

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SETIF 1

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

THESE

Présentée au Département d'ELECTROTECHNIQUE

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Option : AUTOMATIQUE

Par

Mme BENSEMRA née BELLA YASMINA

THÈME

**Contribution à la gestion de la maintenance
dans un environnement distribué**

Soutenue le 20/02/2020 devant le Jury :

| | | | |
|----------------------------|-------------------|---|---------------------------|
| KHEMLICHE Mabrouk | Professeur | Univ. Ferhat Abbas Sétif 1 | Président |
| MOSTEFAI Mohammed | Professeur | Univ. Ferhat Abbas Sétif 1 | Directeur de thèse |
| MOUSSAOUI Abdelkrim | Professeur | Univ. 8 mai 1945 Guelma | Examineur |
| MOUSS Hayet | Professeur | Univ. Mostefa Benboulaïd - Batna 2 | Examinatrice |
| MOUSS Kinza Nadia | Professeur | Univ. Mostefa Benboulaïd - Batna 2 | Examinatrice |
| SAIT Belkacem | Professeur | Univ. Ferhat Abbas Sétif 1 | Examineur |

Avant-propos

Le travail présenté dans cette thèse a été effectué au Laboratoire d'Automatique de Sétif (LAS), au sein de l'équipe conduite qui se fixe pour objectifs, l'étude, la modélisation, l'analyse et la conduite des systèmes industriels.

Ce travail doit énormément à mon Directeur de thèse M. MOSTEFAI Mohammed, Professeur à l'université Ferhat Abbas Sétif 1, qui m'a encadré pour la réalisation des travaux. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude et ma haute reconnaissance pour sa collaboration active et fructueuse. Grâce à sa patience, sa disponibilité ainsi qu'à ses encouragements, cette thèse a pu être concrétisé et mené à terme.

Je tiens à remercier Monsieur KHEMLICHE Mabrouk, Professeur à l'Université Ferhat Abbas Sétif 1, pour avoir accepté de présider le jury de ma soutenance.

Je tiens également à exprimer toute ma gratitude à Madame MOUSS Hayet Professeur à l'université Mostefa Benboulaïd - Batna 2, Madame MOUSS Kinza Nadia Professeur à l'Université Mostefa Benboulaïd - Batna 2, Monsieur MOUSSAOUI Abdelkrim Professeur à l'université 8 Mai 45 Guelma et Monsieur SAIT Belkacem Professeur à l'université Ferhat Abbas Sétif 1, qui ont bien voulu examiner ce travail.

Je remercie vivement le Professeur AOUNI Lakis de m'avoir accueilli au sein du département de mécanique de l'école polytechnique de Montréal, je remercie également Docteur OULMANE Abdelhak pour sa collaboration et ses encouragements.

Mes remerciements vont également aux collègues et amies du Laboratoire pour leurs sympathies et encouragements. Et pour finir, je ne remercierai jamais assez mes proches et amies pour leurs aides et soutien moral.

Résumé

De nos jours les évolutions technologiques et le contexte économique actuel ont provoqué d'importants changements dans les systèmes de gestion de maintenance, le choix de ses éléments structurels n'est pas indépendant de son environnement.

Parallèlement aux évolutions technologiques, l'organisation spatiale et distribuée de la maintenance a été également développée. Dans ce contexte nous avons proposé un système de gestion de maintenance appliqué à une unité de production constituée de plusieurs sites distribués géographiquement. Pour avoir des installations bien entretenues et fiables, capables de réaliser des estimations plus rapides et plus fiables, un programme de maintenance bien conçu est obligatoire.

Pour ce faire, nous avons appliqué une politique de maintenance prédictive mise en œuvre en CBM. Comme notre application est portée sur des machines tournantes, l'analyse vibratoire constitue un outil efficace pour extraire des informations sur l'état de santé des machines. Une méthode de détection et d'isolation de défaut dans le domaine temps-fréquence sur un roulement industriel est appliquée. Les résultats expérimentaux obtenus sont validés par rapport aux résultats calculés théoriquement.

Pour prendre en charges les actions de maintenance conditionnelles générées, une modélisation d'un système de gestion de tâches de maintenance est développée par rapport au contexte distribué proposé par notre système. Les tâches (actions) de maintenance prédictives sont requises par des évènements aléatoires, l'affectation de ces tâches se fait à des ressources ayant des niveaux de compétences différents. Le problème est réduit à un problème d'ordonnancement dynamique à ressources parallèles indépendantes ayant une complexité NP-difficile.

Pour résoudre ce problème d'ordonnancement, nous avons appliqué des heuristiques de recherche par voisinage basé sur un algorithme de descente amélioré. Comme notre système répond bien aux normes de la conception orienté objet (COO) et afin de développer un système de gestion de maintenance efficace, nous avons modélisé le système avec le langage UML. Une simulation ainsi qu'une validation des résultats est effectuée.

Table des matières

| | |
|--|------|
| <i>Avant-propos</i> | I |
| <i>Résumé</i> | II |
| <i>Table des matières</i> | III |
| <i>Liste des Acronymes</i> | VIII |
| <i>Liste des Tableaux</i> | X |
| <i>Table des Figures</i> | XI |
| <i>Introduction générale</i> | 1 |
| <i>CHAPITRE I : La gestion de la maintenance : une perspective évolutive</i> | |
| <i>(Etat de l'art et Problématique)</i> | 8 |
| <i>I.1 Introduction</i> | 8 |
| <i>I.2 Evolution des besoins de maintenance</i> | 8 |
| <i>I.2.1 Pratiques de la maintenance au fil du temps</i> | 9 |
| <i>I.2.2 La maintenance en contexte</i> | 10 |
| <i>I.2.3 Changements dans le domaine de la maintenance</i> | 12 |
| <i>I.2.3.1 Evolution technologique des équipements</i> | 12 |
| <i>I.2.3.2 Evolution du service à la clientèle</i> | 13 |
| <i>I.2.3.3 Evolution de la technologie de l'information et de la communication</i> | 13 |
| <i>I.2.3.4 Externalisation de la fonction maintenance</i> | 13 |
| <i>I.2.3.5 Evolution organisationnelle et distribution de la maintenance</i> | 15 |
| <i>I.3 Classification de la maintenance</i> | 15 |
| <i>I.3.1 Actions de maintenance</i> | 17 |
| <i>I.3.1.1 Actions correctives de maintenance (CM)</i> | 17 |
| <i>I.3.1.2 Actions de maintenance de précaution (PM)</i> | 17 |
| <i>I.3.2 Politiques de maintenance</i> | 18 |
| <i>I.3.3 Concepts de maintenance</i> | 20 |
| <i>I.3.3.1 Tableaux de décision (Q & D)</i> | 23 |
| <i>I.3.3.2 Approches du coût du cycle de vie (LCC)</i> | 23 |
| <i>I.3.3.3 Maintenance Productive Totale (TPM)</i> | 24 |
| <i>I.3.3.4 Maintenance centrée sur la fiabilité (RCM)</i> | 25 |

| | |
|---|----|
| <i>I.3.3.5 Concepts liés à la RCM.....</i> | 26 |
| <i>I.3.3.6 Concepts de maintenance personnalisés.....</i> | 27 |
| <i>I.4 Responsable de la maintenance.....</i> | 27 |
| <i>I.4.1 Techniques d'aide à la décision.....</i> | 28 |
| <i>I.4.2 Evolution de la CMMS.....</i> | 29 |
| <i>I.5 Synthèse bibliographique et problématique</i> | 30 |
| <i>I.5.1 Synthèse bibliographique.....</i> | 30 |
| <i>I.5.2 problématique.....</i> | 33 |
| <i>I.5.2.1 Architecture du système de production.....</i> | 33 |
| <i>I.5.2.2 Niveaux d'action en gestion de maintenance.....</i> | 34 |
| <i>I.5.2.3 Objectifs à atteindre.....</i> | 35 |
| <i>I.6 Conclusion.....</i> | 36 |
| <i>CHAPITRE II : Application d'une politique de maintenance prédictive mise en œuvre en (CBM) (Détection de défaut d'un roulement industriel)</i> | 37 |
| <i>II.1 Introduction.....</i> | 37 |
| <i>II.2 Evolution des performances de disponibilité des machines.....</i> | 37 |
| <i>II.2.1 Stratégie de la maintenance prédictive.....</i> | 39 |
| <i>II.2.2 Approches pronostiques de la maintenance conditionnelle (CBM).....</i> | 40 |
| <i>II.2.2.1 Approche basée sur un modèle</i> | 40 |
| <i>II.2.2.2 Approche basée sur les données.....</i> | 41 |
| <i>II.2.2.3 Approche hybride.....</i> | 41 |
| <i>II.2.3 Techniques de détection de défauts et leur pourcentage % d'utilisation.....</i> | 42 |
| <i>II.3 Détection et analyse des défauts pour les machines tournantes.....</i> | 43 |
| <i>II.3.1 Analyse vibratoire pour la détection des défauts des roulements industriels.....</i> | 43 |
| <i>II.3.2 Fréquences caractéristiques de défaut des roulements à billes.....</i> | 45 |
| <i>II.3.3 Classe des distributions quadratiques temps-fréquence (La classe de Cohen).....</i> | 47 |
| <i>II.3.3.1 Distribution de Choi-Williams.....</i> | 48 |
| <i>II.3.3.2 Distribution de Born-Jordan.....</i> | 49 |
| <i>II.4 Application pratique.....</i> | 49 |
| <i>II.4.1 Description du roulement et fréquences caractéristiques des défauts.....</i> | 49 |
| <i>II.4.2 Tests expérimentaux, acquisition et traitement des données.....</i> | 51 |
| <i>II.4.2.1 banc d'essai expérimental.....</i> | 51 |
| <i>II.4.2.2 Diagramme des vitesses de rotation de l'arbre du banc d'essai.....</i> | 52 |

| | |
|--|-----------|
| <i>II.4.2.3 Logiciel de traitement des données.....</i> | 53 |
| <i>II.4.2.4 Expérimentation.....</i> | 54 |
| <i>II.4.2.4.1 Mesures des vibrations pour une vitesse de rotation de 1000 tr/min.....</i> | 54 |
| <i>II.4.2.4.2 Mesures des vibrations pour une vitesse de rotation de 2000 tr/min.....</i> | 56 |
| <i>II.4.2.4.3 Validations des résultats.....</i> | 57 |
| <i>II.5 Conclusion.....</i> | 58 |
| <i>CHAPITRE III : Modélisation et optimisation d’ordonnancements statique et dynamique sous contrainte de compétences (Application à un contexte distribué).....</i> | 60 |
| <i>III.1 Introduction.....</i> | 60 |
| <i>III.2 Description des problèmes d’ordonnancement.....</i> | 60 |
| <i>III.2.1 Notations et définitions.....</i> | 61 |
| <i>III.2.2 Travaux.....</i> | 62 |
| <i>III.2.3 Ressources.....</i> | 62 |
| <i>III.2.3.1 Une machine (une ressource) (\emptyset)</i> | 62 |
| <i>III.2.3.2 Machines (ressources) parallèles.....</i> | 63 |
| <i>III.2.3.3 Machines dédiées.....</i> | 63 |
| <i>III.2.3.4 Autres configurations.....</i> | 64 |
| <i>III.2.4 Les contraintes.....</i> | 65 |
| <i>III.2.4.1 Contraintes des ressources.....</i> | 65 |
| <i>III.2.4.2 Contraintes de procédure.....</i> | 65 |
| <i>III.2.4.3 Contraintes temporelles.....</i> | 65 |
| <i>III.2.5 Les critères d’optimisation et fonctions « objectifs ».....</i> | 65 |
| <i>III.2.6 Classification des problèmes d’ordonnancement.....</i> | 66 |
| <i>III.2.7 Approches classiques de résolution des problèmes d’ordonnancement.....</i> | 67 |
| <i>III.2.7.1 Les méthodes exactes.....</i> | 68 |
| <i>III.2.7.1.1 Les méthodes optimales efficaces.....</i> | 68 |
| <i>III.2.7.1.2 Les méthodes optimales énumératives.....</i> | 68 |
| <i>III.2.7.2 Approches métaheuristiques.....</i> | 69 |
| <i>III.2.7.2.1 Les algorithmes gloutons.....</i> | 69 |
| <i>III.2.7.2.2 Les méthodes de recherche locale par voisinage.....</i> | 69 |
| <i>III.2.7.2.3 Les métaheuristiques à base de population.....</i> | 70 |
| <i>III.3 Missions et spécificités de la fonction ordonnancement en maintenance.....</i> | 70 |
| <i>III.3.1 Missions de l’ordonnancement en maintenance.....</i> | 71 |

| | |
|--|-----------|
| <i>III.3.2 L'ordonnancement et les ressources humaines.....</i> | 71 |
| <i>III.3.2.1 La prise en compte des ressources humaines.....</i> | 72 |
| <i>III.3.2.2 La prise en compte des compétences.....</i> | 72 |
| <i>III.3.3 L'ordonnancement et la planification selon l'horizon.....</i> | 73 |
| <i>III.3.3.1 Différences entre ordonnancement et planification.....</i> | 73 |
| <i>III.3.3.2 Précisions sur la notion d'horizon.....</i> | 74 |
| <i>III.3.4 Ordonnancement statique et dynamique.....</i> | 74 |
| <i>III.3.4.1 Ordonnancement statique.....</i> | 74 |
| <i>III.3.4.2 Ordonnancement dynamique.....</i> | 75 |
| <i>III.3.5 Un problème multicritère.....</i> | 75 |
| <i>III.4 Modélisation des différentes composantes de l'ordonnancement.....</i> | 75 |
| <i>III.4.1 Description du système de production structuré en multi-sites</i> | 75 |
| <i>III.4.2 Modélisation mathématique.....</i> | 76 |
| <i>III.4.2.1 Sites de production.....</i> | 76 |
| <i>III.4.2.2 Ressources humaines.....</i> | 77 |
| <i>III.4.2.3 Tâche de maintenance.....</i> | 78 |
| <i>III.4.2.4 Fonction « Objectifs » et critères d'optimisation</i> | 79 |
| <i>III.4.2.5 Les contraintes.....</i> | 80 |
| <i>III.5 Algorithmes d'insertion statique et dynamique des nouvelles tâches.....</i> | 80 |
| <i>III.5.1 Heuristique d'insertion dynamique d'un problème monocritère.....</i> | 81 |
| <i>III.5.2 Heuristique d'insertion dynamique du problème multicritère.....</i> | 83 |
| <i>III.5.2.1 choix de la politique d'optimisation multicritère.....</i> | 83 |
| <i>III.5.2.2 Heuristique de résolution multicritère.....</i> | 85 |
| <i>III.6 Conclusion.....</i> | 87 |
| CHAPITRE IV : Développement d'une plateforme de simulation en langage UML pour la gestion des tâches de maintenance dans un contexte distribué..... | 88 |
| <i>IV.1 Introduction.....</i> | 88 |
| <i>IV.2 Outils UML utilisés pour la modélisation du système.....</i> | 89 |
| <i>IV.2.1 Diagramme de classe.....</i> | 89 |
| <i>IV.2.1.1 La visibilité des membres d'une classe.....</i> | 90 |
| <i>IV.2.1.2 Types de relation entre classes.....</i> | 90 |
| <i>IV.2.1.2.1 Héritage.....</i> | 90 |
| <i>IV.2.1.2.2 Association.....</i> | 91 |

| | |
|---|------------|
| <i>IV.2.1.2.3 Contenance.....</i> | 91 |
| <i>IV.2.2 Diagramme de séquence.....</i> | 92 |
| <i>IV.3 Modélisation du système avec le langage UML.....</i> | 93 |
| <i>IV.3.1 Conception orientée objet du système de maintenance.....</i> | 93 |
| <i>IV.3.1.1 Modélisation statique du système.....</i> | 94 |
| <i>IV.3.1.1.1 Identification des classes.....</i> | 95 |
| <i>IV.3.1.1.2 Diagramme de classe du système.....</i> | 107 |
| <i>IV.3.1.2 Dynamique d'insertion de nouvelles tâches.....</i> | 108 |
| <i>IV.4 Simulation et validation du modèle développé.....</i> | 111 |
| <i>IV.4.1 Génération des données.....</i> | 111 |
| <i>IV.4.2 Validation du modèle avec l'approche monocritère.....</i> | 112 |
| <i>IV.4.2.1 Insertion d'une tâche.....</i> | 112 |
| <i>IV.4.2.2 Insertion successive de tâches.....</i> | 114 |
| <i>IV.4.3 Validation du modèle avec l'approche multicritère.....</i> | 115 |
| <i>IV.4.3.1 Impact de l'ajout de critères supplémentaires.....</i> | 115 |
| <i>IV.4.3.2 Insertion de plusieurs tâches.....</i> | 117 |
| <i>IV.5 Contributions par rapport au contexte développé en Mono-site.....</i> | 118 |
| <i>IV.5.1 Contributions pour l'approche Monocritère</i> | 118 |
| <i>IV.5.2 Contribution pour l'approche Multicritère</i> | 119 |
| <i>IV.6 Conclusion.....</i> | 119 |
| <i>Conclusion générale.....</i> | 121 |
| <i>Références bibliographiques.....</i> | 125 |
| <i>Annexe A.....</i> | 136 |
| <i>Annexe B.....</i> | 137 |
| <i>Annexe C.....</i> | 142 |

Liste des Acronymes

BCM: Business-centered maintenance.

BoB: Best-of-breed.

CBM: Condition-based maintenance.

CFR: Constant failure rate.

CIBOCOF: Center Industriel Beleid Onder houd sont wikkkelings framework (Néerlandais).

CM: Corrective maintenance.

CMMS: Computerized maintenance management systems.

DOM: Design-out of Maintenance.

EAMS: Enterprise asset management (system).

EHS: Energy, health and safety.

EDP: Electronic data processing.

ERP: Enterprise resource planning.

FBM: Failure-based maintenance.

FMI: Fast moving items.

ICT: Information communication technology.

IFR: Increasing failure rate.

ILS: Integrated logistics support.

IT: Information technology.

JIT: Just-in-time.

LCC: Life-cycle costing.

LSA: Logistics support analysis.

MCDM: Multi-criteria decision- making.

MIS : Management information system.

MMIS : Maintenance management information system.

MRP: Material requirements planning.

MRO: Maintenance repair and operating supplies.

MTBF: Mean-time-between-failures.

MTTR: Mean-time-to-repair.

NMI: Normal moving items.

OBM: Opportunity-based maintenance.

OEE: Overall equipment effectiveness.
OM: Operations management.
OBM: Opportunity-based maintenance.
OEE: Overall equipment effectiveness.
OM: Operations management.
OR: Operation research.
PM: Precautionary maintenance.
Q&D: Quick & dirty decision charts.
RBI: Risk-based inspections.
RBCM: Risk-based centered maintenance.
RCM: Reliability-centered maintenance.
SAE: Society of automotive engineering.
SMED: Single minute exchange of dies.
SMI: Slow moving items.
TBM: Time-based maintenance.
TPM: Total productive maintenance.
TQM: Total quality management.
UBM: Use-based maintenance.
VDM: Value-driven maintenance.
VSMI: Very slow moving items.
WIP : Works-in-process.

Liste des Tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau I.1. Politiques de maintenance générique..... | 19 |
| Tableau I.2. Description des générations des concepts de maintenance..... | 22 |
| Tableau I.3. Classification des concepts rationalisés de RCM..... | 26 |
| Tableau I.4 Les techniques <i>OR / OM</i> et leurs applications en maintenance..... | 28 |
| Tableau I.5. Evolution des <i>CMMS</i> | 29 |
| Tableau II.1. Spécifications techniques du roulement PW100 #5 | 50 |
| Tableau II.2 Fréquences caractéristiques des défauts du roulement..... | 50 |
| Tableau II.3 Caractéristiques techniques du banc d'essai..... | 51 |
| Tableau II.4 Vitesses de l'arbre de rotation..... | 53 |
| Tableau II.5 Erreurs relatives mesurées..... | 58 |
| Tableau III.1 Critères d'optimisation..... | 66 |
| Tableau IV.1. Valeur de la $\sum w_j T_j$ après insertion d'une nouvelle tâche..... | 112 |
| Tableau IV.2. Valeur de la $\sum w_j T_j$ pour l'optimisation statique et dynamique..... | 113 |
| Tableau IV.3. $\sum w_j T_j$ après insertion de dix tâches..... | 114 |
| Tableau IV.4. Résultats des critères d'optimisation après insertion d'une nouvelle tâche. | 115 |
| Tableau IV.5. Critères d'optimisation après insertion successive de dix tâches..... | 117 |

Table des figures

| | |
|--|----|
| Figure Int.1. Problèmes clés dans la maintenance d'un équipement..... | 2 |
| Figure Int.2. Les problèmes techniques et commerciaux en maintenance..... | 3 |
| Figure Int.3. Différentes actions développées pour la gestion de la maintenance..... | 4 |
| Figure I.1. La fonction de maintenance dans une perspective temporelle..... | 9 |
| Figure I.2. Maintenance en contexte. | 11 |
| Figure I.3. Niveaux de décision d'externalisation..... | 14 |
| Figure I.4. Trois déclinaisons de l'organisation spatiale d'un système de maintenance..... | 15 |
| Figure I.5. Actions, Politiques et Concepts en maintenance..... | 16 |
| Figure I.6. Les « six grandes pertes » de l'efficacité globale de l'équipement..... | 24 |
| Figure I.7. Logique CIBOCOF..... | 27 |
| Figure I.8. Passage vers la structure multi-site du système de production..... | 33 |
| Figure I.9. Niveaux d'action en gestion de maintenance..... | 34 |
| Figure II.1. Disponibilité des équipements en fonction des politiques de maintenance..... | 38 |
| Figure II.2. Politique de maintenance et sévérité du dommage..... | 38 |
| Figure II.3. un « workflow » d'un programme de maintenance prédictive..... | 39 |
| Figure II.4. Pourcentage % d'utilisation des techniques de surveillance des machines..... | 42 |
| Figure II.5 Pourcentage % des causes des défaillances dans les machines tournantes..... | 43 |
| Figure II.6 Caractéristiques physiques du roulement à billes..... | 45 |
| Figure II.7. Modulation d'amplitude pour la fréquence de défaut f_{IRF} | 46 |
| Figure II.8. Roulement de Pratt & Whitney considéré pour les tests..... | 50 |
| Figure II.9 Banc d'essai expérimental et moniteur portable NI PMA61115..... | 52 |
| Figure II.10. Montage et démontage des roulements sur le banc d'essai..... | 52 |
| Figure II.11 Diagramme des vitesses de rotation de l'arbre..... | 53 |
| Figure II.12 T-F ANALYSIS Toolbox (schéma synoptique)..... | 54 |
| Figure II.13. Distributions pour une vitesse de rotation de 1000 tr/min..... | 55 |
| Figure II.14. Analyse fréquentielle du spectre pour une vitesse de 1000 tr/min..... | 55 |
| Figure II.15. Distributions pour une vitesse de rotation de 2000 tr / min..... | 56 |
| Figure II.16. Analyse fréquentielle du spectre pour une vitesse de 2000 tr / min..... | 57 |

| | |
|--|-----|
| Figure III.1. Structure à une machine. | 62 |
| Figure III.2. Structure à machine parallèles..... | 63 |
| Figure III.3. Structure Atelier <i>flow shop</i> | 63 |
| Figure III.4. Structure Atelier <i>Job Shop</i> | 64 |
| Figure III.5. Architecture multi-sites de l'unité de production..... | 76 |
| Figure III.6. Matrice des durées de déplacement entre les sites..... | 77 |
| Figure III.7. Matrice des compétences..... | 77 |
| Figure III.8. Arrivée stochastique des tâches dans le temps..... | 80 |
| Figure III.9. Principe d'insertion de nouvelles tâches..... | 81 |
| Figure III.10. Algorithme d'initialisation monocritère..... | 82 |
| Figure III.11. Algorithme de descente monocritère | 83 |
| Figure III.12. Procédure de choix d'une politique d'optimisation multicritère..... | 84 |
| Figure III.13. Algorithme d'initialisation multicritère..... | 85 |
| Figure III.14. Algorithme d'optimisation multicritère..... | 86 |
| | |
| Figure IV.1. Structure d'une classe en UML..... | 90 |
| Figure IV.2. Structure de l'héritage en UML..... | 90 |
| Figure IV.3. Structure de l'association navigable dans une direction en UML..... | 91 |
| Figure IV.4. Structure de l'agrégation en UML | 92 |
| Figure IV.5. Structure de la composition en UML..... | 92 |
| Figure IV.6. Lignes de vie d'un diagramme de séquence en UML..... | 92 |
| Figure IV.7. Conception orientée objet du système..... | 94 |
| Figure IV.8. La classe <i>MatriceCompétence</i> | 95 |
| Figure IV.9. La classe <i>MatriceDéplacement</i> | 95 |
| Figure IV.10. La classe <i>Site</i> | 96 |
| Figure IV.11. La classe <i>RessourceHumaines</i> | 97 |
| Figure IV.12. La classe <i>Tâche</i> | 99 |
| Figure IV.13. La classe <i>PlanningPersonnel</i> | 100 |
| Figure IV.14. La classe <i>PlanningGlobal</i> | 101 |
| Figure IV.15. La classe <i>AgentOrdonnancement</i> | 103 |
| Figure IV.16. La classe <i>AlgorithmeMonocritère</i> | 104 |
| Figure IV.17. La classe <i>AlgorithmeMulticritère</i> | 106 |
| Figure IV.18. Diagramme de classe du système..... | 108 |

| | |
|--|-----|
| Figure IV.19. Diagramme de séquences « phase d'initialisation du système »..... | 109 |
| Figure IV.20. Diagramme de séquences « phase d'insertion de la tâche»..... | 110 |
| Figure IV.21. Evolution de $\sum w_j T_j$ en insertion statique et dynamique..... | 113 |
| Figure IV.22. Evolution de $\sum w_j T_j$ avec l'insertion de dix tâches..... | 114 |
| Figure IV.23. Comparaison des critères pour les approches mono et multicritère..... | 116 |
| Figure IV. 24. Evolution des critères avec l'insertion successive de dix tâches..... | 118 |
| Figure Conc.1. Écart entre maintenance et stratégie commerciale..... | 124 |

Introduction générale

Le fonctionnement efficace de la société moderne dépend du bon fonctionnement de nombreux systèmes complexes composés de plusieurs équipements qui fournissent une variété de produits et de services.

Ceux-ci incluent les systèmes de transport (trains, bus, navires, avions...), les systèmes de communication (télévision, réseaux téléphoniques et informatiques), les services publics (réseaux d'eau, gaz, etc.), les usines de fabrication et les biens de consommation, les usines (pour extraire et traiter les minéraux et le pétrole), les hôpitaux (pour fournir des services) et les banques (pour les transactions financières) pour n'en nommer que quelques-uns.

Tout l'équipement n'est pas fiable, il se dégrade avec l'âge et/ou l'utilisation et échoue lorsqu'il n'est plus capable de fournir les produits et les services [1]. Lorsqu'un système complexe échoue, les conséquences peuvent être dramatiques. Il peut entraîner de graves pertes économiques, affecter les êtres humains et causer de graves dommages à l'environnement, néanmoins l'apparition de défaillance peut être contrôlée par des actions de maintenance y compris la maintenance préventive, l'inspection, la surveillance de l'état et la maintenance de la conception [2].

Avec une bonne conception et des actions de maintenance préventive voire prédictive efficaces, la probabilité de défaillance et leurs conséquences peuvent être réduites, mais les défaillances ne peuvent jamais être totalement éliminées [3]. Décider le niveau optimal de maintenance nécessite la construction de modèles appropriés et l'utilisation de techniques d'optimisation sophistiquées [4]. De plus, les problèmes d'entretien ont commencé à être résolus dès la conception, ce qui a mené au concept de durabilité. La fiabilité et la maintenabilité sont devenues des problèmes majeurs dans la conception et l'exploitation des systèmes.

La dégradation et la défaillance dépendent des contraintes sur les divers composants du système. Ceux-ci dépendent des conditions d'exploitation qui sont dictées par des considérations commerciales. En conséquence, la maintenance est passée d'un problème purement technique à un problème de gestion stratégique avec des options telles que l'externalisation de la maintenance, la location d'équipement par opposition à l'achat, etc. [5].

En outre, les progrès technologiques (nouveaux matériaux, nouveaux capteurs pour la surveillance, la collecte de données et l'analyse) ont ajouté de nouvelles dimensions (science, technologie) à la maintenance [6]. Ces progrès se poursuivront à un rythme de plus en plus rapide au XXI^e siècle. Une étude appropriée de la maintenance nécessite un cadre complet qui incorpore tous les éléments clés. Cependant, tous les éléments ne sont pas pertinents pour un problème de maintenance particulier à l'étude.

Les principaux problèmes liés à la maintenance d'un système complexe (voire distribué) ou un équipement individuel sont illustrés à la Figure Int.1. L'acquisition d'un équipement est influencée par des considérations commerciales, sa fiabilité inhérente est déterminée par les décisions prises lors de la conception. La fiabilité et la dégradation de l'équipement sont affectées par les opérations (intensité d'utilisation, environnement d'exploitation, charge de fonctionnement, etc.) [7].

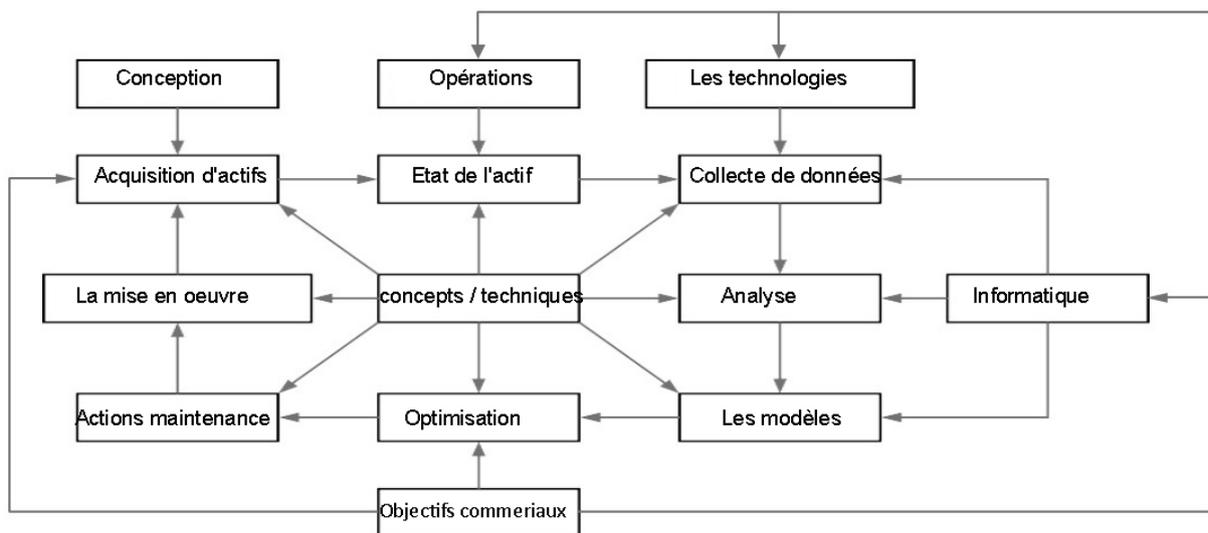


Figure Int.1. Problèmes clés dans la maintenance d'un équipement

Pour effectuer une maintenance efficace, il faut avoir une bonne compréhension d'une variété de concepts et de techniques pour chacune des questions. Le lien entre les problèmes techniques et commerciaux en maintenance nécessite une approche interdisciplinaire comme indiqué sur la Figure Int.2. Pour résoudre les problèmes liés à la maintenance, différentes disciplines concernées sont développées, on peut citer :

- *L'ingénierie* : La dégradation d'un actif dépend dans une certaine mesure de la conception et de la construction (ou de la production) de l'actif. [8].

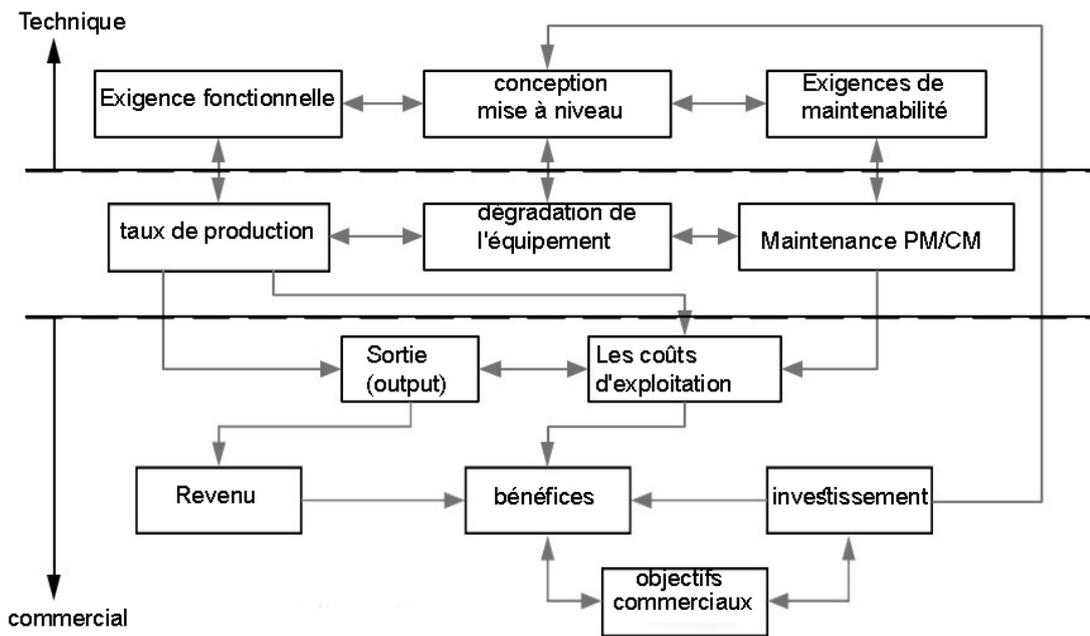


Figure Int.2. Les problèmes techniques et commerciaux en maintenance

- Les sciences fondamentales : Ceci est très important dans la compréhension des mécanismes physiques qui ont une influence significative sur la dégradation et la défaillance.
- L'économie : Les coûts d'entretien peuvent représenter une fraction importante du budget d'exploitation total d'une entreprise, selon le secteur d'activité [9].
- Le légal : Ceci est important dans le contexte de l'externalisation de la maintenance et de la maintenance du matériel loué. Dans les deux cas, la question centrale est le contrat entre les parties impliquées.
- Les statistiques : La dégradation et les défaillances se produisent de manière incertaine, dans ce cas l'analyse des données nécessite l'utilisation de techniques statistiques.
- La recherche opérationnelle : La recherche opérationnelle fournit les outils et les techniques pour la construction des modèles, l'analyse et l'optimisation.
- La théorie de la fiabilité : La théorie de la fiabilité est développée par l'utilisation de la probabilité, des statistiques et de la modélisation stochastique, combinée à des connaissances techniques sur la conception et la compréhension scientifique des mécanismes de défaillance, afin d'étudier les divers aspects de la fiabilité [10].
- La technologie de l'information et informatique : L'exploitation et la maintenance d'actifs complexes génère beaucoup de données. Il faut des moyens efficaces pour stocker et manipuler les données et extraire les informations pertinentes des données.

La gestion de la maintenance a dû devenir encore plus complexe vu que les installations sont devenues hautement automatisées et technologiquement très complexes voire même repartis géographiquement. En faisant face à des attentes techniques et commerciales plus élevées, et face à la concurrence difficile, de nombreuses entreprises cherchent à survivre en produisant plus, avec moins de ressources, dans des périodes plus courtes.

Dans sa thèse intitulée « Contribution à l'ordonnancement des activités de maintenance sous contraintes de compétence : une approche dynamique, proactive et multicritère » F. Marmier a développé des algorithmes d'ordonnancement des tâches de maintenance avec des approches monocritère et multicritère, afin de gérer les plannings de maintenance d'un système de production structuré en mono-site [11]. Pour étendre ce travail au contexte multi-sites nous allons développer dans ce manuscrit, un système de gestion de maintenance pour une unité de production constituée de plusieurs sites, distribués géographiquement et possédant des machines complexes qui nécessitent des techniciens spécialisés pour les diverses interventions de maintenance.

Un système de gestion de maintenance doit prendre en compte la réalisation des tâches techniques tout en tenant compte des objectifs stratégiques et économiques [12]. Les différentes actions développées pour la gestion du système seraient d'une part, de maximiser la disponibilité des équipements en appliquant une politique de maintenance prédictive, d'autre part d'assurer une organisation optimale des plannings de maintenance, ce qui permet de maîtriser les coûts de maintenance (voir Figure Int.3).

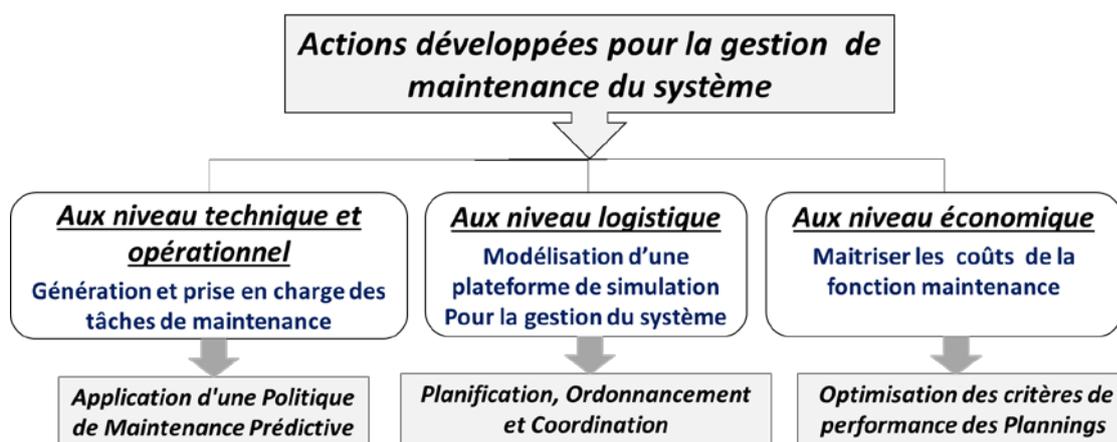


Figure Int.3. Différentes actions développées pour la gestion de la maintenance

Afin de faciliter le démarrage de notre étude, on suppose que pour le système de maintenance développé les ressources humaines, matérielles et informationnelles sont disponibles.

Une politique de maintenance prédictive est appliquée au parc machines des sites de production et mise en œuvre en CBM, pour surveiller la dégradation des équipements [13]. Comme notre action de maintenance va porter sur des machines tournantes, L'analyse vibratoire constitue un outil efficace pour extraire des informations sur l'état de santé des machines.

Une méthode de détection et d'isolation de défaut dans le domaine temps-fréquence est appliquée sur un roulement industriel. Des capteurs de vibrations sont mis en place pour détecter la présence de défaillance. Une fois que la dégradation d'un équipement est constatée, des actions (tâches) de maintenance conditionnelles sont alors générées.

Pour prendre en charges ces tâches de maintenance, on doit les insérer dans un planning de maintenance organisé d'une façon adéquate avec celles de la production. Comme ces tâches arrivent de manière stochastique, une insertion dynamique de ces tâches est appliquée afin de perturber le moins possible l'organisation des plannings [14].

Les tâches de maintenance sont affectées à des ressources ayant une compétence requise différente pour chaque tâche, notre problème serait réduit à un problème d'ordonnancement dynamique à ressources parallèles indépendantes ayant une complexité NP-difficile. Les algorithmes de résolution appliqués sont des heuristiques de recherche par voisinage basé sur un algorithme de descente amélioré.

Résoudre un problème d'ordonnancement dynamique consiste à organiser dans le temps un planning de maintenance, compte tenu des contraintes temporelles et des contraintes portant sur la disponibilité des ressources requises en optimisant certaines fonctions objectifs telles que la minimisation des retards, de l'écart type, du makespan, etc. [15].

Afin de montrer l'efficacité de notre système de gestion des tâches de maintenance prédictive et comme notre système répond bien aux normes de la conception orienté objet (COO) nous avons développé une plateforme de simulation orienté objet en utilisant le langage UML. Une simulation ainsi qu'une validation du système de gestion de maintenance est effectuée.

Notre contribution serait d'intégrer un système de gestion de maintenance prédictive dans un système de production reparté en multi-sites, cette intégration se fait par le développement de plusieurs points :

- Développer un état de l'art sur la gestion de la maintenance des systèmes complexes et positionner notre problématique par rapport à l'organisation distribuée de la maintenance.

- Développer une application pratique de la maintenance conditionnelle (CBM), pour la détection des défauts sur les machines tournantes en appliquant les distributions quadratiques temps-fréquence.
- Modélisation des différentes composantes d'ordonnements statique et dynamique pour l'insertion des nouvelles tâches de maintenance prédictive et application d'heuristiques d'optimisation pour résoudre les problèmes d'ordonnement statique et dynamique (monocritère et multicritère).
- Développer une plateforme de simulation en appliquant le langage UML.

Ces points sont développés dans cette thèse et articulés en quatre chapitres :

Chapitre I développe les éléments fondamentaux de la maintenance et de son environnement, décrit le chemin d'évolution de la gestion de la maintenance et les forces motrices de tels changements (le contexte de la maintenance est décrit et ses éléments dynamiques sont brièvement discutés). On explique comment les pratiques de maintenance ont évolué dans le temps et où différentes époques ont été distinguées. En outre, ce chapitre consacre une attention particulière à la description d'un lexique commun pour les actions et politiques de maintenance afin de se concentrer davantage sur l'évolution des concepts de maintenance.

On va montrer aussi qu'au fur et à mesure que la gestion de la maintenance évoluait, le travail du responsable de la maintenance l'était aussi. Nous terminerons ce chapitre par une synthèse bibliographique des principaux domaines au croisement desquels est positionnée notre problématique, dans ce contexte nous présenterons l'architecture du système de production ainsi que les objectifs de notre étude.

Le Chapitre II aborde le changement de paradigme dans les systèmes de maintenance modernes, et montre les avantages présentés par la maintenance prédictive. Les différentes techniques de détection et d'analyse de défauts appliquées par la maintenance prédictive sont développées brièvement. Une étude particulière est consacrée au diagnostic par l'analyse vibratoire car cette technique est adaptée aux composants mécaniques et aux machines industrielles en fonctionnement. Elle permet aussi de détecter la majorité des défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes, sujet de notre application.

Une politique de maintenance conditionnelle (CBM) est appliquée pour mesurer l'indice de performance des vibrations des machines. Des distributions quadratiques temps-fréquence de

la classe de Cohen sont appliquées pour analyser la signature des capteurs. Une application pratique pour la détection et l'analyse de la dégradation d'un roulement industriel est illustré en fin de ce chapitre.

Le Chapitre III sera consacré à la modélisation d'ordonnements pour la gestion de tâches de maintenance prédictive générées par le système. L'objectif de ce chapitre serait de développer des ordonnancements dynamiques et statiques pour gérer l'insertion de ces tâches dans un planning de maintenance courant.

La première partie de ce chapitre sera consacrée dans un premier temps à un rappel de quelques notions de base sur les problèmes d'ordonnement ainsi que les approches classiques de résolution relatives à ces problèmes, dans un second temps un aperçu sur la mission et les spécificités de la fonction ordonnancement en maintenance est développé.

La deuxième partie de ce chapitre sera consacrée à la modélisation des différentes composantes des ordonnancements. Dans ce contexte des heuristiques sont développées pour l'approche monocritère et multicritères sous contrainte de compétences.

Le Chapitre IV aborde Les modélisations UML en maintenance qui offrent une vision globale des situations considérées, proche des attentes de représentation des situations de décisions collaboratives en maintenance, selon des approches distribuées ou à distance. Une plateforme de simulation est développée par le langage UML, pour gérer l'apparition de nouvelles tâches de maintenance prédictive dans le contexte distribué.

Pour terminer une simulation du modèle pour différentes approches d'insertion dynamique de nouvelles tâches de maintenance dans un planning de maintenance courant est développée. Les résultats obtenus sont validés par rapport à des approches d'insertion statique. Une synthèse des contributions de notre étude par rapport aux travaux réalisés dans un contexte mono-site est développée en fin de ce chapitre

Enfin, nous concluons ce travail en donnant quelques perspectives qui mettent en évidence les évolutions futures de ce travail.

CHAPITRE I

La gestion de la maintenance : une perspective évolutive (Etat de l'art et Problématique)

1.1 Introduction

Au cours des dernières décennies, la maintenance industrielle est passée d'un non-problème à une préoccupation stratégique. Il y a peut-être peu d'autres disciplines de gestion qui ont subi autant de changements au cours du dernier demi-siècle.

Dans ce premier chapitre, nous aborderons les changements de gestion de la maintenance subis parallèlement aux évolutions technologiques. Nous commencerons par analyser le contexte dans lequel la gestion de la maintenance a évolué au fil du temps, par la suite une classification simpliste mais vraiment pertinente de la maintenance sera développée où nous attirerons l'attention, en particulier sur trois de ces termes confus : l'action de maintenance, la politique de maintenance et le concept de maintenance.

On va montrer aussi qu'au fur et à mesure que la gestion de la maintenance évoluait, le travail du responsable de la maintenance l'était aussi. Nous terminerons ce chapitre par développer une synthèse bibliographique des principaux domaines au croisement desquels est positionnée notre problématique. Dans ce contexte nous présenterons un système de production distribué géographiquement en multi-sites qui sera l'objet de notre contribution en gestion de maintenance prédictive.

1.2 Evolution des besoins de la maintenance

Le phénomène de concurrence a exigé aux entreprises des efforts colossaux pour rester compétitives et assurer leur pérennité sur le marché. Ainsi, pour assurer une meilleure rentabilité avec de faibles charges et une production de meilleure qualité et en continu, l'entreprise s'est trouvée contrainte d'assurer une fonction de maintenance évolutive, Afin de répondre aux besoins de sa clientèle et garantir sa rentabilité.

I.2.1 Pratiques de la maintenance au fil du temps

La fonction de maintenance est passée d'une non-issue à une préoccupation stratégique (Figure I.1).

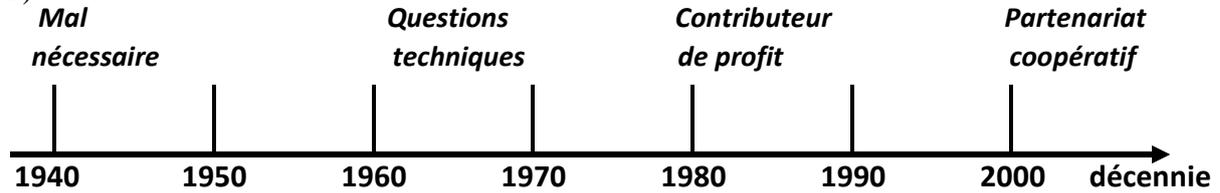


Figure I.1. La fonction de maintenance dans une perspective temporelle

Au fur et à mesure que les connaissances en maintenance sont améliorées et que des technologies habilitantes plus avancées sont disponibles, la perception de la « bonne » action de maintenance a beaucoup changé au cours des dernières décennies.

Dans les années 1950s presque toutes les actions de maintenance étaient correctives. La maintenance en soi était considérée comme un coût ennuyeux et inévitable, qui ne pouvait être géré.

Plus tard, dans les années 1960s, de nombreuses entreprises se sont tournées vers des programmes de maintenance préventifs, car elles pouvaient reconnaître que certaines défaillances de composants mécaniques avaient une relation directe avec le temps ou le nombre de cycles utilisés. Cette croyance était principalement basée sur l'usure physique des composants ou les caractéristiques de fatigue liées à l'âge. À ce moment-là, c'était accepté que des actions préventives puissent éviter certaines pannes et entraîneraient des économies à long terme.

À la fin des années 1970s et au début des années 1980s, l'équipement est devenu plus complexe en général. En conséquence, l'effet de superposition du modèle de défaillance des composants individuels commence à modifier les caractéristiques de défaillance d'un équipement simple. À ce stade, l'efficacité de l'application des mesures de maintenance préventive a commencé à être remise en question et a été examinée plus attentivement.

Une préoccupation commune au sujet de "sur-maintenir" a augmenté rapidement. Cela signifiait un passage progressif, mais pas complet, aux actions de maintenance prédictives (inspection et condition). Naturellement, la maintenance prédictive était, et est toujours, limitée aux applications où c'était à la fois techniquement faisable et économiquement intéressant. Le

fait que l'équipement de surveillance de l'état soit devenu plus accessible et meilleur marché, a été favorable à cette tendance.

À la fin des années 1980s et au début des années 1990s, l'histoire de la maintenance a été marquée par l'émergence d'une ingénierie simultanée (concourante) ou d'une ingénierie du cycle de vie. Ici, les exigences de maintenance étaient déjà prises en compte lors des étapes précédentes du produit, telles que la conception ou la mise en service.

Par conséquent, au lieu d'avoir à composer avec des caractéristiques intrinsèques, la maintenance s'est avérée être active dans la définition des exigences de conception pour les installations et est devenue partiellement impliquée dans la sélection et le développement de l'équipement.

Tout cela a conduit à un type différent de maintenance préventive (proactive), dont le principe sous-jacent était d'être proactif aux étapes précédentes du produit, afin d'éviter des conséquences ultérieures. Pourtant, ces actions ne sont en effet généralement pas réalisées par les personnes chargées de la maintenance elles-mêmes, mais font certainement partie de l'évolution structurelle de la maintenance en tant que partenaire formel ou informel au sein de l'organisation.

Plus tard dans les années 2000s, la maintenance est devenue une fonction à part entière, au lieu de la sous-fonction de production. Il est clair que la gestion de la maintenance est devenue une fonction complexe, englobant compétences techniques et en gestion, tout en ayant besoin de flexibilité pour faire face à un environnement commercial dynamique. La direction reconnaît qu'avoir une stratégie de maintenance bien pensée associée à une mise en œuvre judicieuse de cette stratégie pourrait en réalité avoir un impact financier significatif.

De nos jours, cela a conduit à considérer la maintenance comme un partenaire mature dans le développement des stratégies commerciales et cela éventuellement au même niveau que la production.

1.2.2 La maintenance en contexte

Pour discuter du contexte dans lequel la gestion de la maintenance est intégrée, on peut se demander ce qu'est la maintenance en tant que telle ?

La plupart des auteurs dans la littérature sur la gestion de la maintenance, d'une manière ou d'une autre, conviennent de définir la maintenance comme « l'ensemble des activités requises

pour maintenir les équipements physiques dans les conditions de fonctionnement souhaitées ou les restaurer ». Bien que cela définisse ce qu'est la maintenance, cela peut suggérer que la maintenance est simple, ce qui n'est pas le cas, comme le confirmera tout praticien de la maintenance. Par conséquent, la « gestion de la maintenance » est nécessaire pour intégrer les pratiques de maintenance dans un contexte complexe et dynamique.

D'un point de vue pragmatique, l'objectif clé de la gestion de la maintenance est « l'optimisation du cycle de vie total des actifs » [16], en d'autres termes, maximiser la disponibilité et la fiabilité des actifs et des équipements pour produire la quantité souhaitée de produits, avec les spécifications de qualité requises, en temps opportun. Évidemment, cet objectif doit être atteint de manière rentable et en accord avec les réglementations environnementales et de sécurité.

La Figure 1.2 montre clairement que la maintenance est intégrée dans un contexte d'entreprise donné auquel elle doit contribuer. En plus cela montre que la fonction de maintenance doit faire face à de multiples forces et exigences à l'intérieur et à l'extérieur de son organisation.

