. "Faire une thèse" correspond donc à un projet, le doctorant peut être assimilé à un responsable de projet et non à un étudiant. La thèse est donc une expérience de travail professionnel en tant que tel, que je souhaite valoriser.

J'ai commencé à préparer mon après thèse environ 9 mois avant la soutenance. Une réflexion sur les perspectives et sur les débouchés me semblait importante. Les issues professionnelles possibles à la thèse peuvent se résumer en deux grandes familles : un retour vers le secteur privé avec une recherche d'emploi en entreprise, ou la recherche d'un poste d'enseignant chercheur.

Concernant la recherche d'emploi dans le secteur privé, le bilan des compétences acquises pendant la thèse et mes intérêts personnels me permettent de déduire qu'un poste de responsable de projets en industrialisation ou en développement de produits mais aussi de responsable méthodes correspondrait à mes compétences. En rentrant un peu plus dans le détail, je pense qu'un poste qui ferait intervenir des capacités d'innovation et d'imagination dans le but de développer ou d'innover sur des produits m'intéresserait beaucoup. J'ai un grand intérêt pour les produits dont le consommateur ou l'utilisateur final est le grand public, ce qui est dû à l'expérience que j'ai eu lorsque je travaillais chez Stanley Tools. Cependant, travailler pour fournir des services à d'autres entreprises m'intéresserait aussi énormément. C'est le style de travail qui permet d'élargir et d'enrichir très rapidement sa culture personnelle et professionnelle.

Concernant la recherche d'emploi dans le secteur public, un poste d'enseignant chercheur m'intéresserait réellement. Comme je l'ai évoqué précédemment, c'est un métier complet et varié. Cependant, les postes sont rares et chers. Ma thèse, se terminant au mois de novembre, me permet de passer l'étape des qualifications pour l'exercice de cette fonction. Il faudra attendre ensuite le mois de mars 2008 pour pouvoir postuler à des postes pour la rentrée de septembre 2008. Il faut donc que je trouve une activité pour cette période. Deux possibilités, sont offertes : trouver un emploi d'attaché temporaire de l'enseignement et de la recherche (ATER) ou trouver un post-doctorat (post-doc). La principale différence réside dans le fait qu'un post-doc entraînera forcément un changement de laboratoire (le Canada a même été évoqué avec mes encadrants). Cela me permettrait d'ajouter une touche internationale supplémentaire à mon CV, de le compléter au niveau du volume des publications et d'agrandir le réseau relationnel. De plus, ayant déjà effectué un certain volume horaire d'enseignement, le post-doc me permettrait d'étendre ma recherche et de bénéficier du regard d'experts d'un autre laboratoire.

Dans tous les cas, que je choisisse le secteur public ou privé, il est indispensable que je fasse des dossiers d'ATER et une recherche de post-doc pour essayer de m'assurer un revenu sur cette période. Ayant la chance de m'intéresser à plusieurs débouchés, avoir le choix grâce à une anticipation me permet bien entendu de sélectionner l'opportunité

qui, au final, me semblera la plus intéressante.

Par rapport à mes travaux de recherche, l'après thèse a été évoquée avec mon encadrant. Nous avons identifié les perspectives en recherche de ce travail ainsi que les apports scientifiques obtenus et restant à valoriser. Une extension de mon travail peut donc être envisagée par rapport à l'ordonnancement des activités de maintenance en contexte distribué. Cela correspond à gérer des activités pour lesquelles les ressources et les tâches ne sont pas nécessairement localisées sur le même site de production. Avoir des perspectives sur ma thématique de recherche dans mon laboratoire m'assure du soutien de mes encadrants actuels dans la réalisation de futur travaux communs.

Pour préparer mon après thèse, j'ai très tôt mis à jour mon CV. Je l'ai mis en ligne sur le site de recherche d'emploi "monster.fr" et j'ai pu constater que mon profil intéressait les recruteurs. J'ai notamment eu en milieu de troisième année un contact direct pour un poste basé en Allemagne. De plus ce site permet de savoir combien de recruteurs ont consulté le CV et de se situer par rapport au marché de l'emploi. Le site internet de notre laboratoire étant peu fonctionnel, il me fallait un moyen d'exposer mon travail de recherche, en quelque sorte une vitrine de communication. J'ai alors créé un site internet¹ pour exposer ma recherche de post-doc et mettre en avant mes publications et mon CV.

¹<http://fmarmier.free.fr/>

Conclusion générale

Dans le contexte de mondialisation actuel, les entreprises doivent être de plus en plus compétitives. Le fonctionnement des moyens de production étant très optimisé, de nos jours, il est nécessaire de trouver d'autres leviers d'amélioration. Les services de maintenance interviennent pour maintenir ou remettre en état de bon fonctionnement les équipements. Ces services sont composés de ressources humaines et ce sont elles qui réalisent ces interventions. L'affectation et l'ordonnancement des activités de maintenance représentent donc un moyen d'action directe sur la performance des entreprises.

Pour réaliser ce travail, nous avons formulé des hypothèses générales définissant le contour du problème abordé. Seules les ressources humaines ont été prises en compte. Les ressources telles que les pièces détachées ou encore l'outillage sont supposés disponibles et en quantité illimitée sur les lieux des interventions. Les déplacements sur les lieux des interventions sont considérés comme compris dans la durée des tâches. On suppose que les différents équipements maintenus se trouvent sur un même site et donc que les durées ne sont pas influencées par l'ordre de traitement des tâches. Nous avons aussi supposé que chaque tâche ne nécessitait pour être traitée qu'une seule ressource et que ces tâches n'étaient pas sécables. Les ressources humaines sont supposées toujours présentes.

Cette thèse est organisée en deux parties. La première partie est un état de l'art portant sur les activités de maintenance et l'ordonnancement de ces activités. Cet état de l'art se trouve dans les deux premiers chapitres. La deuxième partie présente les contributions scientifiques. Elle est organisée à travers les trois chapitres suivants et comporte les différents apports de notre travail.

État de l'art

La maintenance est une composante qui influence activement les performances de l'entreprise. Pour faire face à cette responsabilité, la maintenance se modernise. Celle-ci permet non seulement l'identification réactive des éléments défaillants, mais aussi la prévision des pannes. Le service de maintenance intervient donc pour remettre en état de bon fonctionnement les équipements. Il agit alors pour corriger ce changement d'état. Mais ils participent aussi à la prévention des défaillances, avant que l'équipement ne quitte son état de bon fonctionnement. De ces deux politiques d'interventions, découle deux types de tâches de maintenance : les tâches de maintenance préventive et les tâches de maintenance corrective [AFNOR, 2001]. La principale différence existant entre ces tâches

est que les tâches préventives sont connues et que l'on sait quand elles doivent avoir lieu. Les tâches correctives, quant à elles, sont requises par des événements imprévisibles et la connaissance que l'on en a dépend d'un diagnostic. Ces tâches ont cependant un point commun : elles requièrent des compétences particulières pour les traiter.

Nous présentons les différentes formes et organisations de la maintenance que l'on peut rencontrer dans les entreprises. Nous pouvons ainsi situer le service maintenance dans l'entreprise et de comprendre l'importance de son action. Il ressort donc de cette étude que les ressources humaines sont plus que jamais acteur de l'efficacité du service et qu'une organisation performante de leurs activités de travail, prenant en compte leurs différences, peut permettre d'accroître la compétitivité des entreprises.

La gestion de l'activité de chacun des membres du service de maintenance peut permettre d'augmenter le nombre de tâches réalisées sur une même période. Cette augmentation de "productivité" de la maintenance se traduit alors par une amélioration de la disponibilité des équipements. En effet, le service de maintenance s'engage sur des disponibilités [Francastel, 2001], pour les différents équipements dont il a la charge. Pour piloter ses activités, le service de maintenance s'appuiera donc notamment sur la comparaison entre les différents engagements pris, et les taux de disponibilité courant.

L'une des problématiques, rencontrées par les services de maintenance, est alors l'affectation et l'ordonnancement des tâches de maintenance aux ressources humaines.

La notion de compétence est la capacité permettant d'exercer convenablement une fonction ou une activité. Les compétences influent sur la durée des tâches. La durée d'une tâche n'est alors plus une donnée, mais une variable dépendant de la ressource qui est en charge de son traitement. La réalisation d'un ordonnancement de tâches de maintenance, à partir de tâches dont les durées seront systématiquement soit plus courtes soit plus longues sera remis régulièrement en cause et modifié. En effet, si une tâche est plus courte, cela entraînera une perte de productivité du service car l'opérateur de maintenance aurait pu éventuellement réaliser d'autres tâches. Cependant, si la tâche nécessite plus de temps pour son traitement, ce sont toutes les tâches suivantes qui seront décalées dans le temps.

Il en découle que les ressources humaines, avec leurs différences de niveaux de compétences, ne sont que très peu prises en compte dans les approches d'ordonnancement [Letouzey, 2001]. Les ressources humaines sont le plus souvent du personnel qualifié qui utilise ses compétences tout au long de ses activités. Ce manque de prise en compte semble alors d'autant plus important qu'il influe directement sur la durée des tâches. Nos recherches bibliographiques sur les différentes façons de réaliser un ordonnancement nous a aussi permis de déterminer que, suivant les caractéristiques des tâches de maintenance, les approches d'ordonnancement utilisées doivent être différentes.

Le décideur doit cependant être en mesure de transmettre au personnel un ensemble d'ordres de travail réalistes et tenant compte des spécificités du domaine de la maintenance. La problématique de l'ordonnancement des activités de maintenance, est rendu

encore plus complexe puisque les dates d'arrivée des tâches peuvent être connues pour un horizon donné ou non le problème est alors *déterministe* ou *stochastique*. L'approche peut être *statique* ou *dynamique*. Les données de ces tâches peuvent être *précises* ou *imprécises* (durées, date pour laquelle elle doit être terminée,...). L'approche doit donc être *proactive* et fournir des solutions *robustes*. Le nombre de critères suivant lesquels les solutions du problème seront évaluées complexifie encore le problème. Le contexte de la maintenance entraîne un problème *multi-critère*. Ces différents éléments reflètent la difficulté de réaliser une approche de résolution pour ce problème. Ils reflètent aussi le fait que le nombre de sous-problèmes est très important.

Chaque tâche doit être prise en compte, affectée à une ressource et ordonnancée pour être traitée à une date déterminée. La résolution du problème d'ordonnancement des activités de maintenance nous conduira donc à trouver la bonne ressource et la bonne date de traitement pour chacune des tâches. Mais ce problème est composé d'un ensemble de sous problèmes différents d'ordonnancement.

Contributions scientifiques

Des politiques d'interventions préventive et corrective, il découle deux types de tâches de maintenance : les tâches de maintenance préventive et les tâches de maintenance corrective. Ces deux types de tâches doivent être intégrées à l'ordonnancement. Dans un premier temps, nous proposons une approche de résolution qui consiste à affecter et ordonnancer des tâches de maintenance préventive et corrective avec des date de disponibilités différentes, sur des ressources différentes avec pour objectif de minimiser la somme pondérée des retards.

Le problème d'ordonnancement des activités de maintenance est un problème multi-critère. Notre problème est donc étendu au multi-critère et nous apportons une seconde approche de résolution à un problème d'affectation et d'ordonnancement dynamique et multi-critère des activités de maintenance.

Le contexte de la maintenance industrielle est un contexte incertain. Nous étendons alors ce problème au contexte incertain et nous proposons une troisième approche de résolution pour un problème multi-critère d'affectation et d'ordonnancement dynamique et multi-critère des activités de maintenance en contexte incertain.

1. Approche de résolution dynamique pour un problème mono-critère d'affectation et d'ordonnancement des activités de maintenance

Les tâches de maintenance préventive sont connues pour un horizon déterminé. Nous proposons une approche de résolution statique pour les affecter et les ordonnancer. Les tâches de maintenance correctives, quant à elles, sont réalisées suite à des événements aléatoires. Leurs données sont connues grâce au diagnostic et les équipements sont disponibles immédiatement après. Pour ne pas remettre complètement en cause l'ordonnancement courant, les tâches de maintenance correctives doivent être affectées et ordonnancées dynamique-

ment. Nous proposons une heuristique d'insertion dynamique. Cette approche utilise la notion de fenêtre d'insertion, ainsi que des algorithmes de parcours de graphes pour évaluer les retards potentiels. Pour améliorer la solution obtenue suite à l'insertion d'une tâche, nous avons proposé une approche d'amélioration par modifications partielles de l'ordonnancement. Cette heuristique est basée sur la méthode kangourou.

Ces algorithmes d'ordonnancement sont différents et adaptés aux types de tâches de maintenance. Ces approches sont alors complémentaires car les deux types d'activités de maintenance doivent être prises en compte dans la réalité industrielle. L'état de l'art montre que cette problématique n'est pas uniquement liée au contexte de la maintenance, mais se retrouve plus généralement dans une problématique d'affectation et d'ordonnancement d'activités de service.

