

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Ecole Nationale Polytechnique
Département de Génie Industriel
General Electric

Mémoire de Projet de Fin d'Études
pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en management industriel

Contribution à l'amélioration de la fonction maintenance Application : General Electric

Présenté par
SAADOUNE Nawel

Présenté et soutenu publiquement le **18/06/2017**

Composition du Jury :

Président	M .	BENHASSINE	ENP
Rapporteurs	M .	BOUKABOUS	ENP
	M .	BOURENANE	GE
Examineur	Mme.	BOUKADOUM	ENP

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Ecole Nationale Polytechnique
Département de Génie Industriel
General Electric

Mémoire de Projet de Fin d'Études
pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en management industriel

Contribution à l'amélioration de la fonction maintenance Application : General Electric

Présenté par
SAADOUNE Nawel

Présenté et soutenu publiquement le **18/06/2017**

Composition du Jury :

Président	M .	BENHASSINE	ENP
Rapporteurs	M .	BOUKABOUS	ENP
	M .	BOURENANE	GE
Examineur	Mme.	BOUKADOUM	ENP

Remerciements

Nous tenons à remercier sincèrement M. Boukabous en tant que Directeur de ce mémoire pour ses précieux conseils, et pour son soutien tout au long de ce parcours.

Nous remercions aussi M. Bourernane, notre co-Directeur, qui s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi que pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer.

Nous tenons également à remercier Mme Noual et Mme Khemmar pour leur soutien apporté tout au long de ce projet.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant de l'examiner et de l'enrichir par leurs suggestions.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

ملخص

الهدف من هذه الدراسة يتمثل في تحسين نظام تسيير الصيانة على مستوى شركة جنرال الكتريك. لهذا الغرض، قمنا بتشخيص وظيفة الصيانة بعد دراسة مفصلة للوضع الحالية، هذا التشخيص سمح لنا باقتراح جملة من التحسينات أبرزها كان إنشاء مخطط غانت لترتيب و مراقبة تدخلات الصيانة

كلمات مفتاحية : الصيانة الوقائية، التشخيص، الترتيب، مؤشرات فعالية الأداء، توفر المعدات

ABSTRACT

The aim of this study consists in contributing to the improvement of the maintenance function management at General Electric company.

With this intention, we carried out a diagnosis of the maintenance function after a detailed study of the existing system, which enabled us to identify areas for improvement. Among these, we established a GANTT chart for scheduling and monitoring the maintenance interventions.

Keywords : *Preventive maintenance, diagnosis, scheduling, Performance indicators, tooling availability.*

Résumé

L'objectif de cette étude consiste à contribuer à l'amélioration de la gestion de la fonction maintenance au niveau de l'entreprise General Electric.

Pour ce faire, nous avons mené un diagnostic de la fonction maintenance après une étude détaillée de l'existant, lequel nous a permis de dégager des axes d'améliorations. Parmi ceux-ci, nous avons élaboré un diagramme de GANTT pour l'ordonnancement et le suivi des interventions de maintenance.

Mots-clés : *maintenance préventive, diagnostic, ordonnancement, indicateurs de performance, disponibilité de l'outillage.*

Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction Générale	10
1 Présentation de l'entreprise & Problématique	12
Introduction	12
1.1 Aperçu général sur General Electric	12
1.1.1 Présentation du conglomérat General Electric	12
1.1.2 Historique	12
1.1.3 Domaines d'activités	12
1.2 General Electric en Algérie	13
1.2.1 Les Produits de GE Power en Algérie :	15
1.2.2 Différents types de contrat de maintenance GE	16
1.3 Positionnement du problème	17
Conclusion	18
2 La maintenance : Principaux concepts	19
Introduction	19
2.1 Aperçu sur la maintenance	19
2.2 La fonction maintenance au sein de l'entreprise	19
2.3 Les missions principales de service maintenance	20
2.4 Les objectifs de la maintenance	20
2.5 Les fonctions du service maintenance	22
2.6 Enjeu économique de la maintenance	22
2.7 Types de maintenance	23
2.7.1 La maintenance corrective	23
2.7.2 La maintenance préventive	23
2.7.3 La maintenance améliorative	24
2.8 Niveaux de la maintenance	24
2.9 La logistique de maintenance	26
2.9.1 Les clés de la logistique de maintenance	26
2.10 Le choix de politique de maintenance d'un matériel	27
Conclusion	27
3 L'ordonnancement : Principaux Concepts	28
Introduction	28
3.1 Définitions de l'ordonnancement de la maintenance	28
3.2 Éléments de base d'un problème d'ordonnancement de maintenance	28

3.2.1	Tâches de maintenance	28
3.2.2	Les opérations	29
3.2.3	Les ressources	29
3.2.4	Les contraintes	30
3.3	Les objectifs et les critères d'un problème d'ordonnancement	30
3.4	Modélisation de l'ordonnancement de la maintenance	31
3.5	Les niveaux hiérarchiques	31
3.5.1	Niveau stratégique : Établir la politique de maintenance	31
3.5.2	Niveau tactique : Définir le plan de maintenance tactique	32
3.5.3	Niveau opérationnel : Définir le plan de maintenance opérationnel	32
3.6	Les objectifs de l'ordonnancement de la maintenance	32
	Conclusion	33
4	Étude de l'existant : Étude de la fonction maintenance au sein de GE	35
	Introduction	35
4.1	Les types de maintenance appliqués aux TM2500+	35
4.1.1	Entretien selon état	36
4.2	Analyse des processus de maintenance	40
4.2.1	Proposition d'une représentation des processus de maintenance	40
4.2.2	Cartographie relationnelle	40
4.2.3	Cartographie détaillée	41
4.3	Analyse de la fonction maintenance	43
4.3.1	Étude du système organisationnel	43
4.3.2	Étude des équipements et méthodes	45
4.3.3	Les moyens humains	45
4.3.4	Analyse du flux informationnel	45
4.3.5	Diagnostic	45
4.3.6	Collecte d'informations	46
4.3.7	Les analyses des résultats	46
	Conclusion	47
5	Suggestions pour l'amélioration de la fonction maintenance	48
	Introduction	48
5.1	Les axes d'amélioration	48
5.1.1	Axe 1 - Ordonnancement des travaux de maintenance	48
5.1.2	Axe 2 - Préparation des travaux de maintenance	48
5.1.3	Axe 3 - Gestion et tenue des pièces de rechange et outillage	49
5.1.4	Axe 4 - La mise en place d'un tableau de bord pour la gestion de maintenance	49
5.1.5	Axe 5 - Constitution d'un dossier historique	50
5.2	Ordonnancement des tâches de maintenance	51
5.2.1	La démarche d'ordonnancement	51
5.2.2	Le diagramme de Gantt	51
5.2.3	Établissement d'une liste des tâches	53
5.2.4	Détermination des antériorités	53
5.2.5	Estimation des durées d'exécution des tâches	53
5.2.6	Construction du diagramme Gantt	53
5.2.7	Exploitation du diagramme	53
	Conclusion	54
	Conclusion Générale	55