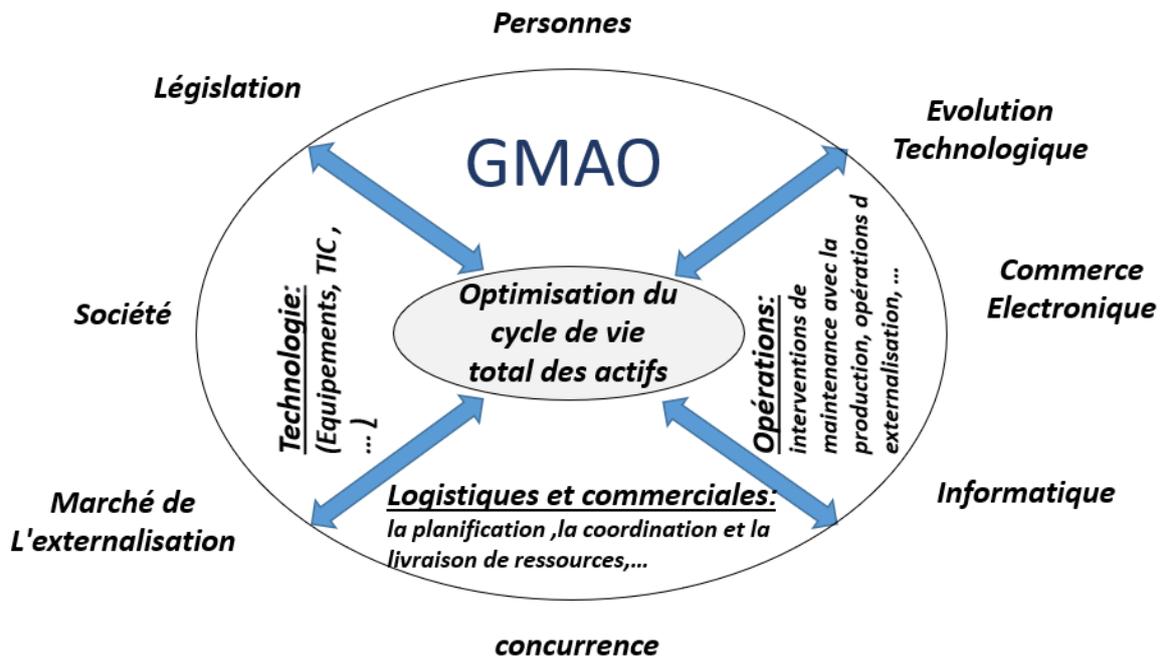


Figure I.2. Maintenance en contexte

Au-delà de tout doute, les tâches de maintenance sont complexes, englobant un mélange d'éléments de gestion, de technologie, d'opérations et de soutien logistique. Pour gérer et coordonner les caractéristiques complexes et changeantes qui constituent la maintenance, une couche de gestion est impérative. La direction est concentrée sur "quoi décider" et "comment

décider", le gestionnaire jongle avec les éléments technologiques, opérationnels et logistiques qui doivent principalement s'harmoniser avec la production.

La technologie fait référence aux actifs physiques que la maintenance doit supporter avec un équipement et des outils adéquats. Les opérations indiquent la combinaison d'interventions de maintenance de service avec activités de production de base. Enfin, l'élément logistique soutient les activités de maintenance dans la planification, la coordination et la livraison de ressources telles que les pièces de rechange, le personnel, les outils, etc. [17].

D'une manière ou d'une autre les éléments technologiques, opérationnels et stratégiques sont toujours présents, mais leur intensité et leurs interrelations varient d'une situation à l'autre. Clairement, le choix des éléments structurels de maintenance n'est pas indépendant de son environnement. En outre, d'autres facteurs tels que le contexte commercial, la société, la législation, l'évolution technologique, le marché de l'externalisation, seront importants.

De plus, les nouvelles tendances, tel que le contexte des e-business, influencera énormément la gestion de la maintenance actuelle et future. Une nouvelle ère de maintenance est attendue car les barrières de communication sont comblées et les opportunités de coordination du service de maintenance deviennent plus intenses.

1.2.3 Changements dans le domaine de la maintenance

Il faut s'attendre à ce que ni la gestion de la maintenance ni son environnement ne soient stationnaires. Les changements constants dans le domaine de la maintenance sont reconnus pour avoir permis des développements nouveaux et innovants dans le domaine de la science de la maintenance.

1.2.3.1 Evolution technologique des équipements

L'évolution technologique dans les équipements de production est une évolution en cours qui a commencé au XXe siècle et qui a été énorme. Sans surprise, de nos jours, les installations sont hautement automatisées et technologiquement très complexes. Souvent, ces installations sont intégrées à des lignes de production de bonne taille.

Les installations ne sont pas seulement devenues plus complexes, elles sont également devenues plus critiques en termes de fiabilité et de disponibilité. La redondance est seulement considérée pour les composants très critiques.

En outre, les caractéristiques intrinsèques de l'équipement telles que la conception modulaire et la normalisation sont prises en compte afin de réduire les temps d'arrêt pendant la maintenance corrective ou préventive. Fort heureusement, on assiste à un mouvement vers des niveaux plus élevés de standardisation et de modularisation à tous les niveaux des installations. Comme les concepts d'optimisation du cycle de vie sont louables, il devient impératif qu'aux premières étapes de la conception, les exigences de fiabilité et de maintenabilité soient bien pensées.

1.2.3.2 Evolution du service à la clientèle

Parallèlement à l'évolution technologique, l'attention croissante portée à la clientèle entraîne une pression encore plus forte, en particulier sur les installations critiques. Comme le service à la clientèle en termes de temps, de qualité et de choix devient central dans les décisions de production, plus de flexibilité est nécessaire pour faire face à ces différents besoins. Cela nécessite des installations bien entretenues et fiables, capables de réaliser des estimations plus rapides et plus fiables.

1.2.3.3 Evolution de la technologie de l'information et de la communication

La maintenance n'échappe pas à l'évolution de la technologie de l'information et de la communication (TIC), qui a énormément changé les pratiques commerciales [18]. En outre, de nouveaux principes de production et de gestion, tels que la philosophie du juste-à-temps (JIT), la gestion de la qualité totale (TQM), etc., ont émergé. Ces tendances de production visent, par tous les moyens, à réduire les déchets et à supprimer les transactions sans valeur ajoutée.

Il n'est pas surprenant que les inventaires de « Work-in-process » (WIP) soient l'un des principaux problèmes à améliorer. Il est clair que les stocks de WIP entraînent des coûts élevés en raison de l'immobilisation du capital, des surfaces de travail coûteuses, etc.

1.2.3.4 Externalisation de la fonction maintenance

La concurrence est devenue féroce et mondiale en raison de la mondialisation. Cela implique que la nature de l'environnement des affaires est devenue complexe, dynamique, et exigeant des stratégies concurrentielles différentes, par conséquent, de nombreuses organisations envisagent d'externaliser certaines activités commerciales non essentielles et de créer de nouveaux partenariats et alliances.

Il n'est pas surprenant que la maintenance en tant que fonction de support ne fasse pas exception à la sous-traitance, pourtant, ce n'est peut-être pas si simple. L'externalisation de la maintenance des systèmes techniques peut devenir un problème sensible si elle n'est pas traitée avec diligence. Ces circonstances suggèrent que l'externalisation doit être considérée au niveau opérationnel, tactique et stratégique (Figure I.3) [19].

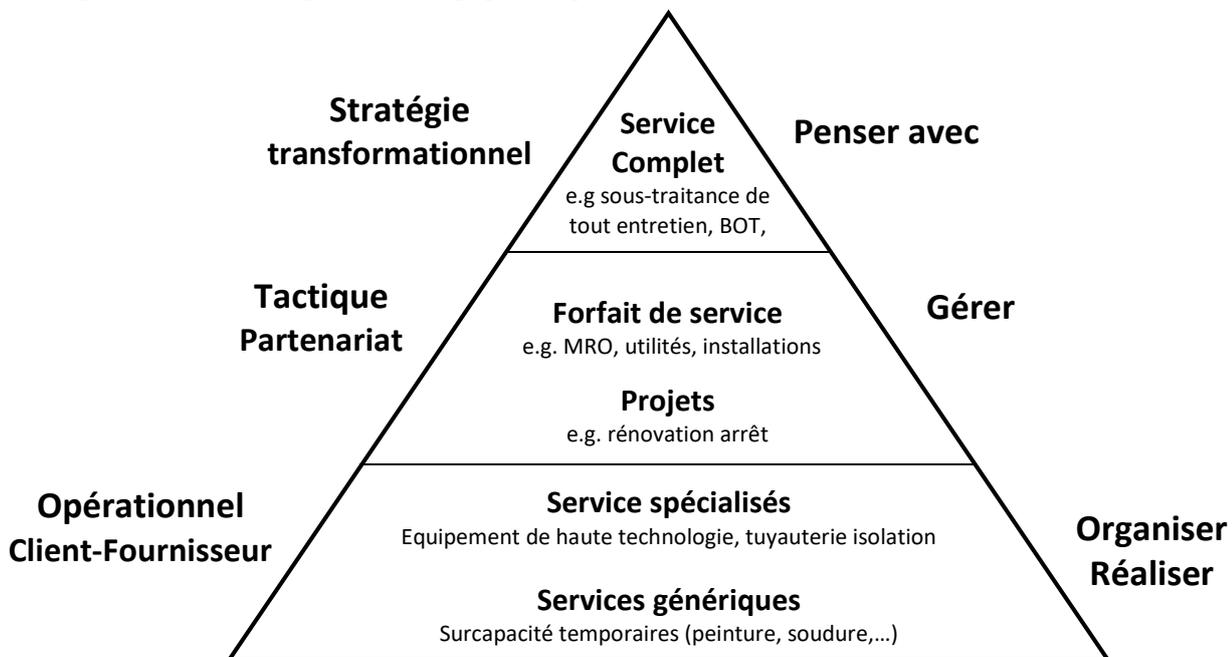


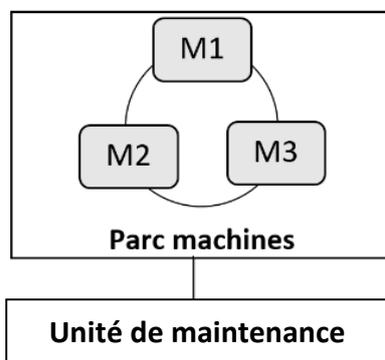
Figure I.3 Niveaux de décision d'externalisation

- Sous-traitance opérationnelle : À ce niveau, une tâche spécifique est sous-traitée, la relation entre le fournisseur et le client est strictement limitée à une situation de vente-achat. L'impact sur l'organisation interne du client est également limité.
- Sous-traitance tactique : À ce niveau d'externalisation, le client partage la responsabilité de la gestion avec le fournisseur et un type de partenariat simple est établi. L'impact sur l'organisation interne est également plus important.
- Sous-traitance stratégique : Ce type d'externalisation est également qualifié de «transformation-sourcing » "en raison de son impact sur l'organisation interne du client. Ici, une sous-traitance complète est réalisée, le service de maintenance est détaché du client et transféré au fournisseur. La relation entre le client et le fournisseur est un partenariat fort : le client a entièrement confié au fournisseur l'une de ses activités de maintenance stratégique. Ce niveau d'externalisation est encore moins répandu que les précédents.

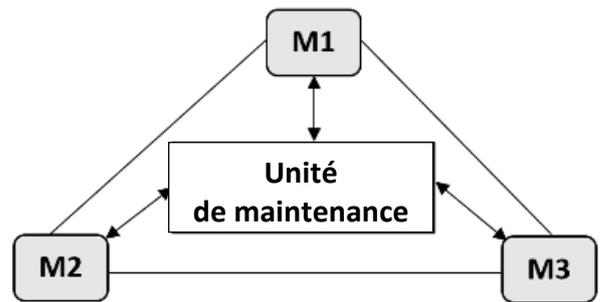
1.2.3.5 Evolution organisationnelle et distribution de la maintenance

Parallèlement aux évolutions technologiques, l'organisation spatiale de la maintenance a également évolué. Nous considérons différentes organisations du système de maintenance et des ressources qui le composent :

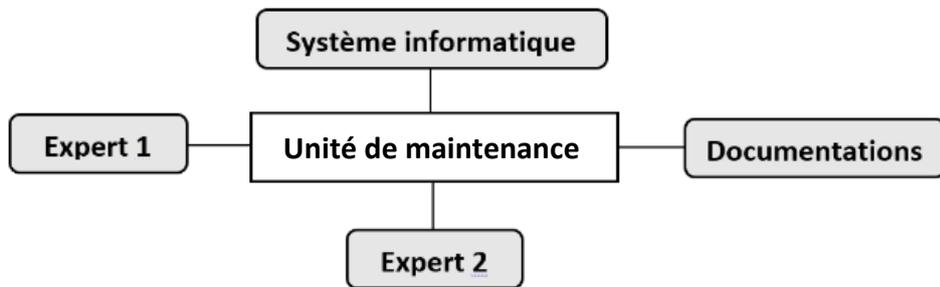
- le service de maintenance est distant du parc à maintenir [20] : Figure I.7a,
- l'ensemble d'équipements maintenus est distribué [21] : Figure I.7b,
- le service est composé de ressources distribuées [22] : Figure I.7c.



a. Système de maintenance distant du parc



b. Système de maintenance d'un parc d'équipements distribué



c. Système de maintenance composé d'éléments distribués

Figure I.4 Trois déclinaisons de l'organisation spatiale d'un système de maintenance

1.3 Classification de la maintenance

Un programme de maintenance bien conçu est obligatoire pour satisfaire les exigences commerciales, environnementales et de sécurité.

Malgré les circonstances particulières, si l'on a l'intention de compiler ou de juger un programme de maintenance, certains termes de maintenance élémentaire doivent être sans

ambiguïté et traités avec cohérence. Pourtant, à la fois dans la pratique et dans la littérature, il existe beaucoup de confusion.

Par exemple, ce que pour certains est une politique de maintenance d'autres l'appellent une action de maintenance ; ce que certains considèrent comme un entretien préventif, d'autres l'appellent une maintenance préétablie ou programmée. En outre, certains affirment que certains concepts peuvent presque être considérés comme des stratégies ou des philosophies, et ainsi de suite. Cependant, l'adoption d'une classification plutôt simpliste, mais vraiment pertinente, est essentielle (Figure I.4) [23].

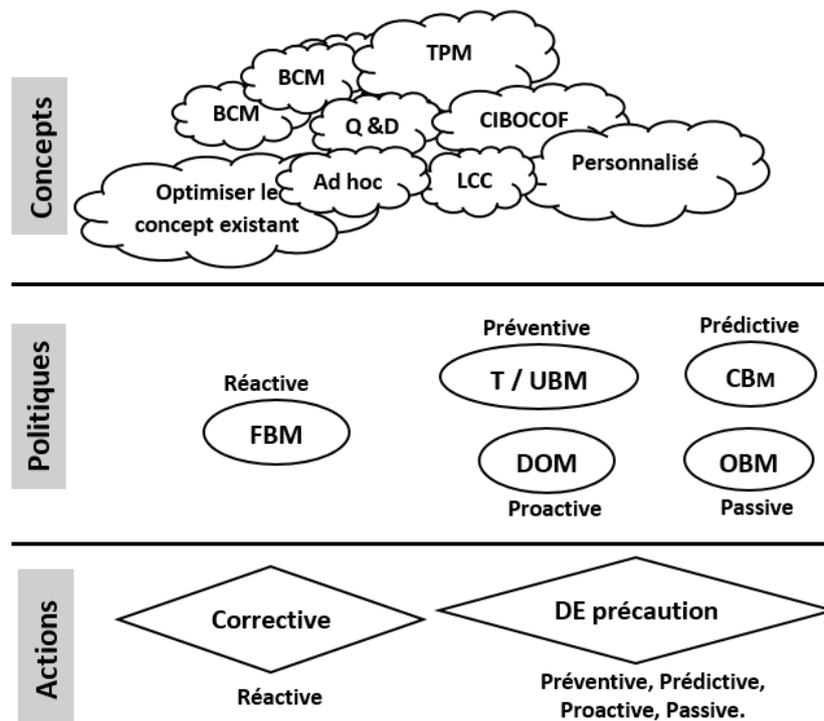


Figure I.5. Actions, Politiques et Concepts en maintenance

Nous attirons l'attention, en particulier, sur trois de ces termes confus : l'action de maintenance, la politique de maintenance et le concept de maintenance. Dans la suite de ce chapitre, la terminologie suivante est adoptée :

- Action de maintenance : intervention de maintenance de base, tâche élémentaire réalisée par un technicien (Que faire ?)
- Politique de maintenance : une règle ou un ensemble de règles décrivant le mécanisme de déclenchement des différentes actions de maintenance (Comment est-il déclenché ?)

-
-
- Concept de Maintenance : un ensemble de politiques de maintenance et d'actions de différents types et la structure de décision générale dans laquelle ceux-ci sont planifiés et soutenus. (La recette de logique et de maintenance utilisée ?)

1.3.1 Actions de maintenance

Fondamentalement, comme le montre la Figure I.4, les actions ou interventions de maintenance peuvent être de deux types. Il s'agit d'actions de maintenance corrective (CM) ou de maintenance de précaution (PM).

1.3.1.1 Actions de maintenance correctives (CM)

Les actions CM sont des actions de réparation ou de restauration suite à une panne ou une perte de fonction. Ces actions sont "réactives" dans la nature ; Les actions correctives sont difficiles à prévoir car le comportement de la défaillance de l'équipement est stochastique et les pannes sont imprévues [24].

Les actions de maintenance telles que le remplacement d'une ampoule défectueuse, la réparation d'une canalisation rompue et la réparation d'un moteur bloqué sont quelques exemples de mesures correctives.

1.3.1.2 Actions de maintenance de précaution (PM)

Les actions de PM peuvent être de nature « *préventive, prédictive, proactive ou passive* ». Ces types d'actions sont modérément plus complexes que les premiers. Pour décrire pleinement chacun d'entre eux, un livre peut être écrit seul.

Néanmoins, les idées fondamentales visent à diminuer la probabilité de défaillance du bien physique et / ou à anticiper, ou éviter si possible, les conséquences en cas de défaillance [25], [26], [27], [28]. Certaines actions PM (préventives et prédictives) sont plus faciles à planifier, car elles peuvent s'appuyer sur des calendriers fixes ou sur la prévision de comportements stochastiques.

Cependant, d'autres types d'actions sont devenus partie intégrante de la connaissance tacite de l'organisation. Quelques exemples précis de mesures de précaution qui peuvent être mentionnées sont la lubrification, le remplacement bimensuel des roulements, les rondes d'inspection, la surveillance des vibrations, l'analyse d'huile, les ajustements de conception, etc. Toutes ces tâches sont considérées comme des actions de maintenance.

De plus, même dans le cadre de la maintenance préventive, il n'est pas toujours simple de classer certaines actions en types simples. Cela est dû à la perception changeante de la maintenance et à l'évolution rapide de ses techniques.

1.3.2 Politiques de maintenance

Au fur et à mesure que de nouvelles techniques de maintenance sont disponibles et que les implications économiques de l'action de maintenance sont comprises, un impact direct sur les politiques de maintenance est attendu. Plusieurs types de politiques de maintenance peuvent être envisagés pour déclencher, d'une manière ou d'une autre, des interventions de maintenance préventives ou correctives.

Comme décrit dans le Tableau I.1, ces politiques sont principalement basées sur la maintenance basée sur les défaillances (FBM), la maintenance basée sur le temps utilisé (TBM / UBM), la maintenance conditionnelle (CBM), la maintenance basée sur les opportunités (OBM), la maintenance de conception (DOM), et la E-maintenance. Nous conseillons au lecteur, particulièrement intéressé par les principes sous-jacents et le type de modèles, d'examiner les références [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35].

Beaucoup de choses sont à voir avec la discussion concernant l'acuité des actions de maintenance, par conséquent, il est clair que l'élaboration de politiques et la compréhension de son efficacité et de son efficacité continuent d'être affinées comme n'importe quelle autre science de la gestion.

À l'heure actuelle, FBM, TBM, UBM et CBM acceptent et saisissent les équipements physiques qu'ils ont l'intention de maintenir comme un fait donné. En revanche, il y a davantage d'actions et de politiques de maintenance proactives qui, au lieu de considérer les systèmes comme « une donnée », examinent les changements ou les mesures de sécurité possibles nécessaires pour éviter la maintenance en premier lieu.

La politique de maintenance proactive appelée DOM est impliquée de manière proactive à des étapes plus précoces du cycle de vie du produit pour résoudre les problèmes potentiels. Idéalement, les politiques DOM visent à éviter complètement la maintenance tout au long de la durée de vie des installations, bien que cela puisse ne pas être réaliste, cela conduit à considérer un ensemble varié d'exigences de maintenance à la première étape de la conception de l'équipement.

Au milieu des années 1990, avec l'émergence d'internet comme technologie habilitante et la croissance du commerce électronique comme standard de communication d'entreprise, la maintenance électronique est également apparue dans le radar des politiques de maintenance. La maintenance électronique plutôt qu'une politique peut également être considérée comme un moyen ou un catalyseur pour certaines, sinon toutes, les politiques précédentes. Par conséquent, la maintenance électronique a attiré beaucoup l'attention des chercheurs en maintenance compte tenu de son grand impact sur les pratiques commerciales.

Un exemple de cette évolution est la télémaintenance, qui permet de diagnostiquer l'installation et de réaliser un type limité de réparations à partir d'un site distant en utilisant les TIC et des outils sophistiqués de contrôle et de connaissances.

Tableau I.1 Politiques de maintenance générique

| <i>Politiques</i> | <i>Description</i> |
|--|--|
| FBM | La maintenance FBM (CM) est effectuée uniquement après une panne. En cas de comportement CFR et / ou de faibles coûts de panne, cela peut être une bonne politique. |
| TBM / UBM | PM est effectué après une durée spécifiée (par exemple 1 mois, 1000 heures de travail, etc.). CM est appliqué si nécessaire. UBM suppose que le comportement de défaillance est prévisible et de type IFR. PM est supposé être moins cher que CM. |
| CBM | PM est exécuté chaque fois que la valeur d'un paramètre système donné (condition) dépasse une valeur prédéterminée. PM est supposé être moins cher que CM. Le CBM gagne en popularité en raison du fait que les techniques sous-jacentes (par exemple l'analyse des vibrations, la spectrométrie d'huile, ...) deviennent plus largement disponibles et à de meilleurs prix. Les visites d'inspection traditionnelles avec une liste de contrôle sont en fait un type primitif de CBM. |
| OBM | Pour certains composants, on attend souvent de les maintenir jusqu'à ce que "l'occasion" se présente lors de la réparation d'autres composants plus critiques. La décision de savoir si l'OBM convient pour un composant donné dépend de l'espérance de vie résiduelle, qui dépend à son tour de l'utilisation. |
| DOM | L'objectif de DOM est d'améliorer la conception afin de faciliter la maintenance (ou même de l'éliminer). Les aspects ergonomiques et techniques (fiabilité) sont importants ici. |
| <i>CFR = Constant failure rate (taux de défaillance constant),</i> | |
| <i>IFR=Increasing failure rate (taux de défaillance croissant)</i> | |

I.3.3 Concepts de maintenance

L'idée d'un programme de maintenance « optimisé » suggère qu'un ensemble adéquat d'actions et de politiques de maintenance doit être sélectionné et affiné afin d'améliorer le temps de disponibilité, d'allonger le cycle de vie total des actifs physiques et d'assurer des conditions de travail sécurisées.

Limiter les budgets de maintenance et la législation environnementale, Cela ne semble pas simple et peut nécessiter une vision holistique. Par conséquent, un « concept de maintenance » pour chaque installation est nécessaire pour planifier, contrôler et améliorer les différentes actions et politiques de maintenance appliquées.

Dans la pratique, il est clair que de plus en plus d'entreprises consacrent du temps et des efforts à déterminer le bon concept de maintenance. Sans surprise, à mesure que la complexité du système augmente et que les exigences de maintenance deviennent plus complexes, les concepts de maintenance nécessitent différents niveaux de complexité. La littérature nous fournit différents concepts qui ont été développés à travers une combinaison d'idées théoriques et d'expériences pratiques. De nombreuses entreprises établissent des équipes avec des membres de différents domaines (ingénierie, production, maintenance, ...) pour accomplir cette tâche difficile. Sur le marché, de nombreux consultants offrent leurs services pour aider dans ce processus.

Néanmoins, des conseils extérieurs peuvent être utiles, mais pour avoir un bon concept qui réponde à tous les besoins des entreprises, cela doit être construit par des personnes internes, en utilisant toutes les connaissances disponibles [23]. Plusieurs fois dans ce chapitre, il a été suggéré qu'à côté de la complexité croissante des systèmes, la maintenance a également évolué dans le temps. Cela a conduit à *trois générations de concepts de maintenance* avec leurs points de transition respectifs, une vue d'ensemble est proposée et est également présentée dans le Tableau I.2.

- *Première génération* : Dans le passé, l'équipement était généralement beaucoup plus simple ; par conséquent, le besoin d'aide à la décision de maintenance était modéré. Pour des systèmes vraiment simples, même une seule politique de maintenance peut éventuellement être considérée comme un concept en soi même [36].

Avec l'avènement de l'automatisation, les installations sont devenues très mécanisées et l'équipement s'est avéré plus complexe et les interdépendances des systèmes multi-unités ne pouvaient plus être ignorées. Pour maintenir efficacement de telles installations, un ensemble spécifique de politiques et d'actions de maintenance était nécessaire. Le besoin de structurer les décisions est devenu crucial. Ces circonstances ont suscité, en première instance, le concept des diagrammes de décisions simples et rapides (Q & D) [37], [38].

- Deuxième génération : Des concepts de maintenance supérieurs ont été revendiqués, à mesure que la complexité des décisions de maintenance augmentait. En conséquence, au cours des quarante dernières années, une vaste gamme de concepts de maintenance a été abondamment documentée dans la littérature. Ces concepts fournissent un réservoir de connaissances pour les praticiens de la maintenance et les chercheurs. Les exemples typiques, et peut-être les plus importants, sont les plus productifs tels que les approches de maintenance (TPM), la maintenance centrée sur la fiabilité (RCM) et l'optimisation du coût du cycle de vie (LCC).
- Troisième génération : Tous les concepts précédents, comme beaucoup d'autres, ont plusieurs avantages et sont voués à des insuffisances spécifiques. En conséquence, de nouveaux concepts de maintenance sont développés, les anciens sont mis à jour et des méthodologies pour concevoir des concepts de maintenance personnalisés sont créées. Les concepts de maintenance personnalisés sont fondamentalement apparus car il est très difficile de revendiquer un concept « one fits all » dans le monde de la maintenance complexe et en constante évolution.

Les concepts qui appartiennent à cette génération sont, par exemple, la maintenance axée sur la valeur (VDM) et CIBOCOF, qui ont été développés au Centre de Gestion industrielle (CIB). De plus, les concepts de maintenance internes, développés pour la plupart dans des organisations à maturité de maintenance assez élevée, appartiennent également à cette catégorie de concepts, par exemple en étendant les étapes d'analyse de la RMC et en introduisant des inspections basées sur les risques (RBI), un plan de maintenance plus ciblé et mieux conçu pourrait être développé.

Tableau I.2 Description des générations des concepts de maintenance

| <i>Génération</i> | <i>Concept</i> | <i>Description</i> | <i>Principaux atouts</i> | <i>Principales faiblesses</i> |
|-------------------|-----------------|--|--|---|
| 1st | <i>Ad hoc</i> | Mise en œuvre des politiques de FBM et UBM ; rarement CBM, DOM, OBM | Simple | Décisions <i>Ad hoc</i> |
| 1st → 2nd | Q&D | Diagramme de décision facile à utiliser. Cela aide à décider de la "bonne" politique de maintenance | Cohérent, permet des priorités | Des questions et des réponses difficiles |
| 2nd | LCC | Ventilation détaillée des coûts tout au long de la durée de vie de l'équipement permettant de planifier la logistique de maintenance | Philosophie de base saine | Ressources et données intensives |
| | TPM | Approche avec une vue d'ensemble sur la maintenance et la production. Particulièrement réussi dans l'industrie manufacturière | Considère les aspects humains / techniques, s'inscrit dans l'approche kaizen. Boîte à outils étendue | Mise en œuvre fastidieuse |
| | RCM | Approche structurée axée sur la fiabilité. Initialement développé pour les environnements de haute technologie / à haut risque | Approche puissante, procédure pas à pas | Resource intensive |
| 2nd → 3rd | Basé sur la RMC | Approches visant à remédier à certaines des lacunes perçues de la MRC Exemple : MRC simplifiée, BCM, RBCM | Performances améliorées, par exemple utilisation d'une analyse statistique solide | Parfois, une simplification excessive |
| 3rd | personnalisé | Développé en interne ; choix des concepts existants Exemples : CIBOCOF, VDM | Exploiter les forces de la société et prendre en compte le contexte commercial spécifique | Assurer la cohérence et la qualité du concept développé |

Une description simple des concepts les plus importants est présentée et des références importantes sont fournies au lecteur intéressé dans les paragraphes suivants.

1.3.3.1 Tableaux de décision (Q & D)

Un diagramme de décision de Q & D est un diagramme de décision avec des questions sur plusieurs aspects comprenant : Les motifs de panne, les réparations de l'équipement, le contexte commercial, les capacités de maintenance, la structure des coûts, etc.

Répondant aux questions pour une installation donnée, l'utilisateur passe par les branches du diagramme. Le processus s'arrête avec la recommandation de la politique la plus appropriée pour l'installation spécifique.

Bien que certains tableaux de décision Q & D soient disponibles dans la littérature [38], la plupart des entreprises adoptant cette approche préfèrent établir leurs propres graphiques, qui intègrent leurs expériences et leurs connaissances dans le processus décisionnel.

1.3.3.2 Approches du coût du cycle de vie (LCC)

LCC est apparu à la fin des années 1960 et est en train de ressusciter. Le principe de base de LCC est parfois résumé par "il est imprudent de payer trop, mais il est stupide de dépenser trop peu". Cela fait référence aux deux principales idées sous-jacentes de LCC.

➤ *La première idée* : concerne la structure des coûts des icebergs présentés par Blanchard [39], par qui LCC a été relancé. Il propose principalement que lorsque l'on envisage des alternatives d'entretien ou d'achat d'équipement, il ne faut pas se limiter à ce que l'on peut voir : « le sommet de l'iceberg », comme les coûts d'entretien directs (matériel, main-d'œuvre, etc.).

Les coûts indirects à long terme, tels que les frais d'exploitation, les frais de formation, les coûts d'inventaire des pièces de rechange, etc, sont au moins du même ordre de grandeur.

À leur tour, les décisions de conception sont fondées sur les principes du coût total de possession (CTP). Dans la littérature, plusieurs approches LCC peuvent être distinguées, parmi les plus importants figurent le soutien logistique intégré / l'analyse du soutien logistique (ILS / LSA) et la gestion des biens [40], [41], [42].

➤ *La seconde idée* : se réfère au principe selon lequel plus on avance dans le cycle de conception ou de construction de l'équipement, plus il sera coûteux de faire des modifications (par application du DOM). La maintenance doit être prise en compte dès le premier moment de la conception d'une machine ou d'un système.

I.3.3.3 Maintenance Productive Totale (TPM)

La TPM est bien plus qu'un simple concept [43], La TPM implique une participation totale, à tous les niveaux de l'organisation. Il vise à maximiser l'efficacité de l'équipement et à établir un système complet de maintenance préventive.

La TPM s'intègre entièrement à la philosophie TQM et à l'approche JIT [44], Cette dernière s'assure que les problèmes de nature diverse (matérielle, rupture, formation, ...) sont abordés et résolus un par un, au lieu de les camoufler en utilisant des stocks tampons importants comme c'était le cas avec les approches MRP. La boîte à outils TPM est composée de diverses techniques, dont certaines sont universelles telles que Six-sigma, analyse Pareto ou ABC, diagrammes Ishikawa ou arêtes de poisson, etc. D'autres concepts et techniques tels que SMED, OEE et 5S sont spécifiques de la philosophie TPM.

Les deux derniers techniques sont d'une importance extrême et méritent d'être expliqués. L'efficacité globale de l'équipement (OEE) est un outil puissant pour mesurer l'utilisation efficace de la capacité de production. La force du concept est l'intégration des questions de production, de maintenance et de qualité, ce qu'on appelle les « six grandes pertes » de capacité utile. La Figure I.5 illustre ce concept.

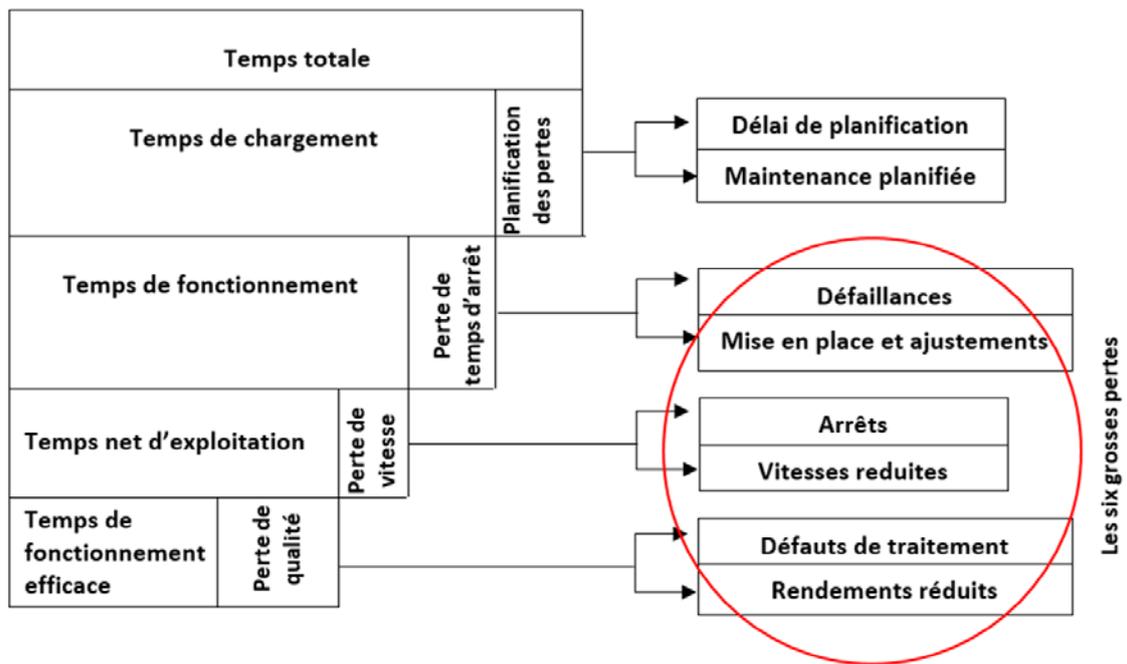


Figure 1.6. Les « six grandes pertes » de l'efficacité globale de l'équipement

D'un autre côté, les **5S** forment l'un des principes de base du TPM : *Seiri* (ranger), *Seiton* (ordre), *Seiso* (nettoyage, (faire) scintiller), *Seiketsu* (propre, standardiser les règles) et *Shitsuke* (autodiscipline, éducation, suivre et progresser).

1.3.3.4 Maintenance centrée sur la fiabilité (RCM)

Le RCM provient des années 1960 dans l'industrie aéronautique nord-américaine. Plus tard, il a été adopté par l'aviation militaire et, par la suite, il n'a été mis en œuvre que dans des installations industrielles à haut risque telles que les centrales nucléaires.

Maintenant, il peut être trouvé dans l'industrie en général, les livres de Nowlan and Heap [45] ; Anderson & Neri [46] et Moubray [47] ont contribué à l'adoption de la RCM par l'industrie.

Aujourd'hui de nombreuses versions de RCM sont présentes, la RCM rationalisée étant l'une des plus populaires. Cependant, la Society for Automotive Engineers (SAE) détient la définition RCM généralement acceptée.

La SAE pose les questions de base à résoudre par l'implémentation RCM ; une procédure claire étape par étape existe et des tableaux de décision et des formulaires sont disponibles :

- Quelles sont les fonctions et les normes de performance associées de l'actif dans son contexte opérationnel actuel ?
- Comment peut-il échouer à remplir ses fonctions ? (Échecs fonctionnels)
- Quelles sont les causes de chaque échec ? (Modes de défaillance)
- Que se passe-t-il lorsque chaque défaillance se produit ? (Effets de la défaillance)
- De quelle manière chaque échec compte-t-il ? (Conséquences de la défaillance)
- Que faut-il faire pour prévoir ou prévenir chaque défaillance ? (Tâches proactives et intervalles de tâches)
- Que devrait-on faire si une tâche proactive appropriée ne peut être trouvée ? (Actions par défaut)

La RCM est indéniablement un concept de maintenance précieux. Il prend en compte la fonctionnalité du système, et pas seulement l'équipement lui-même. Du point de vue conceptuel, il y a quelques points faibles, par exemple la RCM est sans aucun doute un processus très consommateur de ressources, ce qui rend également difficile l'application de la RCM à tous les équipements.

I.3.3.5 Concepts liés à la RCM

Dans les références [48], [49], [50], [51], on peut trouver de nombreux concepts liés à la RCM tels que la BCM, la RBCM, la RCM rationalisé, etc. Tous ces concepts adoptent les principes de la RCM avec l'intention de résoudre certaines de ses lacunes.

Les concepts liés à la RCM constituent l'étape de transition vers la troisième génération des concepts de maintenance. Différentes approches de rationalisation existent ; Cependant, très peu sont acceptables en tant que méthodologies RCM formelles. Le Tableau 1.3 fournit une image des approches RCM rationalisées populaires.

Tableau I.3 Classification des concepts rationalisés de RCM

| <i>Exemple</i> | <i>Caractéristique</i> | <i>difficulté</i> |
|---------------------------------------|---|--|
| <i>Approche rétroactive</i> | À partir du plan de maintenance existant. On détermine le mode de défaillance pour toutes les tâches de maintenance et implémente les dernières étapes RCM pour celles-ci. | Il faut beaucoup de temps pour trouver les modes de défaillance pour toutes les tâches. Les fonctions sont détectées sur une base <i>ad hoc</i> . Cela implique que le plan de maintenance existant est bon. |
| <i>Approche générique</i> | Utilise des listes génériques de modes de défaillance, voire des analyses génériques de systèmes techniques. | Ignore le contexte opérationnel des systèmes techniques et les pratiques de maintenance actuelles. Il suppose un niveau d'analyse standard pour tous les systèmes. |
| <i>Approche de saut</i> | Omet une ou plusieurs étapes. Généralement, la première étape (fonctions) est ignorée et l'analyse commence par la liste des modes de défaillance. | Supprime la première et essentielle étape de la RCM, c'est-à-dire l'analyse fonctionnelle et, en tant que telle, ne permet pas non plus d'établir des normes de performance solides. |
| <i>Approche de criticité</i> | Limite l'implémentation à des fonctions critiques et / ou à des échecs pour ceux-ci, une analyse complète du RCM est effectuée. | Détermine souvent la criticité sur une base <i>ad hoc</i> ou utilise des outils de criticité moins fiables que l'approche RCM. |
| <i>Approche de criticité complète</i> | Effectue une analyse RCM complète pour les équipements critiques uniquement. L'équipement critique est défini ici comme un équipement de goulot d'étranglement, qui a rencontré de nombreux problèmes de maintenance dans le passé ou est critique en termes de risques pour la sécurité. | Idem comme ci-dessus, bien que toutes les étapes du RCM soient suivies, ce qui garantit une "image" complète. |

I.3.3.6 Concepts de maintenance personnalisés

La méthodologie VDM (Value Driven Maintenance) proposée par Haarman et Delahay [52], est construite sur de meilleures pratiques et concepts de maintenance tels que TPM, RCM et RBI. Il montre où se situe la valeur ajoutée de la maintenance et comment une organisation peut être mieux structurée pour réaliser cette valeur.

Waeyenbergh [53] présente CIBOCOF comme un cadre pour développer des concepts de maintenance personnalisés. CIBOCOF part de l'idée que, bien que tous les concepts de maintenance disponibles dans la littérature contiennent des idées intéressantes, aucune d'elles ne peut être mise en œuvre sans une personnalisation plus poussée.

Les entreprises ont leurs propres priorités dans la mise en œuvre d'un concept de maintenance et sont susceptibles d'opter pour la « sélection sélective » des concepts existants. CIBOCOF propose un cadre pour le faire de manière intégrée et structurée. La Figure I.6 illustre les étapes que ce concept traverse structurellement.

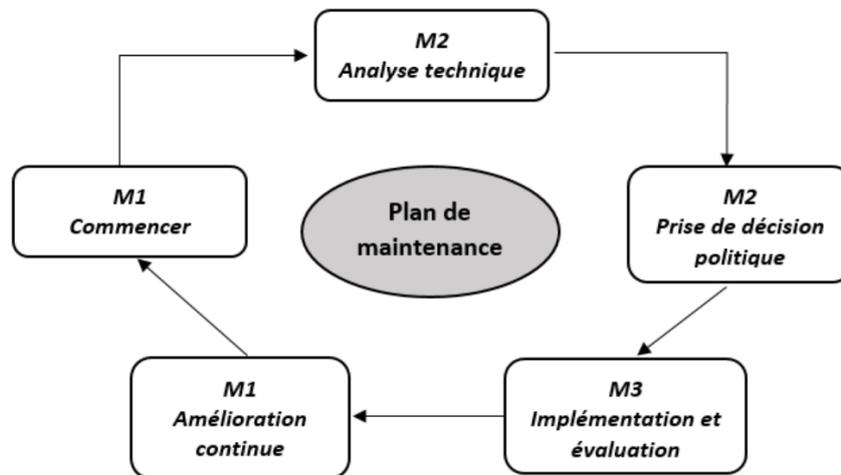


Figure I.7. Logique CIBOCOF

I.4 Responsable de la maintenance

Au fur et à mesure que la gestion de la maintenance évoluait, le travail du responsable de la maintenance l'était aussi [54]. Un bon gestionnaire de maintenance doit avoir une formation technique afin d'avoir un œil sur la « grande image » et de ne perdre aucun aspect hors de vue. Plus récemment, les responsables de la maintenance sont également consultés dans les décisions stratégiques, par ex. achats de nouvelles installations, choix de conception, ... [55].

Il est également important que le responsable de la maintenance soit un bon communicateur et un bon gestionnaire, car la maintenance reste une fonction à forte intensité de main-d'œuvre. Le responsable de la maintenance doit être capable d'attirer et de retenir des techniciens hautement qualifiés.

1.4.1 Techniques d'aide à la décision

L'évolution de la gestion de la maintenance nécessite des techniques d'aide à la décision variées [56], tels que l'outil d'analyse statistique pour prédire le comportement de défaillance des équipements, les schémas de décision pour déterminer le bon concept de maintenance, les modèles mathématiques pour optimiser les paramètres de la maintenance, les critères de décision concernant la maintenance électronique, les aides à la décision pour les décisions d'externalisation, etc.

Le Tableau I.4 illustre l'utilisation de certaines techniques d'aide à la décision pour la gestion de la maintenance.

Tableau 1.4 Les techniques *OR / OM* et leurs applications en maintenance

| <i>Techniques</i> | <i>Exemples d'application en gestion de la maintenance</i> |
|--|---|
| • Statistiques | ➤ Décrire le comportement en cas de défaillance |
| • Théorie de la fiabilité | ➤ Prédiction de la fiabilité des systèmes complexes |
| • Théorie de Markov | ➤ Etudes de disponibilité de systèmes réparables |
| • Théorie du renouvellement | ➤ Décisions de remplacement (groupe ou individu) |
| • Programmation mathématique | ➤ Optimisation des paramètres de la politique de maintenance |
| • Théorie de la décision | ➤ Décisions dans l'incertitude |
| • Théorie des files d'attente | ➤ Capacité du personnel de compromis - niveau de service |
| • Simulation | ➤ Comparaison des politiques de maintenance alternatives |
| • Contrôle de l'inventaire | ➤ Gestion MRO : FMI, NMI, SMI et VSMI |
| • Étude du temps et du mouvement | ➤ Estimation des temps d'intervention de maintenance |
| • ordonnancement - liste | ➤ Planification quotidienne des travaux de maintenance |
| • La planification du projet | ➤ Planification du redressement, grands projets de rénovation |
| • MCDM | ➤ Sélection du meilleur partenaire d'impartition |
| <p><i>MRO = maintenance, repair and operating supplies, FMI = fast moving items, NMI = normal moving items, SMI = slow moving items, VSMI = very slow moving items, MCDM = multi-criteria decision making, OR/OM=Operations Research / Operations Management</i></p> | |

I.4.2 Evolution des CMMS

L'aide de la technologie de l'information (TI) présente un intérêt particulier lors de la discussion de l'aide à la décision pour les gestionnaires de la maintenance.

Les systèmes de gestion de maintenance assistée par ordinateur “Computerized Maintenance Management Systems” (CMMS) [57], MMIS (Maintenance Management Information System) [58], A Product of Raytheon Company ou EAMS (Enterprise Asset Management Systems) [59], offrent aujourd'hui un support important au gestionnaire de maintenance. Ces systèmes ont également évolué avec le temps (Tableau I.5).

Tableau I.5 Evolution des CMMS

| <i>Systèmes informatiques professionnels</i> | <i>CMMS</i> | <i>Caractéristiques</i> |
|--|------------------------|--|
| <i>1970s</i> | <i>1ere génération</i> | <ul style="list-style-type: none"> • Principalement l'enregistrement et l'administration des données (EDP). • Support de processus limité ou nul. • Applications mainframe à faible priorité. • Marché du logiciel limité, beaucoup de développement interne. |
| <i>1980s–1990s</i> | <i>2eme génération</i> | <ul style="list-style-type: none"> • Contrôle des coûts et gestion des ordres de travail ; • La gestion MRO plus souvent incluse, ... • Lien avec le module d'information financière de l'entreprise. • Premier MIS pour la maintenance. • De nombreuses applications de micro-ordinateur autonomes. • Marché des logiciels dynamique, mais pas toujours fiable. |
| <i>1990s ...</i> | <i>3eme génération</i> | <ul style="list-style-type: none"> • Communication externe possible, par ex. e-MRO. • Plus large, par ex. Utilisation des ressources et module EHS. • Capacités d'analyse améliorées. • Multimédia et fonctionnalités Web. • Marché mature pour la partie intégrée de l'ERP ou de BoB. |

Enfin, le responsable de la maintenance d'aujourd'hui doit faire preuve de souplesse, pour saisir les opportunités dans un environnement commercial dynamique où la mondialisation, les

fusions, les marchés grandissants de la sous-traitance et les technologies émergentes de la maintenance électronique font partie du quotidien.

1.5 Synthèse bibliographique et problématique

1.5.1 Synthèse bibliographique

Nous présentons dans cette partie une synthèse bibliographique des principaux domaines au croisement desquels est positionnée notre problématique. Ces domaines concernent le cadre applicatif de la fonction maintenance, les politiques de maintenance et leurs outils d'intégration dans un environnement industriel et les mécanismes liés à la prise de décision avec la dimension multi-acteur du travail collaboratif.

- ***Maintenance des systèmes distribués : Méthodes d'aide à la décision temps-réel***

Les objets sur lesquels reposent les préoccupations de ce travail sont les systèmes distribués multi-sites [60], avec des contraintes logistiques non négligeables entre les différents sites et partageant les mêmes ressources de maintenance entre ces sites. Les problèmes auxquels l'auteur s'intéresse vont dans le sens des exigences de la planification et d'ordonnancement des tâches de maintenance et d'affectation en temps-réel des ressources suivant leur disponibilité pour la réalisation de ces tâches, afin de maîtriser certains coûts inhérents au fonctionnement du système. Parmi les différents types de coûts abordés dans ce travail se situent notamment ceux qui suivent.

- Les coûts des états critiques des entités du système.
- Les coûts dus à des défaillances (fréquence faible).
- Les coûts dus à des fréquences élevées d'intervention de maintenance, entraînant donc de la sur-maintenance.

Pour résoudre les problèmes ainsi posés, des approches mettant en œuvre des méthodes d'ordonnancement d'activités (tâches ou actions) de maintenance basées sur des règles de priorité sont développées. Aux solutions fournies par la plupart de ces règles des bornes inférieures sont déterminées.

- ***Décision collaborative dans les systèmes distribués : Application à l'e-maintenance***

Dans ce travail Anne Seguy [61] a concentré ses recherches sur les mécanismes de décision collaborative en e-maintenance dans le but d'en évaluer les performances. Pour cela, ses travaux vont consister, d'une part, à analyser et à formaliser les processus décisionnels

collaboratifs en intégrant l'influence des TIC et d'autre part, à proposer les moyens d'évaluer la performance d'un service de maintenance supporté par les TIC.

- ***Contribution à l'optimisation de la maintenance dans un contexte distribué***

Dans ce travail [62], Ahmad Alali Alhouaij étudie en particulier le cas d'une entreprise constituée de plusieurs sites de production distribués géographiquement et possédant des machines complexes qui nécessite des techniciens spécialisés pour les diverses interventions de maintenance. Les équipements sont soumis à une maintenance préventive effectuée par un atelier mobile qui est en charge des visites régulières avec une politique de remplacement. Les équipements défectueux sont quant à eux réparés dans un atelier central de maintenance.

Une solution est proposée pour répondre aux exigences de ces systèmes.

- ***Architectures de diagnostic et de pronostic distribuées des Systèmes Techniques Complexes de Grande Dimension (STCGD)***

Une architecture distribuée pour le diagnostic et le pronostic de systèmes techniques complexes de grande dimension (STCGD) est proposée pour en définir l'état de santé [63]. Chaque système est réalisé par un certain nombre de sous-systèmes eux-mêmes implémentant des fonctions. Ces fonctions sont également constituées d'interconnexions de composants remplaçables et/ou réparables.

En effet, il existe deux types d'acteurs agissant sur le système : les opérateurs et les mainteneurs. Chacun d'eux a des besoins différents concernant le résultat que leur fournira le système de surveillance. L'opérateur voudra connaître les fonctionnalités indisponibles de son système car cela aura des conséquences opérationnelles durant la mission à assurer. Pour le mainteneur, les composants seront sa seule priorité. Ainsi, afin d'aider les différents acteurs du système et les aider dans la conduite ou le maintien en condition opérationnelle, il faut définir une fonction de diagnostic fournissant des informations non erronées dans un temps raisonnable.

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

Dans cette thèse, on s'intéresse à un problème d'affectation et d'ordonnancement en prenant en compte les compétences des ressources humaines [11]. 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.

On propose une approche de résolution dynamique pour un problème monocritère d'affectation et d'ordonnement des activités de maintenance dans un contexte mono-site. Dans le contexte de la maintenance, différents critères concernant les ressources et les tâches sont importants, alors une extension de l'approche dynamique monocritère au multicritère est développée. Toutes ses approches font appel à une méthode d'amélioration par modification partielle de l'ordonnement, inspirée de la méthode de descente-kangourou.

- ***Modélisation de la maintenance prédictive pour les services d'ingénierie tout au long du cycle de vie***

La maintenance prédictive doit prévoir le nombre de rejets à tout point de révision avant toute défaillance afin de prendre des mesures de maintenance adéquates de manière précise et proactive. Dans cet article [64], un aperçu des stratégies de maintenance pronostique est présenté. L'approche de pronostic fondée sur les données proposées utilise une technique statistique consistant à (i) les méthodes d'estimation des paramètres des données de délai avant défaillance pour prédire les paramètres pertinents du modèle statistique et (ii) la modélisation des pronostics incorporant la fonction de distribution cumulative fiable de Weibull pour prédire la partie rejet, remplacement et réutilisation.

L'analyse de la modélisation utilise des données synthétiques validées par des experts du domaine industriel. Le résultat de la prédiction peut offrir une solution supplémentaire aux concepteurs, fabricants et opérateurs de systèmes de produits-services industriels. La nouveauté de cet article est le développement de l'approche de performance tout au long de la vie. L'approche vérifie quand le système doit subir une maintenance, une réparation et une révision avant que la panne ne se produise.