2. Approche de résolution dynamique pour un problème multi-critère d'affectation et d'ordonnancement des activités de maintenance

Quatre critères ont été pris en compte dans une telle approche. Deux sont liés aux tâches elle-mêmes, il s'agit de la somme pondérée des retards et du nombre de tâches en retard. Deux autres sont liés aux ressources humaines, puisqu'il s'agit de l'équilibrage de la charge et du nombre de changements d'affectations réalisés sur un ordonnancement. Le problème ainsi reformulé de manière multi-critère ne peut être résolu avec des approches mono-critères telles que celles que nous avons proposé initialement.

L'approche proposée est une extension au multi-critère de l'approche dynamique précédente. Elle fournit au décideur un ensemble de solutions au problème d'ordonnancement ainsi que l'évaluation de chacune de ces solutions suivant chacun des critères évoqués. Nous proposons ainsi une adaptation de la méthode du kangourou au multi-critère. L'ensemble final de solutions fournies au décideur est un ensemble de solution pareto efficace.

3. Approche de résolution dynamique pour un problème multi-critère d'affectation et d'ordonnancement des activités de maintenance en contexte incertain

Certaines données présentent des imprécisions qu'il est important de prendre en compte. Utiliser des données pouvant varier comme données d'entrée d'une approche d'ordonnancement, peut mener à des solutions dont l'efficacité effective s'éloigne de celle projetée.

Nous avons alors mis en évidence la nécessité d'anticiper et de prendre en compte les différentes incertitudes existantes dans un ordonnancement lorsque le décideur s'engage, sur des niveaux disponibilité à maintenir. Une dérive par rapport à ces engagements engendre des pénalités, que l'on retrouve dans le critère de la somme pondérée des retards. Pour que les solutions proposées, une fois appliquée, aient les résultats escomptés suivant ce critère, les incertitudes doivent alors être anticipées. Une réponse que nous donnons est le développement d'une mesure de la robustesse des ordonnancements suivant le

critère de la somme pondérée des retards. Cette mesure utilise la logique floue pour modéliser les données qui ne sont pas précises car estimées (comme par exemple un taux de compétence). La mesure de la robustesse est obtenue en prenant en compte, pour chaque tâche de l'ordonnancement, le dépassement potentiel des *due-dates*.

En intégrant cette mesure, en substitution au critère de la somme pondérée des retards, à l'approche dynamique et multi-critère, nous proposons une approche proactive. Cette approche anticipe les incertitudes et propose des solutions robustes par rapport à la somme pondérée des retards. Elle propose au décideur un ensemble de solutions avec leurs évaluations suivant chacun des critères.

Perspective de ce travail

■ Une autre approche multi-critère

Les algorithmes génétiques sont bien adaptés à l'évaluation de problèmes multi-critères et à la réalisation de recherches de valeurs optimales selon plusieurs objectifs simultanés [Dhaenens *et al.*, 2000]. Ils ont aussi le gros avantage de pouvoir être appliqués dans un grand nombre de domaines de recherche de solution, pour lesquels il n'est pas nécessaire d'avoir la solution optimale, qui prendrait par exemple trop de temps et de ressources pour être calculée (ou tout simplement si personne n'est capable de la trouver de manière théorique). De plus ce type d'approche est utilisé dans de plus en plus de travaux de recherche multi-objectifs. Il pourrait ainsi être intéressant de comparer les résultats que l'on obtiendrait à l'aide d'un algorithme génétique avec l'approche multi-critère que nous avons présenté dans cette thèse.

■ Compléments sur les ressources

Tout au long de cette thèse, nous nous sommes intéressé uniquement à l'ordonnancement des ressources humaines. Les ressources telles que les pièces de rechanges ou encore l'outillage ont été supposées disponibles et en quantité illimitée sur les lieux des interventions. Cependant, les activités de maintenance requièrent régulièrement des pièces de rechange qui peuvent ne pas être en stock pour des raisons de coût de stock ou de mauvaise organisation. Smidt-Destombes *et al.* s'intéressent à cette problématique de remplacement de pièces détachées suite à des pannes et prennent en compte le fait qu'après avoir remplacé la pièce défectueuse, l'opérateur de maintenance la réparera [de Smidt-Destombes *et al.*, 2006]. Le niveau de stock est suivi afin de le minimiser sans générer de rupture. la notion de "Kit d'intervention" introduite par Kaffel [Kaffel, 2001] comprend non seulement les consommables et les pièces de rechanges mais aussi l'outillage que le personnel de maintenance emmène avec lui lorsqu'il intervient. Tout l'outillage n'est cependant pas déplaçable. Des machines telles que des perceuses à colonnes ou encore des rectifieuses peuvent être nécessaires dans certains cas. Une autre problématique concernant la gestion de l'outillage, déplaçable ou non, en quantité limitée peut alors être introduite. Il serait alors intéressant d'intégrer les contraintes de pièces détachées et d'outillage.

Nous avons aussi fixé que le nombre de ressources par intervention était limité à une ressource. Cependant, dans la réalité, il arrive que certaines opérations nécessitent plusieurs

ressources soit pour des questions de manipulation d'objets lourds ou encombrants, soit pour effectuer des tests pendant qu'un autre opérateur effectue des réglages ou encore pour accélérer le traitement de certaines tâches. C'est le cas de Ruiz-Torres *et al.* [Ruiz-Torres *et al.*, 2007] qui, dans un contexte de machines parallèles, utilisent une deuxième ressource pour minimiser le nombre de tâches en retard.

■ Prise en compte du contexte distribué

Une autre hypothèse que nous avons formulé concernait les déplacements à effectuer par les ressources et l'espacement géographique des différents lieux d'intervention. Au cours de cette thèse, nous avons considéré que les déplacements sur les lieux des interventions étaient compris dans la durée des tâches. On a supposé que les différents équipements maintenus se trouvent sur un même site et donc que les durées n'étaient pas influencées par l'ordre de traitement des tâches.

À l'heure actuelle, de plus en plus d'entreprises sous-traitent la fonction maintenance ; ce qui impose une organisation du service de maintenance quelque peu différente. Ainsi, on trouve de plus en plus de services de maintenance utilisant des centres de télémaintenance pour assurer un suivi en temps réel de l'état des équipements à maintenir. De nouvelles données dans un tel contexte apparaissent. Les sites de production à maintenir ne sont pas nécessairement tous dans un même lieu géographique ; des informations permettant de diagnostiquer les pannes peuvent être obtenues à distance ; etc. Ainsi, la planification du travail à réaliser s'en trouve modifiée.

La principale perspective de ce travail est donc l'extension au contexte distribué des approches réalisées. La prise en compte de la localisation des ressources est une piste de travail très intéressante. Tang *et al.* [Tang *et al.*, 2007] ont ainsi étudié le problème d'un technicien de maintenance qui doit effectuer des tâches de maintenance préventive sur différents sites.

■ Développement de l'aspect coopératif

Un autre aspect à approfondir consisterait à prendre en compte cet éloignement à travers des ordonnancements distribués. Différentes unités de maintenance distantes utilisent des ordonnancements distincts. Il est alors possible d'imaginer le cas où l'une de ces entités ait une charge trop importante. Dans le cas où la charge serait faible dans d'autres unités, celle-ci pourrait mettre à disposition des ressources. Les ordonnancements communiqueraient et généreraient ainsi des transferts de ressources ou une mutualisation des ressources à partir d'un transfert de tâches d'une unité vers une autre, pour globalement équilibrer la charge, minimiser la somme pondérée des retards...

La maintenance se modernise à travers le développement de la e-maintenance. Celle-ci permet de mettre des outils intelligents à la disposition du personnel situé à distance (Raisonnement À Partir de Cas par exemple). Cela permet aussi à ces ressources de bénéficier d'expertises à travers l'assistance à distance des intervenants. L'intégration de cette évolution de la maintenance à notre problématique d'ordonnancement débouche sur de nouveaux problèmes. Dans lesquels les ressources entrent en jeu non plus uniquement

sur les lieux de l'intervention, mais aussi en support à distance.

Annexe A

Application de l'heuristique d'affectation

Dans cette annexe, nous allons présenter les données d'un exemple simple qui nous permettra d'illustrer les méthodes présentées. Nous allons dans un premier temps présenter les ressources du service de maintenance pris en compte dans l'exemple. Dans un second temps nous présenterons les tâches dont elles devront assumer la charge.

A.1 Les ressources utilisées

Pour cet exemple simple, nous prendrons le cas d'un atelier de maintenance composé de deux ressources humaines. Chaque ressource humaine dispose de deux compétences particulières et nécessaires pour les activités de maintenance exercées au sein de l'atelier notée compétence 1 et compétence 2. Pour chaque compétences ces ressources possède des niveaux différents. Chacune d'entre elles est spécialisée dans l'une des compétences en particulier. C'est à dire qu'elles sont très performantes dans une discipline et moins efficaces dans l'autre bien qu'elles puissent tout de même intervenir du fait de leur polyvalence.

La matrice A.1 présente les niveaux de compétence de chacune des ressources dans les deux compétences utilisées pour l'exemple.

$$\begin{array}{l} RH_1 \\ RH_2 \end{array} \begin{array}{cc} \begin{array}{c} Comp_1 \\ Comp_2 \end{array} & \begin{array}{c} Comp_2 \\ Comp_1 \end{array} \\ \left[\begin{array}{cc} 1,4 & 1,8 \\ 1,9 & 1,2 \end{array} \right] \end{array} \quad (A.1)$$

A.2 Les tâches à traiter

Les ressources devront traiter des tâches de maintenance réparties dans deux spécialités. Les deux ressources sont compétentes pour réaliser chacune des tâches mais les temps de traitement d'une tâche donnée seront différents suivant la ressource employée. Chacune des tâches est caractérisée par un temps de base qui sera multiplié par le taux de compétence de la ressource choisie pour obtenir le temps de traitement réel de celle-ci (suivant la fonction affine III.1). De plus, chaque tâche dispose d'une date de disponibilité ainsi que d'une date de fin requise. Toutes les tâches doivent être traitées, même si celles-ci doivent se terminer avec un retard par rapport à la date de fin fixée.

Les tâches de maintenance préventives sont connues. En début de période, l'ensemble de ces tâches est ordonnancé sur l'horizon considéré. Le tableau A.1 suivant présente l'ensemble des tâches de maintenance préventives qui seront ordonnancées dès le début de l'exemple. Les durées et les dates sont exprimées en unité de temps.

TAB. A.1 – Données concernant les tâches de maintenance préventive.

N°	p_j	r_j	d_j		Compétence requis	w_j	Durée		$\frac{\max(p_{ij})}{w_j}$
			faible charge	forte charge			mini	maxi	
1	2	1	4	3	1	7	2,8	3,8	0,54
2	3	3	16	9	2	9	3,6	5,4	0,6
3	6	1	8	6	1	4	8,4	11,4	2,85
4	7	2	17	12	2	9	8,4	12,6	1,42
5	9	4	19	13	2	4	10,8	16,2	4,05
6	0,5	18	32	25	1	12	0,7	0,95	0,08

L'ensemble des tâches de maintenance préventive, devant être traité au cours de la période débutant, est ordonnancé et affecté dès le début de celle-ci. Elles sont donc affectées de manière statique à l'aide de l'algorithme *ECT* ou des heuristiques développées.

A.3 Mise en oeuvre de l'algorithme ECT

Cet algorithme débute par le tri des tâches suivant la règle LPT prenant en compte les durées potentielles maximales de celles-ci. Ces durées que l'on retrouve dans le tableau A.1 sont le produit de la durée de base et du taux de compétence de la ressource la moins performante, pour ce type de tâche. Nous obtenons alors la liste triée suivante : 5-4-3-2-1-6.

En prenant les tâches dans l'ordre obtenue, le déroulement de l'algorithme ECT présente alors les étapes suivantes :

L'ordonnancement alors obtenu (présenté dans la table A.2) affecte les tâches 4-3 à la ressource humaine 1 et les tâches 5-2-1-6 à la ressource humaine 2. Comme nous pouvons l'observer sur la figure A.1, la durée totale de celui-ci (C_{max}) avec l'algorithme *ECT* est

TAB. A.2 – Algorithme ECT

Etape	\sum durée des tâches affectées à RH_1	\sum durée des tâches affectées à RH_2
Affectation de j_5 à RH_2	0	10,8
Affectation de j_4 à RH_1	12,6	10,8
Affectation de j_3 à RH_1	21	10,8
Affectation de j_2 à RH_2	21	14,4
Affectation de j_1 à RH_2	21	18,2
Affectation de j_6 à RH_2	21	20,15
C_{max}	21	

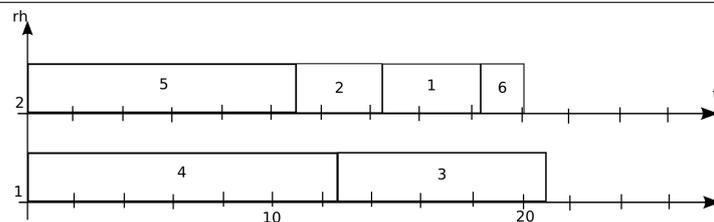


FIG. A.1 – Ordonnement ECT

alors de 21 unités de temps.

Nous allons maintenant présenter l'approche que nous avons développée pour résoudre ce même problème.