Appendices	56
A Description de la remorque principale de la turbine à gaz LM2500+	57
A.1 Remorque principale	57
A.1.1 Système de ventilation et de combustion	57
A.1.2 Échappement de la turbine	57
A.1.3 Système d'huile de lubrification de la turbine	57
A.1.4 Patin d'huile de lubrification du générateur	57
A.2 Aperçu générateur	57
B Description des dispositifs auxiliaires	59
B.1 Système huile de lubrification	59
B.2 Système air de refroidissement et étanchéité	60
C Special Tooling	61
D Consumable Materials	64
E Listes des taches de maintenance et leurs durées	66
F Quelques taches de l'opération Engine Exchange	71
Bibliographie	71

Table des figures

1.1	Les activités de General Electric	14
1.2	Turbine à Gaz Aérodérivatives LM2500+	16
2.1	Les activités de la fonction maintenance.	20
2.2	Types de maintenance	25
3.1	Modélisation du coût d'une tâche de maintenance.	29
3.2	Structure hiérarchique des objectifs de l'ordonnancement de la maintenance. . .	34
4.1	La répartition des turbine LM2500+ sur le territoire national	36
4.2	Cartographie de l'échange modulaire de la partie chaude	39
4.3	Cartographie relationnelle de l'intervention de maintenance des turbines LM2500+	40
4.4	Cartographie générique de l'intervention de maintenance des turbines LM2500+	41
4.5	Représentation des composantes du service maintenance	43
4.6	L'organisation hiérarchique du service maintenance	44
5.1	Le diagramme de Gantt	52

Liste des tableaux

1.1	Quelques dates clés	13
2.1	Les ressources nécessaires pour chaque niveau de maintenance.	26
4.1	Les niveaux de maintenance préventive systémique des TM2500+	37
5.1	Le tableau de bord de la gestion du service maintenance	50

Liste des abréviations

AFNOR :	Association Française de Normalisation
ALGESCO :	Algerian Engineering Services Company
CMT :	Contrat de maintenance transactionnel
CPM :	Customer Performance Manager
CSA :	Contractual Service Agreement
DJIA :	Dow Jones Industrial Average
EE :	Engine Exchange
FE :	Field Engineer
GDPR :	Gestion des pièces de rechange
GE :	General Electric
GPS :	GE Power Services
HS :	Hot Section
HSE :	Hot Section Exchange
LTA :	Lead Technical Advisor
MMP :	Multi-Year Maintenance Plan
O&M :	Operation & Maintenance
SM :	Site Manager
SNTF :	Société Nationale des Transports Ferroviaires
TG :	Turbine à Gaz
TV :	Turbine à Vapeur

Introduction générale

Les entreprises industrielles disposent d'équipements et d'installations de plus en plus complexes, performants et très coûteux, dont l'efficacité est capitale pour le maintien de la production en quantité et en qualité tout en respectant les délais.

La réduction des coûts d'exploitation et la maîtrise de la disponibilité des équipements, donnent à la maintenance des systèmes un rôle prépondérant dans les activités de production. Les concepts de la maintenance définissent des précédés pour maximiser la performance globale des équipements de l'entreprise.

Un système de maintenance adéquat au système de production d'une entreprise doit à la fois satisfaire les critères techniques, maximiser l'impact stratégique et optimiser les critères économiques.

La volonté de General Electric de maintenir sa place de leader en fourniture et maintenance des turbines industrielles sur le marché Algérien lui a permis d'adopter une politique d'innovation stratégique à travers l'installation de nouvelles turbines à gaz dans les centrales électriques algériennes, d'une part, et de se lancer dans une démarche d'amélioration et de perfectionnement de son organisation actuelle, d'autre part.

C'est dans ce cadre que s'inscrit l'idée de cette étude permettant au responsables de la fonction maintenance de GE de bien concevoir son système en lui offrant des outils qui l'aideront à prendre des décisions appropriées quant à la gestion des processus de maintenance et des ressources à travers l'amélioration du système de gestion de maintenance.

Pour ce faire, et sous la demande de l'entreprise, notre projet de fin d'étude a été effectué afin de contribuer à l'amélioration du service maintenance des turbines à gaz aerodérivatives.

L'idée de ce projet s'inscrit dans une démarche d'amélioration des procédures de gestion de la fonction maintenance et de suivi des opérations sur site. Son objectif est d'offrir aux responsables de la maintenance de GE des méthodes qui les aideront à prendre des décisions de gestion à travers des suggestions d'amélioration du service et une démarche d'ordonnement des tâches de maintenance afin de réduire la durée totale des opérations.

Nous avons hiérarchisé ce travail comme suit :

Le premier chapitre porte sur la présentation de l'entreprise General Electric avec ses différentes structures. Ceci nous a permis de bien cerner l'environnement dans lequel évolue le projet ainsi que de mesurer l'ampleur du rôle qu'il joue au sein de l'entreprise. C'est aussi dans ce chapitre que la problématique de notre étude est posée.

Le deuxième chapitre donne un aperçu de la maintenance, et explique le rôle qu'elle occupe au sein de l'entreprise, ses missions principales, ses objectifs ainsi que les différents types et niveaux sous lesquelles elle peut exister dans une entreprise.

Le troisième chapitre présente des concepts liés à l'ordonnement de la maintenance, on y retrouve des notions relatives aux objectifs et critères d'un problème d'ordonnement,

d'une part, et à la modélisation de l'ordonnancement de la maintenance, d'autre part.

Le quatrième chapitre présente une étude détaillée du système dans le but de refléter la situation actuelle de gestion de la maintenance au sein de GE, et sera achevé par un diagnostic dans lequel nous présenterons tous les points à améliorer du service qui feront l'objet du chapitre qui suit.

Le cinquième chapitre constitue le volet d'amélioration où un ensemble d'action d'amélioration est proposé. Sur la base de ces axes, nous avons réalisé un Gantt chart pour l'ordonnancement et le suivi des tâches de maintenance.

Nous cloturons notre travail par une conclusion générale qui constitue la synthèse de notre projet.

Chapitre 1

Présentation de l'entreprise & Problématique

Introduction

Dans ce premier chapitre, nous allons présenter le conglomérat General Electric, ses domaines d'activités, ses différents produits et types de contrats disponibles sur le marché algérien, ce qui nous permet par la suite de cerner la problématique traitée dans ce mémoire.