- ***Maintenance prédictive des axes linéaires des machines-outils : un cas de l'industrie manufacturière***

Dans une fabrication durable, l'entretien approprié est crucial pour minimiser l'impact environnemental négatif. Dans le contexte de la fabrication dans le cloud, de l'Internet des objets et du Big Data, la quantité d'informations disponibles n'est pas un problème, le problème est d'obtenir les informations pertinentes et de les traiter de manière utile. Dans cet article [65], un système d'aide à la décision de maintenance est présenté qui utilise des informations provenant de sources multiples et d'un type différent. Les éléments clés de l'approche proposée

sont l'évaluation et la sélection des méthodes de traitement et d'apprentissage automatique, ainsi que l'estimation des indicateurs de performance clés à long terme (KPI) tels qu'un ratio de pannes imprévues ou une approche de coût de maintenance. Le cadre présenté est appliqué aux axes linéaires des machines-outils.

1.5.2 problématique

A partir de la synthèse bibliographique nous nous intéressons au travail de F. Marmier qui a développé des algorithmes d'ordonnancement de tâches de maintenance avec les approches monocritère et multicritère [11], afin de gérer les plannings de maintenance dans une structure en mono-site, notre problématique consiste à étendre ce travail au contexte multi-sites.

1.5.2.1 Architecture du système de production

Pour développer notre application, nous allons adopter la structure distribuée du système de production présentée par la Figure I.4 (b). Nous allons développer dans ce manuscrit, un système de gestion de maintenance pour une unité de production constituée de plusieurs sites distribués géographiquement et possédant des machines complexes qui nécessite des techniciens spécialisés pour les diverses interventions de maintenance (voir Figure I.8), afin de développer notre étude, on doit tenir compte du temps de déplacement entre les site (t) et de la localisation des ressources sur les sites.

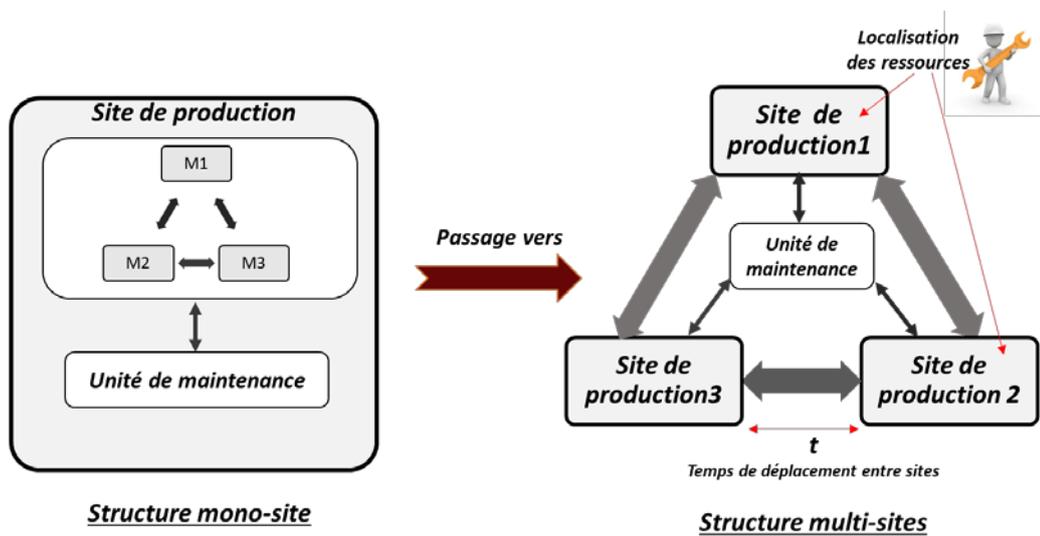


Figure I.8. Passage vers la structure multi-site du système de production

Afin de faciliter notre étude, on suppose que pour le système de maintenance les ressources humaines, matérielles et informationnelles sont disponibles.

I.5.2.2 Niveaux d'action en gestion de maintenance

La gestion de la maintenance est effectuée à trois niveaux différents (stratégique, tactique et opérationnel) comme indiquée sur la Figure I.9.

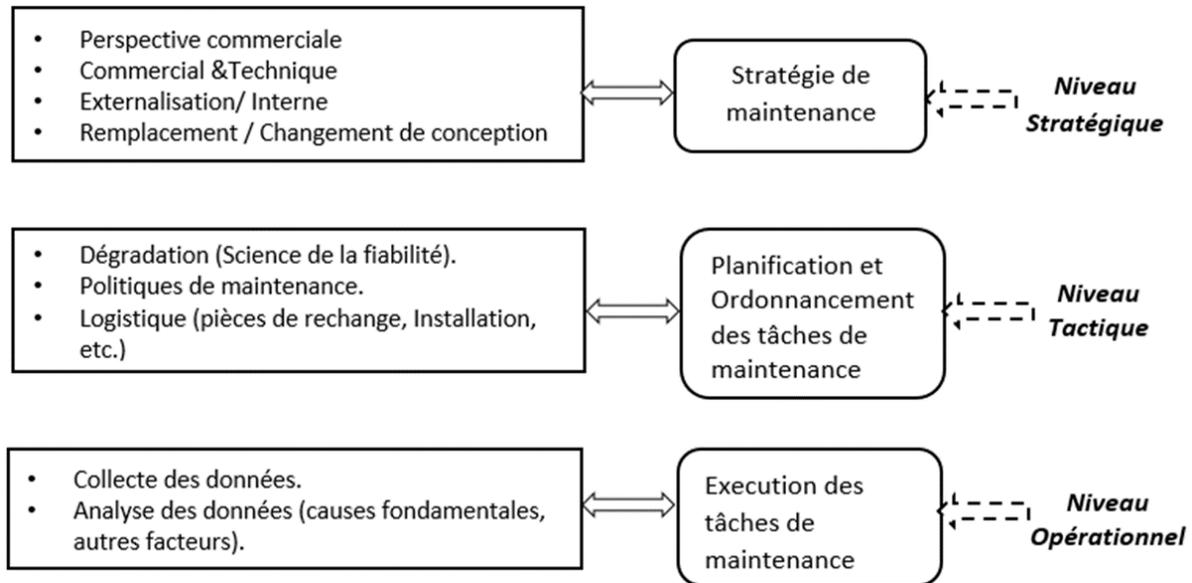


Figure I.9. Niveaux d'action en gestion de maintenance

- *Le niveau stratégique* : concerne la stratégie de maintenance. Cela doit être formulé de manière consistante et cohérente avec les autres stratégies commerciales (production, marketing, finance, etc.).
- *Le niveau tactique* : concerne la planification et l'ordonnancement de la maintenance.
- *Le niveau opérationnel* : concerne l'exécution des tâches de maintenance et la collecte des données pertinentes.

Les trois niveaux d'action en maintenance indiquent qu'un système de gestion de maintenance doit satisfaire trois types d'exigences :

- ✓ **Exigences Techniques** : Elles concernent les fonctions de la maintenance. Il s'agit donc de remettre les machines défectueuses en bon fonctionnement dans un délai optimal tout en améliorant la qualité des interventions et améliorer le niveau de retour d'expérience pour mettre à jour le plan de maintenance et aussi faciliter la mise en place de nouvelles techniques d'une manière active.

-
-
- ✓ Exigences économiques : Elles concernent les coûts de maintenance. Le système proposé doit proposer d'une part, un bon service de maintenance. D'une autre part, il doit optimiser les ressources et maîtriser les coûts produits par les activités de maintenance. Cela ne peut être réalisé que par une logistique efficace.
 - ✓ Exigences organisationnelles : Le système proposé doit gérer les ressources de maintenance (techniciens, pièces de rechange, ...), et planifier/ordonnancer les tâches de maintenance d'une façon adéquate avec celles de la production.

Prendre en compte à la fois, la réalisation des tâches techniques et les objectifs stratégiques et économiques, fait de la gestion de la maintenance une tâche complexe.

1.5.2.3 Objectifs à atteindre

Les objectifs de notre étude seraient d'une part, de maximiser la disponibilité des systèmes de production en appliquant une politique de maintenance, et d'autre part d'assurer une organisation optimale des plannings de maintenance ce qui permet de maîtriser les coûts de maintenance. Pour satisfaire au mieux les exigences techniques, économiques et organisationnelles lors de la gestion de la maintenance du système proposé de la Figure I.8, les points suivants seront développés :

- Une politique de maintenance prédictive est appliquée au parc machines et mis en œuvre en (CBM), afin de surveiller la dégradation des équipements. Pour voir les avantages présentés par la politique de maintenance prédictive, nous invitons le lecteur à revoir la section **I.3.2** de ce chapitre. Des capteurs sont mis en place pour détecter la présence de défauts. Une fois que la dégradation d'un équipement est constatée, des actions de maintenance conditionnelles sont alors générées.
- Pour prendre en charges les actions (tâches) de maintenance conditionnelles générées, elles seront insérées dans des plannings de maintenance organisés d'une façon adéquate avec celles de la production. Comme ces tâches arrivent de manière stochastique, une insertion dynamique s'impose afin de perturber le moins possible les plannings courants.
- Pour résoudre le problème d'insertion des tâches de maintenance, des ordonnancements dynamiques sont développés par des approches monocritère et multicritère sous contrainte de compétences en tenant compte des contraintes temporelles et des contraintes portant sur

la disponibilité des ressources requises en optimisant certaines fonctions « objectifs », telles que les retards, le makespan, l'équilibre de charge, etc.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons montré que les évolutions technologiques et le contexte économique actuel ont provoqué d'importants changements dans les systèmes de gestion de maintenance, donc le choix des éléments structurels de maintenance n'est pas indépendant de son environnement.

En effet la fonction maintenance doit faire face à de multiples forces et exigences à l'intérieur et à l'extérieur de son organisation tels que : le contexte commercial, la société, la législation, l'évolution technologique, le marché de l'externalisation et le contexte de e-business. Comme les installations sont hautement automatisées et technologiquement très complexes en plus l'attention croissante portée à la clientèle cela a entraîné une pression encore plus forte en particulier sur les installations critiques.

Pour avoir des installations bien entretenues et fiables, capables de réaliser des estimations plus rapides et plus fiables, un programme de maintenance bien conçu est obligatoire. Parallèlement aux évolutions technologiques, l'organisation spatiale de la maintenance a été également développée dans ce chapitre, nous avons considéré différentes organisations du système de maintenance et des ressources qui le composent.

En fin de ce chapitre un système de gestion de maintenance en contexte distribué est développé, dans ce cas d'étude, une unité de production constituée de plusieurs sites distribués géographiquement est proposée. Pour satisfaire au mieux les exigences techniques, économiques et organisationnelles lors de la gestion de la maintenance du système proposé, nous allons appliquer une action de maintenance prédictive mise en œuvre par une politique de surveillance de la dégradation CBM, qui sera développée dans le chapitre suivant avec une application sur les machines tournantes.

Pour prendre en charge les actions de maintenance conditionnelles générées, une modélisation d'un système de gestion de tâches de maintenance ainsi qu'une simulation et une validation des résultats sont développées dans les chapitres III et IV.

CHAPITRE II

Application d'une politique de maintenance prédictive mise en œuvre en (CBM) (Détection de défaut d'un roulement industriel)

II.1 Introduction

L'évolution de l'appareil productif, avec des installations réparties géographiquement et des machines de plus en plus complexes et automatisées, a conduit à une nouvelle perception des enjeux rattachés à la fonction maintenance. Dans ce chapitre nous allons montrer que ces enjeux montrent l'intérêt majeur de la maintenance et de la maintenance prédictive en particulier dans ce contexte.

Différentes techniques de détection et d'analyse de défauts développées par la maintenance prédictive sont présentées, parmi ces techniques de diagnostic l'analyse vibratoire est largement utilisée [66], car elle est adaptée aux composants mécaniques et aux machines industrielles en fonctionnement. Elle permet aussi de détecter la majorité des défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes, sujet de notre application.

Une politique de maintenance prédictive mise en œuvre en maintenance conditionnelle (CBM) est appliquée au parc machines du système de production développé dans le chapitre précédent et présenté par la Figure I.8. Des indices de performance sont continuellement surveillés par des capteurs d'accélération, des distributions quadratiques temps–fréquence de la classe de Cohen ont été appliquées pour analyser la signature de ces capteurs.

Une application pratique pour la détection et l'analyse de la dégradation d'un roulement industriel est développé en fin de ce chapitre.

II.2 Evolution des performances de disponibilité des machines

En revenant sur l'histoire du développement de la maintenance et en prévoyant la tendance de développement des technologies, une présentation du paradigme de maintenance [67] et une

feuille de route vers l'excellence peut être illustrée par la Figure II.1. La maintenance prédictive présente beaucoup d'avantages par rapport à la maintenance réactive et préventive.

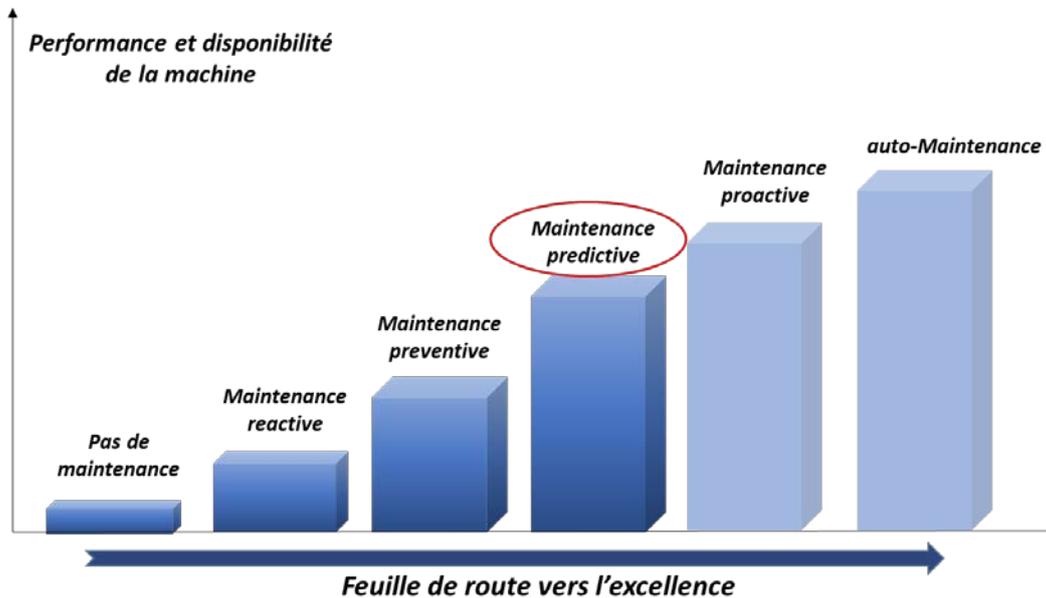


Figure II.1. Disponibilité des équipements en fonction des politiques de maintenance

La prédiction en maintenance augmente la fiabilité et la disponibilité des machines industrielles en diminuant le nombre de pannes (voir Figure II.2), elle permet la diminution de la très coûteuse maintenance corrective en planifiant les interventions et en organisant les arrêts de production et elle réduit les coûts de maintenance préventive en prévoyant au mieux le moment de changement des pièces, seulement quand cela est réellement nécessaire, ni trop tôt (maintenance préventive), ni trop tard (maintenance corrective).



Figure II.2. Politique de maintenance et sévérité du dommage

II.2.1 Stratégie de la maintenance prédictive

La maintenance prédictive (PdM) est une stratégie de maintenance à temps opportun. Il est basé sur la politique de limite de défaillance, dans laquelle la maintenance est effectuée uniquement lorsque le taux de défaillance ou d'autres indices de fiabilité d'une unité atteint un niveau prédéterminé.

La maintenance prédictive peut être décrite comme un processus nécessitant à la fois des compétences technologiques et humaines, tout en combinant toutes les données de diagnostic et de performance, l'historique de maintenance, les journaux des opérateurs et les données de conception, c'est cette intégration de diverses données, informations et processus qui conduit à la réussite d'un programme PdM[68].

Ce programme analyse la tendance des paramètres physiques mesurés par rapport aux limites techniques connues afin de détecter, d'analyser et de corriger un problème avant qu'une défaillance ne survienne [69]. Un plan de maintenance est conçu sur la base des résultats de prédiction issus de la surveillance conditionnelle (voir figure II.3).

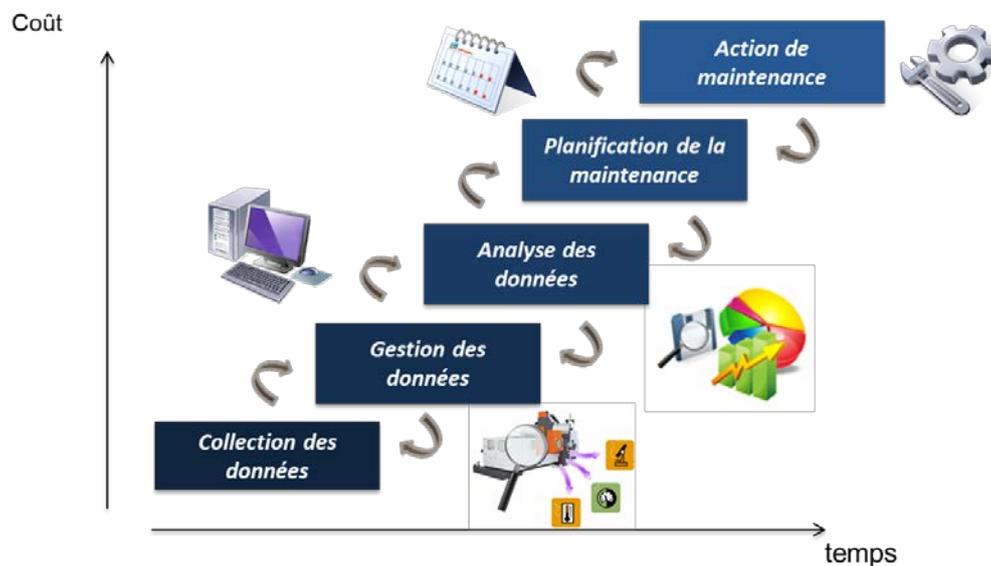


Figure II.3. un « workflow » d'un programme de maintenance prédictive

Pour mettre en place un programme de PdM [70] les coûts peuvent être, en raison des investissements supplémentaires en matériel de surveillance et en logiciels, des coûts en personnel, en outillage et en formation nécessaires. Cependant, ce programme fournit une base pour les opérations de maintenance et de diagnostic des pannes, et offre une fiabilité accrue des

équipements et une avance suffisante des informations pour améliorer la planification, en réduisant ainsi les temps d'arrêt et les coûts d'exploitation imprévus.

La stratégie de maintenance prédictive est mise en œuvre en maintenance conditionnelle (CBM) dans la plupart des systèmes de production, où certains indices de performance sont périodiquement [71] [72] ou continuellement surveillés [73]. Chaque fois qu'une valeur d'index dépasse un seuil prédéfini, des actions de maintenance sont effectuées pour restaurer la machine à son état d'origine ou à un état où la valeur modifiée est satisfaisante par rapport au seuil.

II.2.2 Approches pronostiques de la maintenance conditionnelle (CBM)

Les méthodes et les pratiques de CBM ont été continuellement améliorées au cours des dernières décennies. Les techniques de fusion de capteurs sont maintenant couramment utilisées en raison de la supériorité inhérente à tirer parti des informations mutuelles provenant de plusieurs capteurs [74] [75]. Une variété de techniques en matière de vibrations, de température, d'émissions acoustiques, d'ultrasons, de débris d'huile, de conditions de lubrifiant, de détecteurs de copeaux et d'analyses temps / stress ont fait l'objet d'une attention considérable.

Par exemple, l'analyse de la signature vibratoire, l'analyse de l'huile et les émissions acoustiques, en raison de leur excellente capacité à décrire les performances de la machine, ont longtemps été utilisées avec succès pour le pronostic [76], [77], [78]. Les approches de pronostiques actuelles peuvent être classées en trois groupes de base : Approche basée sur un modèle, approche axée sur les données et approche hybride.

II.2.2.1 Approche basée sur un modèle

nécessite une connaissance détaillée des relations physiques entre les composants associés d'un système et de leurs caractéristiques. C'est un modèle quantitatif utilisé pour identifier et évaluer la différence entre l'état de fonctionnement réel déterminé à partir des mesures et l'état de fonctionnement attendu, dérivé des valeurs des caractéristiques obtenues à partir du modèle physique.

Bunday [79] a présenté la théorie et la méthodologie permettant d'obtenir des indices de fiabilité à partir de données historiques. Cependant, il est généralement prohibitif d'utiliser l'approche basée sur un modèle, car les relations et les caractéristiques de tous les composants associés d'un système et de son environnement sont souvent trop compliquées pour construire

un modèle avec une précision raisonnable. Dans certains cas, les valeurs de certains paramètres /facteurs de processus ne sont pas facilement disponibles.

II.2.2.2 Approche basée sur les données

nécessite une grande quantité de données historiques représentant des opérations normales et «défectueuses». Il n'utilise aucune connaissance à priori du processus, mais dérive plutôt des modèles comportementaux à partir des données de mesure du processus lui-même. Les techniques de reconnaissance de formes sont largement utilisées dans cette approche.

II.2.2.3 Approche hybride

fusionne les informations basées sur un modèle et les informations basées sur des capteurs et tire parti d'approches basées sur des modèles et sur des données grâce auxquelles des résultats pronostiques plus fiables et plus précis peuvent être générés [80], [81], [82] et introduit une méthode de raisonnement hybride pour le pronostic, intégrant la connaissance explicite du domaine et les données relatives aux machines. Malgré les progrès réalisés dans le domaine de la politique CBM, de nombreuses questions fondamentales demeurent. Par exemple :

1. La plupart des recherches sont menées au niveau de l'équipement unique et il n'existe aucune infrastructure permettant d'utiliser un système de diagnostic et de pronostic des machines distantes en temps réel pour la maintenance.
2. La plupart des approches de pronostic développées sont spécifiques à une application ou à un équipement. Une méthodologie ou une boîte à outils de pronostic générique et évolutive n'existe pas.
3. Actuellement, les méthodes sont axées sur la résolution du problème de prédiction des défaillances. Le besoin d'outils pour l'évaluation de la performance du système et la prévision de la dégradation n'a pas été bien traité.
4. Le monde de la maintenance de demain est un monde d'information pour la surveillance basée sur les fonctionnalités. Les caractéristiques utilisées pour le pronostic doivent être davantage développées.
5. De nombreux algorithmes de prédiction développés ont été démontrés dans un environnement de laboratoire, mais ne sont toujours pas validés par l'industrie.

Pour répondre à ces besoins susmentionnés, des systèmes de maintenance intelligente (IMS) sont développés.

II.2.3 Techniques de détection de défauts et leur pourcentage % d'utilisation

Il existe différentes techniques de détection et d'analyse de défauts, telles que l'analyse vibratoire, l'émission acoustique, la thermographie, l'analyse des huiles et des lubrifiants, la variation de résistance dans un circuit électrique, etc. Le choix de l'indicateur de défaut dépend du type de machine à étudier et du type de défaillance que l'on souhaite détecter. Un aperçu sur les différentes techniques sont développées dans les points suivants :

- L'analyse vibratoire : est adaptée aux composants mécaniques et aux machines industrielles en fonctionnement. Elle permet de détecter la majorité des défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes.
- L'analyse d'huile : est appliquée à toutes les machines contenant des fluides de lubrification (réducteurs, motoréducteurs, moteurs thermiques...). Elle consiste à prélever un échantillon d'huile et de l'analyser (particules d'usure).
- La thermographie infrarouge : suscite un intérêt encore récent dans le domaine de la maintenance jusqu'alors réservée au contrôle d'installations électriques, elle est utilisée notamment pour la détection de défauts qui se manifestent par un échauffement anormal à la surface de l'équipement. Elle est peu utilisée pour la surveillance des machines tournantes. La thermographie permet de réaliser des mesures à distances et d'obtenir instantanément une image thermique de la zone inspectée.
- L'analyse acoustique : permet de détecter tout bruit anormal à l'aide de microphones placés à distance de l'équipement.
- Le contrôle par ultrasons : permet de détecter des défauts de faibles amplitudes à hautes fréquences.

Le pourcentage % d'utilisation de ces techniques en industrie est illustré par la figure II.4 [83].

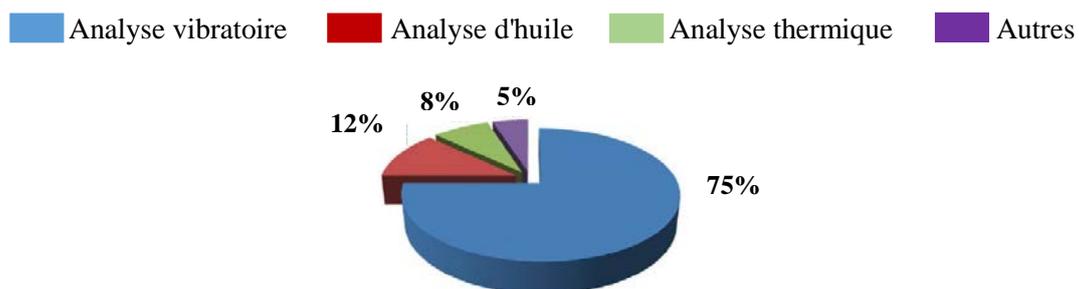


Figure II.4. Pourcentage % d'utilisation des techniques de surveillance des machines

Le pourcentage de 75% présenté par l'analyse vibratoire est justifié par son application surtout pour les machines tournantes, qui représente plus de 80 % des machines industrielles. Elle permet de réaliser un diagnostic approfondi pour localiser le défaut et quantifier sa sévérité.

Il n'existe pas de méthode universelle permettant de détecter de manière assez précoce, tous les types de défauts que l'on est susceptible de rencontrer sur une machine, mais la combinaison et l'association de plusieurs méthodes permet un diagnostic plus fiable et plus rapide.

II.3 Détection et analyse des défauts pour les machines tournantes

La surveillance des machines tournantes ne se limite pas juste à détecter la présence d'un défaut, mais il est aussi nécessaire de pouvoir réaliser un diagnostic approfondi pour le localiser précisément et quantifier sa sévérité. L'analyse vibratoire est une technique qui permet de réaliser ce diagnostic.

En pratique, une bonne conception produira de faibles niveaux vibratoires dans une machine tournante. En effet, avec le vieillissement des machines, les fondations travaillent, les pièces se déforment et s'usent, et de légers changements dans ses propriétés dynamiques apparaissent. Les arbres se désalignent, les paliers s'usent, les rotors se déséquilibrent, les courroies se détendent, les jeux augmentent, tous ces facteurs se traduisent par une augmentation de l'énergie vibratoire qui excite les résonances et ajoute une charge dynamique considérable aux paliers.

Les vibrations recueillies lors des campagnes de mesures sont porteuses d'informations qui caractérisent l'état de fonctionnement de certains composants mécaniques constituant la machine analysée. C'est grâce à l'analyse de ces vibrations qu'il est possible de détecter les composants défectueux et éventuellement de les localiser [84].

II.3.1 Analyse vibratoire pour la détection des défauts des roulements industriels

En réalité, l'endommagement des roulements provoque 40% du nombre total des défaillances des machines tournantes (Figure II.5).



Figure II.5. Pourcentage % des causes des défaillances dans les machines tournantes

Ce sujet a suscité un intérêt croissant de la part de nombreux chercheurs et ingénieurs en essais non-destructifs. Dans la littérature, de nombreux articles sont axés sur les méthodes actuelles d'analyse de signature pour le diagnostic des défauts de roulement [85].

Prashant P. & al ont développé un document de synthèse sur les techniques de détection des défauts des roulements, intitulé « Review of Fault Detection in Rolling Element Bearing » [86]. Ce document couvre les composants des roulements et leur géométrie, les modes de défaillance des roulements, les techniques de surveillance de l'état des roulements, les techniques appliquées dans les domaines temporel et fréquentiel.

Actuellement, des outils avancés de traitement du signal et d'extraction de caractéristiques sont utilisés tels que :

- *La méthode de transformation de Fourier* : a été largement utilisée pour le dé-bruitage et l'extraction de caractéristiques. La composante de bruit dans le signal peut être distinguée une fois celui-ci transformé et les composantes d'entités peuvent être identifiées après la suppression du bruit [87].
- *La méthode de modélisation autorégressive* : calcule les emplacements et les intensités des pics de fréquence à l'aide de modes d'oscillation autorégressifs des lectures de capteurs et affiche des informations importantes sur le processus (généralement, les systèmes mécaniques sont bien décrits par les modes d'oscillations) [88].
- *La méthode de décomposition en paquets d'ondelettes* : permet le calcul rapide de la distribution d'énergie du signal non stationnaire au détriment de la perte de certaines propriétés mathématiques souhaitables [89].
- *La méthode d'extraction des fonctionnalités spécifiques à l'application* : est applicable dans les cas où il est possible d'extraire directement les fonctionnalités relatives aux performances de la série chronologique de lectures de capteurs [90].
- *L'analyse temps-fréquence* : inclut les techniques qui étudient un signal simultanément dans les domaines temps et fréquence, en utilisant diverses représentations temps-fréquence [91]. L'outil de l'analyse temps-fréquence est largement utilisé en industrie pour la détection des signaux non-stationnaires des machines tournantes.

II.3.2 Fréquences caractéristiques de défaut des roulements à billes

Les pistes des roulements et les billes sont chargées cycliquement, ce qui engendre à la surface une dégradation par fatigue qui se présente sous la forme de fissures qui conduisent à l'écaillage puis à la ruine du roulement [92]. Ces fissures peuvent être d'origine superficielle ou provenir de la dégradation de la sous-couche du matériau.

Cette ruine peut être détectée sur un spectre à partir de l'identification des fréquences caractéristiques du roulement. Ces fréquences dépendent des caractéristiques physiques du roulement (voir figure II.6.) : le diamètre des éléments roulants (D_B), le diamètre moyen du roulement (D_P), le nombre de billes (N_B) et l'angle de contact (θ) ainsi que la fréquence de rotation relative entre les bagues intérieure et extérieure (f_r).

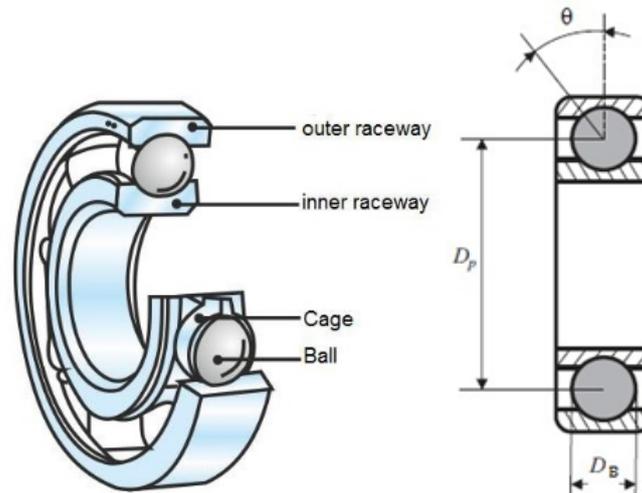


Figure II.6. Caractéristiques physiques du roulement à billes

Les fréquences caractéristiques des défauts de roulement sont données par les formules [93] :

$$f_{CF} = 1/2 f_r \left(1 - \frac{D_B \cos(\theta)}{D_P} \right) \quad (II.1a)$$

$$f_{BF} = D_P / 2D_B \cdot f_r \left(1 - \frac{D_B^2 \cos^2(\theta)}{D_P^2} \right) \quad (II.1b)$$

$$f_{ORF} = N_B / 2 \cdot f_r \left(1 + \frac{D_B \cos(\theta)}{D_P} \right) \quad (II.1c)$$

$$f_{IRF} = N_B / 2 \cdot f_r \left(1 - \frac{D_B \cos(\theta)}{D_P} \right) \quad (II.1d)$$

Avec : f_{CF} (fréquence de défaut de la cage), f_{BF} (fréquence de défaut des billes), f_{ORF} (fréquence de défaut de la bague extérieure), f_{IRF} (fréquence de défaut de la bague intérieure),

Il convient de mentionner que la détérioration des roulements implique non seulement une augmentation de l'amplitude des fréquences de vibration, mais génère également des harmoniques associées à ces fréquences causées par la modulation d'amplitude. Le phénomène de détérioration peut être reconnu par une modulation d'amplitude égale à la fréquence de rotation de l'arbre f_r autour des fréquences de défauts du roulement (voir Figure II.7).

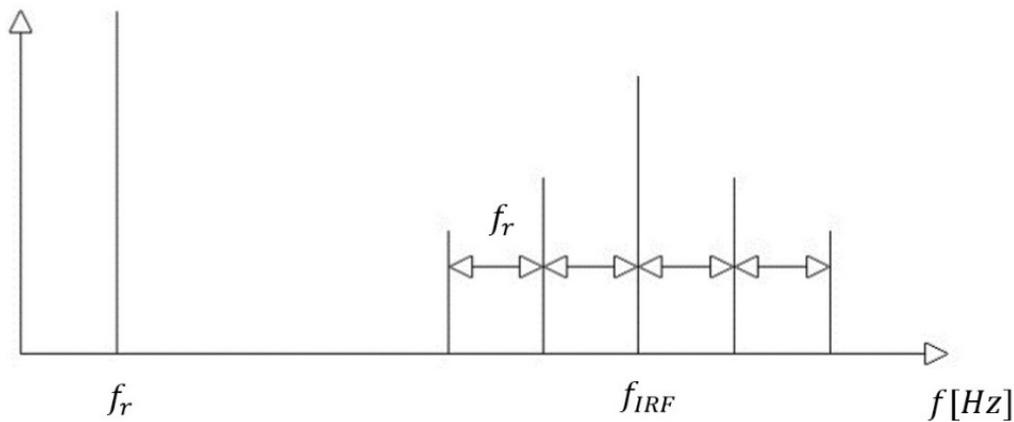


Figure II.7. Modulation d'amplitude pour la fréquence de défaut f_{IRF}

Les méthodes de traitement du signal transforment les signaux de capteur en domaines les plus informatifs des performances d'un composant. En effet l'analyse de séries temporelles ou de fréquence peut être utilisée pour traiter des signaux stationnaires (signaux à fréquence invariante), alors que les ondelettes, ou une analyse temps-fréquence conjointe pourrait être utilisée pour décrire des signaux non stationnaires (signaux avec un contenu de fréquence variable dans le temps).

La plupart des signaux réels, tels que la parole, la musique, les vibrations des machines-outils, les émissions acoustiques, etc. ne sont pas stationnaires. Ces signaux mettent fortement l'accent sur la nécessité de développer et d'utiliser des techniques d'analyse de signaux non stationnaires, telles que les ondelettes ou l'analyse temps-fréquence conjointe (sujet de notre application) [94].

Un aperçu théorique sur les distributions quadratiques temps-fréquence est développé dans la section suivante.

II.3.3 Classe de distributions quadratiques temps-fréquence (La classe de Cohen)

La classe de Cohen [95] regroupe toutes les distributions quadratiques temps-fréquence covariantes par translation de temps et de fréquence, elle offre un large éventail d'outils puissants pour analyser les signaux non stationnaires. Elle combine ainsi les analyses du domaine temporel et du domaine fréquentiel pour donner une image potentiellement plus révélatrice de l'emplacement temporel des composantes spectrales d'un signal [96], [97].

Par conséquent, les représentations temps-fréquence mixtes constituent un outil d'analyse puissant des signaux dont le contenu fréquentiel varie dans le temps.

La formulation générale proposée par Cohen $C_x(t, f)$ est très utile pour mieux comprendre les solutions existantes pour une représentation temps-fréquence du signal x :

$$C_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{2j\pi\xi(s-\tau)} f(\xi, \tau) x\left(s + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(s - \frac{\tau}{2}\right) e^{-2j\pi f\tau} d\xi ds d\tau \quad (II.2)$$

Où x représente le signal, x^* le signal conjugué, t le temps, f la fréquence et $f(\xi, \tau)$ une fonction à deux dimensions appelée fonction de paramétrage ou noyau.

$f(\xi, \tau)$ est une fenêtre d'observation vérifiant $f(\xi, \tau) = f^*(-\xi, -\tau)$ pour garantir le caractère réel de la représentation $C_x(t, f)$.

On peut également écrire (II.2) sous cette forme [89] :

$$C_x(t, f) = \iint_{-\infty}^{+\infty} \Pi(s - t, \xi - f) W_x(s, \xi) ds d\xi \quad (II.3)$$

$$\text{Avec } \Pi(t, f) = \iint_{-\infty}^{+\infty} f(\xi, \tau) e^{-j2\pi(f\tau + \xi t)} d\tau d\xi$$

$$\text{Et } W_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

La fonction $W_x(t, f)$ représente la distribution de Wigner-Ville. C'est l'un des membres les plus importants de la classe de Cohen, sinon son élément central. En fait, l'expression (II.3) présente l'ensemble de toutes les versions de la distribution de Wigner-Ville doublement lissées dans le temps et la fréquence, à condition que $\Pi(t, f)$ puisse être interprété comme un filtre passe-bas bidimensionnel.

Toutes les principales distributions ont été répertoriées dans [98] et [99]. Elles sont caractérisées par différentes fonctions de pondération $f(\xi, \tau)$. On retrouve ainsi les principales distributions connues de Wigner-Ville, Rihaczek, Margenau-Hill, Page, Choi-Williams ou encore Born-Jordan, mais aussi la classique transformée de Fourier à court terme (spectrogramme, sonagramme).

Les différentes contraintes imposées sur le noyau $f(\xi, \tau)$ pour obtenir différentes propriétés de la fonction $C_x(t, f)$, tel que la conservation d'énergie, les marginales correctes, l'invariance d'échelle, l'unitarité et le lien avec les fonctions ambiguïté sont développées par j.p. Ovarlez [94]. Il existe bien entendu d'autres contraintes liées à d'autres propriétés (positivité, conservation du support, etc.).

L'idée de base est de concevoir une fonction conjointe du temps et de la fréquence qui décrit la densité d'énergie ou l'intensité d'un signal simultanément dans le temps et en fréquence. Comme ces distributions sont quadratiques, elles introduisent des termes croisés dans le plan temps-fréquence, ce qui peut perturber la lisibilité de la représentation.

Un moyen d'atténuer ces interférences consiste à lisser la distribution dans le temps et en fréquence, en fonction de leur structure, mais la conséquence en est une diminution des résolutions en temps et en fréquence, et plus généralement une perte de propriétés théoriques.

Des méthodes ont été proposées qui permettent de choisir, de manière optimale et automatique, la fenêtre d'analyse en fonction du type de signal analysé et de réduire les interférences. Les distributions de *Choi-Williams* et de *Born-Jordan* correspondent à des cas particuliers de la classe de Cohen pour lesquels la fonction de paramétrage ne dépend que du produit des variables τ et ξ et permet de réduire les interférences [100] [101].

II.3.3.1 Distribution de Choi-Williams

Cette distribution a été introduite dans le but de réduire les interférences intervenant dans la lecture des distributions temps-fréquence. Le noyau $f(\xi, \tau)$ choisi est de la forme :

$$f(\xi, \tau) = \exp\left[-\frac{(\pi\xi\tau)^2}{2\sigma^2}\right]$$

Où σ est un paramètre de contrôle de la fenêtre de lissage. Si le paramètre σ tend vers l'infini, la distribution de Choi-Williams $CW_x(t, f)$ tend vers la distribution de Wigner-Ville.

Dans les autres cas, cette distribution prend la forme équivalente suivante :

$$CW_x(t, f) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \iint_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sigma}{|\tau|} e^{-2\sigma^2(s-t)^2/\tau^2} x\left(s + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(s - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} ds d\tau \quad (II.4)$$

II.3.3.2 Distribution de Born-Jordan

Si l'on choisit un noyau du type : $f(\xi, \tau) = \frac{\sin(2\pi a \xi \tau)}{2\pi a \xi \tau}$

Où a est une constante, ceci permet de réduire l'énergie des termes d'interférences.

La distribution de Born-Jordan $BJ_x(t, \nu)$ prend la forme suivante :

$$BJ_x(t, \nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2a|\tau|} \left[\int_{t-a\tau}^{t+a\tau} x(s + \tau/2) x^*(s - \tau/2) ds \right] e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (II.5)$$

Les distributions de Born-Jordan et Choi-Williams seront utilisées pour analyser les signaux de capteur de vibrations d'un roulement industriel dans l'application pratique développée dans le point suivant.

II.4 Application pratique

La surveillance des pannes des roulements présente un grand intérêt pratique. L'analyse des vibrations est l'une des méthodes non destructives les plus utilisées pour évaluer les performances des roulements dans une machine en fonctionnement. Différentes failles de roulement induisent différents modèles dans le plan temps-fréquence [102].

Dans cette section, nous allons calculer les valeurs numériques des fréquences associées à chaque type de défaut d'élément (cage, billes, bague de roulement interne et externe), ensuite des approches d'analyse par les distributions temps-fréquence sont introduites.

II.4.1 Description du roulement et fréquences caractéristiques des défauts

Nous utilisons le roulement PW100 n ° 5 conçu par Pratt & Whitney. Ce roulement est un modèle à une rangée de billes à contact radial. Le roulement PW100 n ° 5 est utilisé par l'arbre de la boîte des vitesses. Ce roulement a été collecté auprès de la société Bombardier et a été identifié comme l'un des composants les plus problématiques (voir Figure II.8).



Figure II.8. Roulement de Pratt & Whitney considéré pour les tests

Les caractéristiques techniques du roulement utilisées pour calculer les fréquences théoriques de défaut sont extraites de la fiche technique fournie par le constructeur Pratt & Whitney (voir Tableau II.1).

Tableau II.1. Spécifications techniques du roulement PW100 #5

| <i>P & W Bearing (ID)</i> | <i>PW100 #5BRG (Roller bearing)</i> | |
|-------------------------------|-------------------------------------|---------|
| Inner diameter | 2.8347" | 2.8350" |
| Outer diameter | 3.9292" | 3.9272" |
| Pitch diameter | 3.04165" | |
| Width | 0.625" | 0.630" |
| Contact Angle | 0° | |
| Operating speed 1 | 1000 rpm | |
| Operating speed 2 | 2000 rpm | |

Les fréquences associées aux différents défauts de roulement sont calculées à l'aide des expressions (II.1a), (II.1b), (II.1c) et (II.1d) pour différentes valeurs de f_r (voir Tableau II.2).

Tableau II.2. Fréquences caractéristiques des défauts du roulement

| f_r | f_{CF} | f_{ORF} | f_{IRF} | f_{BF} |
|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 16.66 Hz | 7.64 Hz | 108.32 Hz | 91.71 Hz | 99.54 Hz |
| 33.33 Hz | 15.28 Hz | 216.64 Hz | 183.42 Hz | 199.08 Hz |

II.4.2 Tests expérimentaux, acquisition et traitement des données

Plusieurs essais sur le roulement sont effectués dans le laboratoire du département de mécanique de l'École Polytechnique de Montréal. Le banc d'essai a été conçu au laboratoire de la section mécanique appliquée.

II.4.2.1 banc d'essai expérimental

Le banc d'essai est constitué des éléments suivants : Un système de rotor comprenant un arbre supporté à ses extrémités par un ensemble de deux roulements SKF relié à une boîte de vitesses via un système à courroie de transmission.

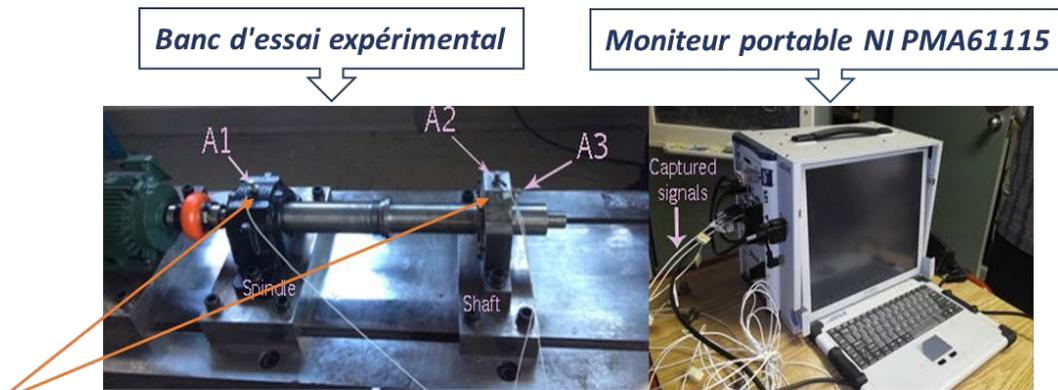
L'ensemble du système est entraîné par un moteur électrique de 2 CV évalué à 3 600 tr / min et soutenu par un ensemble de deux faisceaux à pondération H de 67 lb / pi chacun. Le banc d'essai a une longueur de 1750 mm et une largeur de 210 mm il est conçu pour tester les défauts typiques des machines tournantes (voir Tableau II.3). Un ensemble de manchon de serrage interne et externe sont conçus pour être adapté à toutes les tailles des roulements Pratt & Whitney.

Tableau II.3. Caractéristiques techniques du banc d'essai

| <i>Composants</i> | <i>Spécifications</i> | <i>Fabricant</i> |
|----------------------|----------------------------|------------------|
| Base | 2 H-Beams W8x8 67lb/ft | Prometo |
| Motor | 2Hp, 3600rpm, 575 Volts | Toshiba |
| Couplings | 7/8inch-linch | Rex Omega |
| Bearing House | SNL 510 – H310 – 1210EKTN9 | SKF Canada |

Trois accéléromètres piézoélectriques sont utilisés [103], A1, A2 et A3 (voir Figure II.9), L'accéléromètre A3 est positionné horizontalement sur le roulement, A2 est positionné verticalement sur le côté du roulement pour la surveillance des défauts d'arbre et A1 est positionné horizontalement sur la broche pour la surveillance du moteur.

Les accéléromètres A1 et A2 sont utilisés pour s, assurer de l'alignement de l'arbre, les signaux obtenus par l'accéléromètre A3 sont traiter par le moniteur portable NI PMA61115 pour détecter les défauts du roulement industriel.



Accéléromètres

Figure II.9. Banc d'essai expérimental et Moniteur portable NI PMA61115

Le banc d'essai peut être démonté afin d'enlever l'arbre et l'ancien roulement (Figure II.10 à gauche), ensuite, comme illustré à la Figure II.10 en bas à droite, le nouveau roulement est dilaté par chauffage à 110°C afin de garantir son insertion réussite dans l'arbre. Par la suite, le banc d'essai est soigneusement calibré.



Figure II.10. Montage et démontage des roulements sur le banc d'essai

II.4.2.2 Diagramme des vitesses de rotation de l'arbre du banc d'essai

Les tests sont effectués pour deux vitesses de rotation différentes de l'arbre Sp1 et Sp2 de valeur de 1000 tr/min et de 2000 tr/min respectivement (voir Tableau II.4).

La plage de variation des vitesses est déterminée par le fait que le facteur de crête de la fréquence de défaut réagit bien sur la plage de rotation allant de 500 à 2200 tr/min [104].

En effet, à basse et à haute vitesse, le signal est moins marqué, moins amplifié par le défaut, pour les vitesses élevées, l'amplitude générée par le défaut ne se distingue pas clairement du bruit de fond et pour les vitesses basses, aucune accélération n'est générée.

De plus, pour des vitesses de rotation élevées, en raison d'un bruit excessif, le risque d'endommager le banc d'essai est imminent.

Tableau II.4. Vitesses de l'arbre de rotation

| | Vitesse de rotation (rpm) | Vitesse de rotation (Hz) |
|-----|---------------------------|--------------------------|
| Sp1 | 1000 | 16.66 |
| Sp2 | 2000 | 33.33 |

Les résultats expérimentaux sont pris dans un ordre chronologique sans prendre en compte les temps d'accélération et de décélération du moteur. Nous ne traitons que les résultats obtenus dans les intervalles de temps suivants (t1a-t1b) et (t2a-t2b) qui correspondent aux vitesses de rotation (Sp1, Sp2) de l'arbre (voir Figure II.11).

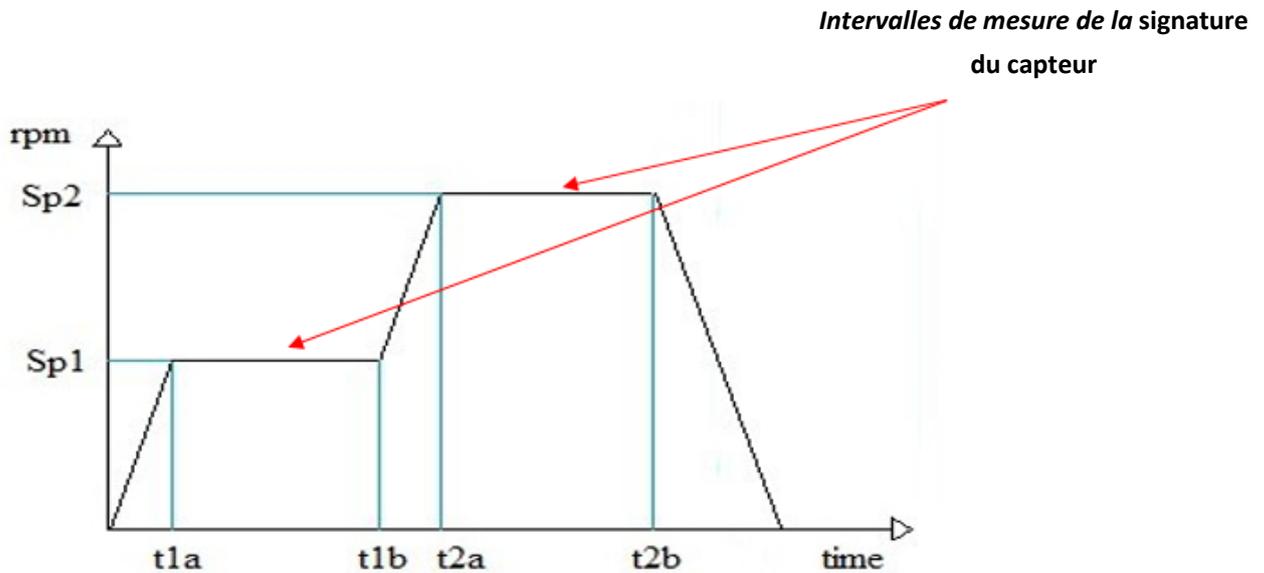


Figure II.11. Diagramme des vitesses de rotation de l'arbre

II.4.2.3 Logiciel de traitement des données

Les mesures d'accélération prises à la sortie des capteurs sont traitées par le moniteur portable NI PMA61115, puis analysées par le logiciel TF-ANALYSIS développé par l'équipe de recherche à l'école polytechnique de Montréal (voir Figure II.12).