A.4 Mise en oeuvre de l'heuristique LPT-H

Au cours de cette partie nous allons comparer les résultats obtenus suivant les algorithmes présentés à la partie III.1.2. Ce comparatif s'effectue entre l'algorithme ECT (Earliest Completion Time) et l'heuristique développée par rapport au C_{max} .

Pour l'exemple, le calcul de la borne inférieure donne $BI = 17,35$.

Les tâches sont aussi triées selon la règle LPT avant d'être ordonnancées, elles sont donc triées : 5-4-3-2-1-6.

On peut observer dans la table A.3 qu'au cours de l'algorithme, certaines tâches sont reculées dans la liste. Cela permet d'attendre avant d'affecter la tâche et de proposer une affectation plus efficace. L'ordonnement alors obtenu affecte les tâches 3-1-6-2 à la ressource humaine 1 et les tâches 5-4 à la ressource humaine 2. La durée totale de l'ordonnement ainsi réalisé est de 19,2 unité de temps, comme nous pouvons le remarquer sur la figure A.2.

TAB. A.3 – Algorithme LPT-H

Etape	\sum durée des tâches affectées à RH_1	\sum durée des tâches affectées à RH_2
Affectation de j_5 à RH_2	0	10,8
Recul de j_4 dans la liste		
Affectation de j_3 à RH_1	8,4	10,8
Affectation de j_4 à RH_2	8,4	19,2
Recul de j_2 dans la liste		
Affectation de j_1 à RH_1	11,2	19,2
Recul de j_2 dans la liste		
Affectation de j_6 à RH_1	11,9	19,2
Affectation de j_2 à RH_1	17,3	19,2
C_{max}		19,2

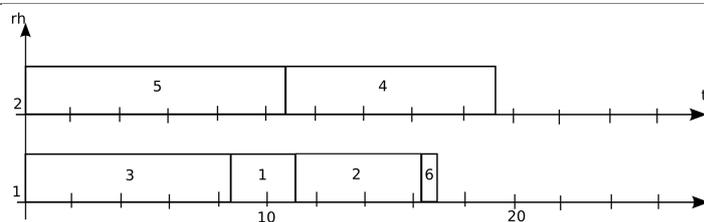


FIG. A.2 – Affectation avec l'heuristique LPT-H

A.5 Synthèse sur l'exemple

Nous avons présenté dans cette partie un exemple d'affectation de tâche de maintenance préventive. Le tableau A.4 présente les résultats obtenus précédemment.

TAB. A.4 – Tableau récapitulatif de l'affectation

Etape	C_{max}
<i>ECT</i>	21
<i>LPT-H</i>	19,2

Annexe B

Application de l'heuristique d'ordonnancement statique mono-critère

Nous reprenons l'exemple débuté précédemment (annexe A) et nous allons appliquer deux types de charges différentes : faible et forte. Pour augmenter la charge sans changer l'exemple, nous allons jouer sur les dates d'achèvement souhaitées des différentes tâches en les rapprochant. Celles-ci peuvent être observées dans le tableau A.1. Étant donné que les date de disponibilités et les *due dates* des tâches sont prisent en compte, nous pourront observer sur les différents schémas, que le traitement de celles-ci ne débute pas avant leurs dates de disponibilité. Le traitement de certaines tâches se termine au delà des *due dates* entraînant des retards, qui seront alors représentés par des zones grisés sur les différents diagrammes.

B.1 Application de l'algorithme *ECT-EDD*

La réorganisation des tâches due à l'application de la règle EDD range les tâches affectées à la ressource humaine 1 dans l'ordre 3-4 et celles affectées à la ressource humaine 2 dans l'ordre : 1-2-5-6. La planification des tâches à leur date de début au plus tôt entraîne une durée totale de l'ordonnancement (C_{max}) de 22 unités de temps.

Dans un contexte de faible charge (observé sur la figure B.1) la somme pondérée des retards est alors de 57.

$$\sum w_j T_j = w_1 T_1 + w_3 T_3 + w_4 T_4 + w_5 T_5 = 7 * 0,8 + 4 * 1,4 + 9 * 5 + 4 * 0,2 = 57$$

La figure B.2, quant à elle, présente le même ordonnancement dans un contexte de forte charge. La somme pondérée des retards est alors de 141.

$$\sum w_j T_j = w_1 T_1 + w_3 T_3 + w_4 T_4 + w_5 T_5 = 7 * 1,8 + 4 * 3,4 + 9 * 10 + 4 * 6,2 = 141$$

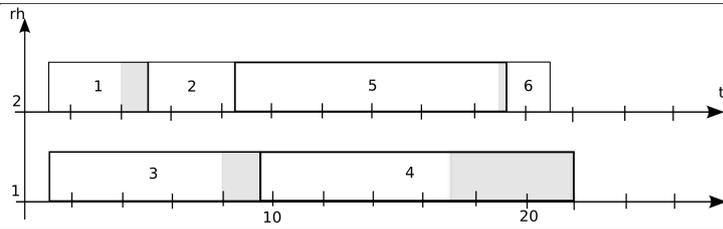


FIG. B.1 – Ordonnancement ECT-EDD en contexte de faible charge

B.2 Application de l'heuristique *LPT-H-EDD*

Lors de la dernière partie de cette heuristique, les tâches affectées à la ressource humaine 1 sont réorganisées dans l'ordre suivant 4-5. Les tâches affectées à la ressource humaine 2 sont elles triées dans l'ordre 1-3-2-6. La durée totale de celui-ci (C_{max}) est alors de 21,2 unités de temps.

Dans un contexte de faible charge (observé sur la figure B.3), la somme pondérée des retards est de 40.

$$\sum w_j T_j = w_2 T_2 + w_3 T_3 + w_5 T_5 = 9 * 1,6 + 4 * 4,2 + 4 * 2,2 = 40$$

La figure B.4, quant à elle, présente le même ordonnancement dans un contexte de forte charge. La somme pondérée des retards est alors de 122.

$$\sum w_j T_j = w_1 T_1 + w_2 T_2 + w_3 T_3 + w_5 T_5 = 7 * 0,8 + 9 * 8,6 + 4 * 6,2 + 4 * 8,2 = 122$$

B.3 Application de l'heuristique *WSPT-H-EDD*

L'ordonnancement alors obtenu affecte les tâches 1-3-6 à la ressource humaine 1 et les tâches 2-4-5 à la ressource humaine 2. La durée totale de l'ordonnancement ainsi réalisé est de 25,8 unités de temps.

Dans un contexte de faible charge (observé sur la figure B.5) la somme pondérée des

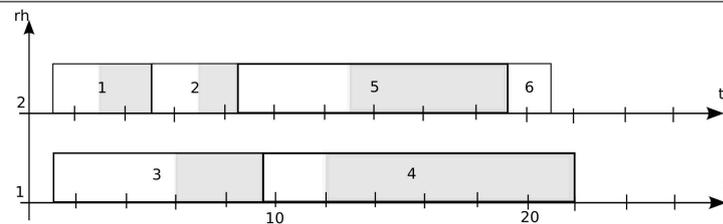


FIG. B.2 – Ordonnancement ECT-EDD en contexte de forte charge

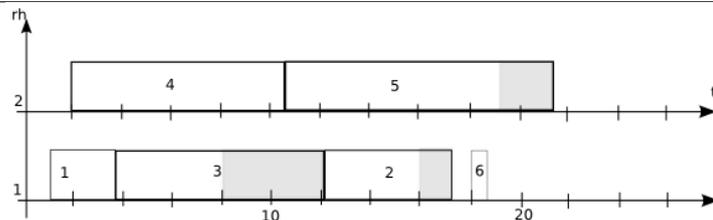


FIG. B.3 – Ordonnancement LPT-H-EDD en contexte de faible charge

retards est de 44.

$$\sum w_j T_j = w_3 T_3 + w_5 T_5 = 4 * 4,2 + 4 * 6,8 = 44$$

La figure B.6 présente le même ordonnancement dans un contexte de forte charge. La somme pondérée des retards est alors de 108,6.

$$\sum w_j T_j = w_1 T_1 + w_2 T_2 + w_3 T_3 + w_5 T_5 = 7 * 0,8 + 4 * 6,2 + 9 * 3 + 4 * 12,8 = 108,6$$

B.4 Synthèse sur l'exemple

Nous avons présenté dans cette partie un exemple d'ordonnancement d'activités de maintenance préventive. Nous avons étudié l'ordonnancement en contexte de faible charge et forte charge. Le tableau B.1 présente les résultats obtenus précédemment.

TAB. B.1 – Tableau récapitulatif

Etape	Faible charge	Forte charge	C_{max}
<i>ECT-EDD</i>	51	141	22
<i>LPT-H-EDD</i>	40	177,6	21,2
<i>WSPT-H-EDD</i>	44	108,6	25,8

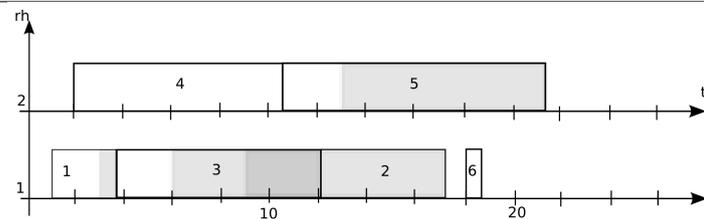


FIG. B.4 – Ordonnancement LPT-H-EDD en contexte de forte charge

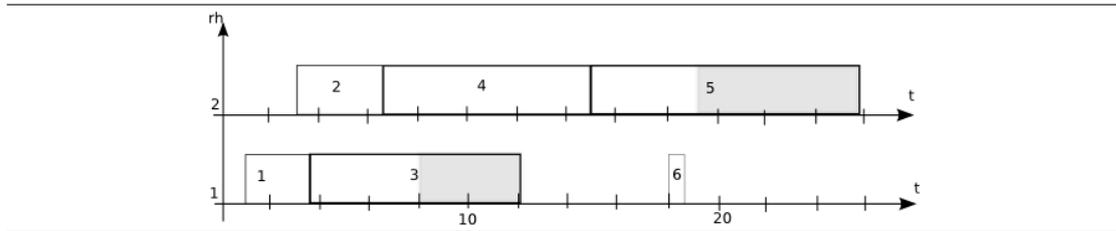


FIG. B.5 – Ordonnancement WSPT-H-EDD en contexte de faible charge

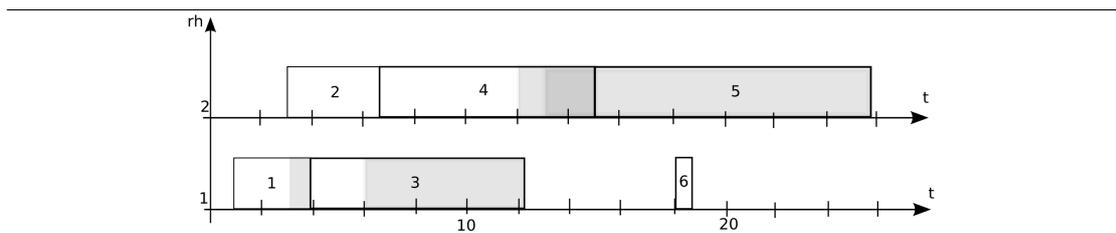


FIG. B.6 – Ordonnancement WSPT-H-EDD en contexte de forte charge

Annexe C

Exemple d'Application de l'ordonnancement dynamique mono-critère

Dans cet exemple simple, nous reprendrons l'ordonnancement courant réalisé dans la partie A.2. À travers cet ordonnancement nous rechercherons les fenêtres d'insertion qui permettent l'insertion dynamique d'une nouvelle tâche. Après avoir présenté cette nouvelle tâche, nous étudierons les différentes possibilités d'insertion.

C.1 Présentation de l'exemple

Pour cet exemple, nous nous placerons en contexte de faible charge. L'ordonnancement courant aura donc été réalisé par l'heuristique *LPT-H-EDD* dans la partie I.1.3.2.b, que l'on retrouve sous la forme de graphe sur la figure C.1.

Les caractéristiques concernant la tâche à insérer sont présentées dans le tableau C.1.

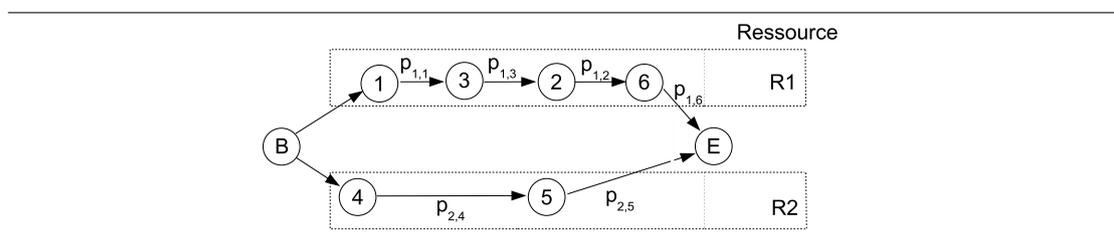


FIG. C.1 – Graphe de l'ordonnancement courant avant insertion

TAB. C.1 – Données concernant les tâches pour l'ordonnancement statique.