1.1 Aperçu général sur General Electric

1.1.1 Présentation du conglomérat General Electric

General Electric est un groupe américain d'entreprises aux activités diverses et non liées (36 filiale dans environ 142 pays) qui fut fondé en 1892 suite à la fusion de l'Edison General Electric Company et de The Thomson-Houston Electric Company. Elle forma 4 ans plus tard (1896), avec 12 autres compagnies le DJIA (Dow Jones Industrial Average) dont elle est la seule à subsister encore aujourd'hui. Elle constitue ainsi une valeur symbole de la principale plate-forme d'échange de la bourse de New York.

Ce groupe est organisé autour de 4 pôles d'activités :

- Prestations de services financiers pour entreprises et particuliers.
- Fabrication d'équipements d'infrastructures tels que des moteurs d'avions et des turbines à gaz.
- Fabrication d'équipements domestiques et industriels comme des appareils électroménagers ou des capteurs de gaz, de température et de pression.
- Fabrication d'équipements médicaux (systèmes d'imagerie, de navigation chirurgicale, etc.)

1.1.2 Historique

Au cours des années, General Electric a su comment se développer et grandir pour devenir une référence dans plusieurs domaines d'activités. Son cheminement fut marqué par plusieurs grandes dates, dont les plus importantes sont les suivantes :

1.1.3 Domaines d'activités

Le conglomérat Américain totalise pour l'année 2016 plus de 140 milliards USD de chiffre d'affaire et emploie près de 310.000 personnes réparties dans divers domaines dont les

Tableau 1.1 – Quelques dates clés

1889	Thomas Edison rassemble ses différentes activités en un seul corps et crée l'Edison General Electric Company.
1892	Union de The Thomson-Houston Electric Company et d'Edison General Electric Company et Création de la General Electric Company.
1895	Remplacement des trains à vapeur par les trains électriques.
1903	Installation de la plus grande turbine à vapeur 5000 KWH mono-arbre.
1929	Mise en place de la plus importante unité de production d'électricité à Hammond.
1956	General Electric est l'un des principaux constructeurs d'ordinateurs.
1957	Développement de J93, le premier moteur à fonctionner à trois fois la vitesse du son, alimentant le bombardier expérimental de l'USAF XB-70.
1999	Rachat du département Turbines à gaz d'Alstom (qui était sous licence GE).
2005	Investissement dans la recherche sur l'environnement.
2013	Rachat de Lufkin Industries (entreprise spécialisée dans les transmissions et le pompage pour l'industrie pétrolière et gazière).
2015	Création d'une nouvelle branche nommée GE Digital regroupant les activités liées au numérique et au logiciel.
2017	Rachat de GE Water par Suez.

principaux sont :

GE Energy Infrastructure : Ensemble de sociétés qui s'intéressent à la recherche et l'exploitation des ressources naturelles (pôle GE Power regroupant G.E Energy et GE Process Technology, pôle GE Oil & Gas, pôle GE Energy Services).

GE Renewable Energy : Propose des solutions d'exploitation des énergies renouvelables éoliennes et hydroélectrique.

G.E Technology Infrastructure : Ensemble de sociétés de développement et d'offre de produits et services dans le secteur de la santé (GE HealthCare), celui du transport (GE Transportation et GE Aviation) et dans le domaine des hautes technologies.

GE Energy Connections and Lighting : Assure la conversion, l'automatisation et l'optimisation de l'énergie en vue d'une alimentation électrique grand public.

GE Capital : Fournit des produits et des services financiers pour les clients et les marchés alignés avec les entreprises industrielles de GE.

La figure 1.1 illustre toutes les activités de GE :

1.2 General Electric en Algérie

La multinationale collabore depuis longtemps avec l'Algérie dans trois secteurs : celui de la santé, du transport ainsi que de l'exploitation et la gestion des ressources naturelles et ce à travers les cinq businesses suivants : [?]

Aviation :

GE Aviation a fourni Air Algérie pendant 25 ans et a équipé l'équivalent de 70% des avions en moteurs évolués et développés par l'entreprise et ses partenaires. Elle assiste également une filiale commune d'Air Algérie et de Sonatrach : Tassili Airlines.

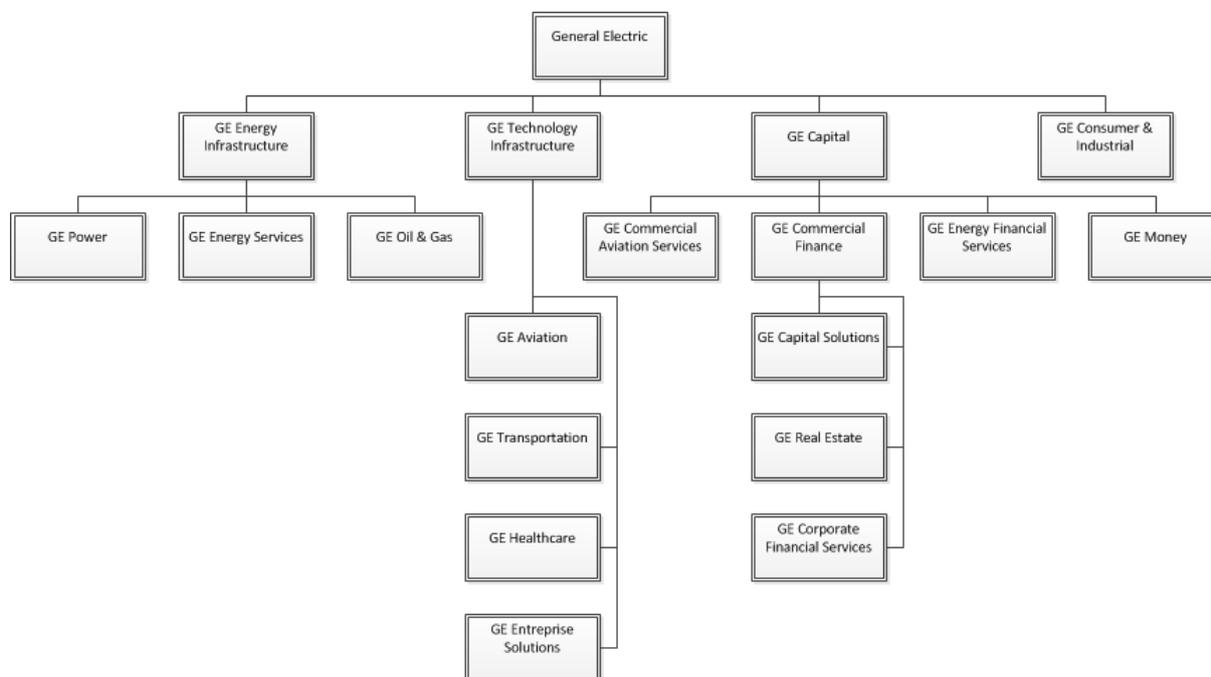


FIGURE 1.1 – Les activités de General Electric

Transportation :

En Algérie, GE Transportation avec tous ses domaines d'expertises est un partenaire de longue date de la Société Nationale des Transports Ferroviaires dans le programme de mise à niveau du réseau ferré incluant le doublage des voies et la reconstruction de certaines, la restauration de la signalisation ainsi que l'électrification.