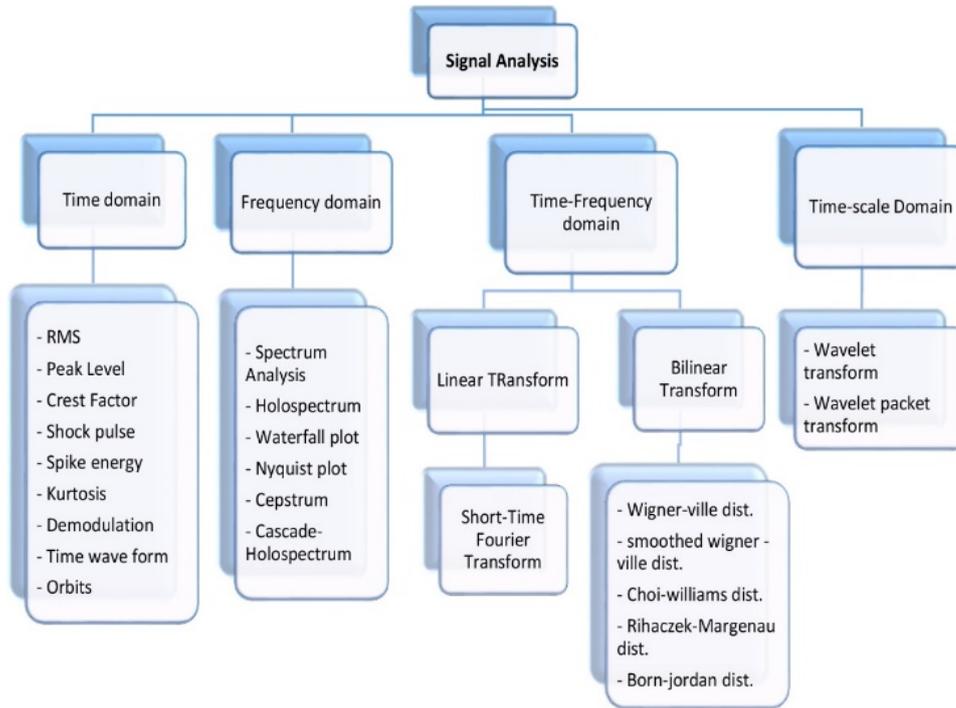


Figure II.12. T-F ANALYSIS Toolbox (schéma synoptique)

Ce logiciel propose un large éventail de méthodes d'analyse temporelle, fréquentielle et de temps-fréquence. Les paramètres d'entrée du logiciel sont la fréquence d'échantillonnage, la longueur de la fenêtre temporelle et la longueur de la fenêtre fréquentielle. Il faut chercher un compromis entre la résolution temporelle et la résolution fréquentielle.

Afin d'obtenir une meilleure résolution une méthode d'essai manuel est appliquée à condition que les longueurs des fenêtres temporelles et fréquentielles satisferaient l'équation $(2n - 1)$, où n est un entier positif [105].

II.4.2.4 Expérimentation

Pour différentes valeurs de vitesse de rotation de l'arbre, la signature du capteur est analysée par les distributions de Choi-Williams et de Born-Jordan. On ajuste les paramètres du logiciel pour une meilleure résolution du signal.

II.4.2.4.1 Mesures des vibrations pour une vitesse de rotation de 1000 tr/min

D'après les graphiques des distributions (a) et (b) de la Figure II.13 la distribution de Choi-Williams présente une meilleure résolution par rapport à celle de Born-Jordan, la modulation du signal indique la présence de signaux non stationnaires en basses fréquences. Ces derniers confirment la présence de défauts au niveau du roulement.

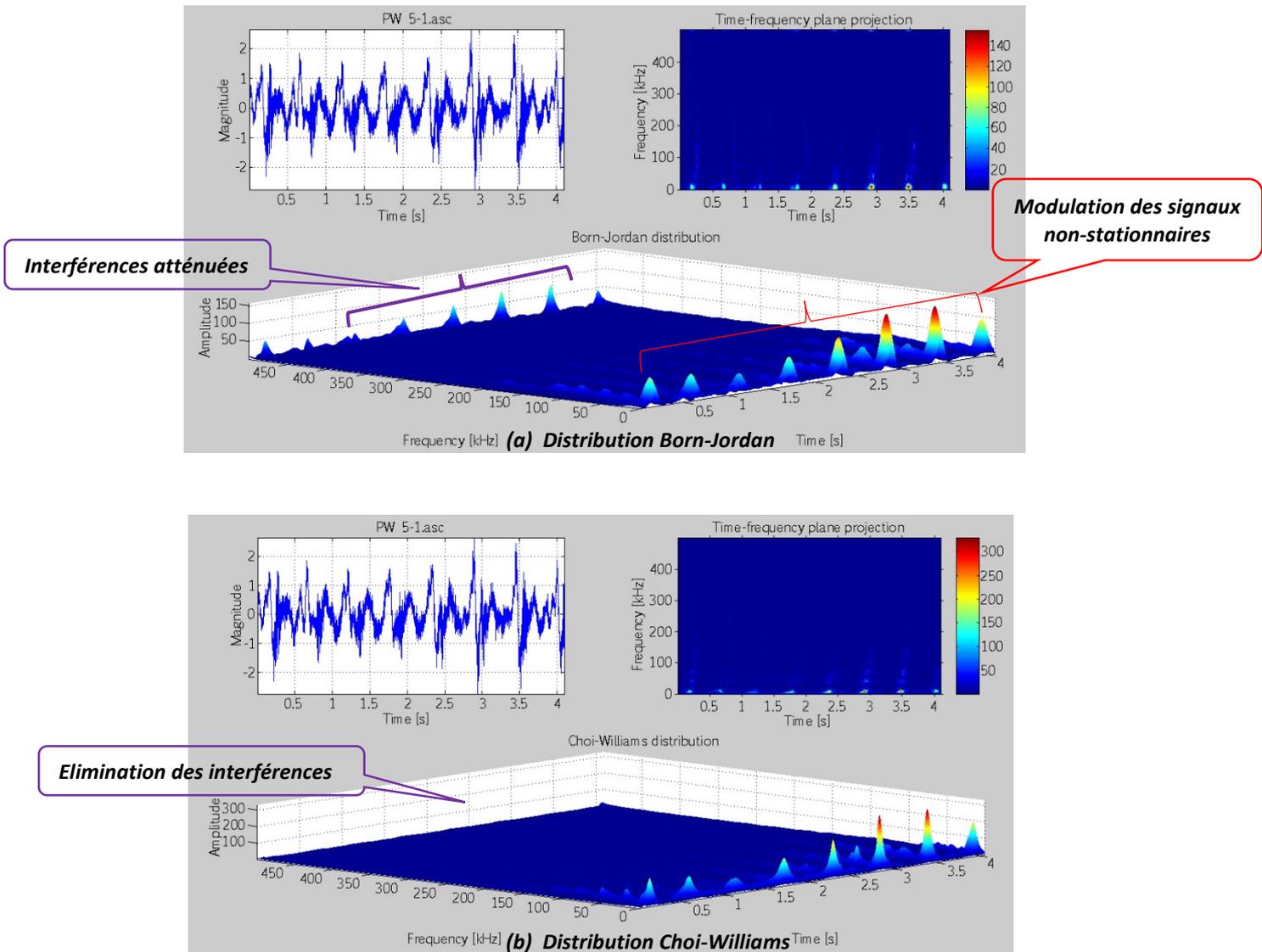


Figure II.13. Distributions pour une vitesse de rotation de 1000 tr/min

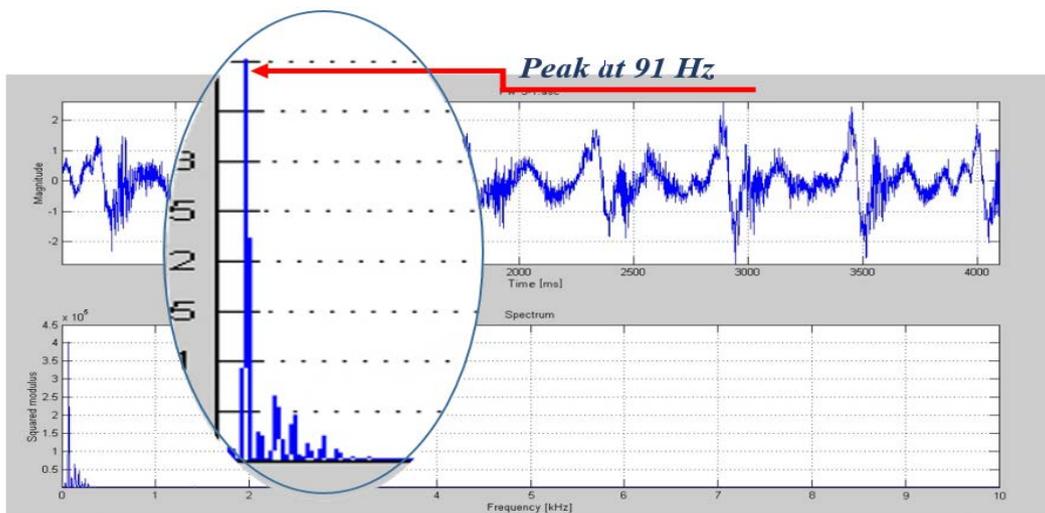


Figure II.14. Analyse fréquentielle du spectre pour une vitesse de 1000 tr/min

Le graphique du spectre du signal de la Figure II.14 montre un pic de fréquence correspondant à une valeur de 91 Hz. On remarque que la fréquence du pic de défaut est proche de la valeur de la fréquence du défaut de la bague interne du roulement (f_{IRF}), qui présente une valeur de 91,71 Hz (voir Tableau II.2).

II.4.2.4.2 Mesures des vibrations pour une vitesse de rotation de 2000 tr/min

Dans ce cas la vitesse de rotation a été doublée à la valeur de 2000 tr / min. D'après les graphiques (a) et (b) des distributions de Born-Jordan et de Choi-Williams de la Figures II.15, le nombre de modulation de fréquence a également doublé. Ces modulations sont présentes en basse fréquence, ce qui confirme la présence de défauts au niveau du roulement.

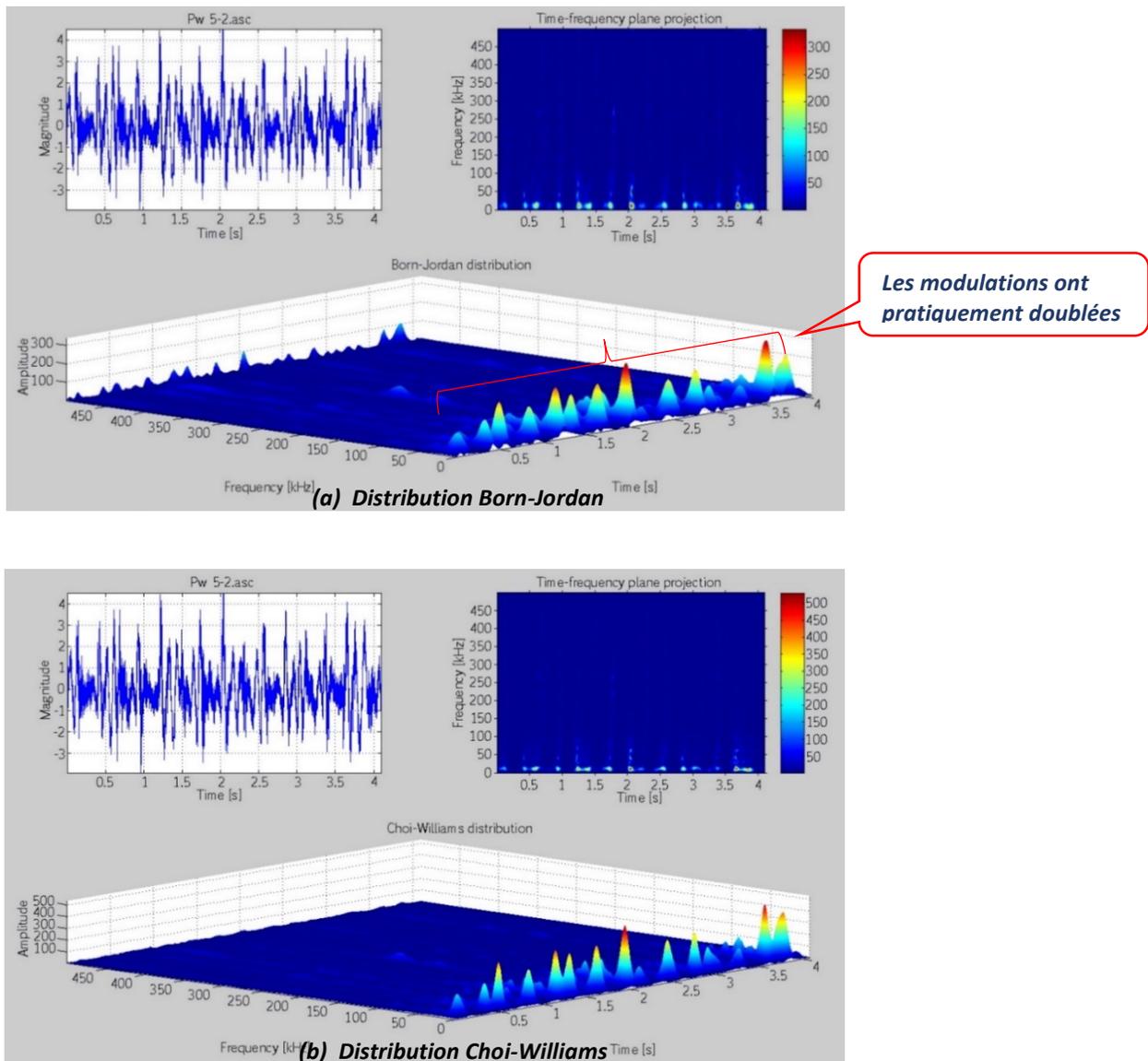


Figure II.15. Distributions pour une vitesse de rotation de 2000 tr / min

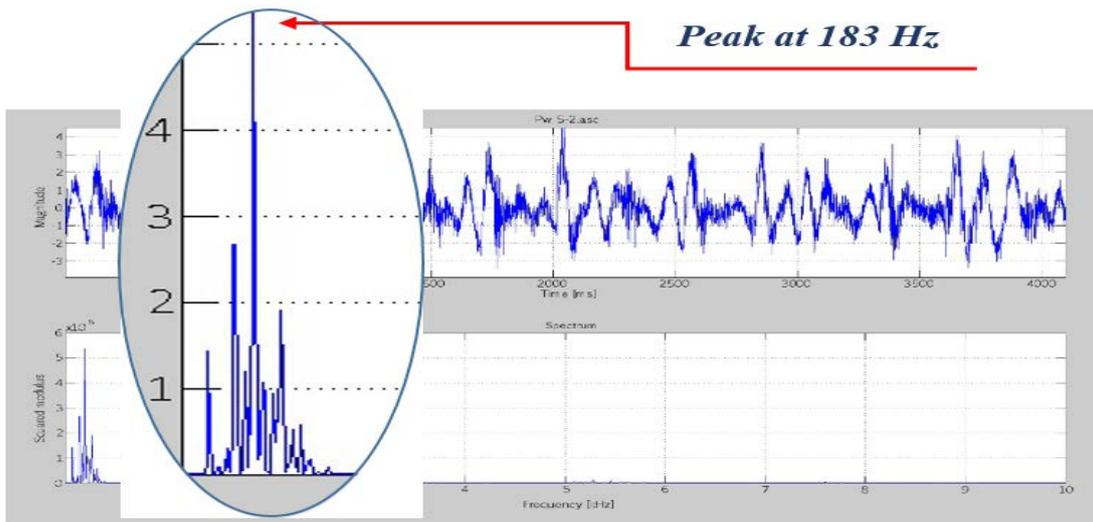


Figure II.16. Analyse fréquentielle du spectre pour une vitesse de 2000 tr / min

Comme précédemment, à partir du graphe spectral (voir la Figure II.16), la fréquence du pic de défaut pour la vitesse de 2000tr/min est de 183 Hz, cette valeur confirme la présence de défaut au niveau de la bague interne du roulement(f_{IRF}). La valeur mesurée est proche de la valeur caractéristique du Tableau II.2 qui correspond à une valeur de 183,42 Hz.

II.4.2.4.3 Validations des résultats

D'après les expériences précédentes, nous remarquons que pour les différentes vitesses de rotation, les distributions temps-fréquence indiquent l'apparition de défaut au niveau de la couronne interne du roulement.

Pour valider les résultats obtenus, nous calculons le pourcentage de l'erreur relative entre la valeur théorique (caractéristique) et la valeur expérimentale de la fréquence de défauts ($\% \Delta f_{IRF}$), l'erreur est calculée d'après la formule :

$$\% \Delta f_{IRF} = \frac{|(f_{IRF})_{experimental} - (f_{IRF})_{theoretical}|}{(f_{IRF})_{theoretical}} \times 100$$

Le Tableau II.5 montre que La fréquence($f_{IRF})_{experimental}$ est inférieur de 0,77% et de 0,23% par rapport à la fréquence $(f_{IRF})_{Theorique}$, pour les vitesses de rotation de 1 000 tr / min et de 2 000 tr / min respectivement.

La validité des mesures est démontrée par l'erreur relativement faible entre les fréquences de défaut théoriques et mesurées, qui a une valeur inférieure à 1 % ($\% \Delta f_{IRF} < 1\%$).

Tableau II.5. Erreurs relatives mesurées

| Vitesse de Rotation f_r | Valeur théorique f_{IRF} | Valeur expérimentale f_{IRF} | % Erreur relative $\% \Delta f_{IRF}$ |
|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|
| 1000rpm | 91.71 Hz | 91 Hz | 0.77 % < 1% |
| 2000rpm | 183.42 Hz | 183 Hz | 0.23 % < 1% |

La détection opportune de ces défauts et l'estimation du délai de défaillance sont des sujets de préoccupation pour les chercheurs, car une défaillance abrupte des roulements peut entraîner un dysfonctionnement de l'ensemble du système, ce qui entraîne des temps morts pour le système et des pertes économiques pour le client.

La défaillance des roulements risque également d'endommager les machines, ce qui entraînera des coûts de réparation et / ou de remplacement de machines extrêmement élevés.

II.5 Conclusion

Ce chapitre aborde le changement de paradigme dans les systèmes de maintenance modernes, passant des pratiques traditionnelles « échec et résolution » à une méthodologie « prédire et prévenir ». Une stratégie de la politique de maintenance prédictive mise en œuvre en maintenance basée sur les conditions est présentée ainsi que les approches pronostiques de la (CBM).

Une méthode de détection et d'isolation de défaut dans le domaine temps-fréquence est appliquée à un roulement industriel. Les résultats expérimentaux obtenus sont validés par rapport aux résultats calculés théoriquement. Les fréquences de défauts obtenues expérimentalement présentent une diminution qui soit inférieure à 1% par rapport aux fréquences calculées théoriquement. Ces résultats montrent l'efficacité de la technique utilisée pour extraire des informations importantes sur la santé des roulements à partir des mesures de vibrations.

Grâce à ces méthodes de diagnostic avancées, il est possible de détecter ces défauts dans leur phase naissante, avant que les effets catastrophiques des défaillances ne puissent se produire. La détection de défauts génère des tâches de maintenance prédictive, pour être prises en charge elles doivent être insérées dans un planning de maintenance préétabli par le service de maintenance.

Comme ces tâches arrivent de manière stochastique, une insertion dynamique s'impose, pour perturber le moins possible les plannings de maintenance.

Le prochain chapitre sera consacré aux développements d'algorithmes d'ordonnancement dynamique dans un contexte distribué.

CHAPITRE III

Modélisation et optimisation d'ordonnancements statique et dynamique sous contrainte de compétences (Application à un contexte distribué)

III.1 Introduction

Dans la Section (I.5.2.1) nous avons présenté l'architecture d'un système multi-sites reparté géographiquement et nous avons mis en évidence dans le chapitre précédent l'intérêt d'appliquer une politique de maintenance prédictive. Lors de l'application de cette politique, des tâches de maintenance seront alors générées mais de manière stochastique, l'objectif de ce chapitre serait de développer des ordonnancements dynamiques pour gérer l'insertion de ces tâches dans un planning de maintenance courant.

La première partie de ce chapitre sera consacrée dans un premier temps à un rappel de quelques notions de base sur les problèmes d'ordonnement ainsi que les approches classiques de résolution relatives à ces problèmes. Dans un second temps un aperçu sur la mission et les spécificités de la fonction ordonnancement en maintenance est développé.

Dans la deuxième partie du chapitre une modélisation d'un problème d'ordonnement est développée relativement à notre problématique, qui consiste en l'insertion dynamique de nouvelles tâches de maintenance conditionnelles dans le contexte distribué définie par notre système. Dans ce contexte deux heuristiques d'ordonnement sont développées pour l'approche monocritère et multicritères sous contrainte de compétences.

III.2 Description des problèmes d'ordonnement

La description d'un problème d'ordonnement nécessite un ensemble de données qui sont les tâches et leurs caractéristiques, les contraintes potentielles, les ressources et le(s) critère(s) d'optimisation. On trouve dans la littérature plusieurs ouvrages consacrés à l'ordonnement, nous citons [92], [93], [94], [95], [96], [97], [98] et [99]. Plusieurs définitions de l'ordonnement y sont données, nous reprenons celle proposée dans [98] et [99] :

Définition 1 :

« Ordonnancer, c'est programmer l'exécution d'une réalisation en attribuant des ressources aux tâches et en fixant leurs dates d'exécution. Les problèmes d'ordonnancement, apparaissent dans tous les domaines de l'économie : l'informatique, la construction (suivi de projet), l'industrie (problèmes d'ateliers, gestion de production), l'administration (emploi du temps). [. . .]. Les tâches sont le dénominateur commun des problèmes d'ordonnancement, leur définition n'est ni toujours immédiate, ni toujours triviale [. . .]. Enfin, il faut programmer les tâches de façon à optimiser un certain objectif qui sera, suivant le cas, la minimisation de la durée totale (c'est le critère le plus fréquemment employé) ou le respect des dates de commande ou de lissage des courbes de main d'œuvre ou encore la minimisation d'un coût. D'une manière générale, trois types d'objectifs sont essentiels dans la résolution des problèmes d'ordonnancement : l'utilisation efficace des ressources, un délai d'exécution des tâches aussi faible que possible et le respect des dates d'achèvement prescrites à l'avance »

Définition 2 :

« Une tâche est un travail élémentaire nécessitant un certain nombre d'unités de temps et de ressources. Ordonnancer un ensemble de tâches, c'est programmer leur exécution en leur allouant les ressources requises et en fixant leur date de début »

Ces deux définitions nous permettent de déterminer les éléments caractéristiques d'un problème d'ordonnancement.

III.2.1 Notations et définitions

Soient $J = \{Tache\ j/j = 1,2,\dots,n\}$ l'ensemble des n travaux (Tâches) à ordonnancer et $R = \{R\ i /i = 1,2,\dots,m\}$ l'ensemble des m Ressources (machines), nous utilisons les notations présentées dans la plupart des ouvrages et articles sur le sujet :

- j Indice de la tâche.
- i Indice de ressource.
- $p_{i,j}$ durée opératoire de la j^{eme} Tâche sur la ressource (machine) R_i (*processing time*).
- r_j date minimale de début de la tâche j (*release date*).
- d_j date d'achèvement souhaitée de la tâche j (*due date*).
- w_j poids de la tâche j (*weight*).

- t_j date de début d'exécution de la tâche j .
- C_j date de fin d'exécution de la tâche j (*completion time*).
- L_j retard algébrique de la tâche j (*lateness*) : $L_j = C_j - d_j$
- E_j avance de la tâche j (*earliness*) : $E_j = \max(d_j - C_j, 0)$
- T_j retard vrai de la tâche j (*tardiness*) : $T_j = \max(C_j - d_j, 0)$
- U_j indicateur de retard de la tâche j : $U_j = 1$ si $T_j > 0$, $U_j = 0$ sinon.

III.2.2 Travaux

Un travail est une entité en attente d'exécution qui requiert un temps machine préalablement défini. Selon le problème étudié, les travaux sont soit élémentaires, ou bien composés de plusieurs sous-travaux désignés par « tâches », dans ce cas, chaque tâche nécessite un temps d'exécution qui lui est associé ; la première et la dernière tâche lancée, définissent respectivement la date de début et de fin d'exécution du travail.

Un travail peut être interdit d'exécution après une date donnée, on parle de date de fin au plus tard (*deadline*) ; quand cette date peut être dépassée, elle est appelée date de fin souhaitée (*due date*).

III.2.3 Ressources

Les ressources sont des moyens « machines ou humains » pouvant réaliser l'ensemble des travaux à exécuter, et sont disponibles en quantités limitées. Elles sont classifiées selon leurs capacités ou bien leurs modes de fonctionnement. Une ressource est dite « renouvelable », si après exécution d'un travail donné elle est disponible avec la même capacité. Elle est consommable, si son utilisation est limitée à uniquement un certain nombre de travaux.

Les différents types possibles de ressources (machines) sont :

III.2.3.1 Une machine (une ressource) (\emptyset)

Dans ce cas, chaque travail est constitué d'une seule tâche (voir Figure III.1.).

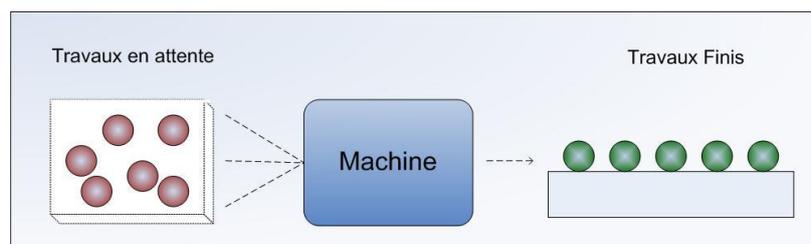


Figure III.1. Structure à une machine

III.2.3.2 Machines (ressources) parallèles

Dans ce cas, les ressources remplissent, a priori, toutes les mêmes fonctions (voir Figure III.2.), Selon leur vitesse d'exécution, on distingue :

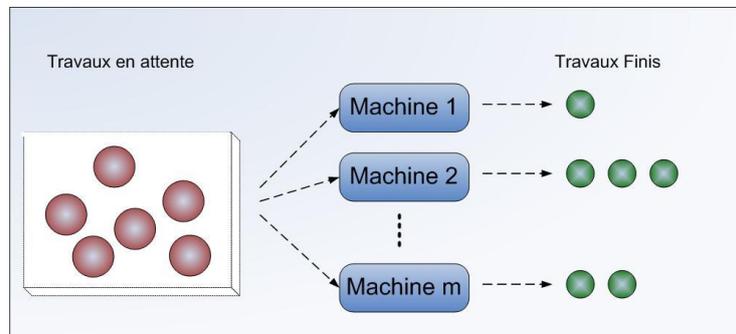


Figure III.2. Structure à machine parallèles

- Machines identiques (P) : la vitesse d'exécution est la même pour toutes les machines (ressources) R_i et pour tous les travaux (Jobs) J_j ;
- Machines uniformes (Q) : chaque machine R_i a une vitesse d'exécution propre et constante. La vitesse d'exécution est la même pour tous les travaux J_j d'une même machine R_i ;
- Machines indépendantes (R) : la vitesse d'exécution est différente pour chaque machine R_i et pour chaque travail J_j .

III.2.3.3 Machines dédiées

Ces machines sont spécialisées en l'exécution de certaines opérations. Dans cette catégorie, chaque travail est constitué de plusieurs opérations (tâches). En fonction du mode de passage des opérations sur les différentes machines, des ateliers spécialisés sont différenciés :

- Flow Shop (F) : c'est un cas particulier du problème d'ordonnement d'atelier pour lequel le cheminement des travaux est unique : les n travaux utilisent les m machines dans l'ordre $1, 2, \dots, m$ (lignes de production), voir Figure III.3 ;

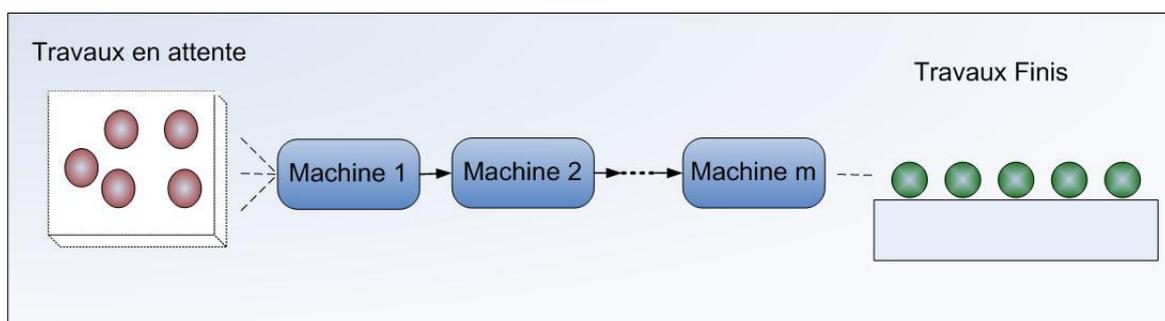


Figure III.3. Structure Atelier flow shop

- Job Shop (J) : les n travaux doivent être exécutés sur les m machines, sous des hypothèses identiques à celles du *flow shop*, la seule différence est que les séquences opératoires relatives aux différents travaux peuvent être distinctes et sont propres à chaque travail (voir Figure III.4).

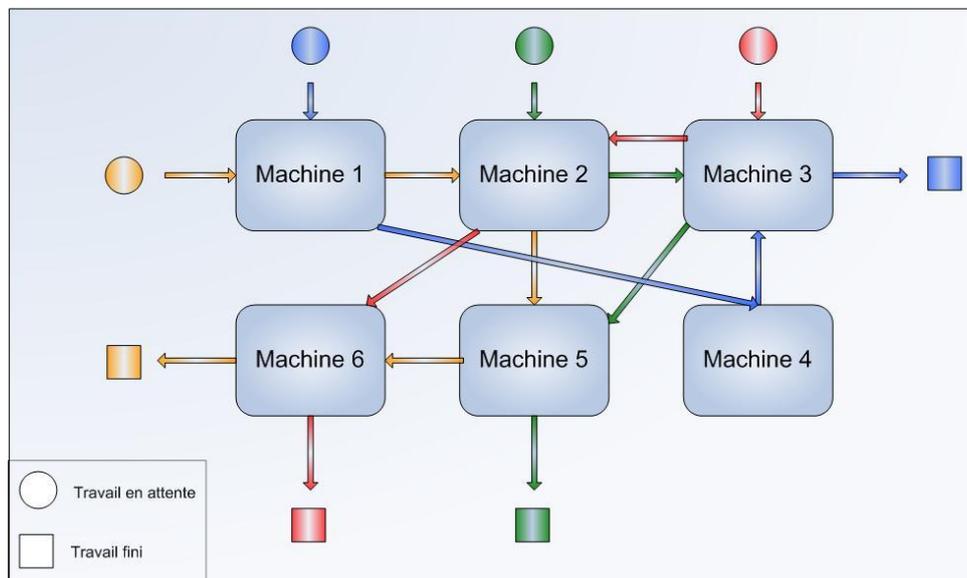


Figure III.4. Structure Atelier *Job Shop*

III.2.3.4 Autres configurations

Les principales catégories (*Flow Shop*) et (*Job Shop*) ne sont pas les seuls modèles dans l'industrie, plusieurs autres catégories intermédiaires existent, dont les plus connues sont :

- Ateliers flow shop hybride : il s'agit d'ateliers *flow shop* dans lesquels un « étage » donné de la fabrication peut être assuré par plusieurs machines en parallèle. Dans ce genre d'ateliers, tout travail passe par chaque étage et l'ordre de passage sur les étages est le même pour chaque travail. Ce type d'ateliers est également appelé « atelier à cheminement unique avec machines en exemplaires multiples » ;

- Ateliers à cheminement libre (open shop) : chaque produit à traiter doit subir un ensemble d'opérations sur un ensemble de machines, mais dans un ordre totalement libre ;

- Ateliers flexibles : ces ateliers sont caractérisés par un niveau d'automatisation élevé, cherchant par là un compromis entre flexibilité et productivité. Ils sont à la base des ateliers à cheminements multiples où les principales tâches (stockage, traitement de pièces, manutention...) sont automatisées.

III.2.4 Les contraintes

Les contraintes expriment des restrictions sur les valeurs que peuvent prendre simultanément les variables de décision, on distingue :

III.2.4.1 Contraintes des ressources

Plusieurs types de contraintes peuvent être induits par la nature des ressources, à titre d'exemple : la capacité limitée d'une ressource implique une contrainte sur la quantité de travaux à affecter à celle-ci, si la ressource est cumulative, la contrainte peut limiter le nombre de travaux à exécuter simultanément.

Une ressource peut également ne pas être disponible sur certaines fenêtres de temps (contraintes d'indisponibilité), ou encore pas valide pour exécuter des travaux donnés (contraintes d'invalidité).

III.2.4.2 Contraintes de procédure

Les contraintes de procédure peuvent être liées aux gammes opératoires, à titre d'exemple :

- Contraintes de précédence (*prec*) : elles expriment les relations entre les tâches à exécuter ; une tâche ne peut être exécutée avant la fin de l'exécution de ses prédécesseurs.
- Contraintes disjonctives : deux tâches sont en disjonction s'ils ne peuvent pas être exécutés simultanément.
- Contrainte de préemption (*pmtn*) : la préemption est autorisée, si l'exécution des travaux peut être interrompue à une date donnée pour être reprise ensuite et potentiellement sur une machine différente.
- Contrainte sur la durée opératoire : $p_j = p$ pour les cas où les travaux ont la même durée opératoire.

III.2.4.3 Contraintes temporelles

C'est des restrictions sur les valeurs que peuvent prendre certaines variables temporelles tels que : la date de disponibilité (r_j), le due date (d_j) ou encore les dates de fin impératives (\bar{d}_j).

III.2.5 Les critères d'optimisation et fonctions « objectifs »

L'approche par optimisation suppose que les solutions candidates à un problème puissent être ordonnées de manière rationnelle selon un ou plusieurs critères d'évaluation numériques. Ces

critères sont construits sur la base d'indicateurs de performances. On cherche alors à minimiser ou à maximiser de tels critères. On note par exemple :

- Critères liés au temps :
 - Le temps total d'exécution ou le temps moyen d'achèvement d'un ensemble de tâches ;
 - Différents retards (maximum, moyen, somme, nombre, etc.) ou avances par rapport aux dates limites fixées ;
- Critères liés aux ressources :
 - La quantité totale ou pondérée de ressources nécessaires pour réaliser un ensemble de tâches
 - La charge de chaque ressource ;

Les critères d'optimisation les plus intéressants et considérés le plus souvent dans la littérature sont donnés dans le Tableau III.1.

Tableau III.1. Critères d'optimisation

| <i>Critères</i> | <i>Maximum</i> | <i>Somme</i> | <i>Somme pondérée</i> |
|------------------------------|-------------------------------|------------------------|---------------------------|
| ▪ Retard algébrique | $L_{max} = \max_{j=1,m}(L_j)$ | $L = \sum_{j=1}^m L_j$ | $L_w = \sum_{j=1}^m wL_j$ |
| ▪ Retard | $T_{max} = \max_{j=1,m}(T_j)$ | $T = \sum_{j=1}^m T_j$ | $T_w = \sum_{j=1}^m wT_j$ |
| ▪ Avance | $E_{max} = \max_{j=1,m}(E_j)$ | $E = \sum_{j=1}^m E_j$ | $C_w = \sum_{j=1}^m wC_j$ |
| ▪ Nombre de tâches en retard | | $U = \sum_{j=1}^m U_j$ | $U_w = \sum_{j=1}^m wU_j$ |
| ▪ Fin de traitement | $C_{max} = \max_{j=1,m}(C_j)$ | | |

III.2.6 Classification des problèmes d'ordonnement

Plusieurs notations ont été introduites dans la littérature pour spécifier un problème d'ordonnement. Un schéma de classification proposé par Graham et al. [114], puis repris par Blazewicz et al. [115], structure les données d'un problème d'ordonnement sur la base d'une notation à trois champs distincts : $\alpha|\beta|\gamma$.

Le champ (α) décrit l'environnement machine (les ressources), (β) précise les contraintes liées aux tâches, et le champ (γ) décrit le ou les critères à optimiser.

- Champ α permet de spécifier l'environnement machine : $\alpha = \alpha1 ; \alpha2$.
 - $\alpha1 = 0$ pour l'Open-shop, F pour le flow-shop et J pour le job-shop. Les machines (ressources) parallèles peuvent être identiques, uniformes ou indépendantes, le champ $\alpha1$ prend ainsi respectivement les notations P , Q et R .

Pour une machine (une ressource) le champ $\alpha_1 = \emptyset$ ou bien il est absent ;

– α_2 correspond au nombre de machines.

• Champ β décrit les caractéristiques des tâches : $\beta = \beta_1; \beta_2; \beta_3; \beta_4; \beta_5; \beta_6$.

– $\beta_1 = pmtn$ dans le cas d'un problème préemptif ;

– $\beta_2 = prec$ si des contraintes de précédence existent entre les tâches ;

– $\beta_3 = r_j$ si des dates de disponibilité sont associées aux tâches ;

– $\beta_4 = d_j$ si des échéances sont associées aux tâches ;

– $\beta_5 = (p_j = p)$ si les tâches ont des durées identiques, $(p_j = 1)$ si les tâches ont des durées unitaires ;

– $\beta_6 = no - wait$ pour les problèmes d'atelier sans attente.

• Champ γ décrit les critères d'optimisation d'un problème d'ordonnement :

– $\gamma = C_{max}$ ($= \max C_j$) si on cherche à minimiser la date d'achèvement maximale.

– $\gamma = \sum C_j$ si on veut minimiser le délai moyen (flow time).

– $\gamma = \sum wC_j$ si on veut minimiser le délai moyen pondéré (weighted flow time).

– $\gamma = L_{max}$ ($= \max(C_j - d_j)$) si on veut minimiser le retard algébrique maximal.

– $\gamma = \sum w_j T_j$ si on veut minimiser la somme des retards pondérés.

– $\gamma = \sum U_j$ si on veut minimiser le nombre des tâches en retard. La fonction U_j indique si la tâche j est en retard (la valeur de U_j est 1 si la tâche j est en retard ($C_j > d_j$) et égale à 0 sinon).

On remarque que tous ces critères sont basés sur l'inconnue C_j et des fenêtres d'exécution $[r_j, d_j]$ associées aux tâches.

III.2.7 Approches classiques de résolution des problèmes d'ordonnement

Plusieurs approches classiques sont proposées dans la littérature pour résoudre les problèmes d'ordonnement, selon leur classe de complexité [116].

Le choix de la méthode de résolution est conditionné par la taille des problèmes combinatoires. La résolution par une méthode exacte ait souvent un coût très élevé en temps de calcul ou en taille de mémoire ce qui justifie l'utilisation de méthodes approchées. Les méthodes de résolution des problèmes d'optimisation sont classées en deux grandes catégories : les méthodes exactes et les approches métaheuristiques.

III.2.7.1 Les méthodes exactes

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

III.2.7.1.1 Les méthodes optimales efficaces

Ces méthodes garantissent la détermination d'une solution optimale en un temps polynomial (fonction du nombre des tâches et des ressources). Ces méthodes n'existent cependant que pour des classes réduites de problèmes d'ordonnement [117]. Parmi les plus connues, nous cions 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 pour w_j croissant ;
- EDD (Earliest Due Date) pour le problème $1|d_j|L_{max}$. Dans cette règle, les tâches sont triées par leur d_j croissant.

III.2.7.1.2 Méthodes optimales énumératives

Parmi les méthodes de résolutions énumératives, on distingue 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 [118]. 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 les critères et les 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) [119]. L'inconvénient majeur réside dans le nombre important de variables et de contraintes nécessaires.
- *La programmation dynamique* : inventée par Bellmann [120], permet de déduire la solution optimale d'un problème à partir d'une solution optimale d'un sous problème.

III.2.7.2 Approches métaheuristiques

Pour résoudre les problèmes de complexité «*NP – difficile*» plusieurs chercheurs se sont orientés vers la proposition de métaheuristiques, qui fournissent des solutions de bonnes qualités en un temps de calcul raisonnable. On cite les métaheuristiques les plus connues.

III.2.7.2.1 Les algorithmes gloutons

Ce sont des méthodes constructives où l'on construit progressivement une solution locale pour un problème d'optimisation, avec l'espoir d'atteindre la solution globale optimale. Si l'algorithme fournit systématiquement une solution optimale, il constitue une méthode exacte, dans le cas contraire, il est appelé une heuristique gloutonne. En ordonnancement, les algorithmes gloutons sont des méthodes de construction par règles de priorité simples de type SPT, EDD, etc.

III.2.7.2.2 Les méthodes de recherche locale par voisinage

Ces méthodes partent d'une solution de départ unique, puis passent d'une solution à une autre voisine par déplacement successif, dans le but d'améliorer le critère. Parmi les méthodes de voisinage, on peut citer les méthodes de descente pour lesquelles une solution voisine doit obligatoirement améliorer le critère, i.e., s'arrête dès qu'il n'existe plus de meilleure solution dans le voisinage.

On note toutefois, qu'afin de pouvoir s'échapper des minima locaux, d'autres approches autorisent la dégradation provisoire du critère, dans le but de pouvoir obtenir un optimum global. C'est le cas de la méthode du recuit simulé introduite en 1983 par Kirkpatrick [121],

inspirée du recuit physique en métallurgie. Le principe est simple, à chaque itération, une solution voisine est choisie aléatoirement, puis acceptée avec une dégradation du critère sous certaines conditions.

Une autre méthode qui autorise la dégradation du critère est la méthode Tabou [122], [123], contrairement au recuit simulé qui génère aléatoirement une solution dans le voisinage de la solution courante, la méthode Tabou explore le voisinage de la solution courante pour choisir la meilleure solution. Pour éviter de cycler, i.e. revenir sur la solution déjà visitée, une liste taboue de solutions explorées est maintenue.

III.2.7.2.3 Les métaheuristiques à base de population

Ces méthodes sont connues aussi sous l'appellation d'algorithmes évolutionnistes, sont des méthodes de recherche qui travaillent sur une population de solutions plutôt que sur une solution unique. Parmi ces méthodes, on retrouve les algorithmes génétiques développés par Holland [124]. L'idée consiste à combiner une population d'individus entre elles pour former de nouveaux individus enfants ayant une empreinte génétique nouvelle héritée des parents.

Une fonction d'évaluation *fitness* mesure la force d'adaptation de chaque individu de la population. L'algorithme génétique s'appuie sur deux phases : la sélection (favorisant les individus ayant un meilleur *fitness*), et la recombinaison (opérateurs de croisement et mutation) qui génère une nouvelle population d'individus enfants en conservant les "bonnes" caractéristiques de leurs parents. Une autre méthode à base de population est l'algorithme de colonies de fourmis introduite initialement par Dorigo [125], cette métaheuristique reproduit le comportement auto-organisationnel des fourmis.

Après ce rappel sur quelques notions de bases relatives aux problèmes d'ordonnement, nous discutons dans la section suivante les spécificités de la fonction ordonnancement en maintenance.

III.3 Missions et spécificités de la fonction ordonnancement en maintenance

La première des spécificités liées à la maintenance est que l'ordonnement a une mission complexe, située entre la fonction méthode chargée de la définition des tâches à effectuer et des moyens à mettre en œuvre et la fonction réalisation chargée de leur exécution.

En maintenance les tâches sont affectées à des ressources humaines ayant des compétences différentes, nous évoquerons la façon dont celles-ci sont prises en compte et le besoin de cette prise en compte.

Nous étudierons la notion d'horizon et son impact sur la manière d'ordonner les tâches, nous aborderons ensuite l'évaluation d'un ordonnancement suivant un ou plusieurs critères. Ces critères spécifiques à l'activité de maintenance seront présentés dans la dernière partie de cette section.

III.3.1 Missions de l'ordonnancement en maintenance

L'ordonnancement représente la fonction « chef d'orchestre » dans un service maintenance, caractérisé par l'extrême variété des tâches en nature, en durée, en urgence et en criticité. Ayant la responsabilité de la conduite et de la synchronisation des actions de maintenance internes ou externalisées, la fonction ordonnancement a pour mission :

- De prévoir la chronologie du déroulement des différentes tâches ;
- D'optimiser les moyens nécessaires en fonction des délais et des chemins critiques ;
- D'ajuster les charges aux capacités connues ;
- De lancer les travaux au moment choisi ;
- De contrôler l'avancement et la fin des travaux ;
- De gérer les projets (prévision, optimisation logistique, avancement et respect des délais) ;
- D'analyser les écarts entre prévision et réalisation.

Cela peut s'exprimer sous la forme : prévoir un instant t et un endroit x où un personnel m muni d'un outillage o et des matières a exécutera la tâche j en harmonie avec les autres travaux connexes.

III.3.2 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 un premier temps, 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 compte des compétences de ces ressources.

III.3.2.1 La prise en compte des ressources humaines

Tchommo et al. [126] ont réalisé une synthèse bibliographique sur l'ordonnancement simultané de moyens de production et des ressources humaines. 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 par Kane et al [127]. Ce modèle permet de calculer dans un service donné le nombre d'employés nécessaires à la réalisation des activités primaires ainsi que celles de maintenance.

Cependant, la mutualisation des ressources dans le cadre de l'optimisation de leur utilisation entraîne souvent des problèmes de gestion [128]. Les ressources mutualisées peuvent être matérielles ou humaines. L'ajustement des capacités à la charge [129] nécessite alors d'optimiser l'utilisation des heures supplémentaires ainsi que le recours à l'intérim.

III.3.2.2 La prise en compte des compétences

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 [126], l'intégration de l'ordonnancement des tâches et des ressources humaines n'est pas un sujet très présent dans la littérature, en ordonnancement classique, le personnel est peu pris en compte. Les quelques articles proposent principalement deux courants d'idées :

- *Les ordonnancements séquentiels* : sont les ordonnancements réalisés en plusieurs étapes [130]. Par exemple dans la gestion des équipages des avions, les tâches prioritaires sont affectées aux personnels les plus qualifiés puis les tâches courantes sont 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. Ils prennent en compte l'ordonnancement des tâches de production et comme information sur les ressources humaines, la productivité relative des opérateurs [131].

Dans 79% des entreprises la gestion des opérateurs est utile ou indispensable en ordonnancement. 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 la réalisation de la tâche, il en ressort des besoins d'approfondissement au niveau du lien entre la compétence de la ressource humaine et la durée opératoire des tâches.

III.3.3 L'ordonnement et la planification selon l'horizon

Dans l'ordonnement des tâches on trouve des problèmes de dimensionnement, d'affectation et de choix du couple tâche/ressource. Les notions d'ordonnement et de planification sont souvent assimilées ou confondues, alors qu'il existe des différences bien réelles. Nous mettrons en avant, dans une première partie, les différences existantes entre l'ordonnement et la planification, puis nous les étayerons par une présentation des différents horizons.

III.3.3.1 Différences entre ordonnancement et planification

Tandis que la planification consiste à affecter des ressources à des intervalles de temps donné, l'ordonnement, quant à lui, consiste à affecter des tâches identifiées à des ressources déterminées, sur des périodes de temps réservées.

a- L'ordonnement

L'ordonnement comprend différents niveaux de réalisation en fonction de la taille de l'entreprise. Il comprend la réalisation de l'ordonnement théorique qui est le déroulement d'un cycle de travail (généralement une année), celui-ci est équitable mais pas forcément réalisable.

Il est nécessaire de réaliser l'ordonnement théorique ajusté qui tient compte des absences prévues, à partir de cet ordonnancement et en tenant compte des aléas et des imprévus, on réalise l'ordonnement prévisionnel.

b- La planification

La planification 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.

Elle peut prendre en compte les contrats, les préférences sur les horaires ou encore l'historique du planning pour assurer un équilibre de la charge [132]. Celle-ci comprend différentes phases :

- *La phase de conception* : qui 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.

- La phase d'ordonnancement : sur laquelle sont déterminés les plannings prévisionnels à court et moyen terme.
- La phase de réaction : qui consiste à vérifier l'adéquation entre le planning prévisionnel et la charge réelle. Cette phase est importante et nécessite de l'informatique distribuée pour la collecte et la gestion des données.

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

III.3.3.2 Précisions sur la notion d'horizon

Les procédures qui utilisent 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 [133], [134], [135]. On retrouve deux types d'horizon :

a- 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.

b- 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 et appliquées. Ces périodes sont généralement "gelées" ou "figées" afin de ne pas être remises en cause lors d'un ré-ordonnancement ultérieur.

III.3.4 Ordonnancement statique et dynamique

En fonction de l'horizon les méthodologies employées seront différentes. L'ordonnancement peut être réalisé de manière statique ou dynamique.

III.3.4.1 Ordonnancement statique

Un algorithme d'ordonnancement est dit statique lorsque l'ordonnancement est prévisible avant la mise en fonctionnement du système. Pour une approche statique, il faut connaître à priori l'ensemble des tâches et leurs caractéristiques, cette approche ne peut s'appliquer que pour des tâches connues pour une période ainsi que pour des tâches périodiques.

Cette approche est hautement prédictible mais pas flexible : un changement sur une des tâches ou une de ses caractéristiques entraîne la reconstruction complète de l'ordonnancement [136].

III.3.4.2 Ordonnancement dynamique

Un ordonnancement est dynamique s'il est créé au fur et à mesure de l'arrivée d'événements [137] Cela correspond à l'insertion des tâches de maintenance corrective ou prédictive (dont on ne connaît les caractéristiques qu'après l'apparition) dans un ordonnancement connu.

III.3.5 Un problème multicritère

Le problème d'ordonnancement en maintenance est par nature multicritère. Thierry Coudert [138] hiérarchise les différents objectifs du service maintenance en deux catégories d'objectifs : interne et externe. Les objectifs externes sont relatifs aux différents coûts de la maintenance, à l'optimisation de l'utilisation des ressources ainsi qu'aux règles de sécurités. Les objectifs internes font références aux performances des équipements maintenus ainsi qu'à leur fiabilité.

L'ensemble des critères retenus pour notre étude sont explicitées dans les points suivants :

- Minimiser le nombre de tâches traitées après leur *due-date*.
- Minimiser les durées des retards ;
- Assurer un meilleur équilibre de charge entre les ressources ;
- Minimiser les durées des plannings ;
- Les modifications apportées à l'ordonnancement doivent être limitées.

Le nombre des critères selon lesquels les solutions des problèmes d'ordonnancement sont évaluées rend ces problèmes différents. Ces problèmes peuvent être monocritère ou multicritère.

Après ce rappel sur quelques notions de bases relatives aux problèmes d'ordonnancement, les approches de résolution ainsi que les spécificités de l'ordonnancement en maintenance, nous abordons dans la section suivante le problème de modélisation des différentes composantes de l'ordonnancement des tâches de maintenance propre à notre problématique

III.4 Modélisation des différentes composantes de l'ordonnancement

III.4.1 Description du système de production structuré en multi-sites

Comme indiqué sur la Figure III.5 notre système distribué est composé de « S » cellules de production qu'on appelle « *sites* » interconnectés par des voies de communications. Chaque site de production est composé de plusieurs machines /équipements qui nécessitent un certain entretien (des opérations de maintenance). L'ensemble des opérations de maintenance est définis par un ensemble $J = \{Tache\ j/j = 1,2,\dots,n\}$.

Pour prendre en charge ces tâches un ensemble d'opérateurs (RH) définis par $RH = \{RH_i / i = 1, 2, \dots, m\}$. Les ressources se déplacent entre sites pour exécuter leurs planning-personnels. Les distances entre sites sont importantes.

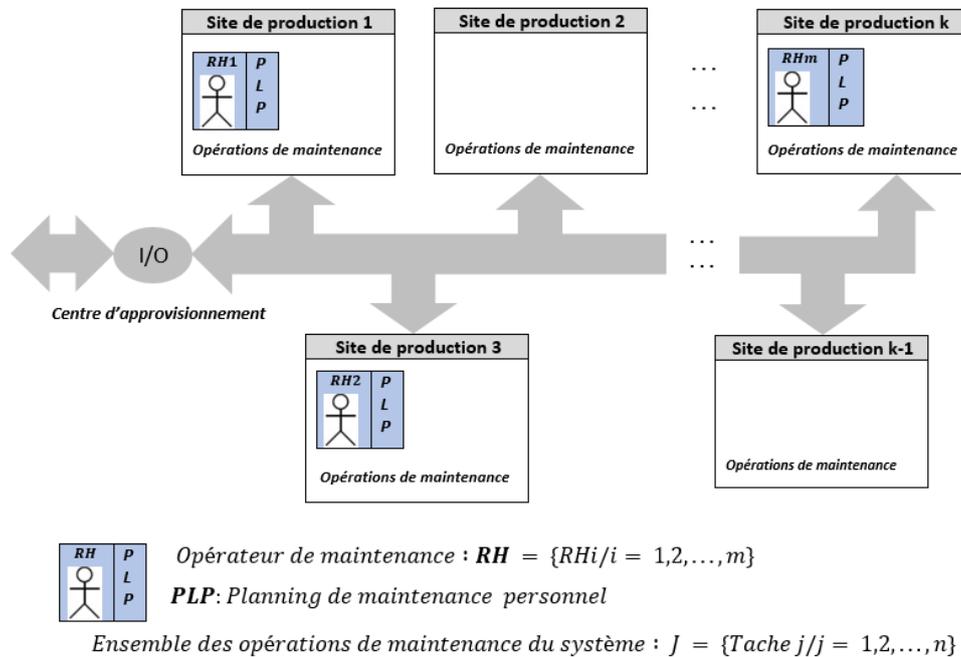


Figure III.5. Architecture multi-sites de l'unité de production

Afin de développer une gestion efficace des tâches de maintenance, il est nécessaire de connaître le temps de déplacement entre les sites, les ressources disponibles et leurs compétences ainsi que les caractéristiques des tâches. A cet effet, une méthodologie de modélisation du système de gestion est développée.