N°	p_j	r_j	d_j faible charge	d_j forte charge	Compétence	w_j	Durée mini	Durée maxi	$\frac{max p_{ij}}{w_j}$
7	6	0	22	...	2	16	7,2	10,8	0,675

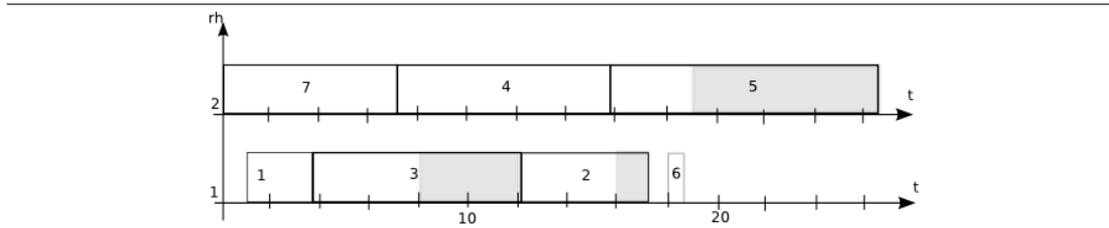


FIG. C.2 – Ordonnancement courant après insertion

C.2 Les fenêtres d'insertion

La tâche est insérée dans les différentes fenêtres de l'ordonnancement courant. La tâche D correspond à la tâche fictive de Début et la tâche F correspond à la tâche fictive de Fin.

Le tableau C.2 présente les résultats obtenus, concernant le critère $\sum w_j T_j$, lors des différentes insertions.

TAB. C.2 – Insertion dynamique

Numéro	Ressource	Fenêtre	$\sum w_j T_j$	C_{max}
1	1	D-1	234,6	28,1
2	1	1-3	180,4	29,1
3	1	3-2	153,2	29,1
4	1	2-6	142,4	29,1
5	1	6-F	160	29,5
6	2	D-4	60,8	26,4
7	2	4-5	68,8	28,4
8	2	5-F	142,2	28,4

L'insertion n°6, qui correspond au fait d'insérer la tâche n°7 en première position dans l'ordonnancement des tâches de la ressource humaine 2 (figure C.2), permet à la fois d'obtenir l'ordonnancement présentant les meilleurs résultats concernant la somme pondérée des retards. Elle servira donc de base de travail par la suite afin d'en améliorer encore les performances.

C.3 Amélioration par modifications partielles

Aléatoirement deux tâches seront sélectionnées et permutées. Nous prendrons les tâches 2 et 7 pour ce premier exemple.

L'ordonnancement obtenu correspond alors à la figure C.3 :

La somme pondérée des retards est alors de 60.

$$\sum w_j T_j = w_3 T_3 + w_5 T_5 + w_7 T_7 = 4 * 4,2 + 4 * 6,8 + 16 * 1 = 60$$

Émettons l'hypothèse que la méthode de recherche par voisinage réalise ensuite un nombre de permutation infructueuse. Celle-ci enchaînera donc sur un saut basé sur la méthode kangourou, qui consiste alors à effectuer trois permutations consécutives avant d'observer la solution obtenue.

TAB. C.3 – Application de la méthode du kangourou

Permutations	$\sum w_j T_j$	Acceptable (<60)
1-2	168	non
2-3	88,2	non
4-7	59,2	oui

Les trois permutations du saut réalisé sont présentées dans le tableau C.3. On peut observer la somme pondérée des retards des solutions intermédiaires du saut. La figure C.4 présente les diagrammes de Gantt de chacune des différentes étapes du saut. On peut observer que la solution est encore améliorée puisque la somme pondérée des retards est de 59,2.

Nous allons maintenant comparer ce résultat avec ce que l'on aurait obtenu avec les heuristiques présentées précédemment.

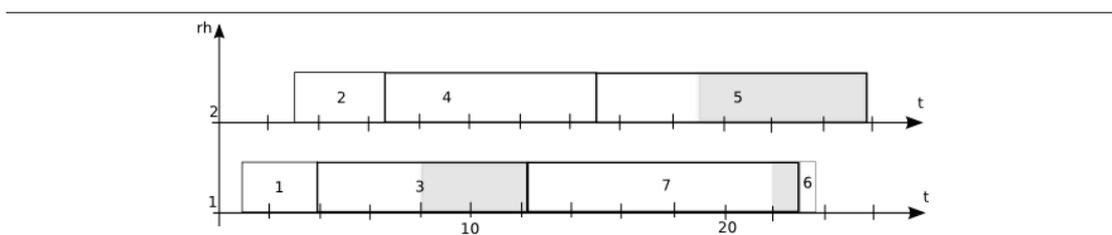


FIG. C.3 – Ordonnancement obtenu après permutation des tâches 2 et 7

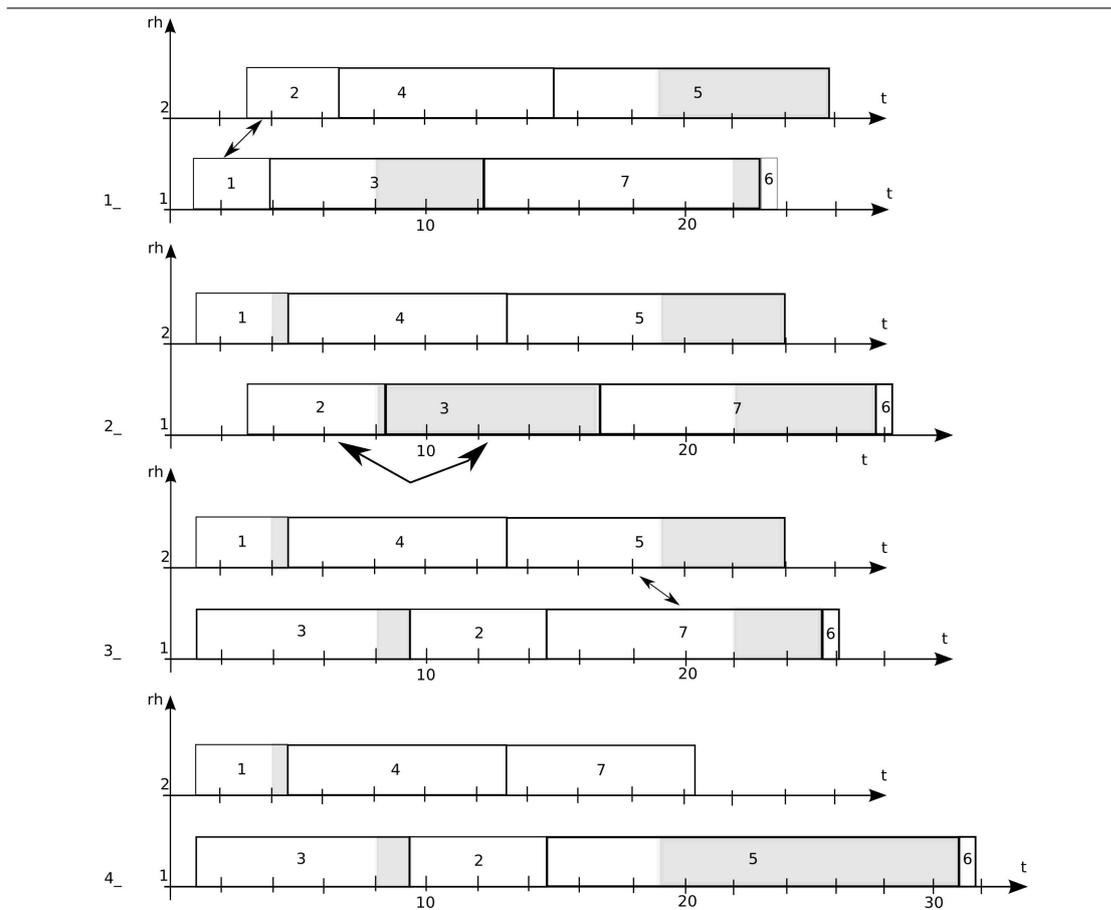


FIG. C.4 – Déroulement d'un saut

C.4 Comparaison avec un ré-ordonnement complet

C.4.1 Application de l'heuristique *LPT-H-EDD*

Les tâches sont donc triées selon la règle *LPT* avant d'être ordonnancées, nous obtenons alors la liste suivante : 5-4-3-7-2-1-6.

La borne inférieure est alors de 20,95.

TAB. C.4 – Algorithme LPT-H

Etape	\sum durée des tâches affectées à RH_1	\sum durée des tâches affectées à RH_2
Affectation de j_5 à RH_2	0	10,8
Affectation de j_4 à RH_2	0	19,2
Affectation de j_3 à RH_1	8,4	19,2
Recul de j_7 dans la liste		
Recul de j_2 dans la liste		
Affectation de j_1 à RH_1	11,2	19,2
Recul de j_7 dans la liste		
Recul de j_2 dans la liste		
Affectation de j_6 à RH_1	11,9	19,2
Affectation de j_7 à RH_1	22	19,2
Affectation de j_2 à RH_2	22	22,8
C_{max}		22,8

L'ordonnement alors obtenu affecte les tâches 3-1-6-7 à la ressource humaine 1 et les tâches 5-4-2 à la ressource humaine 2. La durée totale de l'ordonnement ainsi réalisé est de 22,8 unité de temps.

Une fois réorganisées par le tri *EDD*, les tâches affectées à la ressource 1 sont dans l'ordre 1-3-7-6. Les tâches affectées à la ressource 2, quant à elles, sont dans l'ordre 2-4-5.

On obtient alors :

$$\sum w_j T_j = w_3 T_3 + w_5 T_5 + w_7 T_7 = 4 * 4,2 + 4 * 6,8 + 16 * 1 = 60$$

La somme pondérée des retards est alors de 60.

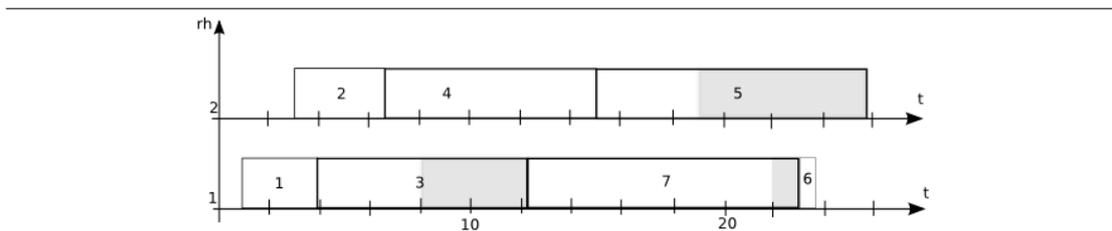


FIG. C.5 – Ordonnement réalisé avec l'heuristique LPT-H-EDD

La figure C.5 présente l'ordonnancement ainsi réalisé qui correspond à celui obtenu après une permutation. Sa durée est alors de 25,8 et la somme pondérée des retards de 60.

C.4.2 Application de l'heuristique *WSPT-H-EDD*

L'application de l'heuristique *WSPT-H* est basée sur le même principe que l'heuristique présentée précédemment. Cependant avant d'être affectée, les tâches sont triées suivant l'ordre *WSPT*. Le tri *WSPT* classe les tâches dans l'ordre suivant : 6-2-1-7-5-3-4.

TAB. C.5 – Algorithme *WSPT-H*

Etape	\sum durée des tâches affectées à RH_1	\sum durée des tâches affectées à RH_2
Affectation de j_6 à RH_1	0,7	0
Affectation de j_1 à RH_1	3,5	0
Affectation de j_2 à RH_2	3,5	3,6
Affectation de j_7 à RH_2	3,5	10,8
Affectation de j_4 à RH_1	16,1	10,8
Recul de j_3 dans la liste		
Affectation de j_5 à RH_2	16,1	21,6
Affectation de j_3 à RH_1	24,5	21,6
C_{max}	24,5	

La table C.5 présente le déroulement de l'algorithme. L'ordonnancement alors obtenu affecte les tâches 6-1-4-3 à la ressource humaine 1 et les tâches 2-7-5 à la ressource humaine 2. La durée totale de l'ordonnancement ainsi réalisé est de 24,5 unité de temps.

Le tri *EDD* range les tâches, affectées à la ressource 1, dans l'ordre 1-3-4-6. Les tâches affectées à la ressource 2, quant à elles, sont dans l'ordre 2-5-7.

La durée de l'ordonnancement est alors de 25,5 (observée sur la figure C.6) et la somme pondérée des retards de 97,4.

$$\sum w_j T_j = w_3 T_3 + w_4 T_4 + w_7 T_7 = 4 * 4,2 + 9 * 7,8 + 16 * 2,6 = 97,4$$

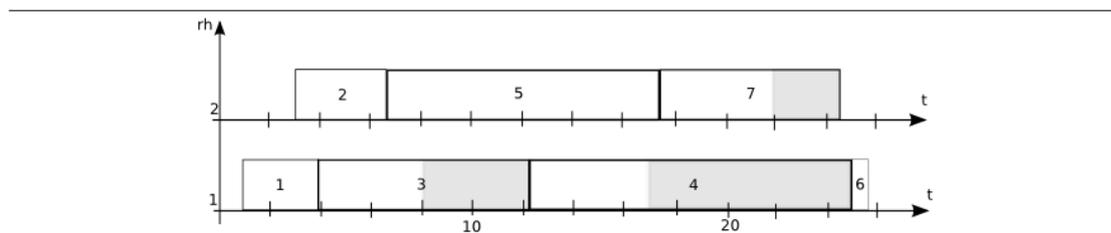


FIG. C.6 – Ordonnancement réalisé avec l'heuristique *WSPT-H-EDD*

C.5 Synthèse de l'exemple

Nous avons présenté dans cette partie un exemple d'ordonnement dynamique de tâche. Nous avons comparé les résultats avec les heuristiques d'ordonnement statiques développé précédemment. Le tableau C.6 présente les résultats obtenus précédemment.