A ce jour, GE Transportation a fourni 25 locomotives à la SNTF, en plus du travail de mise à niveau qui inclut la fourniture de moteurs à carburant éco-énergétiques 7FDL EFI.

Healthcare :

Aujourd'hui, GE fournit le plus large éventail de services de soins de santé et se consacre à apporter des solutions adaptées aux besoins du Ministère de la Santé. Elle est l'équipementier de différents hôpitaux et cliniques du pays à l'exemple de la clinique cardiovasculaire Kara (Oran) et du centre d'imagerie médicale Yaker (Alger). GE a aussi ouvert le premier centre d'applications médicales avancées, possédant ses technologies et équipements médicaux qui seront déployés pour dispenser une formation professionnelle continue.

Oil & Gas :

En partenariat avec General Electric, la société ALGESCO, spécialisée dans l'offre de services d'entretien et d'optimisation de turbines, compresseurs et auxiliaires pour l'industrie pétrolière et gazière Algérienne, crée un centre de maintenance de turbomachinerie à Boufarik. Cet atelier représente le plus grand site GE de ce genre au monde.

Power :

étant en stress hydrique, l'Algérie a longtemps été confrontée à une pénurie d'eau potable, particulièrement à Alger, sa capitale. Pour remédier à cela, le pays se consacre à assurer la fourniture d'eau, notamment en investissant dans des projets de dessalement. Ce qui a aboutie à la création de l'usine de dessalement Hamma qui est propriété conjointe de GE (70 %) et l'Algerian Energy Company.

En 2003, La Société Algérienne de Production de l'Électricité (SPE), filiale du groupe Sonelgaz, a signé un contrat avec GE pour la fourniture d'équipement de génération d'énergie et les services connexes à six nouvelles centrales électriques à cycle combiné. À travers deux sous business : Power Gas Systems chargé de l'installation des centrales électriques, et Power Services dont la mission principale est la prise en charge des contrats de maintenance des équipements installés.

Le présent travail a été effectué au sein de GE Power Services.

1.2.1 Les Produits de GE Power en Algérie :

GE Power fournit principalement des turbines de différents types :

Les Turbines à Gaz :

Ce sont des machines tournantes thermodynamique appartenant à la famille des moteurs à combustion interne. Leur fonction est de convertir l'énergie contenue dans un hydrocarbure en énergie mécanique.

Elles agissent selon le cycle de Baryton, qui comprend une phase de compression, une phase de chauffage (combustion) et une phase de détente. On distingue cinq parties principales dans une turbine à gaz :

- L'admission d'air
- Le compresseur
- Les chambres de combustion
- La turbine
- L'échappement

GE offre une gamme de turbines à gaz dont la capacité varie de 40 à 390 Mégawatts.

Les Turbines à Vapeur

Elles représentent des dispositifs rotatifs destinés à utiliser l'énergie cinétique d'un fluide liquide (l'eau) ou gazeux (vapeur, air, gaz de combustion) pour faire tourner un arbre solidaire des pales de la turbine. Une turbine à vapeur comprend deux étages assurant chacun une ou deux fonctions :

- La détente de la vapeur qui correspond à la conversion de l'énergie potentielle en énergie cinétique.
- La conversion de l'énergie cinétique en couple de rotation de la machine par le biais des aubages mobiles.

La Turbines à Gaz Aérodérivatives :

La turbine à gaz aérodérivatives est un moteur à cycle simple, à double-corps et à combustion interne, constitué des éléments suivants :

1. Composants d'entrée
2. Générateur de gaz
3. Turbine de puissance
4. Composants d'échappement
5. Arbre de transmission à grande vitesse

Le système d'une turbine à gaz aérodérivative comprend une remorque principale et une remorque auxiliaire. La remorque principale contient un moteur à turbine General Electric (modèle LM2500+) reliée à un générateur via un couplage de générateur du moteur. La remorque auxiliaire contient des équipements utilisés dans les sous-systèmes qui prennent en charge les principaux équipements et qui arbitre également la salle de commande close. Les systèmes remorque principale et auxiliaires sont décrit en annexes A et B respectivement.

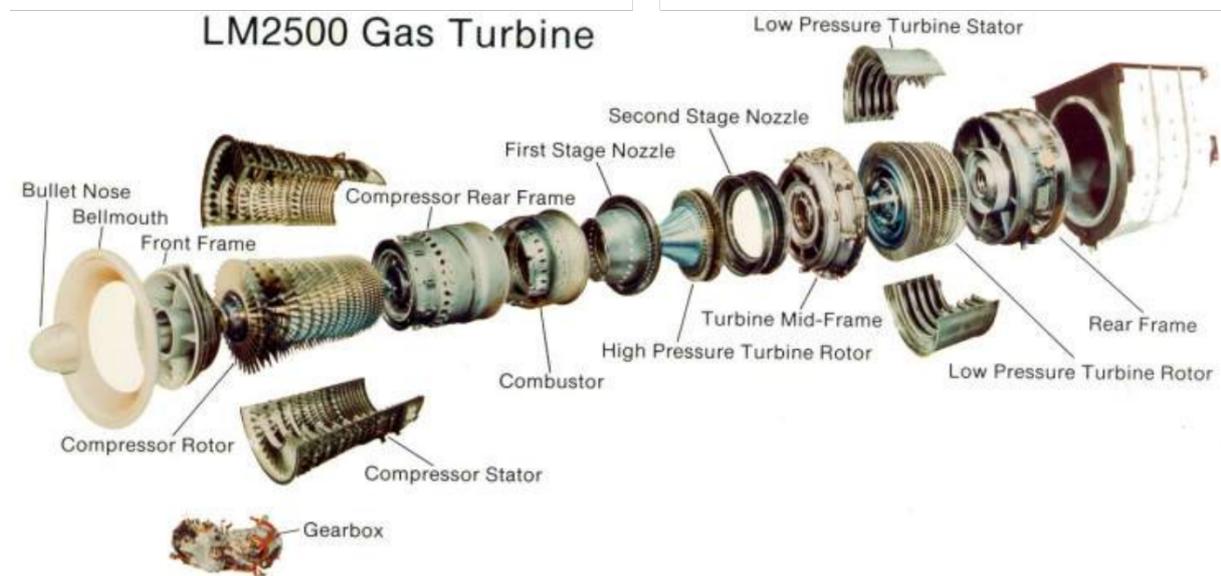


FIGURE 1.2 – Turbine à Gaz Aérodérivatives LM2500+

Le présent travail portera sur la maintenance de ce type de turbines, modèle LM2500+.