III.4.2 Modélisation mathématique

Dans cette partie, nous allons nous intéresser à la modélisation mathématique des différentes composantes d'un planning d'ordonnement de tâche de maintenance en contexte distribué.

III.4.2.1 Sites de production

Les sites sont des cellules de production indépendantes, entre lesquels les opérateurs de maintenance se déplacent. Le temps de déplacement (*moving – time*) entre deux sites «*k*» et «*l*» est noté $mt_{k,l}$, ce temps va s'ajouter au temps nécessaire à l'exécution de la tâche «*j*» qu'on va expliciter par la suite. Les durées de déplacement entre les sites sont modélisées par une matrice carrée symétrique à diagonale nulle comme indiqué par la Figure III.6 :

$$\begin{array}{c}
 \text{site}_1 \\
 \text{site}_2 \\
 \vdots \\
 \text{site}_k
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \text{site}_1 \quad \text{site}_2 \quad \dots \quad \text{site}_k \\
 \left[\begin{array}{cccc}
 0 & mt_{12} & \dots & mt_{1k} \\
 mt_{21} & 0 & \ddots & \vdots \\
 \vdots & \ddots & \ddots & mt_{(k-1)k} \\
 mt_{k1} & mt_{k2} & \dots & 0
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

Figure III.6. Matrice des durées de déplacement entre les sites

Avec : $mt_{k,l} = mt_{l,k} \quad \forall l, \forall k$

Chaque site dispose d'un identifiant et une liste de tâches de maintenance propre à effectuer.

III.4.2.2 Ressources humaines

Le système dispose d'une équipe de maintenance, constitué de ressources humaines ($Rh_i, i = 1 \dots m$), supposés toujours disponibles et qui sont dotés d'un profil de compétence et de qualification qui diffère pour chaque tâche. La multiplicité des compétences par rapport aux tâches montre que notre problème est similaire à un problème d'ordonnement à ressources parallèles indépendantes dont la complexité est définie comme étant un problème *NP-difficile*.

Le profil des compétences est modélisé en une matrice où les lignes représentent les compétences évaluées requises « $skill_{i,j}$ » (le taux de compétence de la ressource i pour effectuer la tâche j). La matrice des compétences est illustrée par la Figure III.7.

$$\begin{array}{c}
 Rh_1 \\
 \vdots \\
 Rh_m
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \text{Task}_1 \quad \dots \quad \text{Task}_n \\
 \left[\begin{array}{ccc}
 Skill_{1,1} & \dots & Skill_{1,n} \\
 \vdots & \ddots & \vdots \\
 Skill_{m,1} & \dots & Skill_{m,n}
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

Figure III.7. Matrice des compétences

La durée réelle nécessaire pour l'exécution de la tâche « j » qui se trouve au site « l » par la ressource « i » qui se trouvait auparavant au site « k » est « $p_{i,j,k,l}$ » où :

$$p_{i,j,k,l} = p_j \times Skill_{i,j} + mt_{k,l} \quad \forall i \in \{1, \dots, m\}$$

Cependant, pour un opérateur i se trouvant dans le site l et exécutant la première tâche j , la durée de cette tâche est :

$$p_{i,j,0,l} = p_j \times Skill_{i,j}$$

III.4.2.3 Tâche de maintenance

Un ensemble de notations est développé pour définir une tâche, dont une partie est l'ensemble des caractéristiques de la tâche représentée par des constantes et une autre partie représentée par des variables qui dépendent de la tâche et de paramètres externes.

(i) Les constantes

Pour chaque tâche « j » on utilise les notations suivantes :

- p_j : « *processing time* » elle représente la durée de base de la tâche « j ».
- r_j : « *release date* » représente la date de disponibilité de la tâche « j ». Elle dépend des données relatives à l'équipement sur lequel elle sera effectuée.
- d_j : « *due date* » la date d'achèvement souhaitée de la tâche « j ».
- $Skill_{i,j}$: compétence requise pour la tâche « j ».
- w_j : pondération de la tâche « j ».
- $site_j$: Le site de production sur lequel se trouve la machine concernée par la tâche « j ».

Ces paramètres sont propres à la tâche et sont définies par le cahier de charge

(ii) Les variables

Les variables sont les paramètres, qui dépendent non seulement de la tâche elle-même mais aussi des paramètres externes. Pour chaque tâche « j » on définit les variables suivantes :

- t_j : date de début de traitement de la tâche « j ».
- $x_{i,j}$: une variable booléenne qui indique l'affectation de la tâche. $x_{i,j} = 1$ si la tâche « j » est affectée à la ressource « i », $x_{i,j} = 0$ sinon.
- $a_{i,j}(t)$: une variable booléenne qui indique la consommation de la ressource « i » par la tâche « j » à l'instant « t ». $a_{i,j}(t) = 1$ si la tâche « j » est traitée par la ressource « i » $a_{i,j}(t) = 0$ sinon.
- $p_{i,j,k,l}$: La durée totale de l'exécution de la tâche « j » qui se trouve au site « l » par la ressource « i » qui se trouvait au paravent au site « k ».
- C_j : la date de complétion du traitement de la tâche « j ». Elle est exprimée ainsi :
$$C_j = t_j + p_{i,j,k,l}$$
- T_j : la variable qui exprime le retard effectué sur la tâche « j » par rapport au *due date*.

Elle est formulée ainsi : $T_j = \max(0, C_j - d_j)$.

- U_j : une variable booléenne pour indiquer si un retard est commis par rapport au *due date* de la tâche « j ». $U_j = 0$ si $T_j = 0$, $U_j = 1$ sinon.
- ID_j : l'identifiant de la ressource humaine qui est supposé effectuer la tâche « j ».
- mod_j : une variable booléenne pour indiquer si une modification est commise par rapport au planning initial. $mod_j = 0$ si ID_j est le même, $mod_j = 1$ sinon.
- $Ordre_j$: une variable entière qui indique l'ordre de la tâche j dans le planning.

III.4.2.4 Fonction « Objectifs » et critères d'optimisation

Les critères d'évaluation d'un ordonnancement sont multiples et implicitement liés. On va traiter deux approches pour évaluer l'ordonnancement : l'approche monocritère et l'approche multicritère. Pour le cas monocritère on choisit le critère qui a le plus d'impact sur les autres critères et on essaie de l'améliorer, dans le cas multicritère, on choisit un certain nombre de critères à améliorer simultanément.

(i) Fonction « objectif » pour l'approche monocritère

Le premier critère qui peut pénaliser l'entreprise est bien le retard sur la remise des projets. Ce dernier représente un cumul de retard sur une ou plusieurs tâches, noté (T_j). Cependant, en raison des pénalités prévues en cas de retard, il sera plus urgent de remettre en état de fonctionnement l'équipement dont le coefficient de pénalité « w_j » est le plus important. L'objectif serait de minimiser la somme des retards pondérés T_w .

Avec $(T_w)_{min} = \min \sum_{j=1}^n w_j T_j$.

(ii) Fonctions « objectifs » pour l'approche multicritère

Il est plus judicieux de chercher non pas des solutions optimisant un critère unique mais plutôt un algorithme d'ordonnancement plus général pour optimiser un ou plusieurs critères.

Les critères choisis pour évaluer l'ordonnancement de notre application sont :

- Minimiser la somme des retards pondérée : $(T_w)_{min} = \min \sum_{j=1}^n w_j T_j$
- Minimiser la date de complétion du projet : $(C_{max})_{min}$
- Minimiser le nombre de tâches en retard : $U_{min} = \min \sum_{j=1}^n U_j$
- Minimiser les modifications de l'ordonnancement initial à travers les changements

d'affectation des tâches : $mod_{min} = \min \sum_{j=1}^n mod_j$

- Equilibrer et réduire la charge d'un ordonnancement « S » en minimisant l'écart type de la charge entre les ressources : $\sigma_{min} = \min \sigma(S)$

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

et PL_i La charge potentielle affectée à la ressource humaine « i ». Elle correspond à la somme des durées des tâches affectée à « i » : $PL_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} * p_{i,j,k,l}$

\overline{PL} La charge moyenne : $\overline{PL} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m p_{i,j,k,l}$

Il est important d'équilibrer la charge entre les différents agents de maintenance, non seulement pour exploiter au maximum toutes les ressources simultanément mais aussi pour traiter toutes les ressources de manière équitable.

III.4.2.5 Les contraintes

Les contraintes expriment des restrictions sur les valeurs que peuvent prendre simultanément les variables de décision, On distingue :

- *Deux contraintes sur les ressources :*
 - une tâche doit être affectée à une seule ressource : $\sum_{j=1}^n x_{i,j} = 1, \forall i \in \{1, \dots, m\}$
 - une ressource ne peut traiter plus qu'une tâche à la fois $\forall t, \forall i, \sum_{j=1}^n a_{i,j}(t) \leq 1$
- *Une contrainte temporelle sur les tâches :*
 - une tâche ne peut être traitée avant que cette dernière ne soit disponible $\forall j, t_j \geq r_j$.

Une fois les différentes composantes de l'ordonnement modélisées, la section suivante est consacrée au développement d'algorithmes d'optimisation avec une heuristique de recherche locale par voisinage.

III.5 Algorithmes d'insertion statique et dynamique des nouvelles tâches

Parmi les perturbations que peut subir un ordonnancement courant, l'arrivée d'une nouvelle tâche est la plus contraignante (Figure III.8).

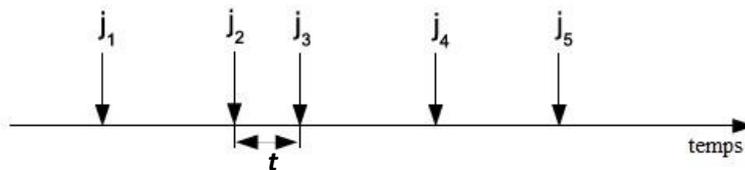


Figure III.8. Arrivée stochastique des tâches dans le temps

On suppose que l'intervalle de temps t entre l'arrivée de deux tâches est suffisamment grand pour appliquer une approche d'affectation et d'ordonnancement dynamique.

Des algorithmes d'insertion et d'optimisation statique et dynamique pour des problèmes monocritère de type $(R/r_j, d_j/T_w)$ et multicritère sous contrainte de compétences en contexte multi-sites. Pour résoudre ce problème on applique une méthode d'optimisation de recherche locale par voisinage [11].

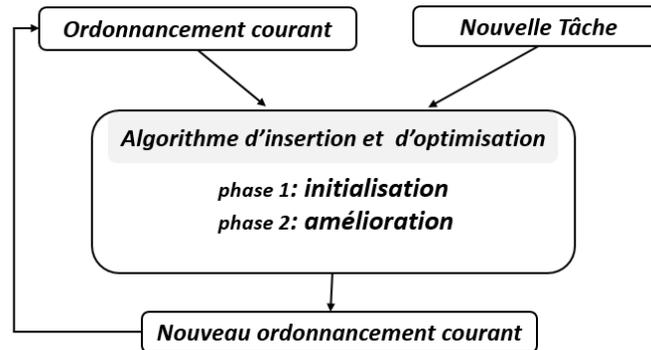


Figure III.9. Principe d'insertion de nouvelles tâches

L'algorithme d'insertion est formé de deux phases (Figure III.9) : la phase de détermination de la solution initiale et la phase d'amélioration de la solution initiale. Pour l'insertion statique la solution initiale est déterminée par l'application de l'algorithme LPT-ECT-EDD (voir Annexe A), pour la phase d'amélioration on applique une méthode de descente par voisinage en effectuant des sauts (méthode de Kangourou) pour éviter tout enfermement dans un optimum local. La méthode de Descente-Kangourou est développée dans les sections suivantes.

III.5.1 Heuristique d'insertion dynamique d'un problème monocritère

Une fois que la liste des tâches de l'ordonnancement courant S est établi, une heuristique d'insertion dynamique de nouvelles tâches est appliquée avec la contrainte d'optimisation qui consiste à minimiser la somme des retards pondérés : $\min T_w$.

L'algorithme utilise les notations suivantes :

- \underline{S} : solution courante,
- $\underline{S0}$: solution sur laquelle la recherche d'amélioration est faite,
- $\underline{Initialisation}(S)$: 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. La phase d'initialisation monocritère est exprimée par l'algorithme de la Figure III.10.

- Voisin(S) : fait une permutation de deux tâches voisines (l'une se trouvant en amont de l'autre) dans le planning personnel d'une ressource humaine,
- Saut(S) : Cette méthode fonctionne de deux manières différentes :
 - elle effectue la permutation de deux tâches qui ne sont pas immédiatement voisines (séparées par au moins une autre tâche) dans le même planning personnel.
 - Ou bien elle effectue des permutations aléatoires de deux tâches se trouvant chacune dans un planning personnel différent.

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.

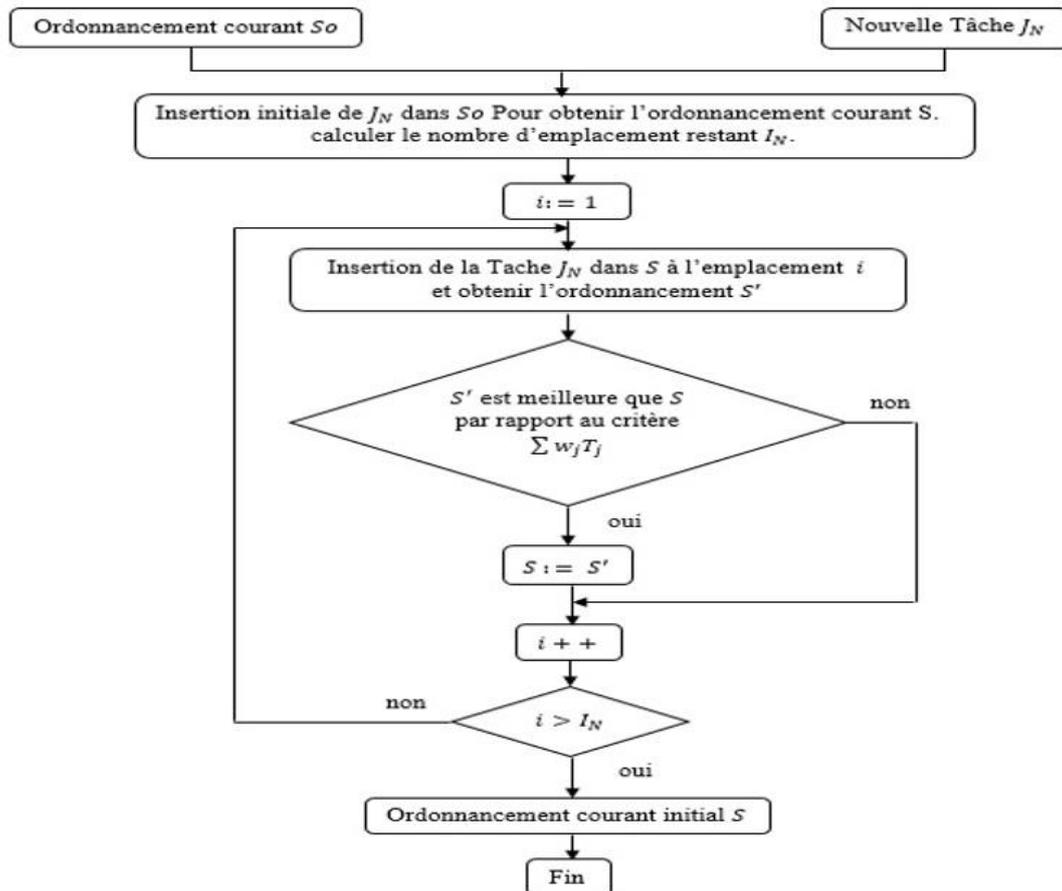


Figure III.10. Algorithme d'initialisation monocritère

La méthode de recherche d'une solution de meilleure qualité, par rapport à notre critère, est décrite par l'algorithme de la figure III.11. Un nombre de recherche maximum doit être défini pour limiter la recherche de solution dans le temps. L'algorithme est principalement composé

de deux itérations : la première correspond à une recherche de solutions plus performante dans un voisinage local. La deuxième correspond à une recherche de 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
```

Figure III.11. Algorithme de descente monocritère [11]

III.5.2 Heuristique d'insertion dynamique du problème multicritère

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 section, nous allons présenter la procédure à appliquer pour choisir la politique d'optimisation multicritère, par la suite l'heuristique d'insertion dynamique multicritère est développée.

III.5.2.1 choix de la politique d'optimisation multicritère

Si l'on se réfère à la procédure proposée par Hammami [139] et qui est détaillée dans la Figure III.12, nous pouvons essayer de déterminer le type de politique d'optimisation qui convient à la résolution de notre problème.

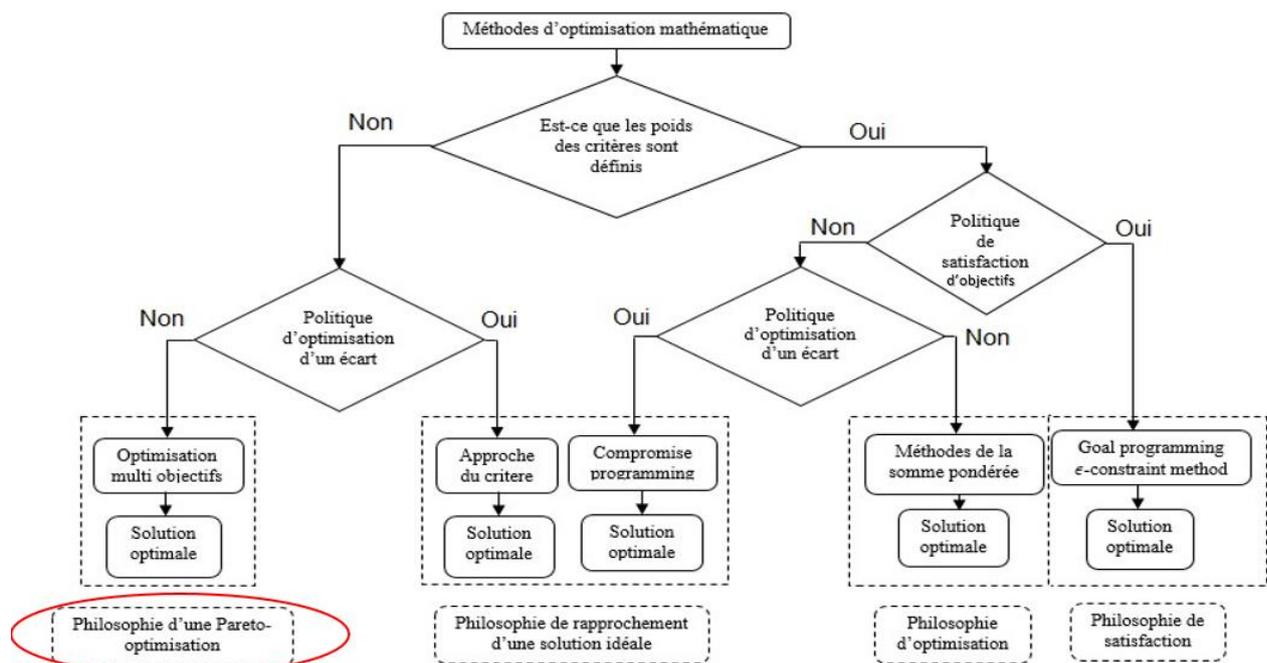


Figure III.12. Procédure de choix d'une politique d'optimisation multicritère

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.

Définition : (Pareto optimal) : « Soit $x = [x_1, \dots, x_n]$ un vecteur de décision avec $x_i \in X_i$ (L'espace réalisable) x est dit Pareto optimal, s'il n'existe pas une solution y domine x . Une solution Pareto optimal appelée aussi : solution efficace, non inférieure ou solution non dominée.

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.

Nous utiliserons donc la relation de non dominance entre deux solutions X_1 et X_2 , 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. $\exists j \in [1, N \text{ objectifs}] \Rightarrow f_j(X1) < f_j(X2)$, ça implique que $X1$ n'est pas dominée par $X2$ et est noté $X1 \not< X2$.

III.5.2.2 Heuristique de résolution multicritère

Contrairement à la version monocritère 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. Étant donné que le principe de fonctionnement de cette heuristique présente de nombreuses similitudes avec l'heuristique monocritère, 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. Figure III.13

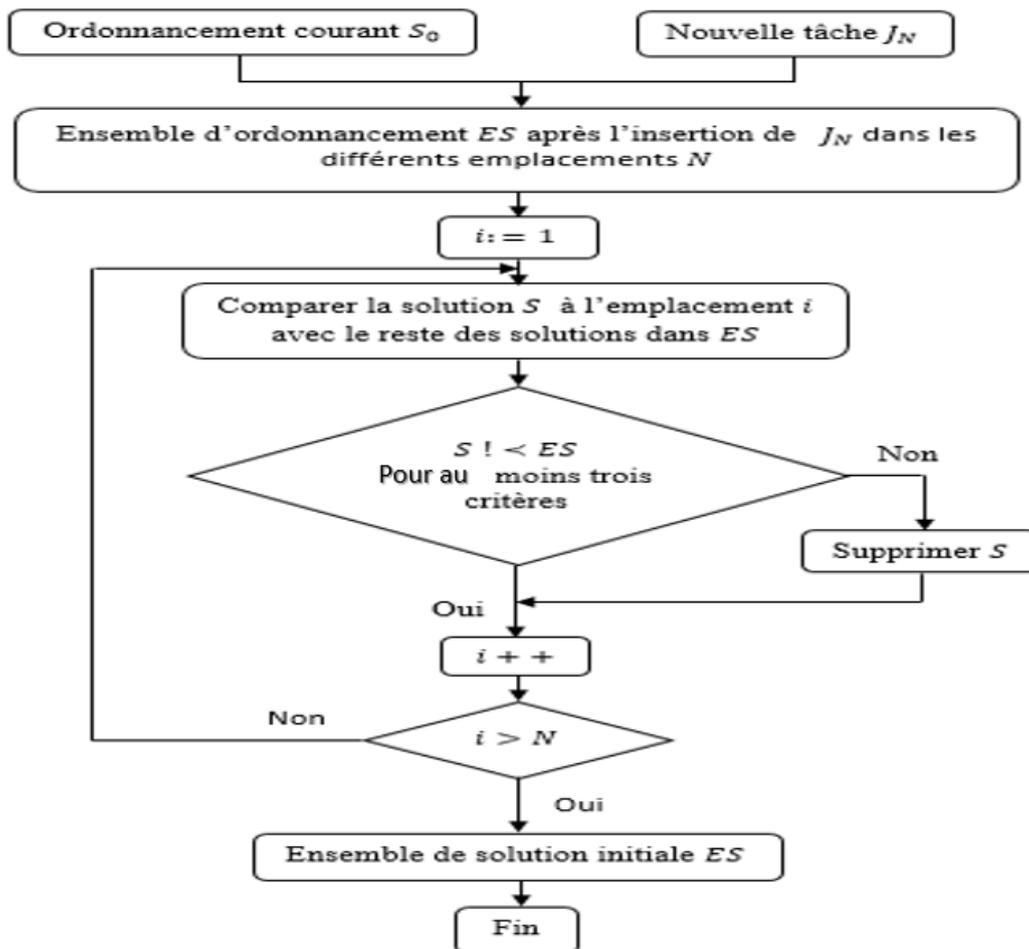


Figure III.13. Algorithme d'initialisation multicritère

Ces solutions d'ordonnements sont ensuite comparées et seules l'ensemble des solutions (*ES*) non dominées qui minimise au moins trois des critères cités au paragraphe (III.4.2.4) sont conservés. L'algorithme de la Figure III.3 montre le déroulement de la phase d'initialisation.

Choix_aleatoire(*ES*) : choisi aléatoirement une solution de (*ES*). C'est cette solution qui sera optimisée 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.

```

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_dominées(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_dominées(ES);
Fin Si
Fait
Fait
    