TAB. C.6 – Tableau récapitulatif

Heuristique	$\sum w_j T_j$
<i>Insertion dynamique</i>	59,2
<i>LPT-H-EDD</i>	60
<i>WSPT-H-EDD</i>	97,4

L'heuristique d'insertion dynamique présente les meilleurs résultats sur cet exemple.

Annexe D

Exemple multi-critère

Nous présentons ici un exemple simple sur lequel nous allons mettre en œuvre notre heuristique. La méthode partant d'un ensemble initial de solution pour l'améliorer avant de le proposer au responsable de maintenance, nous présenterons dans un deuxième temps la réalisation de l'ensemble de solution initial. Et enfin nous déroulerons l'heuristique sur le cas applicatif.

D.1 Présentation

L'approche développée dans ce chapitre et imagée à travers cet exemple a pour objectif de prendre en compte de nouvelles tâches et de les insérer dynamiquement dans un ordonnancement courant. Pour cet exemple, nous reprendrons le cas développé au paragraphe B.2 dont l'ordonnancement courant est présenté sur la figure D.1.

Les caractéristiques concernant la tâche qui sera insérée dynamiquement dans l'ordonnancement courant sont présentées dans le tableau D.1.

Nous allons donc maintenant présenter la réalisation de l'ensemble de solutions initiales appliqué à l'insertion de cette tâche dans l'ordonnancement de la figure D.1.

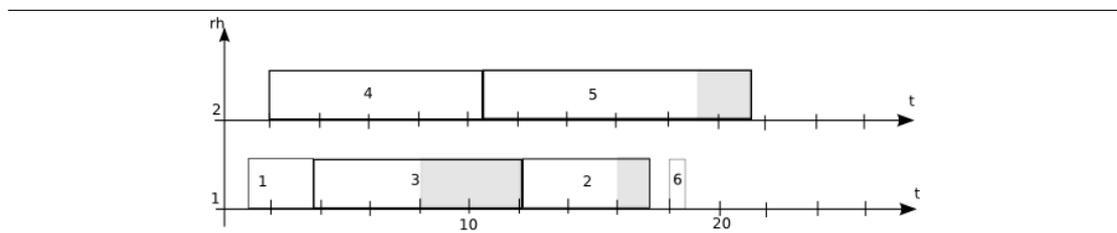


FIG. D.1 – Ordonnancement courant

D.2 Réalisation de l'ensemble de solutions initiales

Le critère des retards des tâches n'est pas le seul critère pris en compte dans cette partie. Des solutions pour lesquelles les nouvelles tâches auraient, dès leur insertion, un traitement qui, se terminant après leur *due-date*, peuvent alors être plus facilement retenue et peuvent être très intéressantes. La nouvelle tâche sera insérée successivement entre toutes les tâches de l'ordonnancement courant. Chacun des ordonnancements réalisés est enregistré et évalué suivant les différents critères retenus pour cette étude. Ensuite, seules les solutions non dominées sont conservées formant ainsi l'ensemble solutions initiales.

Le tableau D.2 présente les résultats obtenus, concernant les critères étudiés, lors de l'insertion de la tâche n°7 dans différentes fenêtres de l'ordonnancement courant.

On peut remarquer que les solutions 1, 3, 5, 7 et 8 n'apportent rien à l'ensemble de solution puisqu'elles sont toutes moins performantes. Pour exemple, la première solution est dominée par la deuxième solution suivant le critère de la somme pondérée des retards et du nombre tâche en retard et elles présentent les même résultats suivant les critères de l'écart type et du nombre de modification. Elles seront donc supprimées afin d'obtenir l'ensemble de solution initial présenté dans le tableau D.3.

Les trois solutions retenues sont présentées sur la figure D.2.

Maintenant que l'ensemble de solution initiale a été réalisé nous allons tenter de l'améliorer en appliquant l'heuristique développée.

D.3 Amélioration de l'ensemble de solutions initiales

L'heuristique sélectionne une solution parmi celles qui sont présentes dans l'ensemble de solutions initiales pour tenter de l'améliorer ou trouver à partir de celle-ci de nouvelles solutions potentiellement intéressantes.

Sélectionnons par exemple la solution n°3 pour l'application de l'heuristique. La première permutation (tableau D.5 et premier diagramme de la figure D.3) permet de réduire le nombre de tâches en retard mais a aussi très fortement permis d'équilibrer la charge entre les ressources. Il est à noter que le déplacement de la tâche n°7 ne compte pas comme une modification de l'ordonnancement courant puisque celle-ci est en train d'être insérée de plus son affectation n'a jamais été rendue officielle. Cette solution est ajoutée

TAB. D.1 – Données concernant les tâches pour l'ordonnancement statique.

N°	p_j	r_j	d_j	d_j	Compétence	w_j	Durée	Durée	$\frac{max p_{ij}}{w_j}$
			faible charge	forte charge					
7	6	0	22	...	2	16	7,2	10,8	0,675

TAB. D.2 – Ensemble de solutions initial

Numéro	Ressource	Fenêtre	$\sum w_j T_j$	$\sum U_j$	σ	$\sum \text{mod}_j$
1	1	D-1	234,6	4	4,45	0
2	1	1-3	180,4	3	4,45	0
3	1	3-2	153,2	4	4,45	0
4	1	2-6	142,4	4	4,45	0
5	1	6-F	160	4	4,45	0
6	2	D-4	60,8	3	4,55	0
7	2	4-5	68,8	3	4,55	0
8	2	5-F	142,2	4	4,55	0

TAB. D.3 – Ensemble de solutions initial après suppressions

Numéro	$\sum w_j T_j$	$\sum U_j$	σ	$\sum \text{mod}_j$
2	1	1-3	180,4	3
4	1	2-6	142,4	4
6	2	D-4	60,8	3

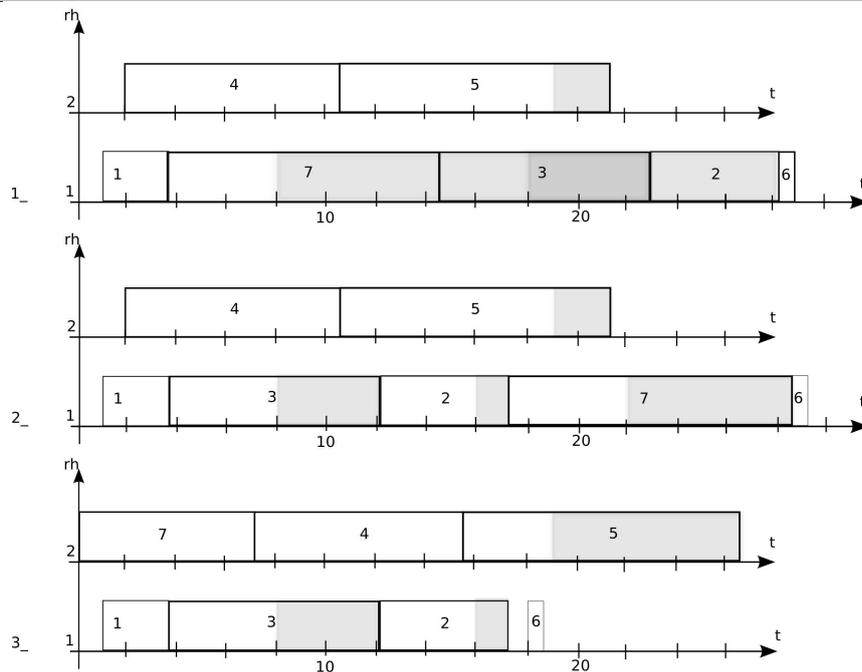


FIG. D.2 – Ensemble de solutions initial

à l'ensemble de solutions, que l'on peut observer sur le tableau D.5, et devient la solution courante. La permutation suivante, entre les tâches 1 et 3, génère une augmentation des retards pondérés et du nombre de tâche en retard sans pour autant améliorer d'autre critère. Elle est donc rejetée. Les autres permutations ne permettent pas de trouver de solution intéressante.

TAB. D.4 – Recherche locale sur la solution n°3

Permutations	$\sum w_j T_j$	$\sum U_j$	σ	$\sum \text{mod}_j$	Retenue ?
2-7	60	3	0,05	1	oui
1-3	119	4	0,05	1	non

TAB. D.5 – Ensemble de solutions

Numéro	$\sum w_j T_j$	$\sum U_j$	σ	$\sum \text{mod}_j$
1	180,4	3	4,45	0
2	142,4	4	4,45	0
3	60,8	3	4,55	0
4	60	3	0,05	1

On peut remarquer que même si cette solution est très intéressante au regard de critères tel que la somme pondérée des retards ou encore l'écart type, aucune solution ne peut être supprimé de l'ensemble de solution puisque celle-ci entraîne une modification de l'ordonnancement initial. Si un choix est à faire, ce sera le décideur qui l'effectuera par la suite.

Dès lors que le nombre de maximum de recherches locales infructueuses fixé est atteint, l'heuristique procède à des sauts afin de sortir de l'optimum local dans lequel elle est enfermée. Celle-ci réalise alors 3 permutations, que l'on peut observer dans le tableau D.6 et sur la figure D.3.

TAB. D.6 – Application de la méthode du kangourou

Permutations	$\sum w_j T_j$	$\sum U_j$	σ	$\sum \text{mod}_j$	Retenue ?
1-3	106,2	4	0,05	1	non
1-2	88,8	4	1,15	1	non
4-7	59,2	3	2,65	2	oui

La solution obtenue présente notamment une amélioration suivant le critère de la somme pondérée des retards.

Cette solution est alors ajoutée à l'ensemble des solutions (tableau D.7), devient la nouvelle solution courante et l'heuristique continue ses améliorations.

Un autre exemple, la solution 2 qui ne présente pas d'amélioration suite à des permutations, cependant la réalisation d'un saut peut entraîner une amélioration. L'enchaînement

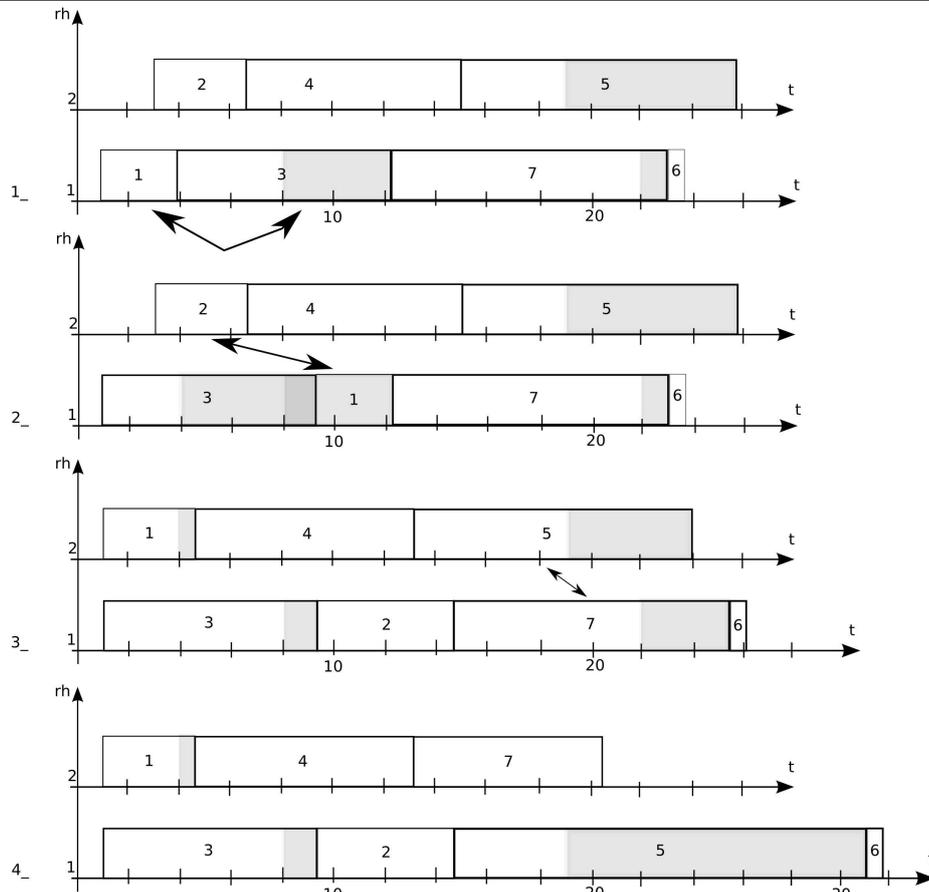


FIG. D.3 – Déroulement d'un saut

TAB. D.7 – Ensemble de solutions

Numéro	$\sum w_j T_j$	$\sum U_j$	σ	$\sum \text{mod}_j$
1	180,4	3	4,45	0
2	142,4	4	4,45	0
3	60,8	3	4,55	0
4	60	3	0,05	1
5	59,2	3	2,65	2

des permutations des tâches 2-6, 5-7 puis 5-2 permet de générer une solution (présenté dans le tableau D.8) qui avec un faible nombre de tâches en retard.