1.2.2 Différents types de contrat de maintenance GE

General Electric est l'un des plus grands fournisseurs de service énergétique dans le monde. Elle dispose d'unités dans plus de 32 pays et fournit des services d'entretien aux clients par quatre types de contrats de maintenance, qui sont :

Contrat de maintenance transactionnel (CMT) :

Un contrat transactionnel est une réponse à une demande ponctuelle d'un client. Il comprend une étendue de fourniture répondant à un de ses besoins précis. Prenons comme exemple la réalisation d'une inspection de combustion de la turbine à gaz :

La responsabilité du constructeur se limitera à fournir au client les prestations en accord avec l'étendue de fourniture spécifiée dans le contrat. Une fois les travaux terminés, mise à part la responsabilité légale de garantie, le constructeur aura complété toutes ses obligations vis-à-vis du client.

Multi-Year Maintenance Plan (MMP) :

Ce contrat représente un engagement à long terme, de plus de 3 ans, signé entre les parties. Ce qui veut dire que le constructeur s'engagera vis-à-vis du client sur les prix des pièces et des services ainsi que les délais d'exécution – ainsi GE fournira donc les pièces de rechange, les services de réparation et les prestations de service sur le terrain – et ce dernier s'engagera sur un volume minimum de commande durant le terme du contrat. Ce type de contrat permet donc au client de gérer sereinement la maintenance de sa centrale en ayant la maîtrise de ses coûts et de sa planification de maintenance avec la disponibilité du personnel GE pour l'exécution des prestations de service.

Contractual Service Agreement (CSA) :

Ce type de contrat est un engagement à long terme signé entre les parties (6 ans et plus). Il fournit un support de maintenance complet de la part du constructeur qui est responsable de la maintenance de la turbine à gaz ainsi que de ses équipements directs, (alternateur et/ou turbine à vapeur) et s'engage vis-à-vis du client à garantir la disponibilité contre la dégradation de la consommation et la dégradation de la puissance. Et pour ce faire, GE propose une solution d'entretien personnalisé de la centrale.

Cette solution comprend une personne responsable de l'exécution du contrat et travaillant au sein de la centrale, au plus proche du client, tous les services nécessaires à la maintenance des équipements (pièces, réparations, prestations de service sur site, ainsi qu'une surveillance à distance de la turbine à gaz en temps réel).

En contrepartie, le client devra travailler en exclusivité avec le constructeur durant toute la durée du contrat. La particularité de ce contrat tient dans le mode de facturation. En effet, le client s'engage sur un mode de rémunération pour toute la durée du contrat qui comprend une partie mensuelle et une partie variable basée sur le nombre d'heures de flamme de la turbine à gaz.

Ce type de contrat est une excellente solution pour les clients souhaitant maîtriser les performances de la centrale ainsi que les risques et les coûts de maintenance.

Le présent travail concerne un projet élaboré dans un cadre du contrat CSA signé entre GE et La Société Algérienne de Production de l'Electricité (SPE).

Operation & Maintenance (O&M)

Tout comme un contrat type CSA, un contrat O&M est un engagement à long terme signé entre les parties (6 ans et plus). Il propose au client les mêmes services qu'un contrat CSA mais a, en plus, la gestion complète de toute la centrale du client par le personnel du constructeur. Il propose donc au client le plus haut niveau de participation et d'engagement de la part du constructeur. Il est important de préciser qu'à travers ce type de contrat, la centrale reste la propriété du client. C'est l'approche la plus complète et complexe qu'un constructeur puisse fournir à son client, ce type de contrat est une excellente solution pour les investisseurs.

1.3 Positionnement du problème

Actuellement en Algérie, le secteur de l'énergie électrique constitue un important secteur stratégique vu l'importance que constitue cette ressource ainsi que les investissements présents dans le domaine. General Electric est un acteur majeur dans la fourniture des turbines de différents types sur le marché algérien, on y retrouve notamment : les turbines à gaz, les turbines à vapeur ainsi que les turbines à gaz Aéroderivatives.

Par les différents contrats signés avec la Société Algérienne de Production de l'Electricité, General Electric constitue à elle seule un atout majeur dans la fourniture et la maintenance des turbines. Elle l'accompagne dans de grands projets nationaux tels que les projets des centrales à cycle combiné, et les services de maintenance et d'entretiens à long terme des différentes centrales réparties sur le territoire national.

Le problème de productivité chez General Electric se voit à travers la variété de service de maintenance qu'elle offre. Cette variété traduit la complexité qui caractérise son système de gestion de la maintenance. Pour faire face à cette complexité, GE doit maîtriser les performances

de ce service en optimisant les coûts et les délais relatives aux différents types d'opérations de maintenances sur les différents types de turbines.

L'entreprise nous sollicite dans le cadre de ce projet pour **contribuer à l'amélioration de son service maintenance des turbines aérodérivatives type LM2500+ en effectuant un diagnostic de toute la fonction et arriver à identifier les actions d'amélioration appropriées.**

Conclusion

Après avoir présenté la problématique de notre travail, nous allons présenter dans les deux chapitres qui suivent un état de l'art théorique qui traite les éléments de la problématique à savoir la maintenance et l'ordonnancement.

Chapitre 2

La maintenance : Principaux concepts

Introduction

La fonction maintenance ne cesse d'évoluer, à la recherche d'un meilleur compromis entre des besoins et des exigences techniques, économiques ou humains, afin que la production soit assurée de manière continue.

La maintenance peut être corrective ou bien préventive (systématique ou conditionnelle); dans les deux cas, elle fait appel à la fiabilité et la maintenabilité en vue d'assurer sa réalisation de la meilleure façon possible.

C'est ce que nous essayerons de mettre en évidence au cours de ce chapitre où nous allons voir la pratique de la maintenance, à travers les définitions et l'explication des concepts liés à la maintenance, ses types, niveaux et son rôle crucial au sein de l'entreprise.

2.1 Aperçu sur la maintenance

La norme **AFNOR X 60-010** définit la maintenance comme étant « l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé ».

La maintenance est une combinaison d'activités techniques, administratives et managériales consistant à effectuer un ensemble d'opérations (dépannage, graissage, visite, réparation, amélioration, etc.) permettant la conservation du potentiel du matériel dans le but d'assurer la continuité et la qualité de la production pour un coût global optimum.

Retour & al[Retour et al., 1990] présentent la fonction maintenance comme un ensemble d'activités regroupées en deux sous-ensembles; les activités à dominante technique et les activités à dominante gestion comme le montre la figure 2.1.

2.2 La fonction maintenance au sein de l'entreprise

Au début, la maintenance fut exclusivement de la réparation (maintenance curative) mais elle se diversifia au fil du temps pour être actuellement une partie entière de l'entreprise.