```

Figure III.14. Algorithme d'optimisation multicritère [11]

L'heuristique d'optimisation développée est décrite par l'algorithme présenté par la Figure III.14. Celui-ci est principalement composé de deux blocs : le premier correspond à une recherche d'un ensemble de solutions dominantes dans un voisinage local.

Le 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. Seules les solutions non dominées sont conservées.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques notions de base sur les problèmes d'ordonnement ainsi que les approches classiques de résolution relatives à ces problèmes.

Nous avons également parlé de la mission et les spécificités de la fonction ordonnancement en maintenance. Une modélisation d'un ordonnancement de tâches de maintenance sous contrainte de compétence, dans le contexte multi-sites est développée. Dans ce contexte deux heuristiques d'optimisation par voisinage, monocritère et multicritère ont été développées.

Afin de montrer l'efficacité de notre système de gestion, développé pour l'insertion de nouvelles tâches de maintenance prédictive, en appliquant les heuristiques étudiés dans ce chapitre, une modélisation ainsi qu'une simulation d'une plateforme de gestion avec l'approche orienté objet est réalisée dans le prochain chapitre.

CHAPITRE IV

Développement d'une plateforme de simulation en langage UML pour la gestion des tâches de maintenance dans un contexte distribué

IV.1 Introduction

Les modélisations UML en maintenance offrent une vision globale des situations considérées, proche des attentes de représentation des situations de décisions collaboratives en maintenance, selon des approches distribuées ou à distance.

Initialement conçus pour réaliser des abstractions du monde réel, les langages objet permettent la modélisation statique et dynamique des constituants d'un système et de son environnement, à partir de modèles stables et réutilisables, avec une appropriation aisée des caractéristiques du système. Le langage de modélisation UML (Unified Modeling Language) est un des principaux langages objet ([140], [141]), pouvant être associé à des langages de programmation comme Java, C++, ...

La littérature concernant les développements UML appliqués en maintenance est assez dense. Les travaux utilisant UML appartiennent à différents courants de recherche. Parmi les travaux qui nous ont paru intéressants, certains pour spécifier des situations décisionnelles ou collaboratives, d'autres pour développer des outils collaboratifs ou d'aide à la décision.

Considérons d'abord des travaux ayant conduit à un développement logiciel, à partir de modélisation objet, Gomes et Rodriguez ont utilisé UML pour spécifier une architecture collaborative et l'ont développé [142], [143]. Dans ses travaux, Le Bars s'appuie sur UML pour spécifier et programmer un système multi-agents permettant d'aider les décisions d'un collectif [144]. D'autres travaux n'ont utilisé UML que pour spécifier une problématique, modéliser ou mieux comprendre un mécanisme, un problème, etc.

Ainsi, Lardeur et Longueville se sont appuyés sur UML pour modéliser les mécanismes de décision et le processus décisionnel, afin d'avoir une vision claire et formalisée des enjeux en présence [145], [146]. Nous retrouvons dans ces travaux nos préoccupations de modélisation.

Nous avons fait le choix d'utiliser le langage de modélisation UML afin de formaliser le problème étudié et de spécifier ses composants clés. En effet, notre système présente un aspect statique, qui représente les relations entre les différents acteurs et objet du système (opérateur, ressources humaines, sites de production, GMAO...) et un aspect dynamique qui décrit l'interaction entre les différents objets sous forme d'objectifs à atteindre d'un côté et sous forme chronologique de scénario d'interaction typique de l'autre (insertion de nouvelle tâche de maintenance).

Nous allons mettre à profit les capacités de représentation graphique et de structuration d'UML afin de développer un modèle pour notre application. Une simulation du modèle pour différentes approches d'insertion statique et dynamique est développée. En fin de ce chapitre une analyse des contributions développées par rapport au contexte mono-site est présentée.

IV.2 Outils UML utilisés pour la modélisation du système

UML est un langage de modélisation utilisant une représentation graphique basée sur les diagrammes. L'usage d'une représentation graphique est un atout car les diagrammes effacent les ambiguïtés dans les modèles. UML 2.0 permet de représenter et de communiquer les divers aspects d'un système d'information par le biais de diagrammes et commentaires. Pour une modélisation, les diagrammes UML ne sont pas nécessairement tous produits [147]. Un aperçu théorique est développé sur les diagrammes qui intéressent l'application de cette thèse à savoir le diagramme de classe et le diagramme de séquence.

IV.2.1 Diagramme de classe

Les diagrammes de classes sont l'un des types de diagrammes UML les plus utiles, ils décrivent clairement la structure d'un système particulier en modélisant ses classes, ses attributs, ses opérations et les relations entre ses objets. Une classe est une description d'une famille d'objets ayant la même structure et le même comportement.

Un objet est une instantiation (occurrence) d'une classe (voir Figure IV.1). Une classe est composée de :

- *Attributs* : données dont les valeurs représentent l'état de l'objet
- *Méthodes* : opérations applicables aux objets

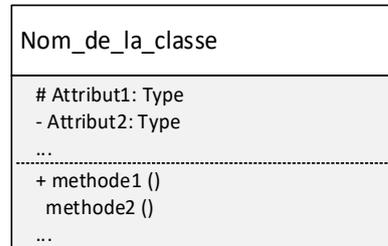


Figure IV.1. Structure d'une classe en UML

IV.2.1.1 La visibilité des membres d'une classe

La Visibilité des attributs définit les droits d'accès aux données (pour la classe elle-même, d'une classe héritière, ou bien d'une classe quelconque) :

- *Publique (+)* : les classes peuvent accéder aux données et méthodes d'une classe définie avec le niveau de visibilité public ;
- *Protégée (#)* : l'accès aux données est réservé aux fonctions des classes héritières ;
- *Privée (-)* : l'accès aux données est limité aux méthodes de la classe elle-même.

IV.2.1.2 Types de relation entre classes

Le terme « interactions » désigne les relations et liens divers qui peuvent exister dans les diagrammes de classes et d'objets. Voici quelques-unes des interactions les plus courantes :

IV.2.1.2.1 Héritage

L'héritage permet de créer une nouvelle classe à partir d'une classe existante (Figure IV.2).

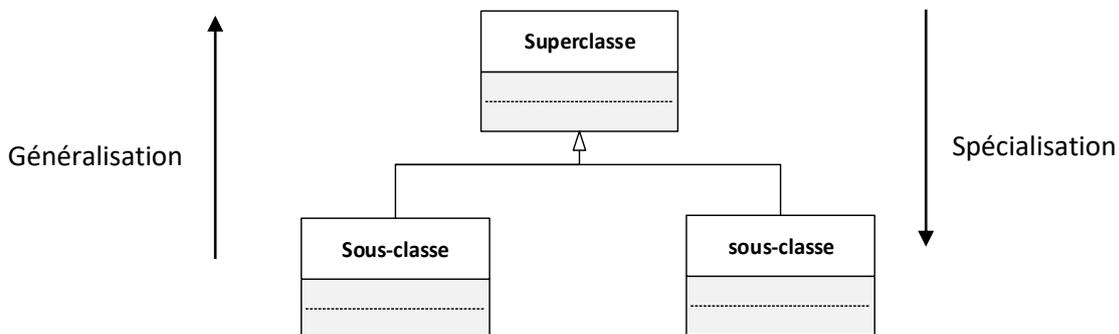


Figure IV.2. Structure de l'héritage en UML

La classe dérivée utilise les attributs et les méthodes de sa superclasse, Les classes sont ordonnées selon une hiérarchie. La généralisation consiste à factoriser les éléments communs (attributs, opération et contraintes) d'un ensemble de classes dans une classe plus général appelée superclasse. La spécialisation est un point de vue descendant qui porte sur une classification, elle permet d'étendre les propriétés d'une classe, sous forme de sous-classe.

IV.2.1.2.2 Association

C'est une connexion sémantique entre deux classes, par défaut, les associations sont navigables dans les deux directions. Dans certain cas, seule une direction de navigation est utile (voir Figure IV.3) ; L'absence de flèche signifie que l'association est navigable dans les deux sens.



Figure IV.3. Structure de l'association navigable dans une direction en UML

Les multiplicités permettent de contraindre le nombre d'objets intervenant dans les instantiations des associations. On en place de chaque côté des associations :

- 1 : la classe est en relation avec un et un seul objet de l'autre classe.
- 1..* : la classe est en relation avec au moins un objet de l'autre classe.
- 0..* : la classe est en relation avec 0 ou plusieurs objets de l'autre classe.
- 0..1 : la classe est en relation avec au plus un objet de l'autre classe.
- M..N : la classe est en relation de M a N objet de l'autre classe.

IV.2.1.2.3 Contenance

C'est un cas particulier d'association exprimant une relation de contenance, on définit deux types de relation de contenance en UML :

- L'agrégation : C'est une forme d'association qui exprime un couplage plus fort entre classes. Elle est utilisée pour représenter les relations du type maître-esclave, tout-parties ou composé-composant.

Sur la Figure IV.4 la Classe_A « contient » les instances de la Classe_B, en effet La suppression de la Classe_A n'implique pas la suppression de la Classe_B, L'élément agrégé peut être partagé.

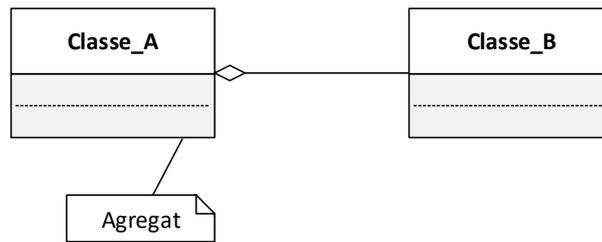


Figure IV.4. Structure de l'agrégation en UML

- La composition (Agrégation forte) : Ce couplage de composition (voir Figure IV.5) indique que les composants ne sont pas partageables et que la destruction de l'agrégat entraîne la destruction des composants agrégés.

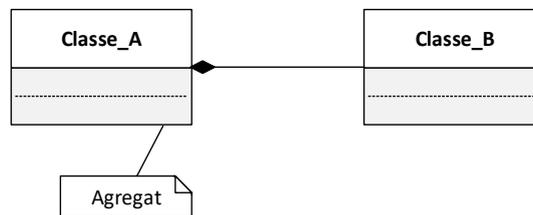


Figure IV.5. Structure de la composition en UML

IV.2.2 Diagramme de séquence

Le diagramme de séquence montre la chronologie des événements et des messages passés entre éléments (lignes de vie) au sein d'une interaction. La progression temporelle est verticale et les éléments sont représentés horizontalement (voir Figure IV.6).

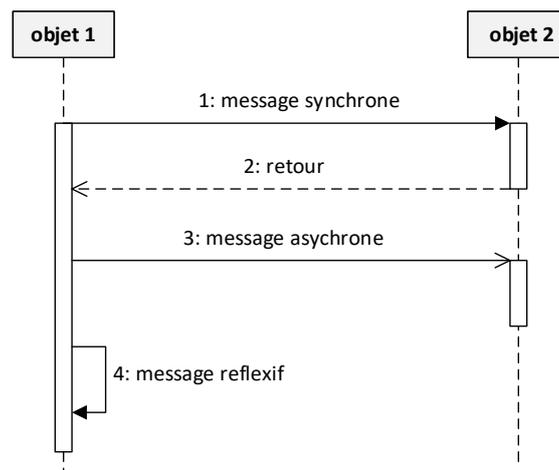


Figure IV.6. Lignes de vie d'un diagramme de séquence en UML

Les éléments sont les objets qui sont en mesure de délivrer des messages. Un utilisateur peut donc figurer dans le diagramme de séquence. Un diagramme simple peut se limiter aux lignes

de vie et aux messages, mais souvent il faudra faire appel aux fragments combinés qui permettent d'affiner la représentation.

- *Lignes de vie* : La progression chronologique se fait du haut vers le bas. Lorsque l'entité s'active, le trait en pointillé est remplacé par un trait large. Lorsqu'un système n'est plus en fonction toutes les entités sont désactivées.
- *Messages* : Ce sont des éléments de communication unidirectionnels entre les lignes de vie qui déclenchent une activité dans le destinataire. La réception d'un message provoque un événement chez le récepteur. La flèche pointillée représente un retour. Cela signifie que le message en question est le résultat direct du message précédent. Un message synchrone (émetteur bloqué en attente de réponse) est représenté par une flèche pleine, alors qu'un message asynchrone est représenté par une flèche évidée. La flèche qui boucle (message réflexif) permet de représenter un comportement interne.

Après cet aperçu théorique nous procédons à la modélisation du système.

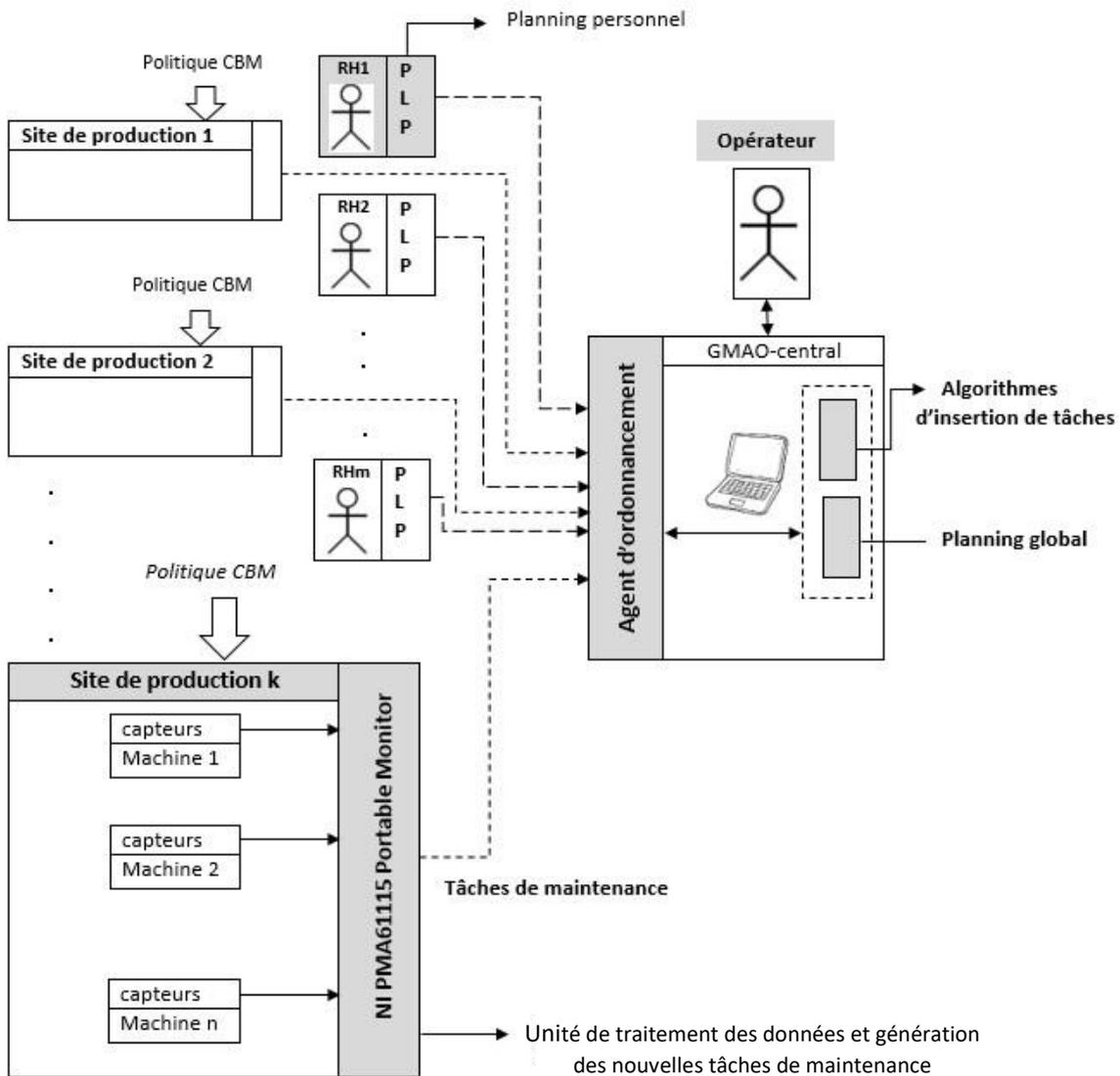
IV.3 Modélisation du système avec le langage UML

Les développements réalisés avec le langage UML sont décomposés en plusieurs étapes. Nous proposons d'abord une identification des composants avec la définition des classes du système. Nous intégrons ensuite ces classes dans différents diagrammes pour traduire l'organisation, les relations entre les composants du système et le déroulement des scénarios dynamiques pour la gestion des tâches.

IV.3.1 Conception orientée objet du système de maintenance

L'unité de production mis à l'étude se compose de plusieurs *Sites*, sur ces derniers, les opérateurs de maintenance (*Ressources Humaines*) réalisent des *Tâches* de maintenance sous contrainte de compétence. On se met dans l'hypothèse qu'on dispose déjà d'un ordonnancement courant (*Planning global*). Ce dernier est constitué des *Plannings Personnels* des ressources humaines. Notre problème serait de gérer l'apparition d'une *Nouvelle tâche* de maintenance conditionnelle qui doit être insérée dans le *Planning Global* courant.

La gestion des plannings se fait au moyen d'un *Agent d'ordonnancement* qui applique un *algorithme* d'optimisation monocritère ou bien *multicritère* pour réaliser l'insertion de nouvelles tâches.



IV.7. Conception orientée objet du système

Le schéma du système représenté par la Figure IV.7, répond bien aux normes de la conception orienté objet (COO), on trouve des interactions entre plusieurs objets : Les tâches, Les sites, Les ressources humaines, Les plannings personnels (ou partiels), Le planning global, L'algorithme d'insertion de nouvelles tâches et l'agent d'ordonnancement. A partir de ces interactions on développe l'aspect statique du système représenté par le diagramme de classe et l'aspect dynamique représenté par le diagramme de séquence.

VI.3.1.1 Modélisation statique du système

On commence par définir les classes du système de gestion de maintenance, ensuite nous utilisons ces classes et leurs instances pour construire un modèle qui traduit le comportement statique du système.

IV.3.1.1.1 Identification des classes

Nous allons décrire une à une les différentes classes du système avec leurs attributs et opérations.

- La classe « **MatriceCompétence** »

Cette classe définit la matrice des compétences des ressources humaines. On utilise une seule variable statique parce qu'il y a une matrice unique des compétences. On préfère cette conception pour faciliter l'accès à la matrice par les deux classes *Site* et *RessourceHumaine*. La Figure IV.8 illustre la classe *MatriceCompétence*.



Figure IV.8. La classe *MatriceCompétence*

- La classe « **MatriceDéplacement** »

Cette classe contient la matrice des temps de déplacement (*mt*) entre les différents sites. On utilise une seule variable statique parce qu'il y a une matrice unique des temps de déplacement. On a préféré cette conception pour faciliter l'accès à la matrice par les deux classes *Site* et *Tâche*. La Figure IV.9 illustre la classe *MatriceDéplacement*

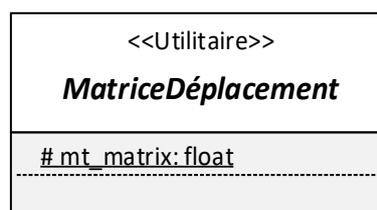


Figure IV.9. La classe *MatriceDéplacement*

- La classe « **Site** »

Dans cette classe nous avons regroupé les informations propres aux sites ainsi que les méthodes qui permettent de manipuler ces informations. Cette classe est illustrée dans la Figure IV.10.

Dans chaque site nous devons trouver les attributs suivants :

- *adresse_du_site* : un numéro pour différencier les sites entre eux.
- *mt* : C'est un vecteur ligne qui contient le temps de déplacement entre le site dont il est

question et les différents sites qu'il y a dans l'unité de production.

- tâches_dans_site :C'est un vecteur qui contient les tâches qui doivent être exécutés dans le site dont il est question.

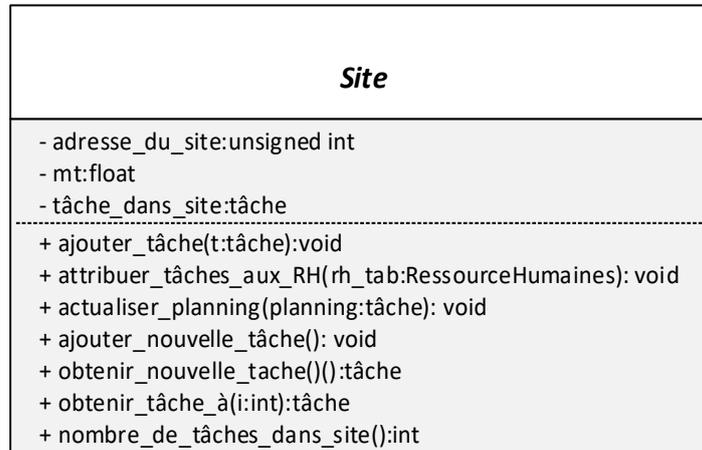


Figure IV.10. La classe *Site*

Pour faire le traitement des données du site nous avons besoin des opérations suivantes :

- attribuer_tâches_aux_RH() :cette méthode permet de distribuer aux ressources humaines les tâches qui se trouvent sur le site selon l'ordre établie dans l'ordonnancement courant.
- actualiser_planning() :Cette méthode permet d'actualiser les information relatives aux tâches qui doivent être exécutées sur le site.
- ajouter_nouvelle_tâche() :Cette méthode permet à l'opérateur de faire entrer les informations relatives à la nouvelle tâche à insérer dans l'ordonnancement courant.
- obtenir_nouvelle_tâche() :Cette méthode permet à la classe AgentOrdonnancement d'obtenir la nouvelle tâche qui doit être insérer dans le planning.
- obtenir_tâche_à() :Cette méthode retourne la tâche qui se trouve à l'emplacement donné comme argument.
- nombre_de_tâche_dans_site() :Cette méthode retourne le nombre de tâche qu'il y a sur le site.

- La classe « **RessourceHumaines** »

Cette classe regroupe toutes les informations relatives aux ressources humaines. Elle est illustrée par la Figure IV.11. Chaque ressource humaine dispose des attributs suivants :

- ID : un identifiant qui lui servira de nom.
- Profile-de-compétence : c'est un vecteur ligne qui contient le taux de compétence de la ressource humaine pour chaque tâche.

- `PlanningPersonnel` : contient les tâches que la ressource humaine est supposée effectuer.

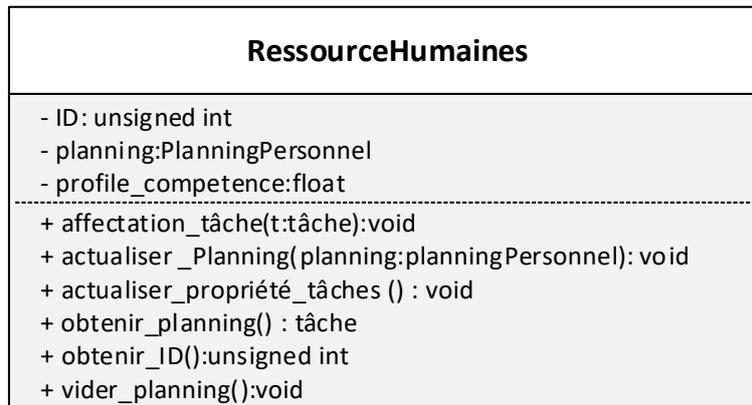


Figure IV.11. La classe *RessourceHumaines*

Les opérations de cette classe sont :

- `affectation_tâche()` : Cette méthode prend comme argument une tâche et elle la range dans le planning de la ressource correspondante. Elle est utilisée pour l'affectation initiale des plannings de l'ordonnancement courant.
- `actualiser_planning()` : Cette méthode permet de faire la mise-à-jour des planning après insertion de la nouvelle tâche.
- `actualiser_propriétés_tâches()` : Cette méthode permet de faire la mise-à-jour des propriétés des tâches selon l'ordre dans lequel elles sont mises dans le planning.
- `obtenir_planning()` : Cette méthode retourne le planning personnel de la ressource humaine. Elle est utilisée pour former le planning global.
- `obtenir_ID()` : Cette méthode donne l'identifiant de la ressource humaine.
- `afficher_planning()` : Cette méthode permet d'afficher les tâches qui se trouvent dans le planning de la ressource humaine.
- `vider_planning()` : Cette méthode permet de supprimer toutes les tâches qui se trouvent dans le planning de la ressource humaine. Elle est utilisée dans le cas de l'affectation statique des tâches.

- *La classe « Tâche ».*

Cette classe rassemble les informations relatives aux tâches. Elle est illustrée par la Figure IV.12. Chaque classe *Tâche* doit disposer des attributs suivants :

- `nom` : Chaque tâche doit disposer d'un nom qui lui ait propre. On suppose une nomenclature numérique pour les tâches et dans ce but on utilise une variable de type entier.

-
-
- p : C'est la durée de base de la tâche.
 - r : C'est la date de disponibilité de la tâche.
 - w : C'est le poids de la tâche.
 - cr : C'est la compétence requise pour la tâche.
 - $ID_Rh_initialement_aff$: C'est l'identifiant de la ressource humaine qui est chargé d'exécuter la tâche dans l'ordonnancement courant.
 - $site$: C'est le nom du site sur lequel la tâche doit être exécutée.
 - p_r : C'est la durée réelle de l'exécution de la tâche.
 - t : C'est le temps de début d'exécution de la tâche.
 - C : C'est le temps de complétion après exécution de la tâche.
 - d : C'est la date d'achèvement souhaité après l'exécution de la tâche.
 - $ordre$: C'est l'ordre d'exécution de la tâche dans le planning.
 - T : C'est la durée du retard commis sur l'exécution de la tâche par rapport au due-date.
 - U : C'est une variable booléenne pour indiquer si un retard est commis par rapport au due-date.
 - mod : C'est une variable booléenne pour indiquer s'il y a eu modification du planning initial.

Les opérations associées à la classe *tâche* sont :

- $obtenir_C()$: Cette méthode donne la date de complétion de l'exécution de la tâche « j ».
- $obtenir_site_aff()$: Cette méthode donne le site sur lequel la tâche « j » doit être exécutée.
- $obtenir_RH_aff()$: Cette méthode donne la ressource humaine qui doit exécuter la tâche dont il est question.
- $obtenir_T_w()$: Cette méthode retourne le retard pondéré effectué sur la tâche « j ».
- $obtenir_U()$: Cette méthode permet de lire l'indicateur du retard pour savoir s'il y a eu retard sur la tâche « j ». Elle facilite le comptage des tâches qui sont en retard par rapport à leur due-date.
- $obtenir_mod()$: Cette méthode permet de lire l'indicateur de modification par rapport à la ressource à laquelle la tâche fut affectée.
- $obtenir_ordre()$: Cette méthode permet d'obtenir l'ordre de la tâche dans la liste des tâches à effectuer par la ressource humaine

- obtenir_nom() : Cette méthode retourne le nom de la tâche dont il est question.
- actualiser_p_r() : Cette méthode prend comme argument l'identifiant de la ressource humaine à laquelle la tâche est affectée pour calculer son temps d'exécution.
- actualiser_tâche() : Cette méthode permet de faire la mise-à-jour des paramètres de la tâche. Elle prend comme argument l'ordre de la tâche dans le planning, la ressource à laquelle la tâche est affectée, le temps de complétions d'exécution de la tâche immédiatement précédente et le site auquel la tâche immédiatement précédente est affectée.
- actualiser_ID_RH() : Puisque, un des attributs de la tâche est l'identifiant de la ressource humaine qui est chargée d'effectuer la tâche, cette méthode permet de faire la mise-à-jour de cet attribut après qu'il y a eu changement dans le planning.

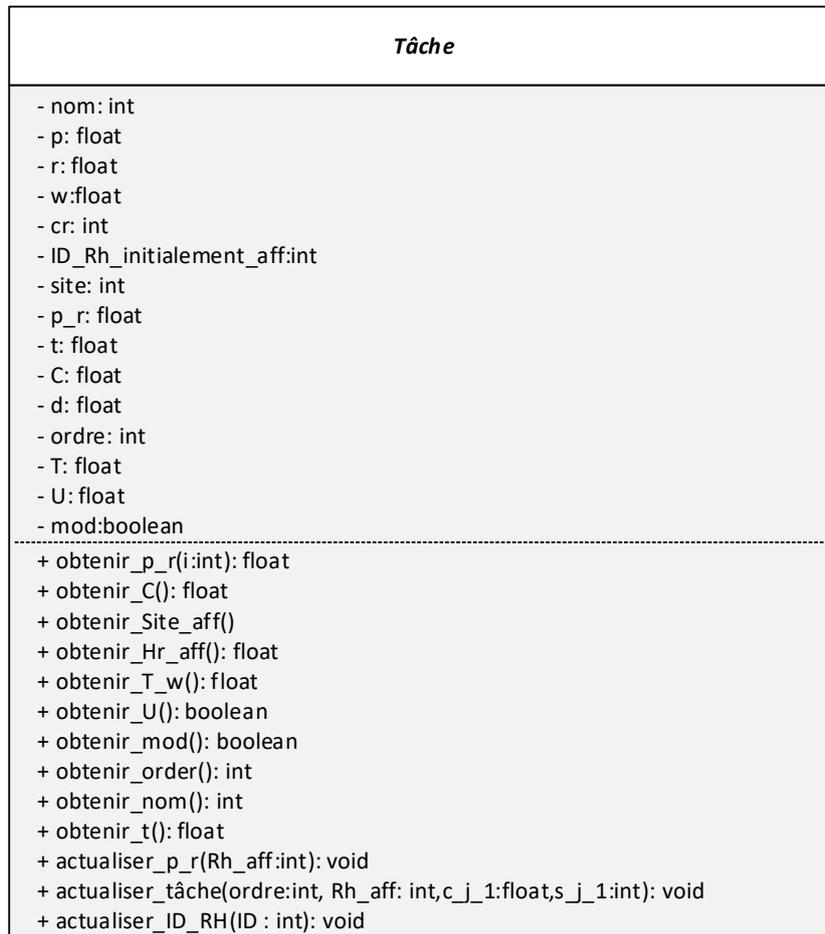


Figure IV.12. La classe *Tâche*

- La classe « **PlanningPersonnel** »

Cette classe permet de créer l'objet du planning personnel de la ressource humaine (Figure IV.13).

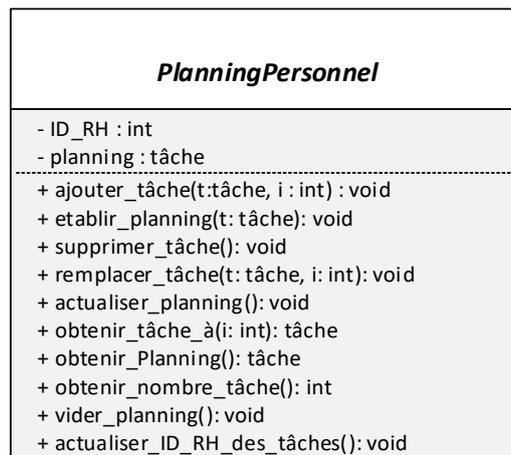


Figure IV.13. La classe PlanningPersonnel

Le planning personnel est constitué des attributs suivants :

- ID_RH : L'identifiant de la ressource humaine chargé d'exécuter le planning.
- Planning : L'ensemble des tâches que doit exécuter la ressource humaine. C'est un vecteur d'objet Tâche.

Les opérations appliquées par le PlanningPersonnel sont :

- ajouter_tâche() : Cette méthode permet d'ajouter une tâche dans le planning à la position donnée comme argument.
- etablir_planning() : Cette méthode permet d'établir le planning initial. Elle ordonnance les tâches données en argument selon l'ordonnement courant.
- supprimer_tâche() : Cette méthode permet de supprimer la tâche dont la position est donnée comme argument.
- remplacer_tâche() : Cette méthode permet de remplacer une tâche donnée comme argument par une autre tâche qui est elle aussi fournie comme argument.
- actualiser_planning() : Cette méthode permet de faire la mise à jour des propriétés de toutes les tâches se trouvant dans le planning.
- obtenir_tâche_à() : Cette méthode permet de retourner la tâche contenu dans l'emplacement donnée comme argument.
- obtenir_planning() : Cette méthode permet de retourner le planning.
- obtenir_nombre_tâche() : Cette méthode donne le nombre de tâches dans le planning.
- vider_planning() : Cette méthode permet de supprimer toutes les tâches dans le planning.

- La classe « *PlanningGlobal* »

Cette classe contient principalement le planning global à optimiser avec tous ces caractéristiques (les critères à optimiser). Le planning global est formé à partir des plannings personnels des ressources humaines. La classe *PlanningGlobal* est illustrée par la Figure IV.14.

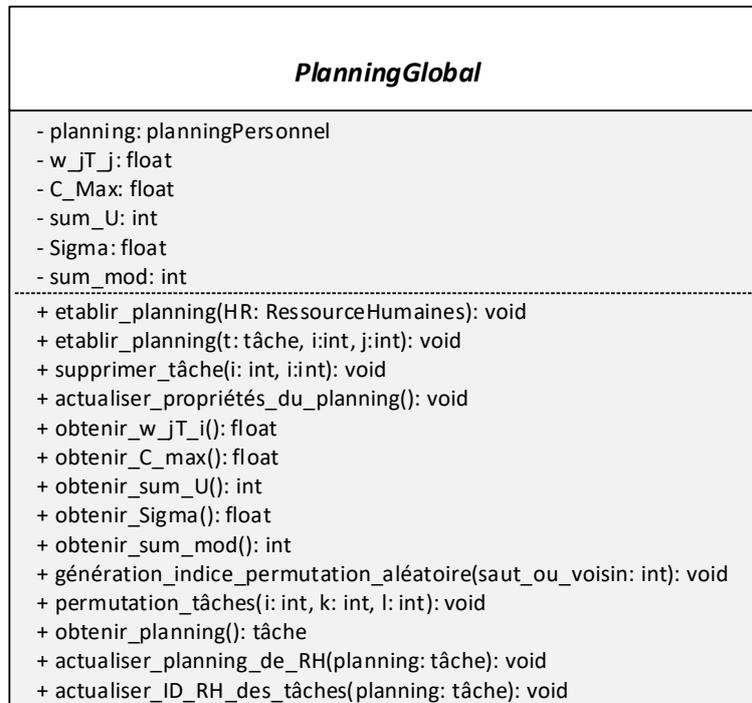


Figure IV.14. La classe *PlanningGlobal*

Les attributs de la classe *PlanningGlobal* sont :

- **planning** : C'est l'élément principal de la classe. Il représente l'ordonnement à optimiser. C'est un vecteur de *PlanningPersonnels*.
- **W_jT_j** : C'est la somme pondérée des retards.
- **C_max** : C'est le temps de complétion du projet.
- **Sum_U** : C'est le nombre de tâches qui sont en retard par rapport à leurs due-date respectifs.
- **Sigma** : C'est l'écart type de la charge entre les ressources.
- **Sum_mod** : c'est la somme des modifications qui ont été effectuée par rapport au planning initial.

Les méthodes nécessaires pour le traitement des données sont :

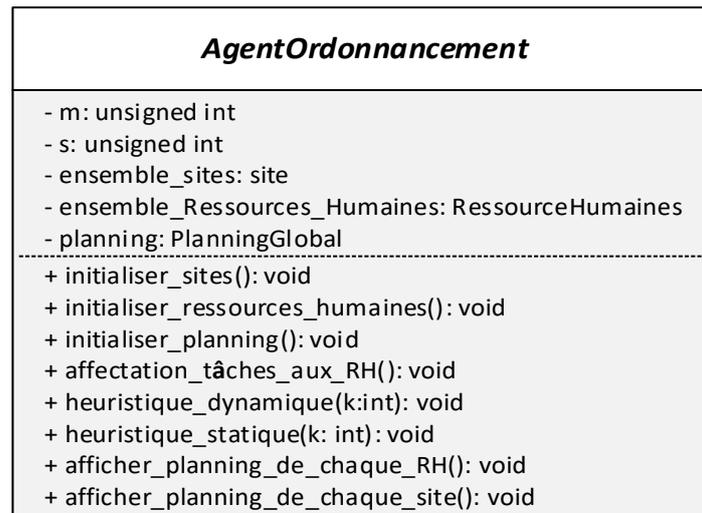
- **etabli_r_planning()**: Cette méthode permet d'établir le planning global à partir des plannings personnels des ressources humaines.

-
-
- ajouter_tâche(): cette méthode permet d'insérer la tâche donnée comme argument à l'emplacement indiqué.
 - supprimer_tâche() : Cette méthode permet de supprimer la tâche à l'emplacement indiqué comme argument.
 - actualiser_propriétés_du_planning() : Cette méthode permet de faire la mise-à-jour des propriétés du planning qui sont : la somme pondéré des retard, le temps de complétion du projet, le nombre de tâches en retard, l'équilibre de charge et la somme des modification par rapport au planning initial.
 - obtenir_w_jT_j() : cette méthode retourne la valeur de la somme pondérée des retards.
 - obtenir_C_max() : cette méthode retourne le temps de complétion du projet.
 - obtenir_sum_U() : cette méthode retourne le nombre de tâches qui sont en retard par rapport à leurs due-date respectifs
 - obtenir_Sigma() : cette méthode retourne la valeur de l'écart type de la charge entre les ressources.
 - obtenir_sum_mod() : cette méthode retourne le nombre de modification par rapport au planning initial.
 - génération_indice_permutation_aléatoire() : cette méthode permet de générer quatre nombre aléatoires. Deux d'entre eux représentent deux ressources choisies aléatoirement, et les deux restants représentent deux tâches chacune prise aléatoirement dans le planning. Elle nous permet de choisir les tâches pour faire le saut et la permutation voisine.
 - permutation_tâche() : Cette méthode permet de permuter les tâches choisies grâce à la méthode génération_indice_permutation_aléatoire().
 - obtenir_planning() : Cette méthode permet de retourner le planning optimisé.
 - acutaliser_planning_Rh() : Cette méthode permet d'affecter à chaque ressource humaine son nouveau planning.

- La classe « **AgentOrdonnancement** »

C'est la classe qui définit les ressources, les plannings et les sites. Elle est chargée de faire la liaison entre les différentes classes citées précédemment et d'effectuer les traitements nécessaires grâce à la classe *AlgorithmeMonocritère* ou la classe *AlgorithmeMulticritère*.

La Figure IV.15 illustre la classe *AgentOrdonnancement*.

Figure IV.15. La classe *AgentOrdonnancement*

Les attributs de cette classe sont :

- m : Le nombre de ressources pour la maintenance dont dispose le système de production.
- s : Le nombre des sites.
- ensemble_sites : C'est une liste qui contient tous les objets Sites.
- ensemble_Ressources_Humaines : C'est une liste qui contient tous les objets RessourceHumaine.
- planning : C'est le planning global qui va être traité par ce programme.

Les opérations sont :

- initialiser_sites() : Cette méthode donne la main à l'utilisateur pour faire entrer l'adresse de chaque site et le temps de déplacement entre le site dont il est question et les autres sites. A la déclaration des sites, l'opérateur aura la main pour faire entrer la liste des tâches à effectuer dans le site.
- initialiser_ressource_humaines() : Cette méthode permet à l'opérateur de faire entrer le nom et le profil de compétence correspondant aux ressources humaines.
- affectation_tâches_aux_RH() : Cette méthode fait la liaison entre les sites et les ressources humaines. Elle permet aux sites d'affecter les tâches qui se trouvent dans ces derniers, aux ressources humaines respectives pour former leurs plannings partiels respectifs.
- initialiser_planning() : Cette méthode permet de former le planning global à partir des plannings partiels des ressources humaines.
- heuristique_dynamique() : après l'appel de cette méthode, l'opérateur a la main pour faire

entrer le site correspondant à la nouvelle tâche à insérer qui lui-même lui demandera les informations relatives à la tâche. Après ça, la méthode demandera à l'opérateur de choisir le concept à utiliser dans l'optimisation (monocritère ou bien multicritères). Après l'optimisation, la solution est affichée, l'opérateur a le choix de garder le planning ou de refaire le processus d'optimisation.

- `heuristique_statique()` : Cette méthode permet d'insérer la nouvelle tâche selon l'heuristique statique en chamboulant tout le planning.
- `afficher_planning_de_chaque_RH()` : Cette méthode permet d'afficher les plannings des ressources humaines
- `afficher_planning_de_chaque_site()` : Cette méthode permet d'afficher informations relatives aux tâches et qui se trouvent dans les sites.

- La classe « **AlgorithmeMonocritère** »

La classe *AlgorithmeMonocritère* est la classe responsable de l'insertion des nouvelles tâches dans le planning et d'optimiser ce dernier.

C'est la classe mère qui englobe les paramètres communs entre l'algorithme d'optimisation monocritère et l'algorithme d'optimisation multicritère.

La Figure IV.16 illustre la classe correspondant à l'*AlgorithmeMonocritère*.

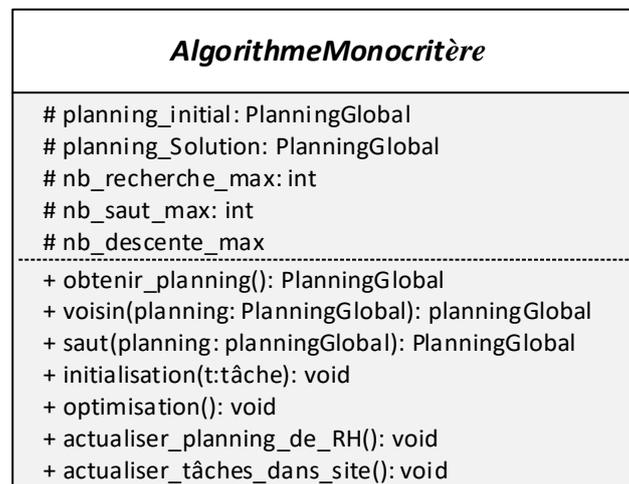


Figure IV.16. La classe *AlgorithmeMonocritère*

Elle a les attributs suivants :

- `planning_initial` : Il représente l'ordonnancement courant.
- `Planning_Solution` : C'est le planning solution courante après insertion de la tâche.
- `nb_recherche_max` : C'est le nombre d'itération maximal que fait l'algorithme.

-
-
- nb_descente_max : C'est le nombre maximal de recherche par voisinage.
 - nb_saut_max : C'est le nombre maximal de recherche par saut.

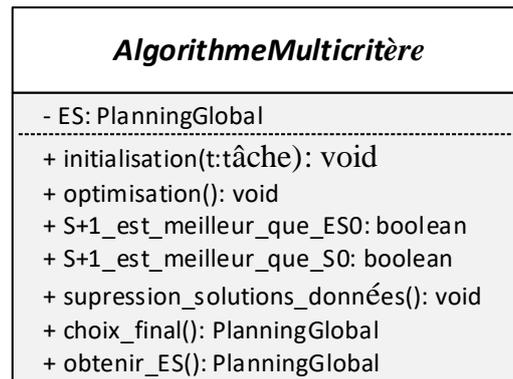
Elle a aussi les méthodes suivantes :

- obtenir_planning() : C'est une méthode qui permet de retourner la solution courante.
- voisin() : C'est une fonction qui fait une permutation de deux tâches voisines (l'une se trouvant en amont de l'autre) dans le planning d'une ressource humaine.
- saut() : Cette méthode fonctionne de deux manières différentes :
 - o Ou bien elle effectue la permutation de deux tâches qui ne sont pas immédiatement voisines (séparées par au moins une autre tâche) dans un planning personnel unique.
 - o Ou bien elle effectue des permutations aléatoires de deux tâches se trouvant chacune dans un planning personnel différent.
- actualiser_planning_de_RH() : Cette méthode est utilisée pour redistribuer les planning aux ressources humaines après avoir effectué le changement.
- initialisation () : Cette méthode effectue l'insertion initiale en essayant toutes les possibilités d'insertion de la nouvelle tâche et ne garde que celle dont le critère à optimiser est minimum.
- Optimisation() : Il s'agit de l'algorithme d'optimisation monocritère. Il se base sur une méthode de recherche par voisinage où on effectue des opérations par voisinage pour explorer d'une manière stochastique, de nouvelles solutions. La méthode du voisinage est améliorée grâce à la méthode Kangourou pour éviter tout enfermement dans un optimum local.
- Actualiser_tâche_dans_site() : cette méthode est utilisée pour actualiser les tâches dans les sites après avoir effectué le changement.

- La classe « **AlgorithmeMulticritère** »

C'est une classe qui hérite de la classe *AlgorithmeMonocritère*. Elle est responsable de l'optimisation multicritère du *PlanningGlobal* (voir Figure IV.17), en plus des attributs que cette classe hérite de sa classe mère, elle possède l'attribut suivant :

- ES : Ensemble de solutions utilisées dans le cas multicritère, Il s'agit de l'ensemble des solutions considérées bonne selon certains critères. C'est un vecteur d'objets de type *PlanningGlobal*.

Figure IV.17. La classe *AlgorithmeMulticritère*

Les méthodes de cette classe sont :

- S+1_est_meilleur_que_S() : Cette méthode permet d'évaluer la solution courante qui est « S » et la solution modifié « S+1 ». Si « S+1 » est meilleur que « S » pour au moins trois critères, cette méthode retourne « Oui » sinon elle retourne « Non ».
- S+1_est_meilleur_que_ES() : Cette méthode permet d'évaluer la solution modifiée « S+1 » par rapport aux solutions contenu dans « ES ». Si « S+1 » est meilleur que toutes les solutions contenues dans « ES » dans au moins trois critères, cette méthode retournera « Oui » sinon elle retournera « Non ».
- suppression_solution_dominées() : Cette méthode supprime les solutions dominées.
- choix_final() : Cette méthode permet de choisir une solution finale parmi l'ensemble des solutions.
- obtenir_ES() : Cette méthode permet d'afficher toutes les solutions contenus dans le vecteur ensemble de solutions ES.
- initialisation () : Cette méthode effectue l'insertion initiale selon le concept multicritère. Elle essaie l'insertion de la tâche dans tous les emplacements possibles du planning et ne garde que celle qui minimise au moins trois des critères suivants :
 - La somme des retards pondérés : $\sum_{j=1}^n w_j T_j$.
 - La date de complétion du projet : C_{max} .
 - Le nombre de tâches en retard : $\sum_{j=1}^n U_j$.
 - L'équilibre de charge : $\sigma(S)$.
 - Le nombre de modification dans le planning : $\sum_{j=1}^n mod_j$.

IV.3.1.1.2 Diagramme de classe du système

La modélisation statique des classes permet de présenter les classes et les interfaces des systèmes ainsi que les différentes relations entre celles-ci. A partir ces classes, nous réalisons un diagramme de classe illustré par la Figure IV.18. Sur ce diagramme, nous avons mis en évidence les principales relations entre les classes.

Nous retrouvons une classe utilitaire mère «*MatriceCompétence*» dont héritent la classe «*Tâche*» et la classe «*RessourceHumaine*». De même pour la classe utilitaire mère «*MatriceDéplacement*» dont héritent la classe «*Tâche*» et la classe «*Site*». Partant du principe que les tâches sont effectuées sur des machines qui appartiennent à des sites, on utilise la composition pour exprimer la relation entre les deux classes «*Site*» et «*Tâche*».

Un planning personnel est composé de tâches, d'où l'utilisation de la relation composition entre les deux classes «*Tâche*» et «*PlanningPersonnel*». Les plannings personnels sont affectés aux ressources humaines, nous avons donc utilisé l'agrégation pour exprimer le fait que chaque ressource a un planning. Les plannings personnels sont le constituant principal du planning global, d'où l'utilisation de la composition entre les deux classes «*PlanningPersonnel*» et «*PlanningGlobal*».

L'instance «*AgentOrdonnancement*» prend le rôle de l'agent d'ordonnancement dans le service de maintenance. On s'est donc inspiré pour créer la classe «*AgentOrdonnancement*», cette classe fait la liaison entre les classes «*Sites*», «*RessourceHumaine*» et «*PlanningGlobal*». L'instance de cette classe va se servir d'une instance de la classe «*AlgorithmeMonocritère*» ou d'une instance de la classe «*AlgorithmeMulticritère*» pour insérer la nouvelle tâche dans le planning courant.

L'algorithme d'insertion multicritère est une généralisation de l'algorithme monocritère. Nous nous sommes donc inspirés de cette relation pour créer les deux classes «*AlgorithmeMulticritère*» et «*AlgorithmeMonocritère*» où la classe «*AlgorithmeMulticritère*» hérite de la classe «*AlgorithmeMonocritère*».

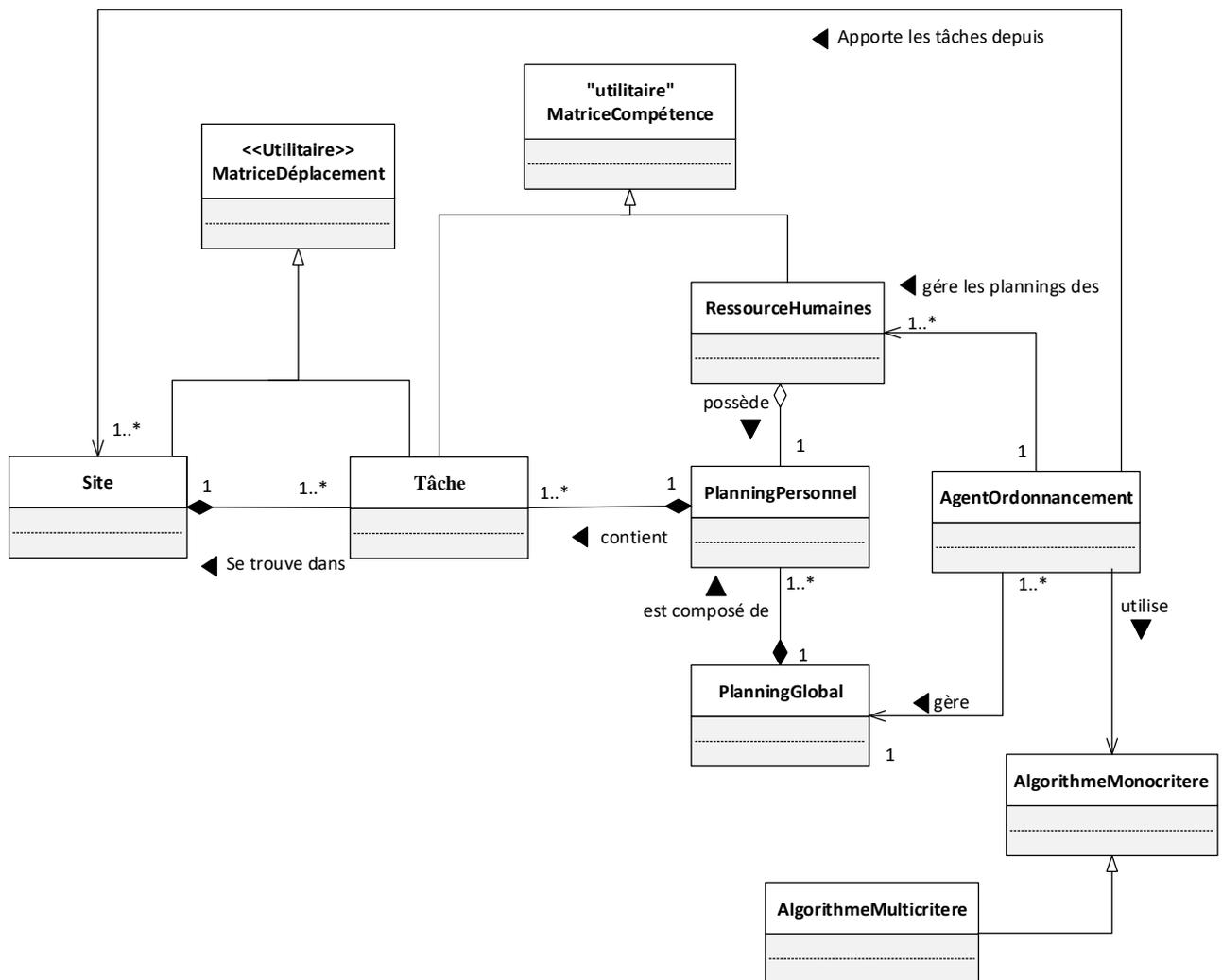


Figure IV.18. Diagramme de classe du système

IV.3.1.2 Dynamique d'insertion des nouvelles tâches

Le déroulement dynamique d'un scénario d'insertion d'une nouvelle tâche de maintenance est décrit par un diagramme de séquence qui permet de montrer la dynamique du système en suivant le déroulement chronologique des évènements.

Ce diagramme est composé de deux phases ; la première phase présente l'initialisation du système. La seconde traduit le déroulement de l'insertion d'une nouvelle tâche de maintenance dans un planning courant.

1- Initialisation du système : lors de l'exécution du programme par l'opérateur, une série d'évènement est produite (voir Figure IV.19). Une fenêtre s'affiche pour demander à l'opérateur la taille de l'ordonnancement (nombre de ressources humaines (m) et le nombre de site (S).

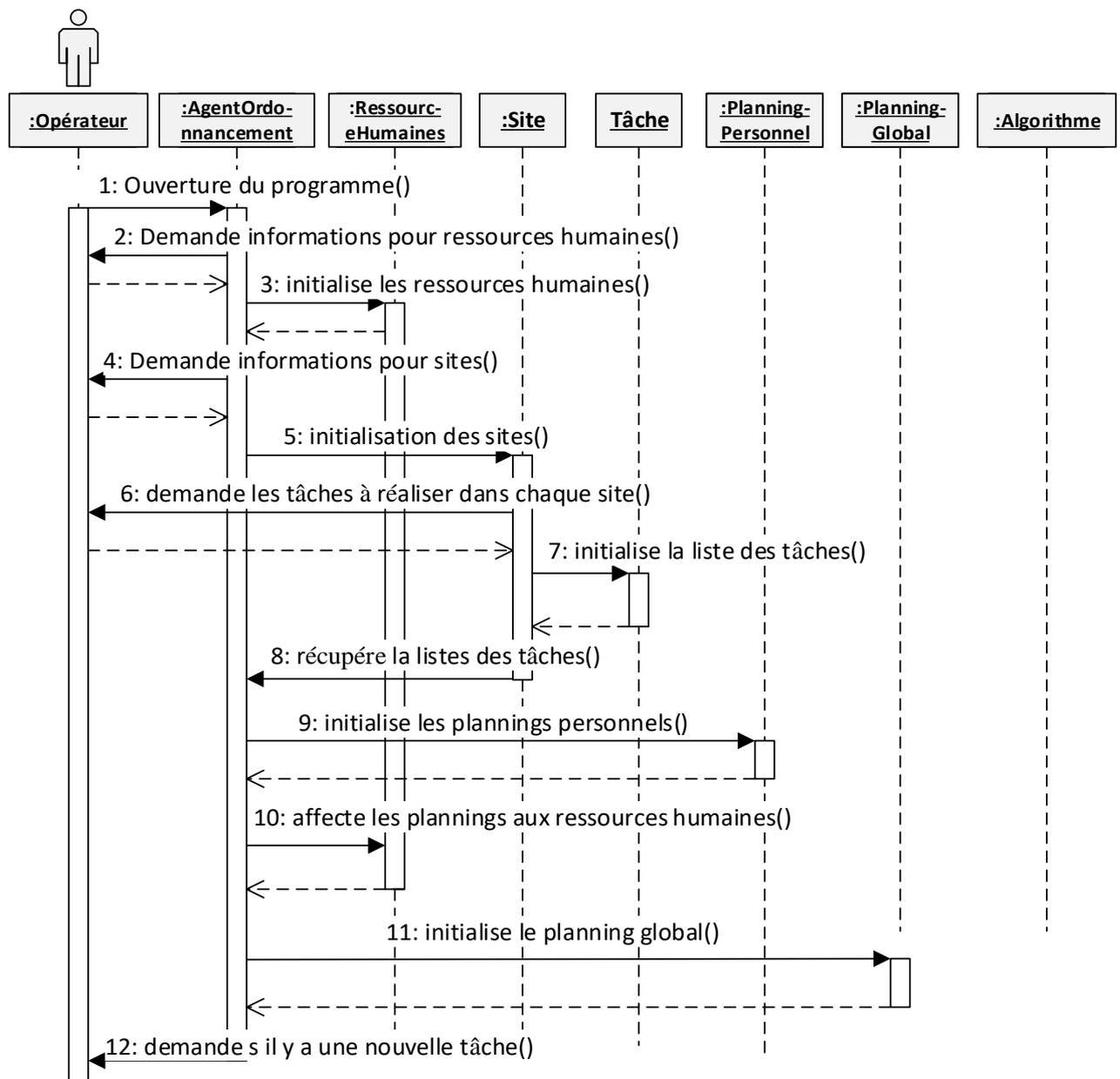


Figure IV.19. Diagramme de séquences « phase d'initialisation du système »

Dès que ces informations sont introduites, une instance de la classe « *AgentOrdonnancement* » est créée (1). L'instance « *AgentOrdonnancement* » demande les informations relatives aux ressources humaines (2). La *MatriceCompétence* est créée ainsi que les objets *RessourceHumaine* (3). L'instance *AgentOrdonnancement* demande à l'opérateur les temps de déplacement entre les *sites* (4). Initialisation des objets sites (5). L'instance *Site* demande le nombre de tâche dans chaque site (6). Exécuter une boucle pour faire entrer les informations relatives aux tâches, ce qui permet de créer et initialiser les objets *Tâche* (7).

L'instance *AgentOrdonnancement* récupère la liste des tâches à partir des sites (8) et initialise

les objets *PlanningPersonnel* (9). Les tâches seront ordonnancées selon leur affectation statique et affecter à leurs ressources humaines respectives 10. L'instance *AgentOrdonnancement* crée l'objet *PlanningGlobal* à partir des *PlanningPersonnel* (11). L'instance *AgentOrdonnancement* demande s'il y a une nouvelle tâche (12)

La phase d'initialisation du programme étant réalisée. Le programme affiche une fenêtre à l'opérateur pour demander s'il y a une nouvelle tâche.

2- Insertion d'une nouvelle tâche : Le déroulement des évènements lors de l'apparition d'une nouvelle tâche de maintenance est représenté par le diagramme de séquences de la Figure IV.20.

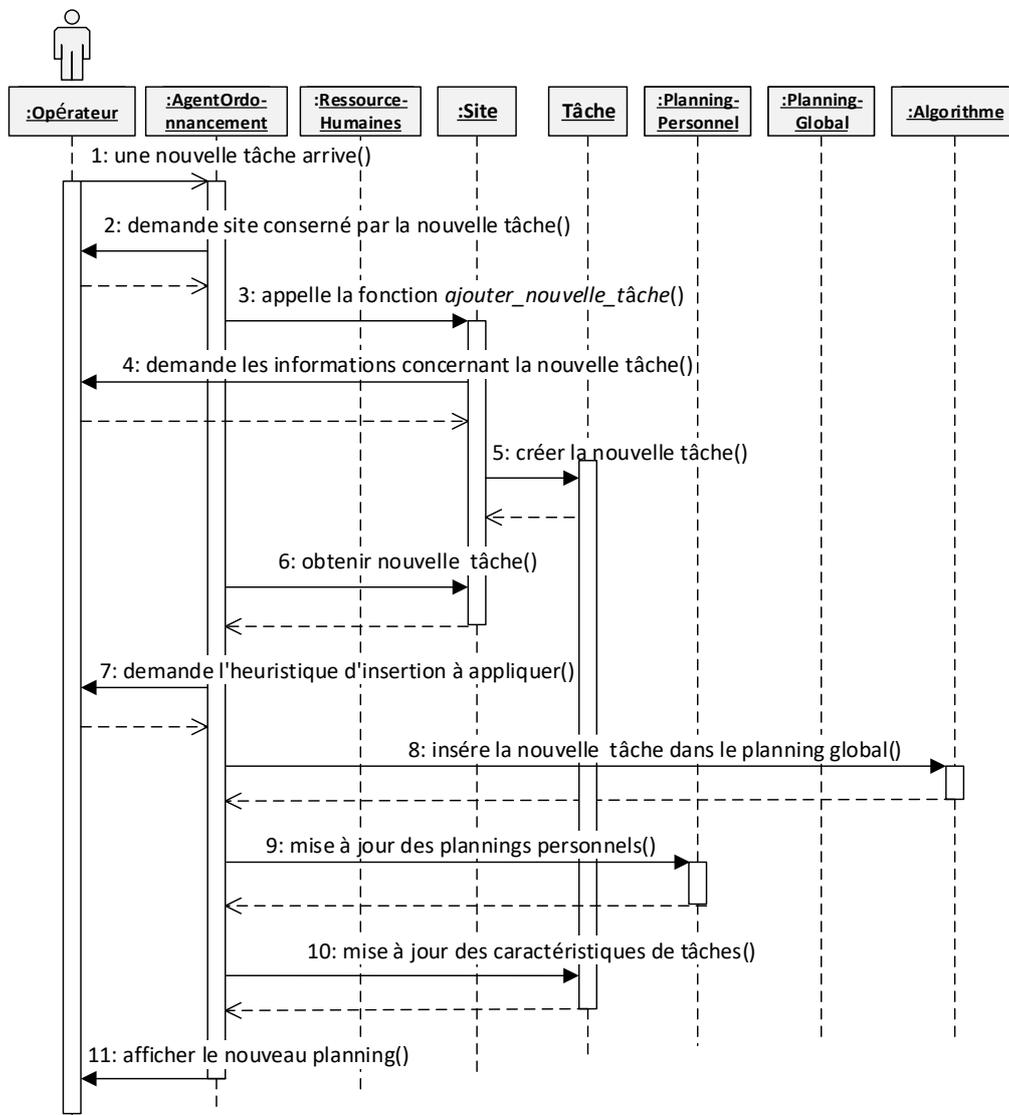


Figure IV.20. Diagramme de séquences « phase d'insertion de la tâche »

Une nouvelle tâche arrive (1). L'instance *AgentOrdonnancement* demande l'identifiant du site concerné par la nouvelle tâche (2). *AgentOrdonnancement* appelle la méthode *ajouter_nouvelle_tache* du site dont il est question (3). L'instance *Site* demande les caractéristiques de la nouvelle tâche (4). Une fois les informations entrées La méthode *ajouter_nouvelle_tache* crée la nouvelle tâche (5).

L'instance *AgentOrdonnancement* obtient la nouvelle tâche (6). Demander à l'opérateur l'heuristique d'insertion dynamique à appliquer (7). Insertion de la nouvelle tâche dans le planning global (8). Mise à jour des plannings personnels (9). Mise à jour des propriétés des tâches (10). Afficher le nouveau planning global (11).

IV.4 Simulation et validation du modèle développé

Une fois la modélisation du système avec l'outil UML développée, nous passons à la programmation avec le langage C++. Dans cette partie, nous allons démontrer la puissance et l'efficacité des algorithmes d'optimisation, monocritère et multicritère développés lors de l'insertion dynamique des tâches dans des ordonnancements courants. La validation des résultats obtenus est effectuée par rapport à des insertions statiques des tâches.

IV.4.1 Génération des données

La durée de base des tâches est un entier généré selon une distribution uniforme dans l'intervalle [5, 90] (variant entre 5 minutes et 90 minutes). Le taux de compétence, que possède chacune des ressources 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, 1440mn] (entre la date de lancement de l'approche t et $t + 24$ heures).

Les pondérations seront générées aléatoirement comme étant des entiers selon une distribution uniforme dans l'intervalle [1, 10]. Pour s'assurer que les tâches soient réalisables dans le temps, les *due dates* ne peuvent pas être fixés avant l'instant $t_1 = r_j + p_j \times 2 + mt_{max}$ avec $0 \leq r_j \leq 1440$. mt_{max} est le temps maximal parcouru entre les différents sites. 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 $[t_1, t_2]$ avec un niveau de charge faible $t_2 = t_1 + p_j \times 4.5 + mt_{max}$. Le temps de déplacement entre les sites (mt) est un entier généré aléatoirement selon une distribution uniforme dans l'intervalle [15, 90].

IV.4.2 Validation du modèle avec l'approche monocritère

Au cours des simulations, nous présentons l'insertion dynamique d'une tâche, afin de montrer la performance des algorithmes pour minimiser la somme pondérée des retards, 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 performances au fur et à mesure des insertions de tâches. Les résultats obtenus sont la moyenne de dix problèmes aléatoirement générés.

IV.4.2.1 Insertion d'une tâche

Le tableau IV.1 présente les résultats de l'insertion d'une tâche à l'égard de la somme pondérée des retards. L'affectation dynamique consiste à insérer la nouvelle tâche et faire un réarrangement partiel dans le planning afin d'améliorer la solution. Pour l'affectation statique, les tâches sont affectées selon l'heuristique LPT-ECT-EDD [11] puis on fait une amélioration du planning grâce à la méthode Descente-Kangourou développée dans le chapitre précédent.

Tableau IV.1. Valeur de la $\sum w_j T_j$ après insertion d'une nouvelle tâche

| Taille de l'ordonnancement | | | Insertion dynamique | | | Insertion statique | | |
|----------------------------|---|-----|---------------------|--------------------|------------------------|--------------------|--------------------|------------------------|
| S | m | n | $\sum w_j T_j$ | | Temps d'exécution (ms) | $\sum w_j T_j$ | | Temps d'exécution (ms) |
| | | | Solution initiale | Après amélioration | | Solution initiale | Après amélioration | |
| 5 | 2 | 30 | 710.547 | 379.715 | 59 | 189098 | 558.202 | 422 |
| | | 50 | 27230.1 | 27016.7 | 94 | 446518 | 34042.3 | 1152 |
| 10 | 5 | 75 | 165.296 | 129.648 | 117 | 400322 | 1352.18 | 10323 |
| | | 90 | 3180.29 | 3112.03 | 184 | 592532 | 6850.71 | 21005 |
| 15 | 8 | 100 | 908.026 | 858.8 | 216 | 772872 | 5228.09 | 36892 |
| | | 150 | 3097.88 | 3073.99 | 238 | 992502 | 9985.06 | 65295 |

Les trois premières colonnes du tableau IV.1 représentent la taille de l'ordonnancement, constitué de (**S**) sites, (**m**) ressources et (**n**) tâches. La quatrième colonne représente la valeur de la somme des retards pondérés de la solution initiale, la colonne qui la succède donne la valeur de la somme des retards pondérés après amélioration. La colonne suivante contient le temps nécessaire pour l'amélioration en millisecondes. La septième colonne représente la solution initiale de l'heuristique statique (voir Annexe A). La huitième colonne représente la solution statique après amélioration. La dernière colonne du tableau indique le temps nécessaire pour l'amélioration.

Dans tous les cas de figures, la solution obtenue grâce à l'insertion dynamique est bien meilleure que la solution obtenue par l'insertion statique. La méthode d'insertion dynamique conserve les propriétés du planning initial et les améliore, par contre la méthode statique fait perdre au planning toutes ses propriétés initiales.

Nous pouvons voir la puissance de l'algorithme monocritère dans le cas de l'amélioration de la solution dans l'insertion statique où l'amélioration atteint les 99% pour l'ordonnancement « $S = 5, m = 2, n = 30$ ». Pour le cas du planning courant composé de 5 ressources et 10 sites on trace le graphique de la Figure IV.21, qui présente l'évolution des résultats obtenus dans le Tableau IV.2.

Tableau IV.2. Valeur de la $\sum w_j T_j$ pour l'optimisation statique et dynamique

| Taille de L'ordonnancement | | | Insertion dynamique | Insertion statique |
|----------------------------|---|-----|---------------------|--------------------|
| S | m | n | $\sum w_j T_j$ | $\sum w_j T_j$ |
| 10 | 5 | 25 | 0 | 0 |
| | | 50 | 0 | 04.95 |
| | | 75 | 129.65 | 1352.15 |
| | | 90 | 3112.03 | 6850.71 |
| | | 100 | 9806.99 | 16923.1 |

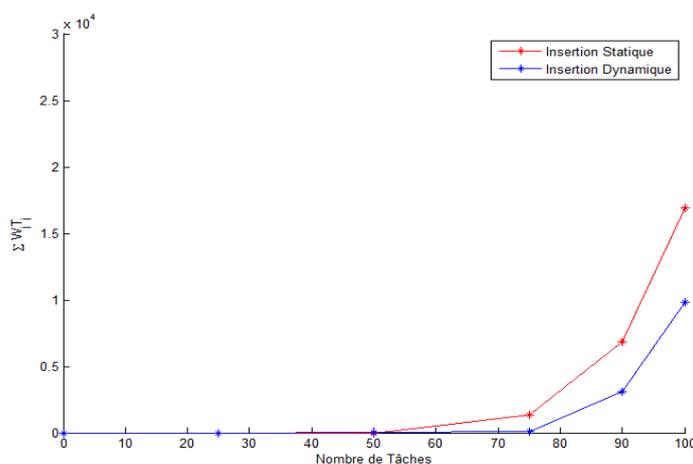


Figure IV.21. Evolution de $\sum w_j T_j$ en insertion statique et dynamique

L'approche d'insertion dynamique est toujours plus performante et ceci se vérifie au fur et à mesure que le nombre de tâches augmente, par exemple, pour $n=90$ tâches, la valeur de la somme des retards pondérés pour l'approche statique est de 6851 U.T par contre celle de l'approche dynamique est de 3112 U.T soit une amélioration de 54.6%.

Une insertion successive de plusieurs tâches est étudiée dans le paragraphe suivant.

IV.4.2.2 Insertion successive de tâches

Le tableau IV.3 présente les résultats obtenus de la somme pondérée des retards suite à l'insertion d'une tâche et suite à l'insertion successive de dix nouvelles tâches.

Tableau IV.3. $\sum w_j T_j$ Après insertion de dix tâches

| S | m | n | nombre de tâches insérées | Insertion dynamique | Insertion statique |
|----|---|-----|---------------------------|---------------------|--------------------|
| | | | | $\sum w_j T_j$ | $\sum w_j T_j$ |
| 5 | 2 | 30 | 1 | 1527.36 | 1736.95 |
| | | | 10 | 3887.34 | 8164.67 |
| 10 | 5 | 80 | 1 | 747.92 | 823.95 |
| | | | 10 | 1178.59 | 2102.49 |
| 15 | 8 | 120 | 1 | 415.06 | 722.21 |
| | | | 10 | 297.29 | 795.145 |