TAB. D.8 – Application de la méthode du kangourou sur la solution 2

$\sum w_j T_j$	$\sum U_j$	σ	$\sum \text{mod}_j$	Retenue ?
102	2	8,95	1	oui

Celle-ci est ajoutée à l'ensemble de solutions qui devient alors (tableau D.9) :

TAB. D.9 – Ensemble de solutions

Numéro	$\sum w_j T_j$	$\sum U_j$	σ	$\sum \text{mod}_j$
1	180,4	3	4,45	0
2	142,4	4	4,45	0
3	60,8	3	4,55	0
4	60	3	0,05	1
5	59,2	3	2,65	2
6	102	2	8,95	1

Annexe E

Détail du calcul de $\mu_{lateness_j}$

Nous présentons ici le détail du calcul de $\mu_{lateness_j}$ présenté au paragraphe V.2.3.2.

$$\begin{cases} \tan \alpha = \frac{CD}{BD} \\ \tan \beta = \frac{CD}{AD} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} BD \tan \alpha = CD \\ AD \tan \beta = CD \end{cases}$$

et donc : $AD \tan \beta = BD \tan \alpha$

$$AD + BD = AB$$

$$BD = AB - AD$$

$$AD \tan \beta = (AB - AD) \tan \alpha$$

$$AD \tan \beta = AB \tan \alpha - AD \tan \alpha$$

$$AD \tan \beta + AD \tan \alpha = AB \tan \alpha$$

$$AD(\tan \beta + \tan \alpha) = AB \tan \alpha$$

$$\begin{cases} AD = \frac{AB \tan \alpha}{\tan \beta + \tan \alpha} \\ CD = AD \tan \beta \end{cases} \Rightarrow CD = \frac{\tan \alpha \tan \beta}{\tan \alpha + \tan \beta} AB$$

$$\text{avec : } \begin{cases} \tan \alpha = \frac{1}{d_j^2 - d_j^1} = \frac{1}{12 - 10} = 0,5 \\ \tan \beta = \frac{1}{C_j^2 - C_j^1} = \frac{1}{11 - 9,7} = 0,77 \end{cases}$$

$$\text{Et donc } CD = \frac{0,5 * 0,77}{0,5 + 0,77} * 1 = 0,3.$$

Nous obtenons alors $\mu_{lateness_j} = 0,3$.

Bibliographie

- Bana e COSTA C.A. et VANSNICK J.C. (1995). « General overview of the MACBETH approach », dans P. PARDALOS, Y. SISKOS et C. ZOPOUNIDIS (éds), *Advances in Multicriteria Analysis*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 93–100.
- de SMIDT-DESTOMBES Karin S. , van der HEIJDEN Matthieu C. et van HARTEN Aart (2006). « On the interaction between maintenance, spare part inventories and repair capacity for a k-out-of-N system with wear-out », *European Journal of Operational Research*, **174**(1) : 182–200.
- de VELDE S.L. Van (1993). « Duality-based algorithms for scheduling unrelated parallel machines », *ORSA Journal of Computing*, **5** : 192–205.
- lassi G.L VAIRAKTARAKIS, CAI X. et LEELA C.Y. (2002). « Workforce planning in synchronous production systems », *European Journal of Operational Research*, **136**(3) : 551–572.
- ABBASI Babak , SHADROKH Shahram et ARKAT Jamal (2006). « Bi-objective resource-constrained project scheduling with robustness and makespan criteria », *Applied Mathematics and Computation*, (180) : 146–152.
- ACCP (2005). « Certification des Compétences », *Technical report*, <http://formation-emploi.cci.fr>.
- ADJALLAH Kondo H. , NIANG Boubacar et NDIAYE Papa A. (2005). « Gestion de tâches de diagnostic à base d'un système distribué », *Colloque Francophone sur le thème : Performances et Nouvelles Technologies en Maintenance (PENTOM)*.
- ADZAKPA Kossi-Pélopé et ADJALLAH Kondo-Hloindo (2003a). « Minimisation du temps de séjour pondéré avec dates de disponibilité inégale des tâches : application à la maintenance », *MOSIM*.
- ADZAKPA Kossi-Pélopé et ADJALLAH Kondo-Hloindo (2003b). « A new effective heuristic for the intelligent management of the preventive maintenance tasks of the distributed systems », *Advanced Engineering Informatics*, **17** : 151–163.
- AFNOR (1995). *Indicateur de maintenance - X 60-020*, AFNOR.
- AFNOR (2001). *Terminologie de la maintenance - NF EN 13306*, AFNOR.
- AFNOR (2002). *Ressources humaines dans un système de management de la qualité . Management des compétences, fascicule de documentation FD X 50-183*, AFNOR, Paris.

- AGGOUNE Riad (2002). *Ordonnancement d'ateliers sous contraintes de disponibilité des machines*, Thèse de doctorat, Université de Metz, France.
- AGGOUNE Riad (2003). « Job shop à deux jobs avec prise en compte de contraintes de disponibilité des machines », *MOSIM*.
- AKTURK M. Selim et OZDEMIR Deniz (2000). « An exact approach to minimizing total weighted tardiness with release dates », *IIE transactions*, **32** : 1091–1101.
- ALLAOUI H. et ARTIBA A. (2004). « Integrating simulation and optimization to schedule a hybrid flow shop with maintenance constraints », *Computers & Industrial Engineering*, **47** : 431–450.
- ALLAOUI H. , MHAMED A. E. et KERMAD L. (2005). « An approach to combine scheduling, maintenance and quality control in the total operation cost for a single machine under uncertainty », *Congrès International de Génie Industriel (GI)*.
- ALOULO Ali (2002). *Structure flexible d'ordonnements à performances contrôlées pour le pilotage d'atelier en présence de perturbations*, PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine.
- ANGEL E. et BAMPIS E. (2005). « A multi-start dynasearch algorithm for the time dependent single-machine total weighted tardiness scheduling problem », *European Journal of Operational Research*, **162** : 281–289.
- ARTIGUES C. , BRIAND C. , PORTMANN M.C. et ROUBELLAT F. (2002). *Pilotage des systèmes de production*, Vol. 149, Hermes, chapter Pilotage d'atelier basé sur un ordonnancement flexible.
- BAPTISTE Pierre , CARLIER Jacques et JOUGLET Antoine (2001). « Minimiser la somme des retards sur une machine avec dates de disponibilité », *MOSIM*.
- BAUCHET Philippe (2005). « Equipes à Responsabilités Elargies : l'expérience d'une entreprise », *Congrès International de Génie Industriel (GI)*.
- BELFARES Lamia , KLIBI Walid , LO Nassirou et GUITOUNI Adel (2007). « Multi-objectives Tabu Search based algorithm for progressive resource allocation », *European Journal of Operational Research*, (177) : 1779–1799.
- BELLENGUEZ-MORINEAU Odile (2006). *Méthodes de résolution pour problème de gestion de projet multi-compétence*, PhD thesis, Université de Tours.
- BELLMANN R. et DREFUS S.E. (1974). *Applied dynamic programming*, Princeton University Press.
- BEMBLA M. (2002). « *Ordonnancement conjoint production et maintenance : Critère et heuristique de résolution* », Mémoire de dea, UFR Sciences et Techniques de l'Université de Franche-Comté.
- BENAOUDA A. , ZERHOUI Nouredine , VARNIER Christophe et MOSTEFAI M. (2005). « Une démarche préventive et coopérative pour la gestion de la pièce de rechange dans une entreprise étendue », *Congrès International de Génie Industriel (GI)*.
- BENAYOUN R , MONTGOLFIER J De , TERGNY J et LARICHEV O (1971). « Linear Programming with Multiple Objective Functions : STEP Method (STEM) », *Mathematical Programming*, **1** : 366–375.

- BENBOUZID Fatima , VARNIER Christophe et ZERHOUNI Nouredine (2005). « Etude de la contribution de la maintenance à la robustesse des ordonnancements conjoints production/maintenance », *Congrès International de Génie Industriel (GI)*.
- BENNOUR Meziane , CRESTANI Didier et PRUNET François (2003). « Une approche de gestion des ressources humaines guidée par les compétences », *MOSIM*.
- BERCHET Claire (2000). *Modélisation pour la simulation d'un système d'aide au pilotage industriel*, PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- BERKOUNE Djamel et MESGHOUNI Khaled (2007). « Resolution approach for multi-objective problems with uncertain demands », *European Journal of Operational Research*, .
- BERTSIMAS Dimitris et SIM Melvyn (2004). « The Price of Robustness », *Operations Research*, **52**(1) : 35–53.
- BILLAUT Jean-Charles et ROUBELLAT Francis (1996). « A new method for workshop real time scheduling », *International Journal of Production Research*, **34**(6) : 1555–1579.
- BILLAUT Jean-Charles , MOUKRIM Aziz et SANLAVILLE Eric (2005). *Flexibilité et robustesse en ordonnancement*, Hermes, chapter 1, pp. 13–32.
- BILLIONNET A. (1999). « Integer programming to schedule a hierarchical workforce with variable demands », *European Journal of Operational Research*, **114** : 105–114.
- BOSCHIAN V. , REZG N. et CHELBI A. (2005). « Evaluation des performances d'un système par les plans d'expériences et une analyse multi-critère », *Colloque Francophone sur le thème : Performances et Nouvelles Technologies en Maintenance (PENTOM)*.
- BOUCHRIHA Hanen et LADET Pierre (2003). « Une modélisation mathématique du problème de la décision de "faire ou faire-faire" », *Conférence Francophone de Modélisation et Simulation (MOSIM)*.
- BOUMANE Abderrazak , TALBI Abdennebi , BOUAMI Driss et TAHON Christian (2003). « Contribution méthodologique à la construction d'un référentiel de compétences en maintenance industrielle », *Colloque Francophone sur le thème : Performances et Nouvelles Technologies en Maintenance*.
- BOUMANE Abderrazak , TALBI Abdennebi , BOUAMI Driss et TAHON Christian (2005a). « Application d'une méthodologie d'identification des compétences requises à l'activité de régulation d'un réseau de transport urbain », *Colloque Francophone sur le thème : Performances et Nouvelles Technologies en Maintenance (PENTOM)*.
- BOUMANE Abderrazak , TALBI Abdennebi , BOUAMI Driss et TAHON Christian (2005b). « Quelle méthodologie pour identifier les compétences requises », *Colloque Francophone sur le thème : Performances et Nouvelles Technologies en Maintenance (PENTOM)*.
- BOURBAKI Nicolas (2007). *Eléments de mathématiques, théorie des ensembles*.
- BOYER Isabelle , RIOPEL Diane et LANGEVIN André (2005). « Gestion des pièces de rechange », *Congrès International de Génie Industriel (GI)*.

- BRANDOLESE M. , FRANCI M. et KAN A.H.G. Rinnoooy (1996). « Production and maintenance integrated planning », *International Journal of production Research*, **34**(7) : 2059–2075.
- BRAUN H.J. (1995). « Ein unscharfes planungsverfahren zur mittelfristigen Personalkapazitäts-anpssung für die bedarfsorientierte Serienproduktion », *Springer-Verlag, Berlin*.
- BUTERA F (1991). *La métamorphose de l'Organisation, du chateau au réseau*, Paris, France.
- CAZENAVE Tristan (1996). *Système d'Apprentissage par Auto-Observation : Application au jeu de Go*, PhD thesis, Université de Paris 6.
- CEDIP (1999). « La lettre du CEDIP », *Fiche technique 8*.
- CERNY V. (1985). « Thermodynamical approach to the traveling salesman problem : an efficient simulation algorithm », *Journal of Optimization Theory and Applications*, **45**.
- CHAN-YEW-CHEONG Peter (2002). *La planification du personnel : acteurs, action et termes multiples pour une planification opérationnelle des personnes*, PhD thesis, Université Joseph Fourier - Grenoble 1.
- CHARNES A. et COOPER W. W. (1961). *Management models and industrial applications of linear programming*, J. Wiley, New York.
- CHATELET P. et JOUGA B. (1999). *Les systèmes d'automatismes et Internet*, J'automatise, chapter 3, pp. 53–55.
- CHELBI Anis et AÏT-KADI Daoud (2003). « Classement des équipements par ordre de priorité pour la maintenance : Une approche multicritère », *Conférence Francophone de Modélisation et Simulation (MOSIM)*.
- CHEN Wei et MURAKI Masaaki (1997). « A fuzzy evaluation of schedule robustness under processing time variations in batch plants », *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **30**(2) : 260–267.
- CLAS A. , MEL'CUK I.A. et POLGUERE A. (1995). *Introduction à la lexicologie explicative et combinatoire*.
- CONGRAM R.K. , POTTS C.N. et van de VELDE S.L. (1998). « An iterated dynasearch algorithm for the single-machine total weighted tardiness scheduling problem », *Technical report*, Faculty of Mathematical Studies, University of Southampton, UK.
- COUDERT Thierry (2000). *Apport des systèmes multi-agents pour la négociation en ordonnancement : application aux fonctions production et maintenance*, PhD thesis, Toulouse.
- CROCIL F. , PERONA M. et POZZETTI A. (2000). « Work-force management in automated assembly systems », *International Journal of Production Economics*, **64** : 243–255.
- DAHAL K. P. , ALDRIDGE C. J. et McDONALD J. R. (1999). « Generator maintenance scheduling using a genetic algorithm with a fuzzy evaluation function », *Fuzzy Sets and Systems*, **102**(1) : 21–29.