Le processus de maintenance influence le système de production (disponibilité, volume, qualité et coût de production et sûreté de fonctionnement) qui est déterminant pour la rentabilité de l'entreprise. Il est donc de la responsabilité de tout organisme de maintenance, relevant du service de management de maintenance de l'entreprise, de veiller à améliorer la performance du processus productif en plus d'assurer la sécurité des biens et des utilisateurs en contact avec ledit processus, de conserver la durabilité de son bon état de fonctionnement, mais aussi, de garantir une propreté irréprochable de son environnement. [Tsang, 2002]

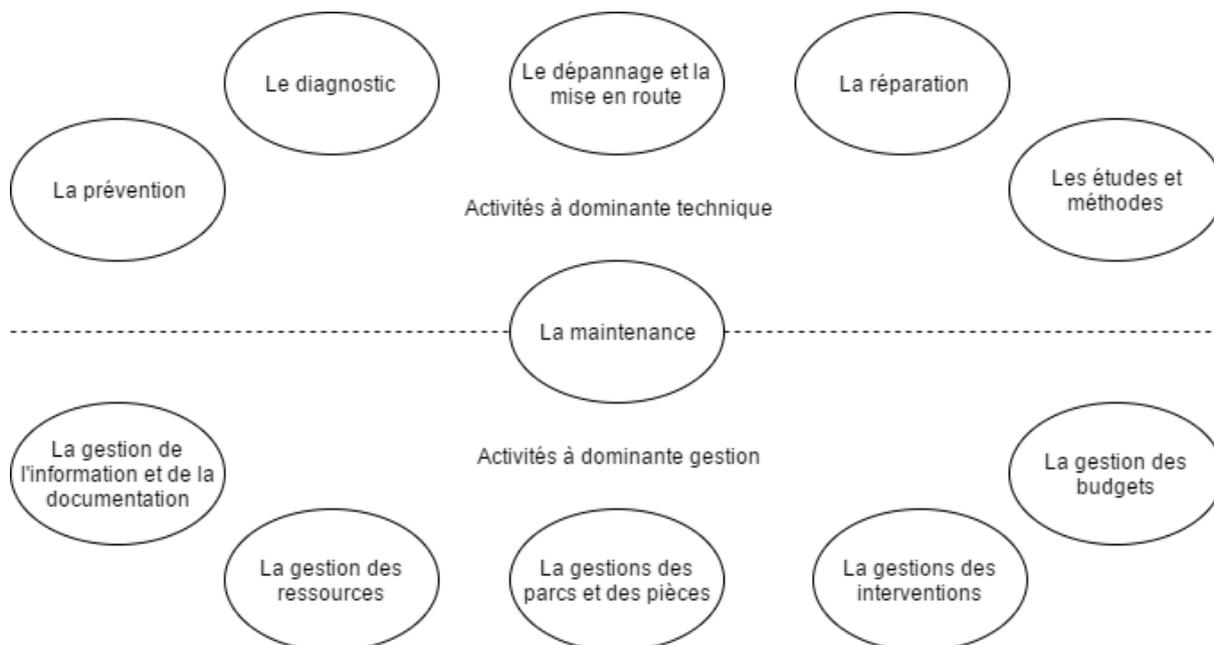


FIGURE 2.1 – Les activités de la fonction maintenance.

2.3 Les missions principales de service maintenance

La mission globale de maintenance peut être définie comme étant une gestion optimisée du parc matériel en fonction des objectifs spécifiques à l'entreprise, ce qui met donc ce service en relation directe avec sa stratégie. Il lui est ainsi impératif d'établir une politique de maintenance en axant sur : la conformité aux textes réglementaires, le fondement sur le soutien à la production, la garantie de la sécurité des biens et des services d'une part et de l'autre; celle du respect de l'environnement externe ainsi que de l'amélioration de l'environnement interne.

Ceci étant, nous pouvons organiser les missions de maintenance autour de trois plans interdépendants, à savoir : [Monchy, 2003]

Le plan technique permettant :

- Le prolongement de la durée de vie des équipements,
- L'amélioration de leur disponibilité et leurs performances.

Le plan économique ayant pour objectifs :

- La réduction des coûts de défaillance, ce qui équivaut à l'amélioration des prix de revient,
- La réduction du coût global de possession de chaque équipement.

Le plan social dont les actions à mettre en place visent à :

- Prévenir et réduire autant que possible les imprévus, car moins d'interventions en urgence diminue le risque d'accident,
- Revaloriser la nature du travail : équipe, polyvalence, qualité, initiative, anticipation.

2.4 Les objectifs de la maintenance

Globalement, le but de la maintenance est d'assurer l'entière disponibilité des équipements de production, dans de bonnes conditions de qualité et de sécurité, à un coût global optimal.

La fonction maintenance a pour buts essentiels de : [Priel, 2005]

Contribuer à assurer la production prévue :

Les programmes et les quantités à fabriquer doivent être étudiés conjointement par la fabrication et la maintenance, en tenant compte des arrêts planifiés pour les interventions de maintenance. Pendant les périodes de marche, la disponibilité des outils de production doit être maximale en minimisant les arrêts imprévus.

Contribuer à maintenir la qualité de produit fabriqué :

La qualité relève, à la fois, de la responsabilité de la production et de la maintenance. Par exemple, une erreur de conduite ou un mauvais entretien d'une machine causera une altération de la qualité du produit fabriqué. Il est donc indispensable de bien définir les responsabilités de la production et de la maintenance.

Il est important qu'après une intervention de maintenance, telle que le réglage de démarrage ou la mise au point du matériel, la réception du dit matériel soit faite conjointement par les responsables de maintenance et de fabrication.

Contribuer au respect des délais :

Il s'agit à la fois, des délais de fabrication des produits et des délais des interventions de maintenance, il incombe à la maintenance qu'ils soient respectés. Et pour ce faire, il faut que la maintenance estime correctement la disponibilité opérationnelle du matériel.

Rechercher des coûts optimaux :

En plus des trois objectifs précédents, la maintenance doit assurer la disponibilité et la rentabilité des équipements de production. Cet objectif ne peut être atteint qu'en planifiant correctement les interventions de maintenance : préparation et ordonnancement des travaux, désignation du personnel qualifié pour ces travaux, préparation des outillages et des pièces de rechange.

Respecter les objectifs humains :

En offrant des formations au personnel dans les spécialités spécifiques de la maintenance, ainsi qu'en assurant un climat de travail agréable. Aussi, le respect des consignes de sécurité doivent être parmi les priorités de la maintenance.

Préserver l'environnement et économiser l'énergie :

La maintenance doit lutter contre les pollutions et nuisances, également entreprendre des actions pour réduire la consommation d'énergie.