Les solutions obtenues avec l'approche dynamique montrent que $\sum w_j T_j$ est nettement inférieure à celle obtenue avec l'approche statique. En effet Après dix insertions, les solutions obtenues gardent toutes leur qualité quel que soit la taille de l'ordonnement.

Pour le problème d'ordonnement de 10 sites, 05 ressources et 80 tâches, nous avons suivi l'évolution de $\sum w_j T_j$ avant et après l'insertion de chacune des dix tâches. D'après la Figure VI. 22, nous remarquons une augmentation de la valeur de $\sum w_j T_j$ juste après l'insertion de la tâche. Puis, au fur et à mesure que l'algorithme d'optimisation se déroule, cette dernière tend à diminuer.

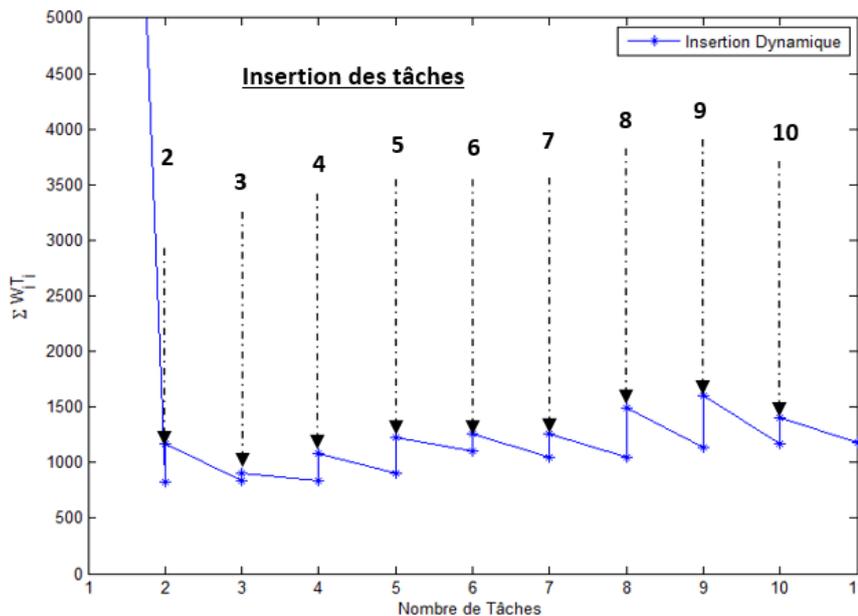


Figure IV.22. Evolution de $\sum w_j T_j$ avec l'insertion de dix tâches

A titre d'exemple, avant l'insertion de la huitième tâche, la valeur de $\sum w_j T_j$ était de 1046 U.T. Au moment de l'insertion elle est montée à 1493 après amélioration elle a pris la valeur de 1132 U.T. On remarque nettement l'amélioration après l'application de l'algorithme d'optimisation.

Comme il n'existe pas de critère universel pour évaluer la qualité d'un ordonnancement, l'application d'une approche multicritère est nécessaire pour une évaluation crédible des ordonnancements en maintenance.

IV.4.3 Validation du modèle avec l'approche multicritère

On utilise une instance de la classe « *AlgorithmeMulticritère* » pour optimiser l'ordonnancement courant et montrer la nécessité d'opter pour une approche multicritère. Au cours de ces paragraphes nous allons effectuer différents tests d'insertion de tâches dans différents ordonnancements courants en appliquant les deux algorithmes monocritère et multicritère afin de comparer l'efficacité des deux approches.

IV.4.3.1 Impact de l'ajout de critères supplémentaires

Le Tableau IV.4 présente les résultats obtenus sur les différents critères d'optimisation après insertion d'une tâche dans des ordonnancements courants de différentes tailles.

Tableau IV.4. Résultats des critères d'optimisation après insertion d'une nouvelle tâche

| S | m | n | Algorithme | critère d'optimisation | $\sum w_j T_j$ | C_{max} | $\sum U_j$ | σ | $\sum mod_j$ |
|----|---|----|--------------|--------------------------|----------------|-----------|------------|----------|--------------|
| 5 | 2 | 30 | monocritère | $\sum w_j T_j$ | 1360.3 | 1840.16 | 4 | 89.58 | 0 |
| | | | multicritère | $\sum w_j T_j$ | 1206.64 | 1821.37 | 3 | 85.96 | 0 |
| | | | | $\sum w_j T_j / \sigma$ | 1234.74 | 1841.97 | 4 | 62.39 | 0 |
| | | | | $\sum w_j T_j / C_{max}$ | 1206.64 | 1821.37 | 3 | 85.96 | 0 |
| 10 | 5 | 75 | monocritère | $\sum w_j T_j$ | 66.52 | 1888.38 | 1 | 116.40 | 1 |
| | | | multicritère | $\sum w_j T_j$ | 74.85 | 1886.3 | 1 | 117.81 | 0 |
| | | | | $\sum w_j T_j / \sigma$ | 96.60 | 1886.3 | 1 | 110.42 | 0 |
| | | | | $\sum w_j T_j / C_{max}$ | 405.56 | 1886.3 | 1 | 119.80 | 0 |

Les trois premières colonnes du tableau présentent la taille des ordonnancements courant. La quatrième colonne correspond au type d'approche appliquée. L'approche multicritère fourni un ensemble de solution. En fonction du contexte l'agent de maintenance décide de privilégier un

critère ou bien de choisir un compromis entre différents critères. Trois solutions sont proposées depuis l'ensemble de solutions trouvées :

- *Solution1* : minimise $\sum w_j T_j$
- *Solution 2* : minimise $\sum w_j T_j$ et σ en même temps.
- *Solution3* : minimise $\sum w_j T_j$ et C_{max} en même temps.

Dans le cas de « $n = 30, s = 5, m = 2$ », il est surprenant de voir que l'approche multicritère fournisse une *solution1* meilleures par rapport à la solution de l'approche monocritère. Nous expliquons cela par le fait que le choix aléatoire d'une solution dans un ensemble de solution donne des points de départ différent ce qui permet d'atteindre des espaces de solutions inatteignable par l'approche monocritère.

La Figure IV.23 présente le tracé des critères pour les quatre solutions obtenus par l'ordonnancement « $s = 5, m = 2, n = 30$ ».

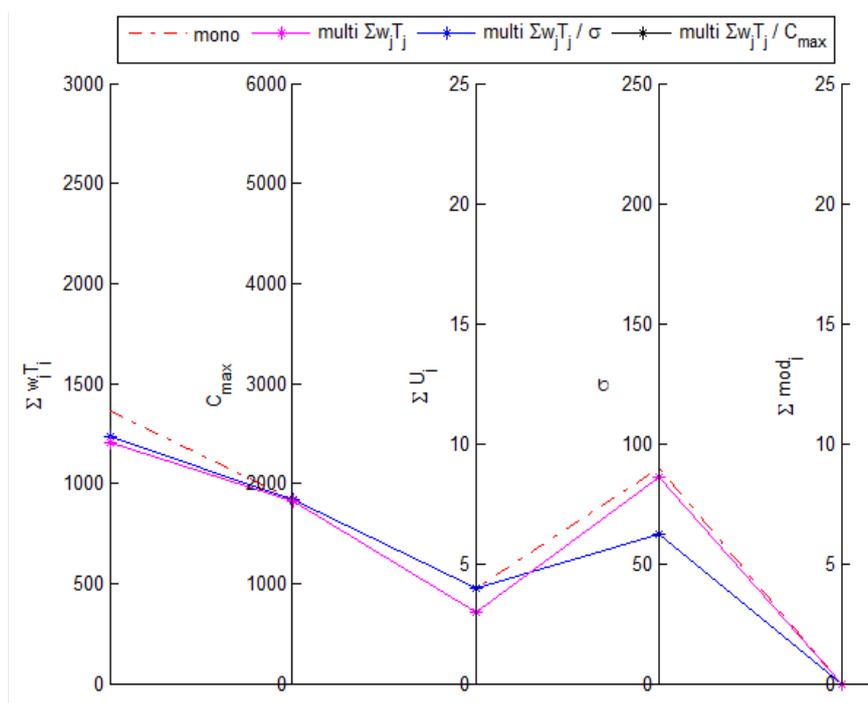


Figure IV.23. Comparaison des critères pour les approches monocritère et multicritère

On remarque que la solution préférant les deux critères $\sum w_j T_j / C_{max}$ pour le choix final coïncide avec celle qui minimise $\sum w_j T_j$. Les solutions obtenues selon l'approche multicritère dominant nettement la solution obtenue par l'approche monocritère.

Par exemple la solution préférant $\sum w_j T_j$ donne le meilleur résultat selon le critère $\sum w_j T_j = 1206.64 U.T$. Elle est devancé par la solution préférant $\sum w_j T_j / \sigma$ selon $\sigma(S) = 62.39$, contre $\sigma(S) = 85.96$ pour la solution préférant $\sum w_j T_j$. Cependant, nous estimons que la différence est acceptable, donc la solution multicritère qui minimise $\sum w_j T_j$ semble être un bon compromis entre les différents critères. Nous présentons dans la section suivante les résultats des critères pour une insertion successive de dix nouvelles tâches.

IV.4.3.2 Insertion de plusieurs tâches

Dans le paragraphe précédent, nous avons constaté que l'approche multicritère donne relativement de meilleurs résultats par rapport à l'approche monocritère. Afin vérifier si les solutions obtenues gardent leurs performances au fur et à mesure des évolutions des ordonnancements. Nous allons effectuer, l'insertion successive de dix nouvelles tâches dans un ordonnancement courant pour différents scénarios.

Tableau IV.5. Critères d'optimisation après insertion successive de dix tâches

| S | m | n | Algorithmes | critère d'optimisation | $\sum w_j T_j$ | C_{max} | $\sum U_j$ | σ | $\sum mod_j$ |
|----|---|----|--------------|--------------------------|----------------|-----------|------------|----------|--------------|
| 5 | 2 | 30 | monocritère | $\sum w_j T_j$ | 3337.66 | 1882.47 | 10 | 40.67 | 1 |
| | | | multicritère | $\sum w_j T_j$ | 6120.12 | 1849.45 | 9 | 20.80 | 1 |
| | | | | $\sum w_j T_j / \sigma$ | 6365.58 | 1878.14 | 10 | 19.54 | 0 |
| | | | | $\sum w_j T_j / C_{max}$ | 6188.9 | 1841.82 | 9 | 30.36 | 1 |
| 10 | 5 | 75 | monocritère | $\sum w_j T_j$ | 1211.34 | 1981.62 | 4 | 81.11 | 4 |
| | | | multicritère | $\sum w_j T_j$ | 3766.62 | 1943.8 | 6 | 47.46 | 1 |
| | | | | $\sum w_j T_j / \sigma$ | 3999.58 | 1959.94 | 5 | 38.85 | 2 |
| | | | | $\sum w_j T_j / C_{max}$ | 3633.33 | 1940.7 | 6 | 52.16 | 1 |
| 15 | 8 | 90 | monocritère | $\sum w_j T_j$ | 135.267 | 1903.49 | 1 | 120.919 | 1 |
| | | | multicritère | $\sum w_j T_j$ | 1281.79 | 1880.39 | 2 | 94.77 | 1 |
| | | | | $\sum w_j T_j / \sigma$ | 2347.71 | 1879.55 | 2 | 55.47 | 1 |
| | | | | $\sum w_j T_j / C_{max}$ | 1218.46 | 1875.44 | 2 | 95.44 | 1 |

Au bout de l'insertion de la dixième tâche selon le Tableau IV.5, nous constatons que l'approche monocritère donne la meilleure solution selon la somme des retards pondérés. Cependant, en prenant l'équilibre de charge, l'approche monocritère donne de très mauvais résultats selon ce critère par rapport aux résultats trouvés par l'approche multicritère.

La solution1 obtenue selon l'approche multicritère semble donner des résultats acceptables selon tous les critères. Pour cette approche et relative à l'ordonnancement courant « s=5 m=2

$n=30$ », Nous allons suivre l'évolution des différents critères d'optimisation représentée sur la figure IV.24.

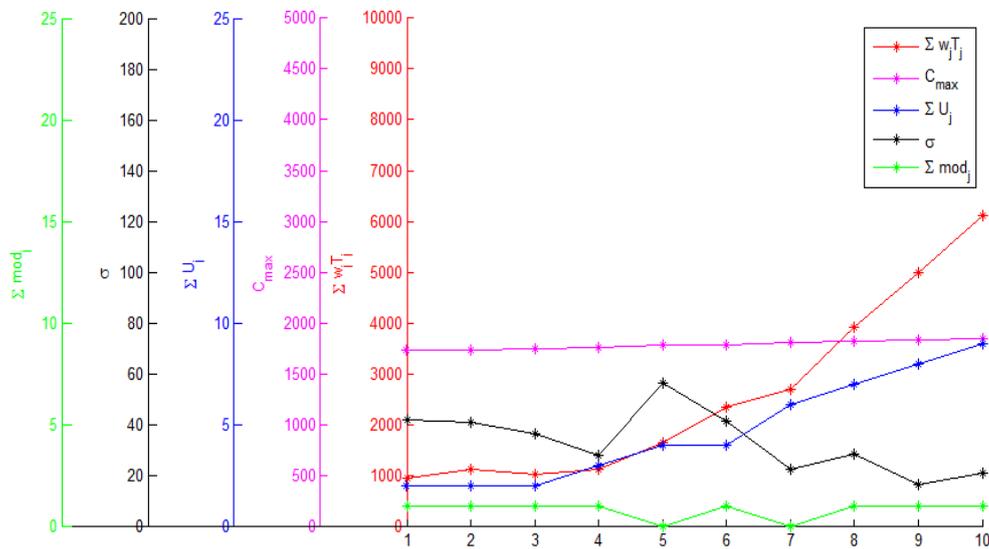


Figure IV. 24. Evolution des critères avec l'insertion successive de dix tâches

Sur cette figure, on voit bien que la date de complétion C_{max} varie très peu, l'algorithme a pu insérer les tâches dans les creux des plannings personnels, ce qui s'explique par l'écart type σ qui tend à diminuer, donc un meilleur équilibre de charge entre les ressources humaines.

Le nombre de tâches en retard et par implication la somme des retards pondérés tendent à augmenter ce qui est normal avec l'insertion de nouvelles tâches. Le nombre de modifications ne dépasse pas le un (1) un bon indicateur pour l'insertion dynamique qui va permettre de perturber le moins possible l'ordonnancement courant.

IV.5 Contributions par rapport au contexte développé en Mono-site

Dans cette section, on va décrire les contributions développées par notre étude dans le contexte multi-sites, par rapport aux résultats obtenus par F. Marmier [11] dans le contexte mono-site.

IV.5.1 Contributions pour l'approche Monocritère

Nous avons étendu l'étude développée en mono-site au contexte multi-sites en introduisant les temps de déplacement entre les sites et en prenons en considération la localisation des ressources humaines sur les sites de production. Dans le contexte mono-site les heuristiques développées sont basées sur le choix d'une borne inférieure. Les résultats obtenus par cette

approche restent limités, pour remédier aux inconvénients des bornes inférieures nous avons appliqué des heuristiques d'optimisation par voisinage.

IV.5.2 Contribution pour l'approche Multicritère

Pour l'approche multicritère, l'optimisation de l'ordonnement est développée par rapport à quatre (04) fonctions « objectifs » à savoir, la somme des retards pondérés, le nombre des tâches en retard, l'équilibre de la charge et le nombre de modification par rapport à l'ordonnement initial.

Dans le contexte multi-sites nous avons étendu l'étude à une cinquième fonction « objectif » qui est le makespan. Pour chercher les solutions non-dominées en contexte mono-site l'étude développée retient les solutions qui ont une amélioration sur au moins deux critères. Dans notre cas on a choisi de retenir les solutions qui minimisent au moins trois parmi les cinq critères à optimiser, qui constitue une amélioration par rapport au contexte mono-site.

Vu l'aspect distribué du contexte de notre étude une plateforme en langage UML est développée pour la gestion des tâches de maintenance.

IV. 6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons développé une architecture orientée objet pour la gestion de la maintenance prédictive sous contrainte de compétences dans une structure multi-site. La modélisation développée permet d'une part de structurer, sécuriser et de partager l'accès à l'information entre les différents objets du système d'autre part d'assurer l'insertion des nouvelles tâches dans le planning de maintenance courant.

Nous avons appliqué l'algorithme d'insertion dynamique monocritère au regard de la somme des retards pondérés, les résultats obtenus sont validés par rapport à une approche d'insertion statique. L'approche d'insertion dynamique monocritère est toujours plus performante et ceci se vérifie au fur et à mesure que la taille de l'ordonnement augmente.

Comme les critères qui peuvent refléter la qualité d'un planning d'ordonnement sont divers, Il a été plus judicieux d'appliquer l'approche dynamique multicritère. Afin de ne pas privilégier un critère sur un autre, nous avons proposé trois solutions possibles.

Afin de valider l'approche multicritère nous avons fait un comparatif avec l'approche monocritère. Les résultats ont été surprenants en constatant que l'approche multicritère donne

de meilleurs résultats vis-à-vis de la somme des retards pondérés par rapport à l'approche monocritère tout en donnant de bons résultats concernant les autres critères.

Nous avons aussi remarqué, que les plannings, obtenus à l'aide de l'approche multicritère, gardent leurs propriétés optimales au fil du temps. On en conclut que, l'approche multicritère est préférable pour l'évaluation d'un planning d'ordonnancement des tâches de maintenance, car elle assure une solution qui soit bonne selon tous les critères, chose qui n'est pas garantie avec l'application de l'approche monocritère.

Conclusion générale

La gestion de la maintenance a indéniablement subi des changements majeurs au cours des dernières décennies. Elle est passée de profil bas, nécessaire mais difficile à gérer, pour être considérée comme une fonction stratégique. Les praticiens n'ont pas seulement changé d'avis à propos de la maintenance ; les universitaires ont aussi bien fait. La maintenance est aujourd'hui une activité professionnelle et un domaine de recherche académique intensive.

Dans ce manuscrit, nous avons montré que de nos jours les évolutions technologiques et le contexte économique actuel ont provoqué d'importants changements dans les systèmes de gestion de maintenance, donc le choix des éléments structurels de maintenance n'est pas indépendant de son environnement. Parallèlement aux évolutions technologiques, l'organisation spatiale et distribuée de la maintenance a été également développée, nous avons considéré dans cette thèse les différentes organisations du système de maintenance et des ressources qui le compose.

Comme les installations sont hautement automatisées et technologiquement très complexes, de plus l'attention croissante portée à la clientèle a entraîné une pression encore plus forte en particulier sur les installations critiques, dans ce contexte nous avons proposé un système de gestion de maintenance appliqué à une unité de production constituée de plusieurs sites distribués géographiquement.

Pour avoir des installations bien entretenues et fiables, capables de réaliser des estimations plus rapides et plus fiables, un programme de maintenance bien conçu est obligatoire. Pour ce faire on a développé un système de gestion de maintenance pour satisfaire au mieux des exigences techniques, économiques et organisationnelles.

- *Sur le plan technique*

Le choix d'une politique de maintenance prédictive et l'application des méthodes de diagnostic avancées en vibration telle que les distributions quadratiques temps-fréquence a permis d'améliorer les performances des équipements et de détecter les défauts dans leur phase naissante. En effet Les fréquences de défauts obtenues expérimentalement présentent une diminution inférieure à 1% par rapport aux fréquences calculées théoriquement. Cela

montre l'efficacité de la technique utilisée pour extraire des informations importantes sur la santé des machines tournantes.

Cette technique permet de prévoir les conditions de dégradation de l'état de la machine, de diagnostiquer les défaillances et de suggérer des actions de maintenance avant qu'une panne ne se produise réellement. La prise en charge dynamique de ces actions de maintenance et leur affectation à des ressources ayant des compétences requises augmentent la disponibilité des machines.

- *Sur le plan organisationnel*

L'organisation distribuée de notre système répond bien aux normes de la COO, La modélisation d'une plateforme avec l'outil UML génère un dispositif organisationnel permettant de réguler la création, la circulation, l'utilisation et l'évolution du patrimoine informationnel pour notre système de gestion des plannings de maintenance.

Les plannings obtenus par l'approche multicritère gardent leurs propriétés au fil du temps et assure une solution qui soit bonne selon tous les critères, chose qui n'est pas garantie quand on applique l'approche monocritère. En effet, dans un premier temps nous avons supposé comme critère d'optimisation la somme des retards pondérés qui traduit les engagements de disponibilité, un algorithme d'insertion dynamique monocritère est appliqué par le modèle. Nous avons constaté que cet algorithme est plus efficace par rapport à l'insertion statique et cela est vérifié au fur et à mesure que la taille de l'ordonnancement augmente.

Cependant, les critères qui peuvent refléter la qualité d'un ordonnancement sont divers, nous avons alors testé l'efficacité de l'approche de résolution multicritère, afin de ne pas privilégier un critère sur un autre, nous avons proposé trois solutions. Pour valider l'approche multicritère, nous avons fait dans un premier temps un comparatif avec l'approche monocritère. Les résultats ont été surprenants en constatant que l'approche multicritère donne de meilleurs résultats vis-à-vis de la somme des retards pondérés par rapport à l'approche monocritère tout en donnant de bons résultats concernant les autres critères.

- *Sur le plan économique*

Le système de gestion développée permet d'augmenter la disponibilité des équipements, d'assurer l'équilibre de la charge entre les ressources, de minimiser les retards ainsi que les dates d'achèvement des plannings ce qui va permettre de maîtriser les couts de maintenance, ce qui va avoir un impact direct sur la stratégie économique de l'entreprise.

Perspectives et travaux futurs

▪ D'autres approches d'optimisation

Des approches d'optimisation telles que, les algorithmes génétiques (AG), l'optimisation de l'essaim de particules (PSO), l'optimisation de la recherche dirigée (DSO), etc. peuvent être intégrées dans la plateforme de simulation développée.

Le travail présenté par *Binodini. Tripathy et al* [148], traite un problème d'ordonnancement monocritère. Les auteurs ont introduit trois approches novatrices pour le problème d'ordonnancement des tâches en utilisant la (DSO). Cet algorithme est utilisé comme algorithme d'entraînement pour former (a) un réseau de neurones artificiels à trois couches (ANN), puis (b) des réseaux de neurones à fonction radiale (RBFN). Ces réseaux sont utilisés pour l'ordonnancement des tâches et offrent des performances intéressantes par rapport aux algorithmes modernes tels que AG, PSO, etc. comme en témoignent les résultats de la simulation de l'article de la référence.

▪ Complément sur les ressources

- *Pièces de rechange et outillages* : Lors de notre étude, nous nous sommes intéressé uniquement aux ressources humaines, quant aux ressources telles que les pièces de rechanges ou encore l'outillage ont été supposées disponibles et en quantité suffisante 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. [149] s'intéressent à cette problématique de remplacement de pièces détachées suite à des pannes.

Une autre problématique concernant la gestion de l'outillage, déplaçable ou non, en quantité limitée peut alors être introduite. Pour notre application, il serait alors intéressant d'intégrer les contraintes de pièces détachées et d'outillage.

- *Ressources humaines* : Nous avons limité le nombre de ressources par intervention à une seule 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. [150] qui, dans un contexte de machines parallèles, utilisent une deuxième ressource pour minimiser le

nombre de tâche en retard. Ce problème peut être abordé dans le cas de notre application.

▪ La maintenance, un élément important de la stratégie commerciale

De nos jours, la plupart des entreprises, reconnaît l'importance de la maintenance comme élément de sa stratégie commerciale. Les attentes en matière de maintenance ne sont plus formulées pour « faire tourner les choses », mais sont basées sur la stratégie commerciale globale. Cette stratégie peut être basée sur la flexibilité, la qualité et le faible coût. L'organisation de la maintenance, avec ses éléments structurels et infrastructurels, est construite en conséquence.

Il existe un écart menaçant entre le niveau de direction supérieur et l'organisation globale de la stratégie de maintenance et le niveau tactique sur lequel les concepts de maintenance sont conçus, détaillés et mis en œuvre (Figure Conc.1). L'écart est cependant présent entre l'alignement de la phase tactique et opérationnelle d'une part et la phase stratégique d'autre part. Bien que les deux aspects soient bien étudiés, le lien entre les deux n'est souvent pas bien établi. Cela a conduit à des déceptions avec la direction ainsi qu'à la frustration des responsables de la maintenance. Il n'y en a toujours pas assez de recherche sur le lien entre la maintenance et la stratégie commerciale [151].

Comblé ce fossé en liant la maintenance et le commercial à tous les niveaux de décision est l'un des défis majeurs pour l'avenir.

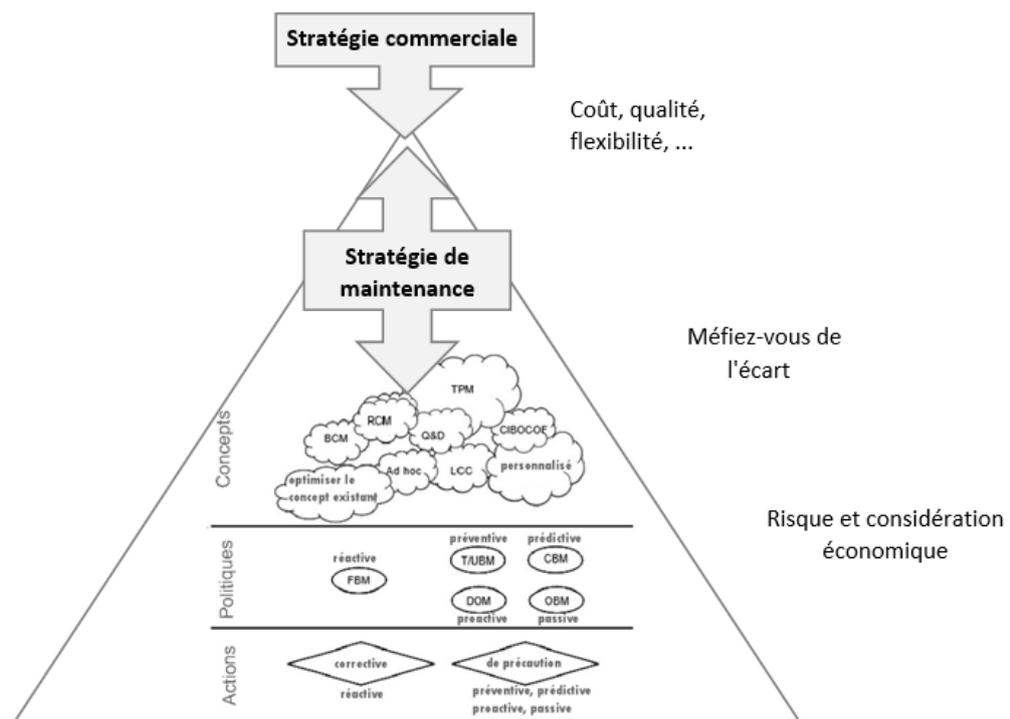


Figure. Conc.1 Ecart entre maintenance et stratégie commerciale

Références bibliographiques

- [1] Jingyuan Shen, Lirong Cui, Yizhong Ma., « Availability and optimal maintenance policy for systems degrading in dynamic environments», *European Journal of Operational Research*, 2018.
- [2] François Monchy et Jean-Pierre Vernier., « Maintenance, Méthodes et organisations », Dunod, 2010.
- [3] Yong Sun, Lin Ma, Joseph Mathew., « Failure analysis of engineering systems with preventive maintenance and failure interactions», *Computers & Industrial Engineering*, 57: 39-549, 2009.
- [4] Duc Pham;D. Karaboga., « Intelligent Optimisation Techniques», Springer, 2000.
- [5] David C. Chou, Amy Y. Chou., «Innovation outsourcing: Risks and quality issues», *Computer Standards & Interfaces*, 33(3): 350-356, 2010.
- [6] Driss Bouami., « Le grand livre de la maintenance : Concepts, démarches, méthodes, outils et techniques », Afnor, 2019.
- [7] David J Smith., « Fiabilité, maintenance et risque », Dunod, 2006.
- [8] Philippe Blancho., Jacques Durand, « Sûreté de fonctionnement et maîtrise des risques, la maintenabilité », CETIM, 1999.
- [9] Marcus Bengtsson, Martin Kurdve., «Machining Equipment Life Cycle Costing Model with Dynamic Maintenance Cost», *Procedia CIRP*, 48: 102-107, 2016.
- [10] Patrick Lyonnet., « Fiabilité industrielle : La boîte à outils des processus de fiabilité et maintenance », Afnor, 2016.
- [11] François Marmier., « Contribution à l'ordonnancement des activités de maintenance sous contrainte de compétence : une approche dynamique, proactive et multicritère », thèse, 2007.
- [12] F. Jahn, M. Cook, M. Graham., « Chapter 12: Production Operations and Maintenance », *Petroleum Science*, 55: 311-323, 2008.
- [13] Deepam Goyal, B. S. Pabla, « Condition based maintenance of machine tools», *Journal of Manufacturing Science and Technology*, 10: 24-35, 2015.

- [14] L.-Y. Wang, X. Huang, P. Ji, E.-M. Feng, « Unrelated parallel-machine scheduling with deteriorating maintenance activities to minimize the total completion time », *Optimization Letters*, 8(1):129–134, 2014.
- [15] Ahmad Alali Alhouaij., « Contribution à l'optimisation de la maintenance dans un contexte distribué », thèse, 2011.
- [16] Iva Kovacic., Veronika Zoller., « Building life cycle optimization tools for early design phases », *Energy*, 92:409-419, 2015.
- [17] Geoff Macangus-Gerrard., « Maintenance and Logistics », Gulf Professional Publishing, Elsevier Inc., 407-410, 2018.
- [18] Priyadarshi Tripathy., Kshirasagar Naik, « Software Evolution and Maintenance: A Practitioner's Approach », Edition Willey, 2014.
- [19] Jean-Claude Francastel., « Externalisation de la maintenance : Stratégies - Méthodes – Contrats », Dunod, 2005.
- [20] Banâtre J. P., Banâtre M., « Les systèmes distribués : expérience du Projet GOTHIC », InterEditions, Coll. Sciences Informatiques, ISBN 2-7296-0242-9, 1991.
- [21] Kaffel H., D'Amours S., Ait-Kadi D., « Les critères techniques pour le choix des acteurs dans un système de maintenance distribuée », 1er Colloque international francophone sur la Performance et les Nouvelles Technologies en Maintenance (PENTOM'03), Valenciennes, France, 2003.
- [22] Han T., Yang B.-S., « Development of an e-maintenance system integrating advanced techniques », *Computers in Industry*, 57 (6), p. 569-580, 2006.
- [23] Khairy A.H. Kobbacy D.N. Prabhakar Murthy., « Complex system maintenance handbook », Springer, 2008.
- [24] Gerardus Blokdyk., « Corrective Maintenance », the Art of Service, 2018.
- [25] Claude Kojchen., « La maintenance préventive - en 28 fiches outils », Dunod, 2017.
- [26] Gerardus Blokdyk., « Proactive maintenance The Ultimate Step-By-Step Guide », the art of service, 2018.
- [27] Gerardus Blokdyk., « Predictive maintenance », Edition Art of service, 2018.
- [28] Konrad Exner, Christian Schnürmacher, Sebastian Adolphy, Rainer Stark. , « Proactive Maintenance as Success Factor for Use-Oriented Product-Service Systems », *Procedia CIRP*, 64: 330-335, 2017.
- [29] McCall, J.J., « Maintenance policies for stochastically failing equipment », *Asurvey*, 1965.
- [30] Geraerds, W.M.J., « Towards a Theory of Maintenance », the English University Press,

- 1972.
- [31] Valdez-Flores, C., Feldman, R.M., «A survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single-unit systems», *Naval Research Logistics*, 36:419-446, 1989.
- [32] Cho, I.D, Parlar, M., «A survey on maintenance models for multi-unit systems», *European journal of Operational Research*, 51:1-23, 1991.
- [33] Pintelon, L., Gelders, L., «Maintenance management decision making», *European Journal of Operational Research*, 58:301–317, 1992.
- [34] Dekker, R., «Applications of maintenance optimization models: A review and analysis. *Reliability Engineering and System Safety*», 52:229-240, 1996.
- [35] Dekker, R., and Scarf, P.A., «On the impact of optimization models in maintenance decision making: the state of the art», *Reliability Engineering and System Safety*, 60:111-119, 1998.
- [36] Wang H., «A survey of maintenance policies of deteriorating systems», *European Journal of Operational Research*, 139:469-489, 2002.
- [37] Pintelon, L., Gelders, L., Van Puyvelde, F., «Maintenance Management», Acco Leuven / Amersfoort, 2000.
- [38] Waeyenbergh, G., Pintelon, L., «A framework for maintenance concept development», *Int J Prod Econ*, 77: 299-313 2002.
- [39] Blanchard, B.S., «Logistics Engineering and Management», Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1992.
- [40] Stephane Michel., « Outil nouvelle génération d’analyse du soutien logistique », 20 congrès de maîtrise des risques et de sûreté de fonctionnement saint-mario, 2016.
- [41] ISO 10303 (STEP) AP 239 edition 3 Application Protocol for Product Life Cycle Support (PLCS) Issue 1.0, 2015
- [42] ADS/AIA S30001 V1.1 International procedure specification for logistic support analysis LSA, 2014.
- [43] Takahashi, Y. and Takashi, O., «TPM: Total Productive Maintenance», Asian Productivity Organization, Tokyo, 1990.
- [44] Jirarat Teeravaraprug, Ketlada Kitiwanwong, and Nuttapon SaeTong, «Relationship model and supporting activities of JIT, TQM and TPM», *Songklanakarinn J. Sci. Technol*, 33: 101-106, 2011.

- [45] Nowlan, F.S., Heap, H.F., «Reliability Centered Maintenance», United Airlines Publications, 1978.
- [46] Anderson, R.T., Neri, L., «Reliability Centred Maintenance: Management and Engineering Methods», Elsevier Applied Sciences, 1990.
- [47] Moubray (1997) Moubray, J., «Reliability-Centred Maintenance», Butterworth-Heinemann, 1997.
- [48] Gits, C.W., «On the Maintenance Concept for a Technical System: A Framework for Design», Ph.D.Thesis, TUEindhoven, the Netherlands, 1984.
- [49] Jones, R.B., «Risk-Based Maintenance», Gult Professional Publishing (Elsevier), 1995.
- [50] Kelly, A., «Maintenance Organizations & Systems: Business-Centred Maintenance», Butterworth-Heinemann, 1997.
- [51] Coetzee, J.L., «An Optimized Instrument for Designing a Maintenance Plan: A Sequel to RCM», PhD thesis, University of Pretoria, South Africa, 2002.
- [52] Haarman, M. and Delahay, G., «Value Driven Maintenance – New Faith in Maintenance Innovation», Dordrecht, The Netherlands, 2004
- [53] Waeyenbergh, G., CIBOCOF., «A Framework for Industrial Maintenance Concept Development», PhD thesis, Centre for Industrial Management – K.U.Leuven, Leuven, 2005.
- [54] Renaud CUIGNET., «Management de la maintenance », Dunod, 2018.
- [55] Bernard T. Lewis, Richard Payant., «Facility Manager's Maintenance Handbook», Springer, 2007.
- [56] Diego Galar, Uday Kumar., «eMaintenance: Maintenance Decision Support Systems, », Academic Press, 2017.
- [57] Labib Ashraf., «Computerised maintenance management systems. In: Complex systems maintenance handbook», Springer, 2008.
- [58] Dilip Kumar, Deepak Kumar., «Maintenance Management, Sustainable Management of Coal Preparation», Woodhead Publishing, 2018.
- [59] A de la Fuente, V. González-Prida, A. Crespo, J. F. Gómez, A. Guillén., «Advanced Techniques for Assets Maintenance Management », IFAC, 51 : 205-210, 2018.
- [60] Pelope Adzakpa, «Maintenance des systèmes distribués : méthodes d'aide à la décision temps réel », Thèse, Troyes, 2004.
- [61] Anne Seguy, «Décision collaborative dans les systèmes distribués : Application à la e-maintenance », Thèse, Toulouse, 2008.

- [62] Ahmad Alali Alhouaij. « Contribution à l'optimisation de la maintenance dans un contexte distribué », Thèse, Grenoble, 2010.
- [63] Mickael Dievart, « Architectures de diagnostic et de pronostic distribuées des Systèmes Techniques Complexes de Grande Dimension », Thèse, Toulouse, 2010.
- [64] C. Okoh, R. Roy, J. Mehnen. « Predictive Maintenance Modelling for Through-Life Engineering Services », *Procedia CIRP*, 59: 196-201, 2017.
- [65] Bernard Schmidt, Lihui Wangba., « Predictive Maintenance of Machine Tool Linear Axes: A Case from Manufacturing Industry », *Conference: FAIM*, 17: 118-125, 2018.
- [66] Morel J., « surveillance vibratoire et maintenance prédictive », *Techniques de l'ingénieur R 6 100*, 2007.
- [67] Ferret, « The Basics of Predictive/Preventive Maintenance », <http://www.ferret.com.au/articles/ad/0c0259ad.asp>, 2019.
- [68] Mijailovic, V., « Probabilistic Method for Planning of Maintenance Activities of Substation Component », *Electric Power System Research* 64: 53–58, 2003.
- [69] Pham, H., Suprasad, A. and Misra, R.B., « Availability and Mean Life Time Prediction of Multistage Degraded System with Partial Repairs », *Reliability Engineering and System Safety*, 56: 169–173, 1997.
- [70] Cavory, G., Dupas, R. and Goncalves, R., A., « Genetic Approach to the Scheduling of Preventive Maintenance Tasks on a Single Product Manufacturing Production Line », *International Journal of Production Economics*, 74: 135–146, 2001.
- [71] Marseguerra, M., Zio, E. and Podofillini, L., « Condition-Based Maintenance Optimization by Means of Genetic Algorithm and Monte Carlo Simulation », *Reliability Engineering and System Safety*, 77: 151–166, 2002.
- [72] Lee, J., « Measurement of machine performance degradation using a neural network model », *Computers in Industry*, 30:193–209, 1996.
- [73] Umeda, Y., Tomiyama, T. and Yoshikawa, H., A., « design methodology for self-maintenance machines », *ASME journal of mechanical design*, 117, 1995.
- [74] Reichard, K., Van Dyke, M. and Maynard, K., « Application of sensor fusion and signal classification techniques in a distributed machinery condition monitoring system », *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 4051:329–336, 2000.
- [75] Roemer, M., Kacprzyński, G. and Orsagh, R., « Assessment of data and knowledge fusion strategies for prognostics and health management », *Proceedings of IEEE Aerospace*

- Conference, 6:62979–62988, 2001.
- [76] Kemerait, R., «New cepstral approach for prognostic maintenance of cyclic machinery», IEEE SOUTHEASTCON, 1987: 256–262, 1987.
- [77] Wilson, B.W., Hansen, N.H., Shepard, C.L., et al, «Development of a modular in-situ oil analysis prognostic system», International Society of Logistics (SOLE), Symposium, 1999.
- [78] Goodenow, T., Hardman, W., Karchnak, M., «Acoustic emissions in broadband vibration as an indicator of bearing stress», Proceedings of IEEE Aerospace Conference, 6: 95–122, 2000.
- [79] Bunday, B.D., «Statistical Methods in Reliability Theory and Practice», Ellis Horwood, 1991.
- [80] Hansen, R., Hall, D., Kurtz, S., «New approach to the challenge of machinery prognostics», Proceedings of the International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, 1994.
- [81] Garga, A., McClintic, K.T., Campbell, R.L., et al., «Hybrid reasoning for prognostic learning in CBM systems», Aerospace Conference, IEEE Proceedings, 6: 2957–2969, 2001.
- [82] K. Efthymiou, N. Papakostas, D. Mourtzis, G. Chryssolouris, « On a Predictive Maintenance Platform for Production Systems», Procedia CIRP, 3: 221-226, 2012
- [83] Jardine A.K.S., Lin D., Banjevic D., «A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance», Mechanical Systems and Signal Processing 20, 1483–1510, 2006.
- [84] Marc Thomas., « Fiabilité, maintenance prédictive et vibration des machines », Presses de l'université du Québec, 2012.
- [85] Chen, D. and Trivedi, K., «Closed-Form Analytical Results for Condition-Based Maintenance», Reliability Engineering and System Safety, 76: 43–51, 2002.
- [86] Prashant P. Kharche & al., «Review of Fault Detection in Rolling Element Bearing», International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE), ISSN: 2349-2163, Volume 1 Issue 5, 2014.
- [87] Elnara Nasimi, Hossam A. Gabbar., «Signal de-noising methods for fault diagnosis and troubleshooting at CANDU® stations», Nuclear Engineering and Design, 280: 481-492, 2014.

- [88] Israel Martínez-Hernández, Marc G. Genton, Graciela González-Farías., «Robust depth-based estimation of the functional autoregressive model», *Computational Statistics & Data Analysis*, 131: 66-79, 2019.
- [89] Vu Dang Hoang., « Wavelet-based spectral analysis », *Analytical Chemistry*, 62: 144-153, 2014.
- [90] Pandit, S., Wu, S-M., «Time series and system analysis with application», FL: Krieger Publishing Co, 1993.
- [91] Cohen, L., «Time-frequency analysis», NJ: Prentice Hall, 1995.
- [92] Bolaers F., Dron J.P., Rasolofondraibe L., « Prédiction et suivi de l'évolution d'un écaillage de fatigue de roulement par analyse vibratoire », XVIème Congrès Français de mécanique, Nice, référence 649, 2003.
- [93] Nelias D., « Contribution à l'étude des roulements : modélisation globale des roulements et avaries superficielles dans le contact EHD pour des surfaces réelles ou indentées », Habilitation à Diriger des Recherches INSA Lyon, 1999.
- [94] J.P. Ovarlez., « Distributions temps-fréquence, Les Ondelettes : Théorie, Pratique et Applications », ONERA DEMR/TSI, France, 1997.
- [95] Leon Cohen., «Time-frequency distributions-a review». *Proceedings of the IEEE*, 77:941-981, 1989.
- [96] P. Flandrin, « Représentations Temps-Fréquence des Signaux Non Stationnaires », Thèse Etat INPG, Grenoble 1987.
- [97] F. Auger, « Représentations Temps-Fréquence des Signaux Non-Stationnaires : Synthèse et Contribution », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 1991.
- [98] Yang Yang, Zhike Peng, Wenming Zhang, Guang Meng., «Parameterized time-frequency analysis methods and their engineering applications: A review of recent advances», *Mechanical Systems and Signal Processing*, 119: 182-221, 2019.
- [99] F. Hlawatsch, G.F. Boudreaux-Bartels, « Linear and Quadratic Time-Frequency Representations», *IEEE Signal Proc. Magazine*, 21-67, 1992.
- [100] Williams, W. and Jeong, J., « Reduced interference time-frequency distributions in time-frequency analysis - methods and applications», edited by B. Boashash, Longman-Cheshire, Melbourne, 1992.
- [101] P.Flandrin., «Time/frequency-scale Analysis», Academic press,1998.

- [102] Shyam Patidar and Pradeep Kumar Soni., « An overview on vibration analysis techniques for the diagnosis of rolling element bearing faults», *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 4:1803-1809, 2013.
- [103] Zhipeng Feng, Ming Liang, and Fulei Chu., «Recent advances in time–frequency analysis methods for machinery fault diagnosis: a review with application examples», *Mechanical Systems and Signal Processing*, 38:165-205, 2013.
- [104] Christophe Migeon., « Émission acoustique et analyse vibratoire pour l'étude des défauts de roulements pour différents régimes moteurs », thèse, *Mécanique*, 2011.
- [105] Boualem Boashash., «Time-Frequency Signal Analysis and Processing», Second Edition: A Comprehensive Reference (Eurasip and Academic Press Series in Signal and Image Processing), 2015.
- [106] Ference T.E. Mortan & D. Pintico., «Heuristics scheduling systems», Wiley, New York, Etats-Unis, 1993.
- [107] P. Chrétienne, E.G. Co'man & Z. Liu J.K. Lenstra., « Scheduling theory and its applications», Wiley, New York, Etats unis, 1995.
- [108] C. Chu & J.M. Proth., « L'ordonnancement et ses applications », Masson, Paris, France, 1996.
- [109] P. Esquirol & P. Lopez., « L'ordonnancement », *Economica*, 1999.
- [110] P. Lopez & F. Roubelat., « Ordonnancement de la production », Hermès, Paris, France, 2001.
- [111] M. Pinedo., «Scheduling: Theory, algorithms and systems (2nd edition) », Prentice Hall, 2008.
- [112] Jihène Kaabi-Harrath., « Contribution à l'ordonnancement des activités de maintenance dans les systèmes de production », Thèse, 2004.
- [113] Samia Ourari., « De l'ordonnancement déterministe a l'ordonnancement distribué sous incertitudes », thèse, 2011.
- [114] R.L. Graham, E.L. Lawler, J.K. Lenstra & A.H.G. Rinnooy Kan., «Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: a survey», *Annals of Discrete Mathematics*, (5) 287-326, 1979.
- [115] J. Blazewicz, K.H. Ecker, E. Pesch, G. Schmidt & J. Weglarz., «Scheduling in computer and manufacturing processes», Springer Verlag, 2001.
- [116] C. Esswein., « Un apport de flexibilité séquentielle pour l'ordonnancement robuste » thèse de doctorat, Université François Rabelais, 2003.

- [117] Trung La Hoang, « Utilisation d'ordres partiels pour la caractérisation de solutions robustes en ordonnancement », PhD thesis, Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS, 2005.
- [118] Lawler E.L., Wood D.E., «Branch and bound methods: A survey», *Operations Research*, (14) 699-719, 1966.
- [119] E. L. Johnson, G. L. Nemhauser & M.W.P. Savelsbergh., «Progress in linear programming-base algorithms for integer programming: an exposition», *INFORMS Journal on Computing*, (12) 2-23, 2000.
- [120] Bellmann R., Drefus S.E., «Applied dynamic programming», Princeton University Press, 1974.
- [121] C. Kirkpatrick, C.D. Gellat & M.P. Vecchi., «Optimization by simulated annealing», *Science*, vol. 220, page 671680, 1983.
- [122] F. Glover., «Tabu search- part I», *ORSA Journal on computing*, (1) 190-206, 1989.
- [123] F. Glover. «Tabu search- part II», *ORSA Journal on computing*, (2) 4-32, 1990.
- [124] J.H. Holland., «Adaptation in natural and artificial systems», Rapport technique, University of Michigan, 1975.
- [125] M. Dorigo., «Optimization, Learning and Natural Algorithms», these, University Paul Sabatier, 1992.
- [126] Tchommo Janvier-Laurent, Batiste Pierre et Soumis François., « Etude bibliographique de l'ordonnancement simultané des moyens de production et des ressources humaines », *Congrès International de Génie Industriel (GI)*, 2003.
- [127] Kane Hamdjatou , Aït-Kadi Daoud., D'Amour Sophie et Batiste Pierre., « Un modèle optimal de planification des ressources pour satisfaire les besoins d'effectifs en maintenance », *Congrès International de Génie Industriel (GI)*,2003.
- [128] Trilling Lorraine et Guinet Alain), « Aide à la décision pour la gestion quantitative des ressources humaines : comment lever la contrainte », *Congrès International de Génie Industriel (GI)*. 2005.
- [129] Kane Hamdjatou et Batiste Pierre., « Un modèle d'ajustement de la capacité à la charge basé sur les ressources humaines », *Conférence Francophone de Modélisation et Simulation (MOSIM)*, 2003.
- [130] Ernst A.T., Jiang H., Krishnamoorthy M., Owens B., Sier D., «Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models», *European Journal of Operational Research*, (153) 3-27, 2004.

- [131] Bellenguez-Morineau Odile., « Méthodes de résolution pour problème de gestion de projet multi-compétence », PhD thesis, Université de Tours, 2006.
- [132] Chan-Yew-Cheong Peter., « La planification du personnel : acteurs, action et termes multiples pour une planification opérationnelle des personnes », PhD thesis, Université Joseph Fourier - Grenoble 1, 2002.
- [133] Hétreux Gilles., « 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, 1996.
- [134] Fontan. Gérard., Mercé Colette., Erschler Jacques., « Performance industrielle et gestion des flux », Lavoisier, 2001.
- [135] Thierry Caroline., « Gestion de chaînes logistique, modèles et mise en œuvre pour l'aide à la décision à moyen terme », PhD thesis, Université Toulouse II, le Mirail, 2003.
- [136] Ramamritham Krithi., Stankovic John A., «Scheduling algorithms and operating systems support for real-time systems», Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1994.
- [137] Parashkevov Atanas., «Distributed real-time computer systems», Master's thesis, Department of Computer Science, University of Adelaide, Australia, 1994.
- [138] Coudert Thierry., « Apport des systèmes multi-agents pour la négociation en ordonnancement : application aux fonctions production et maintenance », PhD thesis, Toulouse, 2000.
- [139] Hammami Sondes, Alouane Atidel Hadj, Jebali Aïda et Ladet Pierre., « Approche multi-objectifs pour l'introduction de l'urgence dans le programme opératoire », Congrès International de Génie Industriel (GI), 2003.
- [140] Ouvrage collectif, OMG Unified Modeling Language (OMG UML), Superstructure, V2.1.2, November 2007.
- [141] Booch G., Rumbaugh J., Jacobson I., « Le guide de l'utilisateur UML », Ed. Eyrolles, Paris, ISBN 2-212-09103-6, 2000.
- [142] Lima Gomes R., « LEICA : Un environnement faiblement couplé pour l'intégration d'applications collaboratives », Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, 2006.
- [143] Rodriguez Peralta L. M., Villemur T., Drira K., Molina-Espinosa J. M., «Managing dependencies in dynamic collaborations using coordination diagrams», 6th International Conference on Principles of Distributed Systems (OPODIS'02), Reims, France, 2002.

- [144] Le Bars M., « Un Simulateur Multi-Agent pour l'Aide à la Décision d'un Collectif : Application à la Gestion d'une Ressource Limitée Agro-environnementale », Thèse de doctorat, Université Paris IX Dauphiné, 2003.
- [145] Lardeur E., Longueville B., «Mutual enhancement of systems engineering and decision-making through process modeling: toward an integrated framework», *Computers in Industry*, 55 (3), p. 269-282, 2004.
- [146] Longueville B., « Capitalisation des processus de décision dans les projets d'innovation : application à l'automobile », Thèse de doctorat, École Centrale Paris, 2003.
- [147] Unified Modeling Language UML 2.0 <http://www.uml.org/>, 2019.
- [148] Binodini. Tripathy, Smita. Dash, Sasmita. Kumari.Padhy, «Dynamic task scheduling using a directed neural network», *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 75: 101-106, 2015.
- [149] Smidt-Destombes Karin S., van der Heijden Matthieu C. et van Harten Aart., « 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: 182-200, 2006.
- [150] Ruiz-Torres Alex J., López Francisco J. et Ho Johnny C., «Scheduling uniform parallel machines subject to a secondary resource to minimize the number of tardy jobs», *European Journal of Operational Research*, 179: 302-315,2007.
- [151] Pintelon, L., Pinjala, K., Vereecke, A., «Evaluating the Effectiveness of Maintenance Strategies», *Journal of Quality in Maintenance Engineering (JQME)*, 12:214-229, 2006.

Annexe (A)

Algorithme LPT-ECT-EDD

La technique LPT consiste à ordonner les tâches par ordre croissant de leur durée maximale p_{ij} . L'algorithme ECT est présenté par la Figure A.1.

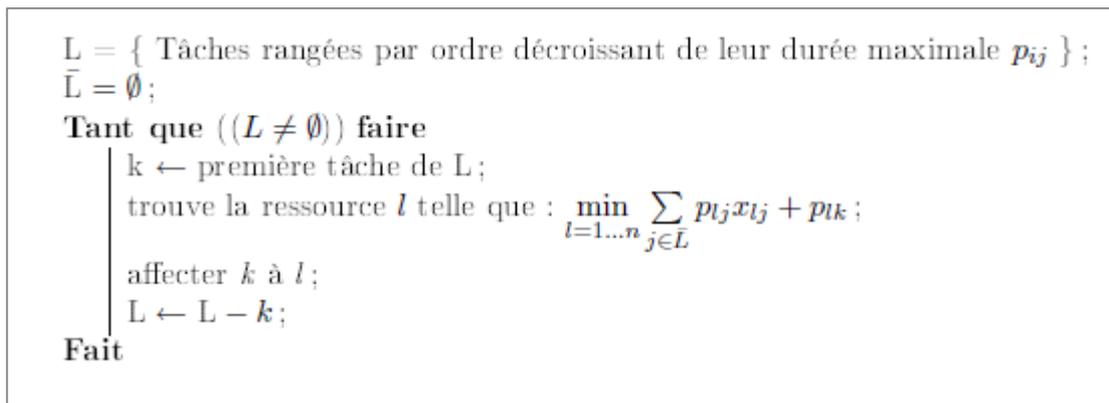


Figure A.1. Algorithme ECT

La technique *EDD* consiste à ordonner les tâches affectées à chaque ressource par ordre croissant de leur due-date d_j .

Annexe (B)

Application 1

Insertion dynamique d'une nouvelle tâche dans un planning de maintenance (Approche monocritère)