- D'ANVERS F. (n.d.). « Lexique de la formation continue », *Technical report*, <http://www.hommes-et-savoirs.fr>.
- DAVENPORT Andrew J. et BECK J. Christopher (2000). « A survey of techniques for scheduling with uncertainty », *Technical report*, IBM and Ilog.
- DHAENENS Clarisse , MABED Mohammed Hakim , RAHOUAL Malek et TALBI El-Ghazali (2000). « Ordonnancement bicritère : Utilisation d'un algorithme génétique », *Journée ROADEF (Recherche Opérationnelle et Aide à la décision) sur la programmation mathématique multiobjectif (PM2O)*, Tours, France.
- DREZET Laure-Emmanuelle et TACQUARD Claudine (2004a). « Adaptation réactive de plannings », *GISEH*.
- DREZET Laure-Emmanuelle et TACQUARD Claudine (2004b). « Modification of employees timetables », *5th International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling*.
- DREZET Laure-Emmanuelle et TACQUARD Claudine (2004c). « Modifications of employees planning to face perturbations », *PMSassassicla*.
- DRUMM H.J. et SHOLZ C. (1988). « Personalplanung », *Planungsmethod und Methodenentwicklung, 2nd ed.*, Poeschel, Stuttgart.
- DUBOIS Didier , FARGIER Hélène et PRADE Henri (1995). « Fuzzy constraints in job-shop scheduling », *Journal of Intelligent Manufacturing*, **6**(4) : 215–234.
- DUENAS Alejandra et PETROVIC Dobrila (2004). « A New Approach to Multi-objective Single Machine Scheduling Problems under Fuzziness », *International Conference on Decision Support Systems (DSS2004)*.
- DUFFUAA S.O. et AL-SULTAN K.S. (1999). « A stochastic programming model for scheduling maintenance personnel », *Applied Mathematical Modelling*, **25** : 285–397.
- EDWARDS W. (1971). « Social utilities », *Engineering Economist, Summer Symposium Series*, (6) : 119–129.
- EL-SHARKH M.Y. , EL-KEIB et CHEN H. (2003). « A fuzzy evolutionary programming-based solution methodology for security-constrained generation maintenance scheduling », *Electric Power Systems Research*, **67** : 67–72.
- ERNST A.T. , JIANG H. , KRISHNAMOORTHY M. , OWENS B. et SIER D. (2004). « Staff scheduling and rostering : A review of applications, methods and models », *European Journal of Operational Research*, **153**(3) : 3–27.
- ERSCHLER J. et TERSSAC G. De (1983). « Flexibilité et rôle de l'opérateur humain dans l'automatisation intégrée de production », *Technical report*, Rapport du Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes No 88137.
- ESQUIROL Patrick et LOPEZ Pierre (1999). *L'ordonnancement*, Economica.
- ESQUIROL Patrick et LOPEZ Pierre (2001a). *Concepts et méthodes de base en ordonnancement de la production*, in *Ordonnancement de la production*, Information, Commande, Communication, chapter 2, pp. 25–53.

- ESQUIROL Patrick et LOPEZ Pierre (2001b). *Ordonnancement de la production*, Hermes, chapter Concepts et méthodes de base en ordonnancement de la production, pp. 25–53.
- ESSWEIN Carl (2003). *Un apport de flexibilité séquentielle pour l'ordonnancement robuste*, PhD thesis, Université de François Rabelais de Tours.
- ESSWEIN Carl , VILCOT Geoffroy et BILLAUT Jean-Charles (2004). « Vers la validation par la simulation d'une approche proactive-réactive d'ordonnancement robuste », *European Journal of Operational Research*, **167**(3) : 796–810.
- FLAVELL R.B. (1976). « A New Goal Programming Formulation », *Omega*, N°4.
- FLEURY Gérard et GOURGAND Michel (1993). « Méthodes stochastiques et déterministes pour les problèmes NP-difficiles », *Technical report*, Université de Clermont-Ferrand 2, Clermont-Ferrand, FRANCE.
- FONTAN Gérard , MERCÉ Colette et ERSCHLER Jacques (2001). *Performance industrielle et gestion des flux*, Lavoisier, chapter 3, pp. 69–111.
- FORTEMPS Philippe (1997). « Jobshop Scheduling with Imprecise Durations : a Fuzzy Approach », *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, **5**(4) : 557–569.
- FRANCASTEL Jean-Claude (2001). *Externalisation de la maintenance - Stratégies, Méthodes et contrats*, Dunod.
- GHARBI A. et KENNE J.P. (2005). « Maintenance scheduling and production control of multiple-machine manufacturing systems », *Computers & Industrial Engineering*, **48** : 693–707.
- GHELAM-ALLAH Samir , SIMEU-ABAZI Zineb , DERAÏN Jean-Pierre , FEUILLEBOIS Christian et VALLET Serge (2005). « Architecture de surveillance et diagnostic pour la maintenance des systèmes avionique », *Colloque Francophone sur le thème : Performances et Nouvelles Technologies en Maintenance (PENTOM)*.
- GLADE Mathieu (2005). *Modélisation des coûts de cycle de vie : prévision des coûts de maintenance et de la fiabilité. Application à l'aéronautique*, PhD thesis, Ecole Centrale de Lyon.
- GLOVER F. (1986). « Futur paths for integer programming and links and links to artificial intelligence », *Computers and Operations Research*, **13** : 533–546.
- GOTHA (2002). « Flexibilité et robustesse en ordonnancement », *Disponible sur www.maths.univ-bpclermont.fr/~sanlavil/flexordo.pswwwmaths.univ-bpclermont.fr/~sanlavil/flexordo.ps*.
- GRABOT B. et LETOUZEY A. (2000). « Short-term manpower management in manufacturing systems : new requirement and DSS prototyping », *Computers in Industry*, **43** : 11–29.
- GRUAT-LA-FORME France-Anne , BOTTA-GENOULAZ Valérie et CAMPAGNE Jean-Pierre (2007a). « Approche hybride de résolution pour un problème d'ordonnancement multicritères sur ressources humaines », *7e Congrès international de génie industriel (GI)*.

- GRUAT-LA-FORME France-Anne , BOTTA-GENOULAZ Valérie et CAMPAGNE Jean-Pierre (2007b). « Modélisation d'un problème d'ordonnancement avec prise en compte des compétences », *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, .
- GUIFFRIDA Alfred L. et NAGI Rakesh (1998). « Fuzzy set theory applications in production management research : a literature survey », *Journal of Intelligent Manufacturing*, **9** : 39–56.
- QUITOUNI A. (1998). *L'Ingénierie du Choix d'une Procédure d'Agrégation Multicritère*, PhD thesis, Université Laval.
- HAMMAMI Abdelkader (2003). *Modelisation Technico-Economique d'une Chaîne Logistique dans une Entreprise Réseau*, PhD thesis, Université de Laval, Québec, Canada.
- HAMMAMI Sondes , ALOUANE Atidel Hadj , JEBALI Aïda et LADET Pierre (2003). « Approche multi-objectifs pour l'introduction de l'urgence dans le programme opératoire », *Congrès International de Génie Industriel (GI)*.
- HARZALLAH Mounira et VERNADAT François (2001). « Un outil de gestion des compétences acquises et requises implanté a Tremery dans le groupe PSA », *MOSIM*.
- HASSAN T. , BABOLI A. , GUINET A. , LÉBOUCHER G. et BRANDON M. T. (2005). « Etude des méthodes de réorganisation et de gestion de stock des services de soins d'un établissement hospitalier », *Congrès International de Génie Industriel (GI)*.
- HILLIER Frederick S. et LIEBERMAN Gerald J. (2005). *Introduction To Operations Research*.
- HÉTREUX Gilles (1996). *Structures de décision multi-niveaux pour la planification de la production : robustesse et cohérence des décisions*, PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.
- HUISKONEN Janne (2001). « Maintenance spare parts logistics : Special characteristics and strategic choices », *International Journal of Production Economics*, **71** : 125–133.
- HUNG R. (1994). « Single-shift off-day scheduling of a hierarchical workforce with variable demands », *European Journal of Operational Research*, **78** : 49–57.
- HWANG C. L. , PAIDY S. R. , YOON K. et MASUD A. S. M. (1980). « Mathematical programming with multiple objectives : A tutorial », *Computers & Operations Research*, **7**(1-2) : 5–31.
- HWANG C. R et YOON K. (1981). « Lecture Notes in Economics and Mathematical », *Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, NY*.
- IBARRA O. et KIM C. (1977). « Heuristic algorithms for scheduling independent tasks of non identical processors », *Journal of the Association for Computing Machinery*, **24** : 280–289.
- IJIRI Y. (1965). « Management Goals and Accounting for Control », *North Holland, Amsterdam*.
- ISAAC Wassy , AÏT-KADI Daoud et NOURELFATH Mustapha (2003). « Stratégie optimale d'inspection et de la maintenance d'un système reconfigurable », *Congrès International de Génie Industriel (GI)*.

- IVANOV Alexei , VARNIER Christophe et ZERHOUNI Nouredine (2003). « Ordonnement des activités de maintenance dans un contexte distribué », *Conférence Francophone de Modélisation et Simulation (MOSIM)*.
- JABEUR Khaled et MARTEL Jean-Marc (2005). « La décision de groupe : l'application de méthodes de surclassement de synthèse », *Technical Report 11*, Groupe de Travail Européen "Aide Multicritère à la Décision".
- JACKSON J.R. (1955). « Scheduling a production line to minimize maximum tardiness », *Management research project, university california*, (43).
- JEBALI Aïda , LADET Pierre et ALOUANE Atidel Hadj (2003a). « Une approche heuristique pour la construction du programme opératoire », *Congrès International de Génie Industriel (GI)*.
- JEBALI Aïda , LADET Pierre et ALOUANE Atidel Hadj (2003b). « Une méthode pour la planification des admissions dans les systèmes hospitaliers », *Conférence Francophone de Modélisation et Simulation*, pp. 466–473.
- KAFFEL Hédi (2001). *La maintenance distribuée : concept, évaluation et mise en oeuvre*, Thèse de doctorat, Faculté des sciences et de Génie, Université Laval, Quebec.
- KALLEN M.J. et NOORTWIJK J.M. Van (2005). « Optimal maintenance decisions under imperfect inspection », *Reliability Engineering and System Safety*, **90** : 177–185.
- KANE Hamdjatou et BATISTE Pierre (2003a). « Un modèle d'ajustement de la capacité à la charge basé sur les ressources humaines », *Conférence Francophone de Modélisation et Simulation (MOSIM)*.
- KANE Hamdjatou , AÏT-KADI Daoud , D'AMOUR Sophie et BATISTE Pierre (2003b). « Un modèle optimal de planification des ressources pour satisfaire les besoins d'effectifs en maintenance », *Congrès International de Génie Industriel (GI)*.
- KENNEDY W.J. , WAYNE-PATTERSON J. et FRENDENDALL Lawrence D. (2002). « An overview of recent literature on spare parts inventories », *International Journal of Production Economics*, **76** : 201–215.
- KHER H.V. (2000). « Examination of worker assignment and dispatching rules for managing vital customer priorities in dual resource constrained job shop environments », *Computers & Operation Research*, **27** : 525–537.
- KIRKPATRICK S. , GELATT C.D. et VECCHI M.P. (1983). *Optimization by simulated annealing*, Science.
- KOVALYOV M.Y. (1991). « On one machine scheduling to minimize the number of late items and the total tardiness », *Technical report*, Institute of Engineering Cybernetics, Academy of Sciences of Byelorussian SSR, Minsk, Byelorussia.
- LA H.T. , SANTAMARIA J.L. et BRIAND C. (2005). « Une aide à la décision pour l'ordonnement robuste en contexte mono-ressource : un compromis robustesse / performance », *6ème Congrès de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF'05)*.
- LAWLER E.L. (1977). « A pseudopolynomial algorithm for sequencing jobs to minimize total tardiness », *Annals of Discrete Mathematics*, **1** : 331–342.