Conseiller :

- La direction pour le renouvellement du matériel,
- Les responsables de fabrication pour une meilleure utilisation des équipements.

Améliorer :

Les équipements de production pour faciliter la maintenance (amélioration de la fiabilité et de la maintenabilité) ainsi qu'augmenter la productivité.

2.5 Les fonctions du service maintenance

Étude :

Son principal objectif consiste en l'analyse du travail à réaliser sur la base de la politique de maintenance prédéfinie. Elle implique la mise en œuvre d'un plan de maintenance avec des objectifs chiffrés et des indicateurs mesurables.

Préparation :

La préparation des interventions de maintenance doit être considérée comme une fonction à part entière du processus maintenance. Toutes les conditions nécessaires à la bonne réalisation d'une intervention de maintenance seront ainsi prévues, définies et caractérisées. Une telle préparation sera conduite impérativement dans le respect des objectifs généraux, tels qu'ils ont été établis par la politique de maintenance : coût, délai, qualité, sécurité.

Peu importe le type d'intervention à réaliser, la préparation sera toujours présente, elle sera :

Implicite (non formalisée) : S'il s'agit de tâches simples, l'intervenant assurera lui-même, automatiquement et par expérience, la préparation de ses actions.

Explicite (formalisée) : Réalisée par un préparateur, elle donne lieu à l'établissement d'un dossier de préparation structuré. Il fera partie intégrante de la documentation technique en étant répertorié et conservé sous réserve de mises à jour ultérieures. Il sera utilisé chaque fois que nécessaire.

Ordonnancement :

Étant donné qu'un service maintenance est caractérisé par l'extrême variété des tâches en nature, en durée, en urgence et en criticité, la structuration méticuleuse et juste de ces différentes tâches et fonctions, selon des critères préétablis, permettra de maintenir l'ordre et de ne pas perdre les objectifs de vue.

Réalisation :

Elle consiste en la mise en œuvre de la meilleure façon, des moyens définis dans le dossier de préparation, pour atteindre les résultats escomptés dans les délais préconisés par l'ordonnancement.

Gestion :

Le service maintenance devra, par le biais de cette fonction, avoir la capacité d'assurer la gestion des équipements, des interventions, des stocks, des ressources humaines et du budget. [Monchy, 2003]

2.6 Enjeu économique de la maintenance

Les contraintes de productivités et d'optimisation des coûts ont fait de la maintenance un centre de profit pour bon nombre de sociétés alors qu'elle fut longtemps considérée comme un centre de coût.

Cette différenciation entre centre de coût et centre de profit se faisant essentiellement dans l'esprit des dirigeants, elle définira, au de-là de toute considération comptable, l'enjeu économique de la maintenance dans l'entreprise. [Vernier, 1999]

2.7 Types de maintenance

Le classement des actions de maintenance peut être établi en fonction de leurs finalités, de leurs résultats et des moyens techniques d'intervention qu'elles utilisent, trois types ont été définis selon leur apparition au fil du temps :

2.7.1 La maintenance corrective

C'est l'ensemble des activités faites suite à la défaillance ou l'endommagement, spécifiquement, du matériel peu coûteux, non stratégique pour la production et sans impact sur la sécurité, afin de lui permettre d'accomplir sa fonction, ne serait-ce que provisoirement. Elle est basée sur 3 étapes, à savoir : la localisation et le diagnostic de la défaillance, la remise en état et le contrôle du bon fonctionnement.

La maintenance corrective se sert de 2 types d'interventions : [Zeghloul, 2003]

Le dépannage :

Appelé aussi maintenance palliative, est une intervention immédiate et rapide pour une remise en état provisoire du matériel. C'est une pratique fréquente en cours de mise au point, de rodage ou au contraire en fin de vie du matériel. Cette intervention est justifiable pour des matériels secondaires, sans incidence directe sur la production; mais elle peut devenir nécessaire par manque de temps dans le cas où on ne peut pas arrêter la production ou par absence de pièces de rechange. De plus, le dépannage est caractérisé par une faible sécurité puisque la défaillance peut survenir à n'importe quel moment. Il est donc nécessaire d'effectuer une réparation le plus tôt possible.

La réparation :

Appelée aussi maintenance curative, est une remise en état définitive du matériel, soit directement après une défaillance soit après un dépannage et il retrouve pratiquement ses caractéristiques de fonctionnement. Elle est caractérisée par une sécurité élevée vu que le risque de défaillance est fortement diminué par rapport au dépannage.

2.7.2 La maintenance préventive

La Maintenance préventive a pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un matériel en cours d'exploitation et ce en en anticipant les pannes. Elle suit les étapes suivantes : [Sitayeb, 2005]

- **L'inspection** : activité de surveillance s'exerçant dans le cadre d'une mission définie et non limitée obligatoirement à la comparaison avec des données préétablies. Elle peut s'exercer au moyen de rondes ;

- **La vérification** : contrôle de conformité avec des données préétablies, suivie d'un jugement. Elle peut comporter une activité d'information, inclure une décision (acceptation, rejet, ajournement) et déboucher sur les actions correctives ;

- **La visite (de maintenance)** : examen détaillé et prédéterminé de l'ensemble (visite générale) ou d'une partie (visite limitée) des différents éléments de la machine et pouvant impliquer des opérations de maintenance de premier niveau. Certaines opérations de maintenance corrective peuvent être effectuées suite à des anomalies constatées lors de cette visite ;

Ce type de maintenance se subdivise à son tour en trois sous-types :

Maintenance conditionnelle :

Surveillance des points sensibles de l'équipement, exercée au cours des visites préventives, permettant d'enregistrer les différents paramètres pouvant renseigner sur l'imminence d'une défaillance.

Maintenance prévisionnelle :

Révision et analyse de l'évolution d'un état de dégradation pour un équipement donné, par exemple : le contrôle des vibrations, inspection visuelle, le contrôle des paramètres de processus (pressions, intensité électrique, vitesses, etc.)

Maintenance systématique :

Interventions, sur un équipement à dates planifiées, ou à volume prédéfini d'unités d'usage atteint, allant du simple remplacement de quelques pièces jusqu'à la révision générale. C'est-à-dire qu'une démarche systématique suppose une parfaite connaissance du comportement de l'équipement, de ses modes et de sa vitesse de dégradation. [Boulenger, 1988]

Elle se pratique dans le cas où une sécurité de bon fonctionnement quasi absolue est souhaitée, en remplaçant suffisamment tôt, les pièces ou organes victimes d'usure ou de dégradation. C'est pourquoi ce type de maintenance est aussi appelé maintenance préventive basée sur la durée de fonctionnement.

2.7.3 La maintenance améliorative

Elle accède aux besoins d'évolution où il convient d'apporter certaines modifications suite à des situations nouvelles, à des obligations ou à des objectifs nouveaux. L'équipement subit donc des activités de maintenance de type : rénovation, reconstruction, modernisation, etc.