Dans cette annexe nous allons appliquer l'heuristique d'insertion dynamique monocritère, sur un exemple simple. Nous allons présenter les profils des opérateurs de maintenance, les durées de déplacement entre les sites, les caractéristiques des tâches ainsi que l'ordonnancement courant et enfin les deux phases, d'initialisation et d'amélioration, de l'algorithme d'optimisation monocritère.

B.1 Les ressources humaines

Dans cet exemple nous allons utiliser deux ressources avec deux niveaux de compétence chacune. La matrice des compétences est illustrée par la Figure B.1.

| | <i>Comp₁</i> | <i>Comp₂</i> |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| <i>Rh₁</i> | 1.4 | 1.8 |
| <i>Rh₂</i> | 1.9 | 1.2 |

Figure B.1. Matrice des compétences des agents de maintenance

B.2 Les sites de production

Nous considérons trois sites de production. Les durées de déplacement entre les sites sont illustrées par la matrice représentée Figure B.2.

| | <i>site₁</i> | <i>site₂</i> | <i>site₃</i> |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| <i>site₁</i> | 0 | 3 | 7 |
| <i>site₂</i> | 3 | 0 | 2 |
| <i>site₃</i> | 7 | 2 | 0 |

Figure B.2. Matrice des durées de déplacements entre les sites

B.3 Caractéristiques des tâches

Nous considérons 6 tâches dont le profile est illustré dans le tableau suivant :

Tableau B.1. Profile des tâches de l'ordonnancement courant

| N° | p_j | r_j | d_j | w_j | Site |
|----|-------|-------|-------|-------|------|
| 1 | 2 | 1 | 10 | 7 | 1 |
| 2 | 3 | 3 | 22 | 9 | 2 |
| 3 | 6 | 1 | 14 | 4 | 1 |
| 4 | 7 | 2 | 23 | 9 | 3 |
| 5 | 9 | 4 | 25 | 4 | 1 |
| 6 | 0.5 | 18 | 38 | 12 | 3 |

Ces tâches ont déjà été assignées aux ressources humaines Rh_1 et Rh_2 . Le planning de l'ordonnancement courant est le suivant :

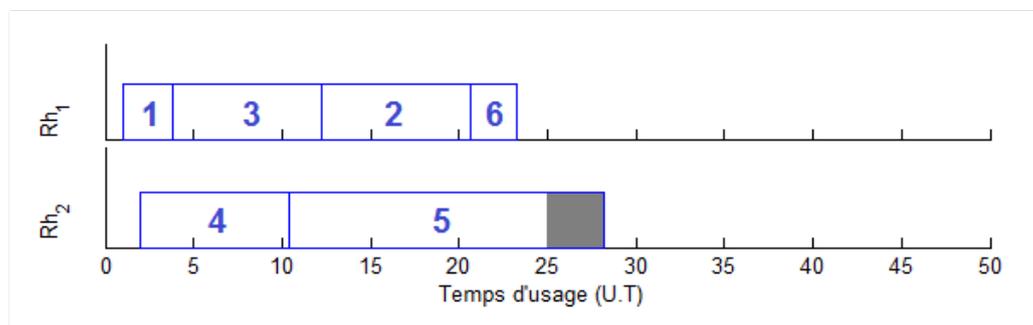


Figure B.3. Planning de l'ordonnancement courant

Nous avons pour ce planning $\sum w_j T_j = 12.8$ U.T. La partie en gris représente le retard sur le due date de la tâche n°5.

La nouvelle tâche à insérer présente les caractéristiques présentées par la Figure B.2.

Tableau B.2. Profile de la nouvelle tâche à insérer dans le planning

| N° | p_j | r_j | d_j | w_j | Site |
|----|-------|-------|-------|-------|------|
| 7 | 6 | 0 | 22 | 16 | 2 |

B.4. Insertion de la tâche

B.4.1 Phase d'initialisation

Cette phase consiste à insérer la nouvelle tâche dans les différents emplacements du planning courant pour enfin garder la solution qui donne la meilleure optimisation de $\Sigma w_j T_j$.

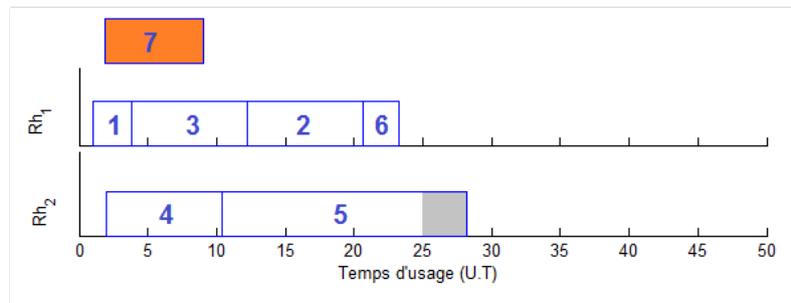


Figure B.4. Planning avant insertion initiale de la tâche 7

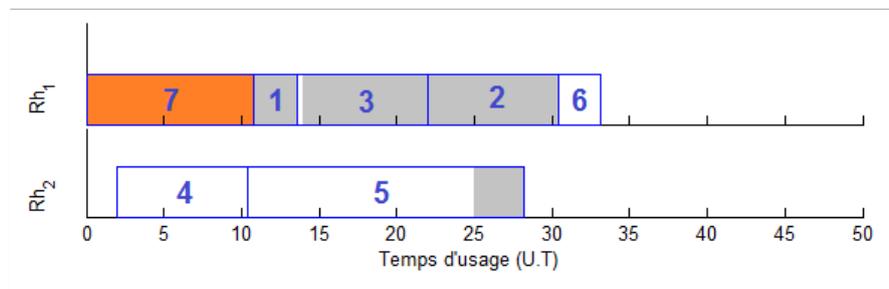


Figure B.5. Insertion initiale de la tâche 7 dans l'emplacement « Début-tâche n°1 »

Le tableau qui suit présente les différentes valeurs obtenus pour $\Sigma w_j T_j$ selon les différentes insertions initiales.

Tableau B.3. Insertion initiale de la nouvelle tâche

| <i>Numéro d'insertion</i> | <i>ressource</i> | <i>Emplacement</i> | $\Sigma w_j T_j$ |
|---------------------------|------------------|------------------------|------------------|
| 1 | 1 | Début-tâche n°1 | 145.6 |
| 2 | 1 | tâche n° 1- tâche n° 3 | 133.4 |
| 3 | 1 | tâche n° 3- tâche n° 2 | 113.4 |
| 4 | 1 | tâche n° 2-tâche n° 6 | 260.4 |
| 5 | 1 | tâche n° 6- Fin | 318.4 |
| 6 | 2 | Début-tâche n°4 | 61.6 |
| 7 | 2 | tâche n° 4- tâche n° 5 | 83.2 |
| 8 | 2 | tâche n° 5-Fin | 227.2 |

Il est clair que la meilleure insertion est le n° 6 avec une somme des retards pondérés égale à 61.2 U.T. Nous garderons ce planning comme solution initiale.

B.4.2 Phase d'amélioration de la solution initiale

La phase d'amélioration consiste à faire une combinaison de permutations voisines et de sauts afin d'améliorer la somme pondérée des retards du planning initial. Les permutations voisines ou l'opération de voisinage consiste à faire des permutations aléatoires entre deux tâches immédiatement voisines (l'une est en amont de l'autre). Cependant, on risque de se coincer dans un optimum local. Pour sortir des optimums locaux on fait des sauts qui peuvent être :

- Des permutations entre deux tâches qui sont loin l'une de l'autre dans le planning (au moins séparées par une tâche).
- Des permutations entre deux tâches chacune appartenant à une ressource différente

L'ordonnancement courant après insertion initiale de la tâche est donné par la Figure B.6.

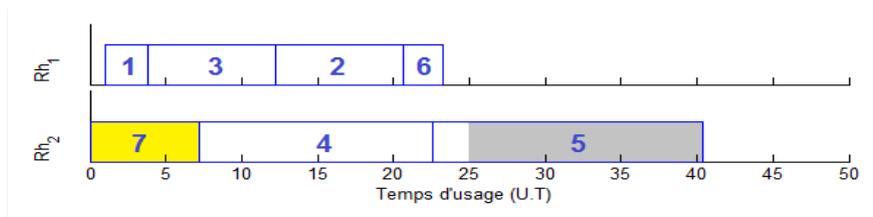


Figure B.6. Planning de la solution initiale

Dans un premier temps, nous allons effectuer des opérations de voisinage (Figure B.7).

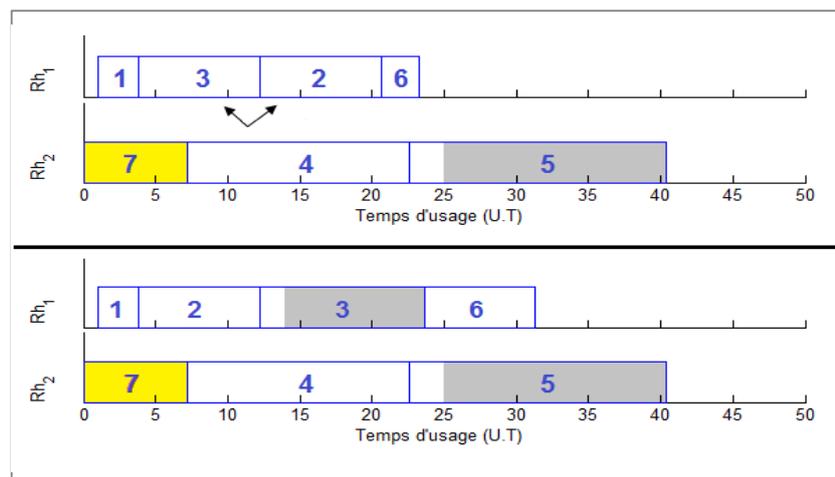


Figure B.7. Déroulement d'une permutation voisine

Après maints essais, ces opérations semblent infructueuses, nous supposons être coincé dans un optimum local. Nous faisons donc une opération de saut en permutant entre la tâche n°7 et la tâche n°2 (Figure B.8).

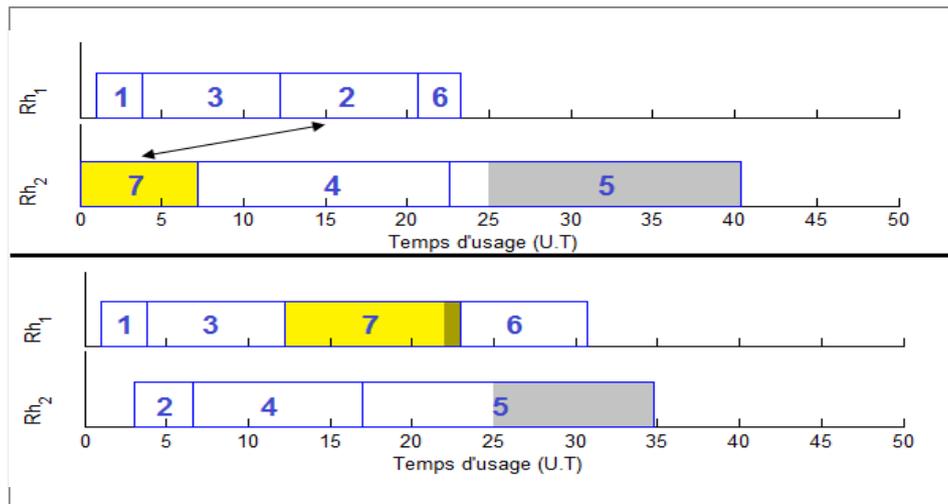


Figure B.8. Déroulement d'un saut

Cette solution donne effectivement une amélioration où $\sum w_j T_j = 55.2$

Nous retournons aux opérations de voisinage en permutant entre la tâche 2 et la tâche 4 comme illustrée par la Figure B.9.

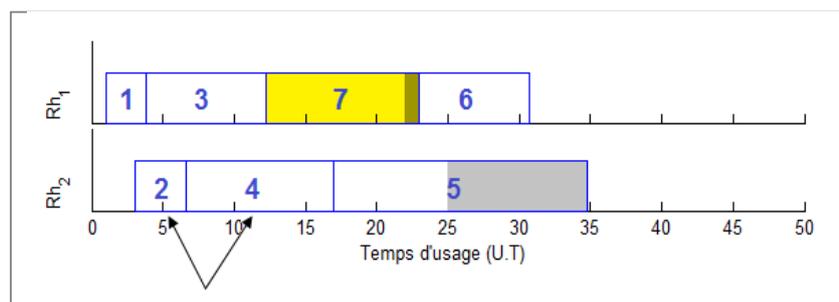


Figure B.9. Déroulement d'une opération de voisinage

La solution obtenue améliore encore plus le planning avec $\sum w_j T_j = 35.2$. Le planning de la solution finale est présentée par la Figure B.10.

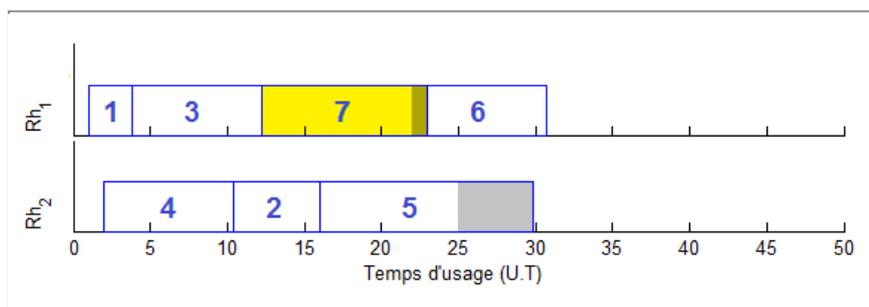


Figure B.10. Planning de la solution finale

Annexe (C)

Application 2

Insertion dynamique d'une nouvelle tâche dans un planning de maintenance (Approche multicritère)

Nous présentons dans cette partie de l'annexe un exemple simple, qui permettra d'expliquer la procédure d'insertion de la tâche selon l'approche dynamique multicritère.

Le profil des compétences, les durées de déplacement entre les sites ainsi que les propriétés des tâches sont présentés dans l'Annexe B. Nous avons également repris l'ordonnancement courant, utilisé dans l'exemple précédent, cet ordonnancement est illustré par la Figure C.1.

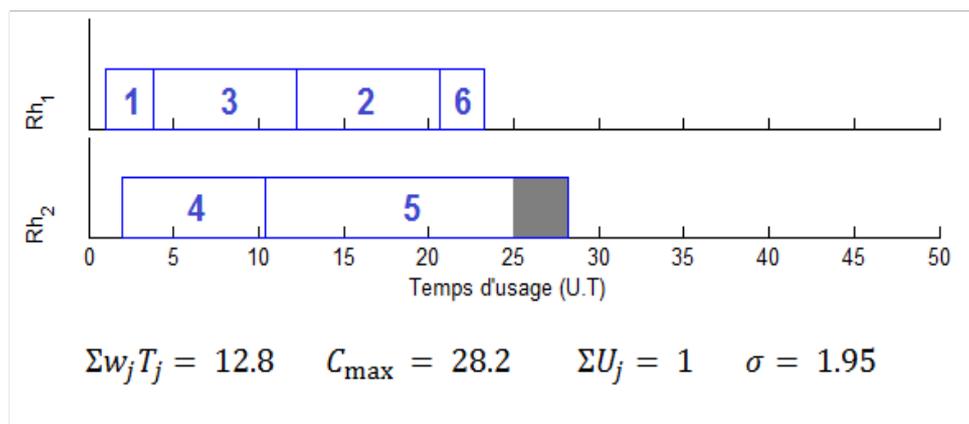


Figure C.1. Ordonnancement courant

C.1 Phase d'initialisation

La phase d'initialisation est divisée en deux sous étapes

- La première étape consiste à insérer la tâche dans différents endroits du planning et enregistrer le résultat de ces insertions dans un ensemble de solutions.
- La seconde phase consiste à trier ces résultats de façon à ne garder que les solutions qui sont meilleurs selon au moins trois critères aléatoires.

La première phase d'initialisation est présentée par le Tableau C.1. Toutes les solutions ont une somme des modifications égale à zéro. Car, dans l'insertion initiale de la nouvelle tâche nous ne touchons pas au planning initial. Dans ce cas-là, toutes les solutions sont jugées meilleures selon ce critère. Il ne nous reste qu'à comparer les quatre critères restants.

Tableau C.1. Insertion initiale multicritère de la nouvelle tâche

| <i>Numéro d'insertion</i> | <i>ressource</i> | <i>Emplacement</i> | $\Sigma w_j T_j$ | C_{max} | ΣU_j | σ | Σmod_j |
|---------------------------|------------------|------------------------|------------------|-----------|--------------|----------|----------------|
| 1 | 1 | Début-tâche n°1 | 145.6 | 33.1 | 4 | 3.45 | 0 |
| 2 | 1 | tâche n° 1- tâche n° 3 | 133.4 | 34.1 | 3 | 3.45 | 0 |
| 3 | 1 | tâche n° 3- tâche n° 2 | 113.4 | 34.1 | 3 | 3.45 | 0 |
| 4 | 1 | tâche n° 2-tâche n° 6 | 260.4 | 42.1 | 3 | 7.45 | 0 |
| 5 | 1 | tâche n° 6- Fin | 318.4 | 41.1 | 2 | 6.95 | 0 |
| 6 | 2 | Début-tâche n°4 | 61.6 | 40.4 | 1 | 9.05 | 0 |
| 7 | 2 | tâche n° 4- tâche n° 5 | 83.2 | 35.4 | 2 | 5.55 | 0 |
| 8 | 2 | tâche n° 5-Fin | 227.2 | 35.4 | 2 | 5.55 | 0 |

La solution correspondant à la première insertion présente le C_{max} minimal et le σ minimal dans l'ensemble des solutions. En plus d'avoir un Σmod_j égal à zéro, cette solution est considérée meilleure selon les trois critères : C_{max} , σ , Σmod_j elle ne va pas donc être supprimée de cet ensemble.

La solution qui correspond à la sixième insertion présente la $\Sigma w_j T_j$ minimale et ΣU_j minimale dans l'ensemble des solutions. Avec Σmod_j égal à zéro, cette solution est considérée meilleure selon les trois critères : $\Sigma w_j T_j$, ΣU_j , Σmod_j . Elle va donc être gardée dans l'ensemble des solutions initiales.

Dans cet ensemble de solutions, nous allons garder uniquement les deux solutions : n°1 et n°6. Le reste des solutions vont être supprimé car elles sont uniquement optimales selon au plus deux critères (le cas des solutions n°2 et n°3). La phase d'initialisation nous permet d'obtenir l'ensemble des solutions initiale présentée par le Tableau C.2.

Tableau C.2. Ensemble des solutions initiales

| <i>Planning N°</i> | <i>Numéro d'insertion</i> | $\Sigma w_j T_j$ | C_{max} | ΣU_j | σ | Σmod_j |
|--------------------|---------------------------|------------------|-----------|--------------|----------|----------------|
| 1 | 1 | 145.6 | 33.1 | 4 | 3.45 | 0 |
| 2 | 6 | 61.6 | 40.4 | 1 | 9.05 | 0 |

La phase d'initialisation terminée, nous passons à la phase d'amélioration.

C.2 Phase d'amélioration

La phase d'amélioration consiste à prendre une solution au hasard dans l'ensemble des solutions initiales et essayer de l'améliorer en effectuant une succession d'opérations de voisinage et de sauts. Si cette solution est améliorée, elle est ajoutée à l'ensemble des solutions initiales.

La comparaison entre solutions se fait de la même manière que la phase d'initialisation. Une solution **A** est meilleure qu'une autre solution **B** si la solution **A** est meilleure que la solution **B** dans au moins trois critères.

Dans notre exemple nous avons choisis la solution initiale correspondant à la sixième insertion. (Figure C.2).

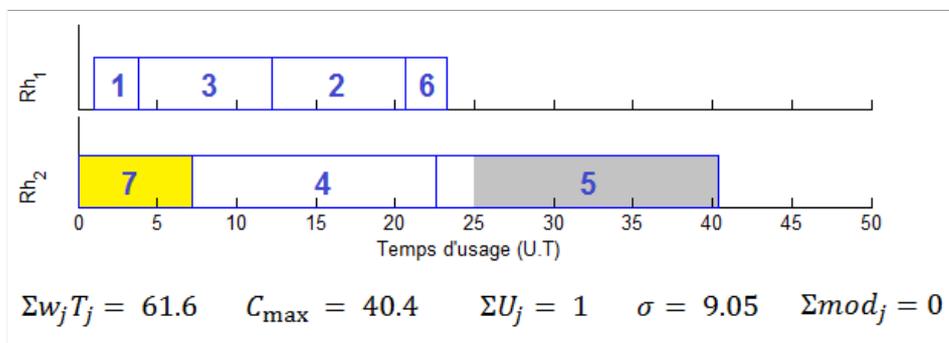


Figure C.2. Solution initiale candidate pour l'amélioration

Nous allons effectuer, dans un premier lieu, des opérations de voisinage en permutant la tâche n°3 et la tâche n°2 (Figure C.3).

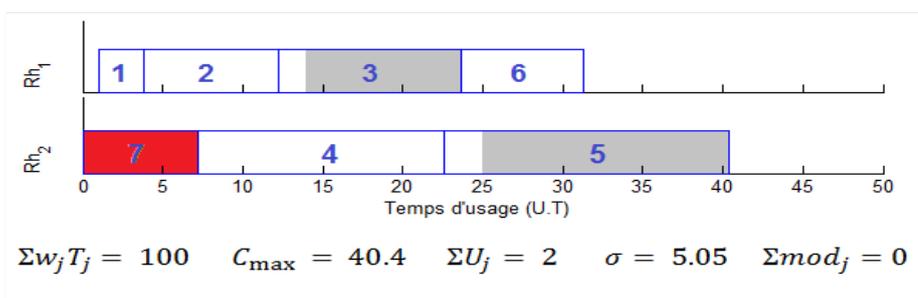


Figure C.3. Résultat de l'opération de voisinage entre la tâche n°2 et la tâche n°3

Cette opération semble infructueuse. La permutation entre les deux tâches n°4 et n°5 ainsi que la permutation entre les deux tâches n°2 et n°6 ne donnent pas de meilleures solutions, l'hypothèse de l'optimum local se présente. Nous devons donc faire des sauts afin de sortir de cet optimum local.

Dans l'opération de saut, nous effectuons la permutation entre les deux tâches n°2 et n°7 de l'ordonnancement de la Figure C.2. Le résultat de l'opération de saut est présenté à la Figure C.4.

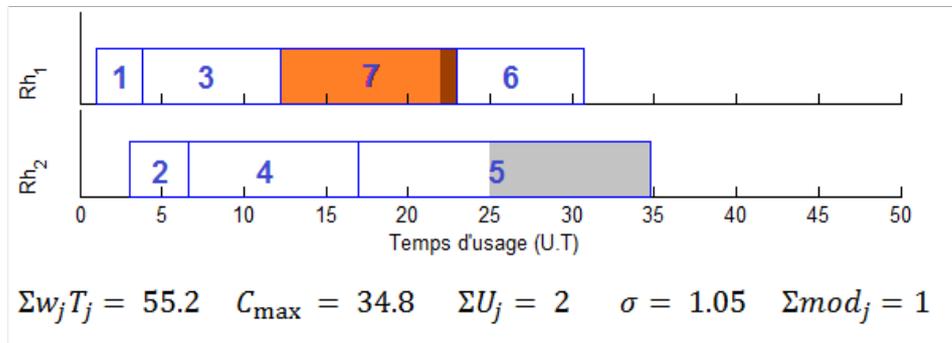


Figure C.4. Résultat de l'opération de saut entre la tâche n°2 et la tâche n°7

On améliore la solution de la Figure C.4. On effectue la permutation entre la tâche n°4 et la tâche n°2. Cette solution semble améliorée d'après les résultats de la Figure C.5. Elle va être donc comparée à l'ensemble des solutions du Tableau C.2.

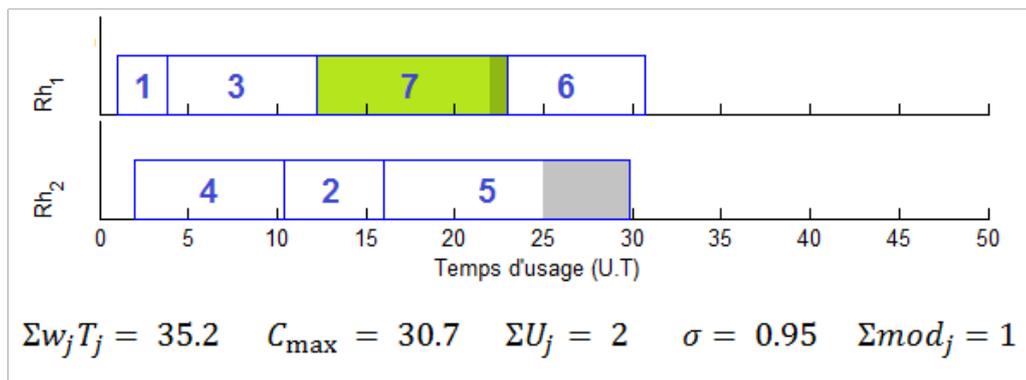


Figure C.5. Résultat de l'opération de voisinage entre la tâche n°2 et la tâche n°4

$\Sigma w_j T_j = 35.2$ $C_{\max} = 30.7$ $\Sigma U_j = 2$ $\sigma = 0.95$ $\Sigma mod_j = 1$

| N° planning | $\Sigma w_j T_j$ | C_{\max} | ΣU_j | σ | Σmod_j |
|-------------|------------------|------------|--------------|----------|----------------|
| 1 | 145.6 | 33.1 | 4 | 3.45 | 0 |
| 6 | 61.6 | 40.4 | 1 | 9.05 | 0 |

Figure C.6. Comparaison de la solution obtenue avec l'ensemble des solutions

La solution améliorée de la figure C.5 domine les deux solutions du tableau dans la figure C.6. La solution retenue est illustrée par la Figure C.7.

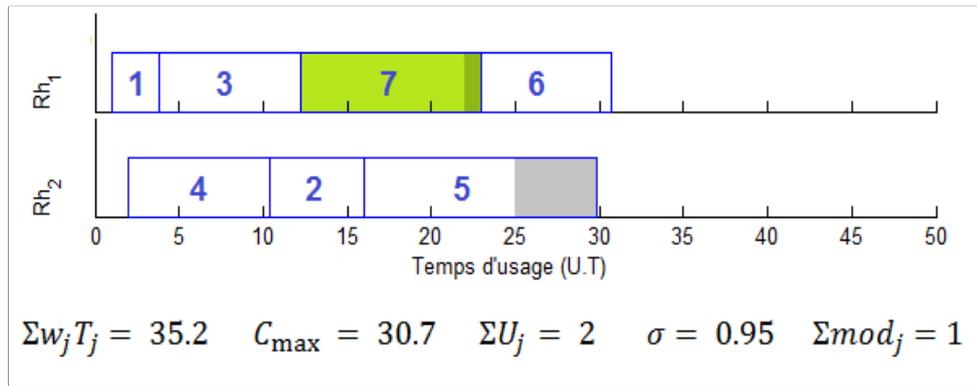


Figure C.7. Planning de la solution finale

Industrial Bearing Fault Detection Using Time-Frequency Analysis

Yasmina Bella

Electrical Engineering Department
Ferhat Abbas Setif 1 University
Setif, Algeria
b_yasmina2014@univ-setif.dz

Abdelhak Oulmane

Department of Mechanical Engineering
Polytechnic School of Montreal
Montreal, Canada
abdelhak.oulmane@polymtl.ca

Mohammed Mostefai

Electrical Engineering Department
Ferhat Abbas Setif 1 University
Setif, Algeria
mostefai@univ-setif.dz

Abstract—Time-frequency fault detection techniques were applied in this study, for monitoring real life industrial bearing. For this aim, an experimental test bench was developed to emulate the bearing rotating motion and to measure the induced vibration signals. Dedicated software was used to analyze the acquired measurements in the time-frequency domain using several distributions with varying resolution. Results showed that each fault type exhibits a specific behavior in the time-frequency domain, which is exploited in the localization of the faulty component.

Keywords—time-frequency domain; industrial bearing; nondestructive test; vibration analysis

I. INTRODUCTION

Enhancement of the production system dependability is a major issue faced by competitive industrial companies. In this context, the predictive maintenance can play a fundamental role in improving the production system reliability and economic efficiency. In fact, the predictive maintenance is a corrective action applied on the equipment, systems or installations based on the previous knowledge of the operation conditions or performances. Hence, using fault monitoring algorithms can provide real time information about the system health and allows a reliable maintenance decision-making tool [1]. In rotating machinery, the fault monitoring of the rolling element bearings (REBs) is of great practical interest. Actually, bearing damage causes 40% of the total amount of failures in an induction motor [2]. A comprehensive review of the recent advances of REBs monitoring techniques can be found in [3]. Current signature analysis method for the diagnosis of bearing faults forms an area of increasing scientific interest. The main idea beyond this technique is detecting faults based on the change of the stator current spectrum of the induction motor. This change causes a variation of the load and irregularities in the magnetic field. The latter affects the mutual and self-inductance and leads to side bands across the line frequency.

Despite the advantages of the current signature method, mechanical vibration signal analysis remains more immediate, simple and rich source of information for understanding the defected bearings (DBs) behavior [4]. Vibration signals acquired from bearings can be either stationary or non-stationary. The stationary signals are characterized by time-

invariant statistical properties (moments, densities etc.), however, the statistical properties of a non-stationary signal vary over time [5, 6]. In fact, bearing vibration signals are almost always non-stationary since they are inherently dynamic (e.g. speed and load condition change over time) [7]. Joint time-frequency analysis is an effective approach for addressing this issue, using signals which are presented in a time-frequency amplitude/energy density 3D space. Hence, both the constituent frequency components and their time variation properties can be detected [8-10]. Several time-frequency analysis methods are developed, e.g. short time Fourier transform [11], wavelet transform [12, 13], bilinear/quadratic time-frequency distributions including Cohen and affine classes distributions based on Wigner-Ville distribution [14-16]. In the same context, adaptive optimal kernel methods allow adaptive kernel modification and make the time-frequency distribution suitable for signal structures identification [17]. To suppress the cross-terms and improve time-frequency resolution, the reassignment method has been proposed in [18]. In order to deal with the non-linearity and non-Gaussianity of signals, time-varying higher order spectrum methods such as Wigner higher order spectrum were developed [19]. It is worth mentioning that most of the above mentioned time-frequency analysis methods have been applied to machinery fault diagnosis [20, 21]. In this paper, time-frequency vibration analysis method is used for fault detection of real world industrial bearings motivated by the promising results in induction motor condition monitoring field [22, 23]. For this aim, a bearing experimental test bench has been developed and the acquired vibration signals were examined using T-F ANALYSIS toolbox. The used approach consists of comparing several time-frequency bearing performances under different operation conditions.

II. NON-DESTRUCTIVE BEARING TESTING BASED ON TIME-FREQUENCY ANALYSIS

Vibration analysis is one of the most usual non-destructive methods utilized to evaluate the bearing conditions in an operating machine. Different bearing faults induce different patterns in the time-frequency plane. In this section we give the frequency values associated to each type of bearing element defect (cage, ball, inner and outer raceways). Thereafter, in order to overcome the drawbacks of the traditional spectral

analysis techniques, quadratic time-frequency distributions approaches are introduced. These techniques allow easier and more precise discrimination between defect and normal bearing. This section represents the theoretical background of the experimental study.

A. Bearings Fault Frequencies

The rolling surface damage is caused by fatigue because of the presence of high forces at the contact points. More specifically, vibrations are produced by the impacts that occur when the surface of one component strikes another surface. Industrial bearings exhibit special behavior in the frequency domain. In fact, as the inner or outer rings rotate, the balls moving over the running surface excite the bearing structure and cause vibrations. When the outer or the inner raceway, the cage or the balls are defected, the amplitude of the vibrations is amplified. By examining the frequency spectrum of a bearing vibrational signal, specific frequencies are amplified when a fault occurs. The bearing fault frequencies can be calculated using the formulas given in [19] as follows (see Figure 1):

$$f_{CF} = 1/2 f_R \left(1 - \frac{D_B \cos(\theta)}{D_P} \right) \tag{1a}$$

$$f_{BF} = \frac{D_P}{2D_B} \cdot f_r \left(1 - \frac{D_B^2 \cos^2(\theta)}{D_P^2} \right) \tag{1b}$$

$$f_{ORF} = \frac{N_B}{2} \cdot f_r \left(1 + \frac{D_B \cos(\theta)}{D_P} \right) \tag{1c}$$

$$f_{IRF} = \frac{N_B}{2} \cdot f_r \left(1 - \frac{D_B \cos(\theta)}{D_P} \right) \tag{1d}$$

where: f_{CF} is the cage fault frequency, f_{BF} the ball fault frequency, f_{ORF} the outer raceway fault frequency and f_{IRF} the inner raceway fault frequency.

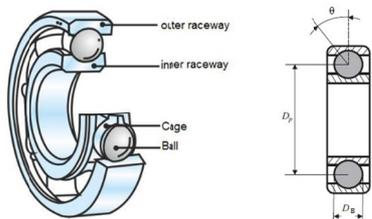


Fig. 1. Representation of ball bearing characteristics.

However, because of the bearing components sliding motion, the characteristic frequencies may be slightly different from their calculated values (1%-2%). Hence, fault isolation can be performed by comparing the measured characteristic frequency with the theoretical ones. The bearing deterioration not only increases the amplitude of the vibration frequencies but also generates harmonics associated to these frequencies caused by the amplitude modulation. The deterioration phenomenon can be recognized by an amplitude modulation equal to the shaft rotation frequency f_0 around the bearing defects frequencies [24].

B. Vibration Analysis Tools

A straightforward way to obtain the frequency spectrum of a time-varying signal $x(t)$ is to localize the signal by modulating it with a window function h [25], before

performing the short-time Fourier transform (STFT) to obtain the frequency content of the signal in the region of the window as follows:

$$F_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(u) h^*(u - t) e^{-2i\pi f u} du \tag{2}$$

where $*$ denotes the complex conjugate [3]. For the spectral representation around t , we simply move by translation window h and we perform a Fourier transformation on the windowed signal as well. However, the spectrogram of the signal $x(t)$ can be estimated by computing the squared magnitude of the STFT, as follows:

$$S_x(t, f) = |F_x(t, f)|^2 \tag{3}$$

On the other hand, time-frequency analysis includes the techniques that study a signal in both time and frequency domains simultaneously, using various time-frequency representations. For instance, the class of quadratic time-frequency distributions is considered the most appropriate method for the analysis and processing of non-stationary signals in many practical applications:

$$P_z(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} K(u, v, t, f) z(u) z^*(v) du dv = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} K^\wedge(u, v, t, f) Z(u) Z^*(v) du dv \tag{4}$$

where $z(u)$, $Z(f)$ are the studied signal and $K(u, v, t, f)$, $K^\wedge(u, v, t, f)$ are the transition kernels. A special class of time-frequency transformation is the Cohen class given by:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{2i\pi\xi(s-\tau)} f(\xi, \tau) z(s + \frac{\tau}{2}) z^*(s - \frac{\tau}{2}) e^{-2i\pi f t} d\xi d\tau dt \tag{5}$$

where $f(\xi, \tau)$ is the observation window verifying $f(\xi, \tau) = f(-\xi, -\tau)$. If the function $f(\xi, \tau)$ is independent of ξ and τ (for example $f(\xi, \tau) = 1$), we get the Wigner-Ville distribution given by (6):

$$W_z(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} z\left(t + \frac{u}{2}\right) z^*\left(t - \frac{u}{2}\right) e^{-2i\pi f u} du = \int_{-\infty}^{+\infty} Z\left(f + \frac{v}{2}\right) Z^*\left(f - \frac{v}{2}\right) e^{-2i\pi f v} dv \tag{6}$$

To reduce the oscillatory inferences of the Wigner-Ville distribution, we apply a separated smoothing in time and frequency using the following time-frequency window: $\varphi(t, f) = g(t)H(f)$. This distribution, known by the smoothed Wigner-Ville distribution, is given by (7):

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t_o, f_o) W_z(t - t_o, f - f_o) dt_o df_o \tag{7}$$

g and h are even and real windows with $h(0) = g(0) = 1$.

Another distribution that allows the minimization of the oscillatory interference effect is the Choi-Williams distribution. For this distribution, the function f has the following form:

$$f(\xi, \tau) = e^{-\frac{(\pi\xi\tau/\sigma)^2}{2}} \tag{8}$$

Hence, the Choi-Williams distribution is given by the following:

$$P(t, f) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sigma}{|\tau|} e^{-2\sigma^2(s-t)^2/\tau^2} z\left(s + \frac{\tau}{2}\right) z^*\left(s - \frac{\tau}{2}\right) e^{-2i\pi f t} ds d\tau \quad (9)$$

Actually, if we choose the kernel function as:

$$f(\psi, \tau) = \frac{\sin 2\pi a \tau \psi}{2\pi a \tau \psi} \quad (10)$$

where a is a constant. This distribution is called Born-Jordan distribution and has the following form:

$$P(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\frac{1}{2|a|\tau} \int_{t-a\tau}^{t+a\tau} z\left(s + \frac{\tau}{2}\right) z^*\left(s - \frac{\tau}{2}\right) ds \right] e^{-2i\pi f t} \quad (11)$$

We emphasize that each time-frequency distribution gives a different resolution quality which allows accurate analysis of the signal under study as illustrated below.

III. EXPERIMENTAL STUDY STEPS

A general description of the bearing structure is given and then the theoretical fault frequencies are calculated using the equations of the previous section. In order to take advantage of the developed theory, we launched several experiments in a dedicated experimental test bench. Finally, for making decisions about the faulty state, we evaluated the acquired vibration measurements using T-F ANALYSIS toolbox which offers a wide range of methods in time, frequency and time-frequency analysis. The advantages of signal analysis in the time-frequency domain are:

- It provides a representation of the signal in three dimensions (amplitude-time-frequency)
- It detects and follows the development of defects that generate a low vibration power.
- It supervises machines in which the normal operating process produces high amplitude of periodic shocks.

T-F ANALYSIS toolbox, also offers more applications in automatic classification of rotating machinery, image processing through usage of Fourier descriptors and neural networks.

A. Bearing Description and Theoretical Fault Frequencies Computation

We used the Pratt & Whitney PW100#5 bearing, this bearing is a single row ball model with radial contact (Figure 2). The technical specifications of bearing that we need to calculate the theoretical fault frequencies are taken from the data sheet provided by the constructor (Table I).

TABLE I. BEARING TECHNICAL SPECIFICATIONS

| P & W Bearing ID | PW100#5BRG roller bearing |
|-------------------|---------------------------|
| Inner diameter | 2.8347" 2.8350" |
| Outer diameter | 3.9292" 3.9272" |
| Pitch diameter | 3.04165" |
| Width | 0.625" 0.630" |
| Contact Angle | 0° |
| Operating speed 1 | 1000rpm |
| Operating speed 2 | 2000rpm |

PW100#5 bearing is used for the shaft of the gearbox. This bearing was collected from Bombardier Company and has been identified as one of the most problematic components.

Furthermore, the frequencies associated with the different bearing defects are calculated using (1a)-(1d) and are summarized in Table II where f_r is the bearing rotating frequency.

TABLE II. BEARING THEORETICAL FAULT FREQUENCIES

| f_r | f_{CF} | f_{ORF} | f_{IRF} | f_{BF} |
|---------|----------|-----------|-----------|----------|
| 16.66Hz | 7.64Hz | 108.32Hz | 91.71Hz | 99.54Hz |
| 33.33Hz | 15.28Hz | 216.64Hz | 183.42Hz | 199.08Hz |

B. Experimental Tests and Measurement Acquisition

Several tests on the bearing were carried out in the Mechanics Department Laboratory at the Ecole Polytechnique de Montreal. The test bench was designed at the laboratory of the applied mechanics section. The latter consists of the following elements: A rotor system consisting of a shaft supported at its ends by an assembly of two SKF bearings that is connected to a gearbox via a transmission belt system. The entire system is driven by a 2HP electric motor rated at 3600rpm and supported by a set of two 67lb/ft H-weighted beams each. The test bench is 1750mm long and 210mm wide (Table III). The test bench is designed to test typical defects in rotating machinery such as damaged bearings, mass imbalance and gears. All bearings are mounted on a clamping sleeve and can be easily disassembled. We have designed an internal and external clamping sleeve assembly to fit all Pratt & Whitney bearing sizes.



Fig. 2. Pratt & Whitney bearing considered for test.

TABLE III. TEST BENCH TECHNICAL SPECIFICATIONS

| Components | Specifications | Manufacturers |
|---------------|----------------------------|---------------|
| Base | 2 H-Beams W8x8 67lb/ft | Prometo |
| Motor | 2Hp, 3600rpm, 575Volts | Toshiba |
| Couplings | 7/8inch-linch | Rex Omega |
| Bearing House | SNL 510 – H310 – I210EKTN9 | SKF Canada |

Three accelerometers were used, A1, A2 and A3 (Figure 3) which were connected to a computer for data acquisition. The accelerometer A3 was positioned horizontally over the bearing for monitoring the bearing faults, A2 was positioned vertically on the side of the bearing for monitoring the shaft faults and A1 was positioned horizontally on the spindle for monitoring the motor and thus test equipment condition. We emphasize that only the data from A1 were analyzed, as we are conducting bearing fault diagnosis. The rest of sensors' information were used for equipment monitoring. The test bench can be disassembled in order to remove the shaft along with the old bearing (Figure 4, left). Then, as illustrated in the lower right

Figure 4, the new bearing is expanded by heating to 110°C in order to insure successful insertion into the shaft. Thereafter, the stretch bench is reassembled and carefully calibrated. The tests were carried out at two different rotational speeds (Sp1, Sp2) of 1000rpm and 2000rpm respectively (Table IV). The speed range was decided after the fact that the peak factor of the fault frequency reacts well over the range of rotation from 500rpm to 2200rpm [26]. At low and high-speed range, the signal is less marked, less amplified by the defect, i.e. for high-speed, the amplitude generated by the fault is not clearly distinguishable from the background noise and for low-speed no acceleration is generated. For high rotational speeds, due to excessive noise, there is an imminent risk of damaging the test bench.

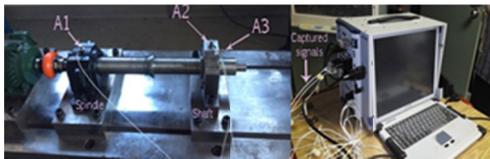


Fig. 3. Experimental test bench.



Fig. 4. Assembling and disassembling of the bearings from the bench.

TABLE IV. TEST SPEEDS

| | Rotating speed (rpm) | Rotating speed (Hz) |
|-----|----------------------|---------------------|
| Sp1 | 1000 | 16.66 |
| Sp2 | 2000 | 33.33 |

Experimental results are presented in a chronological order without taking into consideration the times of acceleration and deceleration i.e. we only deal with the following time intervals: t1a-t1b and t2a-t2b (Figure 5). The acceleration measurements are acquired using NI PMA61115 Portable Monitor and then processed using TF-ANALYSIS software.

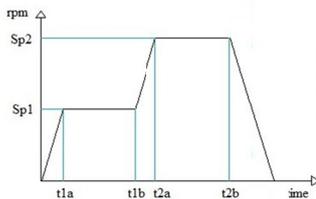


Fig. 5. Speed diagram for PW100#5

For fault diagnosis purposes, only three parameters were considered: sampling frequency, time window length and

frequency window length. It was essential to find a trade-off between time and frequency resolution because if the precision is obtained in the time domain then it is lost in the frequency domain and vice versa. Hence, in order to obtain the best possible resolution for a particular case a manual trial method was applied under the condition that both time and frequency window lengths need to satisfy the equation $2n-1$, where n is a positive integer [3].

C. Discussion and Validation of Results

For different rotational speed values, the graphs of different distributions obtained by the time-frequency method are analyzed. By adjusting the software parameters for different distributions of Choi-Williams and Born-Jordan one seeks a better resolution of the signal.

1) Measurement Results for Time-Period t1a-t1b (Sp1)

From Figures 6 and 7, the distribution of Choi-Williams presents a better resolution compared to the Born-Jordan distribution. The signal modulation indicates the presence of non-stationary signal. The latter confirms the presence of defects in bearing. The signal spectrum graph (Figure 8) shows a frequency peak, which corresponds to the value of 91Hz. From the spectrum graph, we notice that the peak frequency is almost equal to the inner raceway calculated fault frequency f_{IRF} value, which has a value of 91.71Hz (Table II).

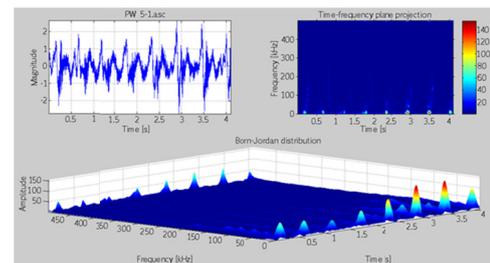


Fig. 6. Born-Jordan distribution for speed of 1000rpm.

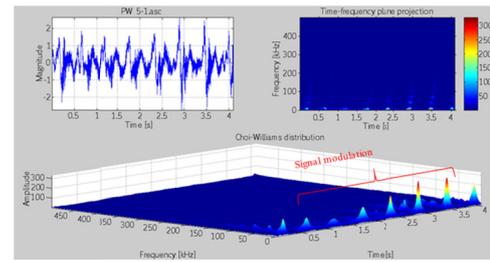


Fig. 7. Choi-Williams distribution for speed of 1000rpm.

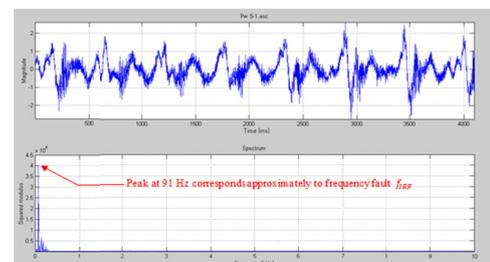


Fig. 8. Spectrum frequency analysis for speed of 1000rpm.

2) Measurement results for Time-Period t2a-t2b (Sp2)

For this time-period, the rotation speed is doubled to the value of 2000rpm (Sp2). According to the Born-Jordan and Choi-Williams distribution graphs (Figures 9 and 10), we note that the modulation number has almost doubled. These modulations are present at low frequency, which confirms the presence of defects. As in Sp1, the peak frequency of 183Hz from the spectrum (Figure 11) corresponds approximately to the fault frequency f_{IRF} (Table II), which equals to 183.42Hz. We noticed that for different rotating speeds, the time-frequency transformations indicate the apparition of f_{IRF} frequency fault. To validate the obtained results we calculate the percentage of relative error between the theoretical value and the experimental value of fault frequency ($\% \Delta f_{IRF}$) which is calculated by (12):

$$\% \Delta f_{IRF} = \frac{|(f_{IRF})_{\text{experimental}} - (f_{IRF})_{\text{theoretical}}|}{(f_{IRF})_{\text{theoretical}}} \times 100 \quad (12)$$

The experimental fault frequency $f_{IRF}^{\text{experimental}}$ for rotating speeds of 1000rpm and 2000rpm is 0.77% and 0.23% less than the theoretically fault frequency respectively (Table V).

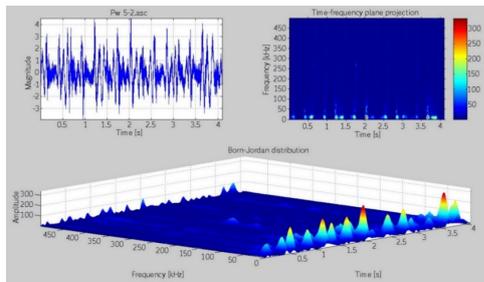


Fig. 9. Born-Jordan distribution for speed of 2000rpm.

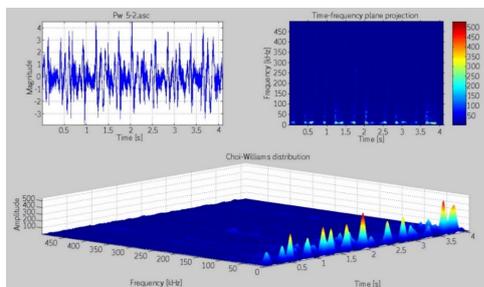


Fig. 10. Choi-Williams distribution for speed of 2000rpm.

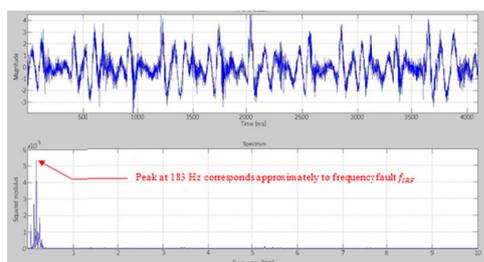


Fig. 11. Spectrum frequency analysis for speed of 2000rpm.

The validity of the measurements is demonstrated by the small difference between the theoretical and measured fault

frequencies, which is less than 1% ($\% \Delta f_{IRF} < 1\%$).

TABLE V. SUMMARY TABLE FOR THE MEASUREMENT ERROR.

| Rotating speed fr | Theoretical f_{IRF} | Experimental f_{IRF} | Relative error $\% \Delta f_{IRF}$ |
|----------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------------------|
| 1000rpm | 91.71 Hz | 91 Hz | 0.77% |
| 2000rpm | 183.42 Hz | 183 Hz | 0.23% |

IV. CONCLUSION

In this paper, a time-frequency domain fault detection and isolation method was applied for industrial bearing. The obtained results are valid in relation to the theoretically calculated results. The difference of the experimentally obtained results and the theoretical ones is less than 1%. This shows the effectiveness of the used technique in extracting important information about the bearing health from the vibration measurements. Further directions of this work will include the study of fault severity and real time bearing monitoring which provides important information for a wide spectrum of critical applications such as aeronautic and transportation. In fact, real time detection facilitates making decisions (system stop, curative maintenance, predictive maintenance, and control law reconfiguration) in order to avoid human and material disasters.

REFERENCES

- [1] E. L. Bonaldi, G. Lambert-Torres, J. G. B. da Silva, L. E. de Lacerda de Oliveira, L. E. B. da Silva, "Predictive maintenance by electrical signature analysis to induction motors", available at: <http://dx.doi.org/10.5772/48045>, INTECH Open Access Publisher, 2012
- [2] S. Patidar, P. Kumar Soni, "An overview on vibration analysis techniques for the diagnosis of rolling element bearing faults", International Journal of Engineering Trends and Technology, Vol. 4, No. 5, pp. 1803-1809, 2013
- [3] S. Nandi, H. A. Toliyat, X. Li, "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors-a review", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No. 4, pp. 719-729, 2005
- [4] S. Choi, B. Akin, M. M. Rahimian, H. A. Toliyat, "Implementation of a fault-diagnosis algorithm for induction machines based on advanced digital-signal-processing techniques", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, No. 3, pp. 937-948, 2011
- [5] F. E. H. Montero, O. C. Medina, "The application of bispectrum on diagnosis of rolling element bearings: A theoretical approach", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 22, No. 3, pp. 588-596, 2008
- [6] S. Guoji, S. McLaughlin, X. Yongcheng, P. White, "Theoretical and experimental analysis of bispectrum of vibration signals for fault diagnosis of gears", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 43, No. 1, pp. 76-89, 2014
- [7] C. Li, V. Sanchez, G. Zurita, M. C. Lozada, D. Cabrera, "Rolling element bearing defect detection using the generalized synchrosqueezing transform guided by time-frequency ridge enhancement", ISA Transactions, Vol. 60, pp. 274-184, 2015
- [8] L. Cohen, Time-Frequency Analysis, Prentice Hall, 1995
- [9] S. Qian, D. Chen, Joint Time-Frequency Analysis, Prentice Hall, 1996
- [10] P. Flandrin, Time-Frequency/Time-Scale Analysis, Academic press, 1998
- [11] A. Prudhom, J. Antonino-Daviu, H. Razik, V. Climente-Alarcon, "Time-frequency vibration analysis for the detection of motor damages caused by bearing currents", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 84, No. A, pp. 747-762, 2015

-
- [12] J. Chen, J. Pan, Z. Li, Y. Zi, X. Chen, "Generator bearing fault diagnosis for wind turbine via empirical wavelet transform using measured vibration signals", *Renewable Energy*, Vol. 89, pp. 80-92, 2016
- [13] N. Hess-Nielsen, M. V. Wickerhauser, "Wavelets and time-frequency analysis", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 84, No. 4, pp.523-540, 1996
- [14] L. Cohen, "Time-frequency distributions-a review", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 77, No. 7, pp. 941-981, 1989
- [15] O. Rioul, P. Flandrin, "Time-scale energy distributions: A general class extending wavelet transforms", *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 40, No. 7, pp. 1746-1757, 1992
- [16] P. Flandrin, P. Goncalves, "Geometry of affine time-frequency distributions", *Applied and Computational Harmonic Analysis*, Vol. 3, No. 1, pp. 10-39, 1996
- [17] A. Bermanis, G. Wolf, A. Averbuch, "Diffusion-based kernel methods on euclidean metric measure spaces", *Applied and Computational Harmonic Analysis*, Vol. 41, No. 1, pp. 190-213, 2016
- [18] L. Gelman, I. Petrunin, J. Komoda, "The new chirp-wigner higher order spectra for transient signals with any known nonlinear frequency variation", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 24, No. 2, pp. 567-571, 2010
- [19] L. Saidi, F. Fnaiech, H. Henaou, G. A. Capolino, G. Cirrincione, "Diagnosis of broken-bars fault in induction machines using higher order spectral analysis", *ISA Transactions*, Vol. 52, No. 1, pp. 140-148, 2013
- [20] Z. Feng, M. Liang, F. Chu, "Recent advances in time-frequency analysis methods for machinery fault diagnosis: a review with application examples", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 38, No. 1, pp. 165-205, 2013
- [21] A. Rai, S. H. Upadhyay, "A review on signal processing techniques utilized in the fault diagnosis of rolling element bearings", *Tribology International*, Vol. 96, pp. 289-306, 2016
- [22] C. Yang, T. J. Kang, D. Hyun, S. B. Lee, J. A. Antonino-Daviu, J. Pons-Llinares, "Reliable detection of induction motor rotor faults under the rotor axial air duct influence", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 50, No. 4, pp. 2493-2502, 2014
- [23] J. A. Antonino-Daviu, V. Climente-Alarcon, J. Pons-Llinares, E. J. Wiedenbrug, "Advanced rotor assessment of motors operating under variable load conditions in mining facilities", 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Pittsburgh, USA, pp. 617-621, November 13, 2014
- [24] M. Thomas, *Fiabilite, Maintenance Predictive et Vibration des Machines*, PUQ, 2012 (in French)
- [25] B. Boashash, *Time-Frequency Signal Analysis and Processing: A Comprehensive Reference*, Academic Press, 2015
- [26] C. Migeon, *Emission Acoustique et Analyse Vibratoire Pour l' Etude des Defauts de Roulements pour Differents Regimes Moteurs*, MSc Thesis, Universite de Reims Champagne-Ardenne, 2011 (in French)

Résumé :

De nos jours les évolutions technologiques et le contexte économique actuel ont provoqué d'importants changements dans les systèmes de gestion de maintenance, le choix de ses éléments structurels n'est pas indépendant de son environnement. Parallèlement aux évolutions technologiques, l'organisation spatiale et distribuée de la maintenance a été également développée. Dans ce contexte nous avons proposé un système de gestion de maintenance appliqué à une unité de production constituée de plusieurs sites distribués géographiquement. Pour avoir des installations bien entretenues et fiables, capables de réaliser des estimations plus rapides et plus fiables, un programme de maintenance bien conçu est obligatoire. Pour ce faire, nous avons appliqué une action de maintenance prédictive mise en œuvre en CBM. Une méthode de détection et d'isolation de défaut dans le domaine temps-fréquence sur un roulement industriel est appliquée. Les résultats expérimentaux obtenus sont validés par rapport aux résultats calculés théoriquement. Les tâches de maintenance prédictives générées sont requises par des événements aléatoires, l'affectation de ces tâches se fait à des ressources ayant des niveaux de compétences différents. Le problème est réduit à un problème d'ordonnancement dynamique à ressources parallèles indépendantes ce problème est résolu en appliquant des heuristiques de recherche par voisinage basé sur un algorithme de descente amélioré. Afin de montrer l'efficacité de notre système de gestion et comme notre système répond bien aux normes de la conception orienté objet (COO), nous avons développé un modèle orienté objet avec le langage UML. Une simulation ainsi qu'une validation du système de gestion de maintenance est effectuée.

Mots clés : maintenance, système distribué, optimisation, CBM, UML.

Abstract :

Nowadays technological developments and the current economic context have brought about important changes in the maintenance management systems, the choice of its structural elements is not independent of its environment. In parallel with technological developments, the spatial and distributed organization of maintenance has also been developed. In this context, we have proposed a maintenance management system applied to a production unit consisting of several geographically distributed sites. To have well-maintained and reliable facilities capable of making estimates faster and more reliable, a well-designed maintenance program is required. To do this, we applied a predictive maintenance action implemented in CBM. A fault detection and isolation method in the time-frequency domain on an industrial bearing is applied. The experimental results obtained are validated with respect to the results calculated theoretically. The generated predictive maintenance tasks are required by random events, assigning these tasks to resources with different skill levels. This problem is reduced to a dynamic scheduling problem with independent parallel resources this problem is solved by applying neighborhood search heuristics based on an improved descent algorithm. In order to show the efficiency of our management system and as our system meets the standards of object-oriented design (COO), we have developed an object-oriented model with the UML language. Simulation and validation of the maintenance management system is performed.

Keywords: maintenance, distributed system, optimization, CBM, UML.

المخلص:

في الوقت الحاضر، أحدثت التطورات التكنولوجية والسياق الاقتصادي الحالي تغييرات مهمة في أنظمة إدارة الصيانة، واختيار عناصرها الهيكلية ليس مستقلاً عن بيئتها. بالتوازي مع التطورات التكنولوجية، تم تطوير التنظيم المكاني والموزع للصيانة. في هذا السياق، اقترحنا نظاماً لإدارة الصيانة مطبقاً على وحدة إنتاج مؤلفة من عدة مواقع موزعة جغرافياً. للحصول على مرافق جيدة الصيانة وموثوقة قادرة على جعل التقديرات أسرع وأكثر موثوقية، يلزم وجود برنامج صيانة مصمم جيداً. للقيام بذلك، قمنا بتطبيق إجراء صيانة تنبئي. يتم تطبيق طريقة الكشف عن الأخطاء وعزلها في مجال التردد الزمني على المحمل الصناعي. يتم التحقق من صحة النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها باستخدام النتائج المحسوبة نظرياً. مهام الصيانة التنبؤية التي تم إنشاؤها مطلوبة بواسطة أحداث عشوائية. يتم تعيين هذه المهام إلى موارد بمستويات مهارة مختلفة. المشكلة مماثلة لموارد موازية مستقلة. يتم حل هذه المشكلة عن طريق تطبيق استدلال البحث الحي على أساس خوارزمية النسب المحسنة. لإظهار كفاءة نظام الإدارة الخاص بنا وبما أن نظامنا يفي بمعايير التصميم الموجه للكائنات، فقد قمنا بتطوير نموذج موجه للكائنات. يتم إجراء محاكاة وكذلك التحقق من صحة نظام إدارة الصيانة.

الكلمات الرئيسية : الصيانة، النظام الموزع، التجميع، CBM، UML.