- LAWLER E.L. (1982). « A fully polynomial approximation scheme for the total tardiness problem », *Operations Research Letters*, **1** : 207–208.
- LAWLER E.L. et WOOD D.E. (1966). « Branch and bound methods : A survey », *Operations Research*, **14** : 699–719.
- LEE Hong Tau , CHEN Sheu Hua et KANG He Yau (2002). « Multicriteria scheduling using fuzzy theory and tabu search », *International Journal of Production Research*, **40**(5) : 1221–1234.
- LEE Loo Hay , LEE Chul Ung et TAN Yen Ping (2007). « A multi-objective genetic algorithm for robust flight scheduling using simulation », *European Journal of Operational Research*, **177**(3) : 1948–1968.
- LENSTRA J. , RINNOOY K.A. et BRUCKER P. (1977). « Complexity of machine scheduling problems », *Complexity of machine scheduling problems*, **1** : 343–362.
- LEON V. Jorge , WU S. David et STORER Robert H. (1994). « Robustness measures and robust scheduling for job shops », *IIE Transactions*, **26**(26).
- LETOUZEY Agnès (2001). *Ordonnancement interactif basé sur des indicateurs : Application à la gestion de commandes incertaines et à l'affectation des opérateurs*, PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- LÉGER Simon (n.d.). « Monte Carlo pour les nuls, 2006 », <http://homepages.nyu.edu/sl1544/MonteCarloNuls.pdf>.
- MACKAY K.N. , BUZACOTT J.A. et SAFAYENI F.R. (1989). *Knowledge based production management systems*, Elsevier Science Publishers, chapter The scheduler's knowledge of uncertainty : The missing link.
- MARTELLO Silvano , SOUMIS François et TOTH Paolo (1997). « Exact and approximation algorithms for makespan minimisation on unrelated parallel machines », *Discrete Applied Mathematics*, **75** : 169–188.
- MCLAY Laura A. et GOLDBERG David E. (2005). « Efficient Genetic Algorithms Using Discretization Scheduling », *Evolutionary Computation*.
- MEHTA S.V. et UZSOY R. (1999). « Predictable scheduling of a single machine subject to breakdowns », *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, **12** : 15–38.
- MENA Sami Ben (2000). « Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision », *Revue de Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, **4**(2) : 83–93.
- MESSAOUDI Darragi , ABDULNOUR Georges , VAILLANCOURT Raynald , KOMLJENOC Drangand et CROTEAU Michel (2005). « Amélioration de la fiabilité des équipements à travers l'optimisation de la maintenance préventive », *Congrès International de Génie Industriel (GI)*.
- MIGNON D.J. , HONKOMP S.J. et REKLAITIS G.V. (1995). « A framework for investigating schedule robustness under uncertainty », *Computers and Chemical Engineering*, **19** : 615–620.

- MJEMA E.A.M. (2002). « An analysis of personnel capacity requirement in the maintenance departement by using a simulation method », *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, **8**(3) : 253–273.
- MOKOTOFF E. et P.CHRÉTIENNE (2002). « A cutting plane algorithm for the unrelated parallel machine scheduling problem », *European Journal of Operational Research*, **141** : 515–525.
- MONCHY François (2000). *Maintenance, méthodes et organisation*, Dunod.
- MULLER Alexandre , LEVRAT Eric et SUHNER Marie-Christine (2005). « Le pronostic, processus clé d'une stratégie de maintenance prévisionnelle pour le maintien en Conditions Opérationnelles d'un système de production », *Congrès International de Génie Industriel (GI)*.
- OUNNAR Fouzia , BOUCHRIHA Hanen , PUJO Patrick , LADET Pierre et D'AMOURS Dophie (2003). « Faire ou faire-faire dans un réseau logistique auto-organisé », *Congrès International de Génie Industriel (GI)*.
- PARASHKEVOV Atanas (1994). « *Distributed real-time computer systems* », Master's thesis, Department of Computer Science, University of Adelaide, Australia.
- PARETO Vilfredo (1909). *Manuel d'économie politique*.
- PETROVIC Dobrila , DUENAS Alejandra et PETROVIC Sanja (2006). « Decision support tool for multi-objective job shop scheduling problems with linguistically quantified decision functions », *Decision Support Systems*, .
- PFUND Michele , FOWLER John W. et GUPTA Jatinder N. D. (2004). « A survey of Algorithms for single and multi-objective unrelated machine deterministic scheduling problems », *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, **21**(3) : 230–241.
- PIERON H. (2005). « Lexique de la formation continue », *Technical report*, <http://www.hommes-et-savoirs.fr>.
- PINEDO Mickael (1995). *Scheduling, Theory, Algorithms and Systems*, Prentice.
- POTTS C.N. et WASSEHNOVE L.N. Van (1985). « A branch and bound algorithm for the total weighted tardiness problem », *Operations Research*, **33** : 363–377.
- PROTEUS (2003). <http://www.proteus-iteaproject.com/>, .
- RAMAMRITHAM Krithi et STANKOVIC John A. (1994). « Scheduling algorithms and operating systems support for real-time systems », *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers*.
- RASOVSKA Ivana (2006). *Contribution à une méthodologie de capitalisation des connaissances basées sur le raisonnement à partir de cas : Application au diagnostic dans une plateforme d'e-maintenance*, PhD thesis, Université de Franche-Comté.
- ROBERTS S.M. et ESCUDERO L.F. (1983). « Minimum problem-size formulation for the scheduling of plant maintenance personnel », *Journal of Optimization Theory and Applications*, **39**(3) : 345–362.
- ROY B. (1985). *Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision*, Economica, Paris.

- ROY B. et BOUYSSOU D. (1993). *Aide Multicritère à la Décision : Méthodes et cas*, Economica, Paris.
- RUIZ-TORRES Alex J. , HO Johnny C. et LOPEZ Francisco J. (2006). « Generating Pareto schedules with outsource and internal parallel resources », *International Journal of Production Economics*, (103) : 810–825.
- RUIZ-TORRES Alex J. , LÓPEZ Francisco J. et HO Johnny C. (2007). « Scheduling uniform parallel machines subject to a secondary resource to minimize the number of tardy jobs », *European Journal of Operational Research*, **179**(2) : 302–315.
- RUSTENBURG W.D. , VAN-HOUTUM G.J. et ZIJM W.H.M. (2001). « Spare parts management at complex technology-based organisations : An agenda for research », *International Journal of Production Economics*, **71** : 177–193.
- SAATY T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*, New York, McGraw-Hill.
- SEFIANE Hakim et SENECHAL Olivier (2005). « Contribution au développement d'une ingénierie du diagnostic pour la télémaintenance », *Congrès International de Génie Industriel (GI)*.
- SIMEU-ABAZI Z. , MASCOLO M. Di et PHAM D.M. (2006). « Maintenance centralisée pour les systèmes de production multi-sites », *MOSIM*.
- SIMON H.A. (1947). *Administrative behaviour : a study of Decision Making Processes in Administrative Organizations*, Mac Millan, New York.
- SLOAN T. W. et SHANTHIKUMAR J.G. (2000). « Combined production and maintenance scheduling for a multiple product, single machine production system », *Production and Management*, **9**(4) : 379–399.
- SMITH W.E. (1956). « Various optimizers for single-stage production », *Naval Research Logistics Quarterly*, **3** : 59–66.
- SONG Xueyan et PETROVIC Sanja (2005). « Handling fuzzy constraints in flow shop problem », *EUROFUSE*.
- SPADONI M. (2004). « Système d'information centré sur le modèle CIMOSA dans un contexte d'entreprise étendue », *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, **38** : 497–525.
- SWAMINATHAN Rajesh , PFUND Michele E. , FOWLER John W. , MASON Scott J. et KEHA Ahmet (2007). « Impact of permutation enforcement when minimizing total weighted tardiness in dynamic flowshops with uncertain processing times », *Computers & Operations Research*, **34**(10) : 3055–3068.
- TAHON C. et ans E. DINDELEUX M. Dupas (1994). « Mise en oeuvre d'un poste de conduite d'atelier à l'AIP de Valenciennes », *Revue d'Automatique et de productique appliquées*, **7**(5).
- TANG Hao , MILLER-HOOKS Elise et TOMASTIK Robert (2007). « Scheduling technicians for planned maintenance of geographically distributed equipment », *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation*, **43**(5) : 591–609.

- TARARYKYNE Viatcheslav (2005). *Modélisation des flux d'information dans un système de E-maintenance*, PhD thesis, UFR des Sciences et Techniques de l'Université de Franche-Comté.
- TCHOMMO Janvier-Laurent , BATISTE Pierre et SOUMIS François (2003). « Etude bibliographique de l'ordonnancement simultané des moyens de production et des ressources humaines », *Congrès International de Génie Industriel (GI)*.
- THIERRY Caroline (2003). *Gestion de chaînes logistique, modèles et mise en oeuvre pour l'aide à la décision à moyen terme*, PhD thesis, Université Toulouse II, le Mirail.
- THOMAS Didier (2005). « Gestion des compétences et organisation : le nouveau défi des entreprises », *Congrès International de Génie Industriel (GI)*.
- TIMMERMAN E. (1986). « An approach to vendor performance evaluation », *Journal of Purchasing and Materials Management*, pp. 2–8.
- TRILLING Lorraine et GUINET Alain (2005). « Aide à la décision pour la gestion quantitative des ressources humaines : comment lever la contrainte financière hospitalière », *Congrès International de Génie Industriel (GI)*.
- TRUNG La Hoang (2005). *Utilisation d'ordres partiels pour la caractérisation de solutions robustes en ordonnancement*, PhD thesis, Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS.
- VANDERPOOTEN D (1988). *A Multicriteria Interactive Procedure Supporting a Directed Learning of Preferences*, Cahiers du Lamsade, Université de Paris-Dauphine.
- VINCKE Ph. (1989). *L'Aide Multicritère à la Décision*.
- WIDMER Marino , HERTZ Alain et COSTA Daniel (2001). *Ordonnancement de la production*, Hermes, chapitre Les méthaheuristiques, pp. 55–93.
- WIERZBICKI A (1980). « The Use of Reference Objectives in Multi-Objective Optimization », *MCDM Theory and Application*, Fandel G, Gal T. Springer Verlag, (177) : 468–486.
- YANG I-Tung et CHANG Chi-Yi (2005). « Stochastic resource-constrained scheduling for repetitive construction projects with uncertain supply of resources and funding », *International Journal of Project Management*, **23**(7) : 546–553.
- ZADEH L. A. (1965). « Fuzzy sets », *Information and control*, **8** : 1265–1279.
- ZEGHAL Farah et MINOUX Michel (2001). « Modélisation et résolution d'un problème d'affectation d'équipages en transport aérien », *MOSIM*.

Résumé

Les services de maintenance interviennent pour maintenir ou remettre en état de bon fonctionnement les équipements. A travers la réduction de l'indisponibilité des équipements, ils participent à l'amélioration de la compétitivité des entreprises. Le service de maintenance est composé entre autre, de ressources humaines qui réalisent les tâches de maintenance. L'un des problèmes du manager de ce service est alors de trouver, pour chaque tâche, quelle ressource la traitera et quand.

Dans cette thèse, nous nous intéressons à un problème d'affectation et d'ordonnement en prenant en compte les compétences des ressources humaines. Les différences de compétence sont peu intégrées dans les modèles de la littérature. Les ressources sont en effet souvent considérées comme identiques ou n'ayant qu'une compétence. Les différents types de tâches présentent aussi des spécificités qui sont peu retrouvées dans les approches de la littérature. Cette problématique se retrouve dans d'autre contexte que celui de la maintenance et touche plus généralement l'affectation et l'ordonnement de l'activité d'un service.

Nous proposons une approche de résolution dynamique pour un problème mono-critère d'affectation et d'ordonnement des activités de maintenance. Dans le contexte de la maintenance, différents critères concernant les ressources et les tâches sont importants. Nous proposons donc une extension de l'approche dynamique mono-critère au multi-critère. Certaines données utilisées dans l'affectation et l'ordonnement sont incertaines. Pour anticiper la présence de ces incertitudes nous proposons une approche dynamique, proactive à un problème multi-critère d'affectation et d'ordonnement d'activité de maintenance en contexte incertain. Toutes ses approches font appel à une méthode d'amélioration par modification partielle de l'ordonnement, inspirée de la méthode du kangourou.

Mots clés : Compétence, Incertitudes, Logique floue, Maintenance, Multi-critère, Ordonnement statique et dynamique, Ressource humaine, Robustesse.

Abstract

Maintenance services intervene to maintain or to repair equipments. With the reduction of the equipments unavailability, they participate to the improvement of the enterprises competitiveness. Maintenance services are mainly composed of human resources who realize maintenance tasks. One problem of the maintenance manager is to find, for each task, which resource will be in charge of it and when.

In this thesis, we are interested in a problem of assignment and scheduling by taking in consideration competences of human resources. Differences of competences are few integrated in models of the literature. Resources are often considered as being identical or having only one competence. The different types of tasks present also specificities which are few found in the approaches of the literature. This problematic can be find in others contexts and is more generally an assignment and scheduling problem of activities of a service.

We propose a dynamic resolution approach for a mono-criterion scheduling problem. In the maintenance context, criteria concerning resources but also tasks are important. We proposed, then, a multi-criteria extension to this dynamic approach. Some data which are used to build schedules are uncertain. To anticipate the presence of uncertainties, we propose a dynamic and proactive approach to a multi-objective scheduling problem in uncertain context. All these approaches are based on an improvement method of solutions. This one is inspired by the kangaroo method and modifies only partially the current solutions.

Mots clés : Fuzzy logic, Human resources, Maintenance, Multi-criterion, Robustness, Static and dynamic scheduling, Skill, Uncertainty modelling.