La figure 2.2 reprend la classification des types de maintenance expliqués précédemment.

2.8 Niveaux de la maintenance

Les actions de maintenance sont organisées, indépendamment de leur type, dans des niveaux d'intervention suivant la nature des opérations, à la qualification requise de l'intervenant et les moyens mis en œuvre.

Selon la norme **NFX 60-010**, il en existe cinq : [Kaffel, 2001]

Niveau 01 :

simples réglages, ou échange d'éléments consommables (changement d'un voyant ou certains fusibles), définis par l'exploitant du bien, en utilisant des moyens accessibles et en toute sécurité. C'est des interventions qui s'effectue sur place, sans outillages et à l'aide des instructions de l'utilisation. Le stock de pièces consommables nécessaires est donc très faible.

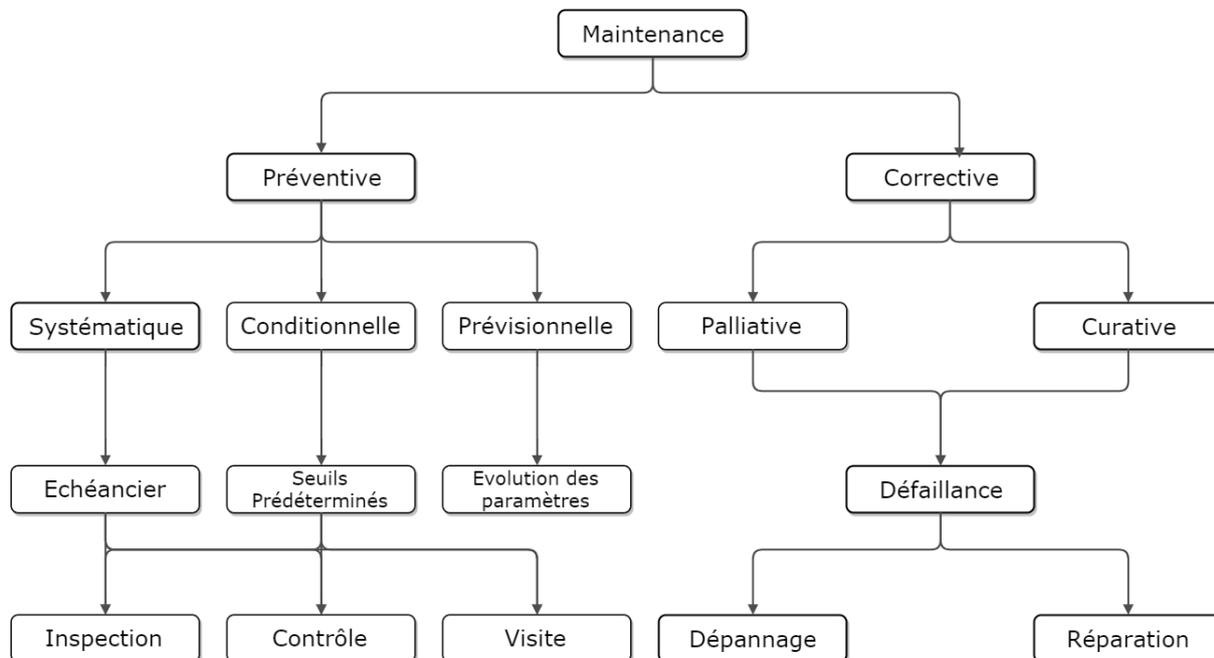


FIGURE 2.2 – Types de maintenance

Niveau 02 :

Dépannage par échange standard des éléments prévus à cet effet et opérations mineures de maintenance préventive, par exemple le graissage ou changement d'un relais. Cela peut être accompli par un technicien habilité de qualification moyenne, sur place et avec l'outillage portable défini par les instructions de maintenance. Des pièces de rechange transportables pourront être fournies en cas de nécessité, sans délais et à proximité immédiate du lieu d'exploitation.

Niveau 03 :

Identification et diagnostic des pannes, réparations par échange de composants ou d'éléments fonctionnels, réparations mécaniques mineures, ainsi que toutes les opérations courantes de maintenance préventive.

Ceci verra l'intervention d'un technicien spécialisé, sur place, ou dans le local de maintenance, à l'aide de l'outillage prévu dans les instructions de maintenance ainsi que des appareils de mesure et de réglage.

A titre d'exemple : réglage général ou réalignement des appareils de mesure.

Niveau 04 :

il consiste en la réalisation de tous les travaux importants de maintenance corrective ou préventive d'un équipement donné – tels que des inspections et remplacement d'aubages – sauf ceux de la rénovation et de la reconstruction. Ils seront réalisés par une équipe comprenant un encadrement technique très spécialisée, dans un atelier spécialisé doté d'un outillage général.

Niveau 05 :

Rénovation, ou exécution de restaurations importantes confiées à un atelier central ou à une unité extérieure. Ce type de travail est donc accompli par le constructeur ou le reconstruteur avec des moyens définis uniquement par lui, il est proche de la fabrication, comme c'est le cas de la réhabilitation d'une raffinerie.

Ces niveaux de maintenance font référence à la complexité des tâches à effectuer et aux ressources humaines et matérielles nécessaires à la réalisation de chacune d'elles. Cette spécification est détaillée dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 – Les ressources nécessaires pour chaque niveau de maintenance.

Niveaux	Personnel d'intervention	Moyens
01	Exploitant sur place	Outillage léger défini dans les instructions d'utilisation
02	Technicien habilité sur place	Outillage léger défini dans les instructions d'utilisation, plus pièces de rechange trouvées a proximité, sans délai
03	Technicien spécialisé, sur place ou en local de maintenance	Outillage prévu plus appareils de mesure, banc d'essai, de contrôle, etc.
04	Equipe encadrée par un technicien spécialisé, en atelier central	Outillage général plus spécialisé, matériel d'essai, de contrôle, etc.
05	Equipe complète, polyvalente en atelier central	Moyens proches de la fabrication par le constructeur

Dans le cadre du présent projet, le travail effectué concerne uniquement les opérations de maintenance systématiques et correctives de niveau 03 et 04.

2.9 La logistique de maintenance

c'est l'ensemble des ressources, services et moyens de gestion nécessaires à l'application de la maintenance. En l'absence de support logistique, il sera impossible de planifier et d'intervenir sur l'équipement ou d'avoir une bonne gestion de stock de pièces de rechange.

En effet, si le système de production fonctionne normalement, il n'y a nul besoin d'un stock de pièce de rechange pour encaisser les aléas, et donc, aucun besoin d'immobiliser de l'argent. Mais dans le cas où il vient à s'enrailler, une rupture de réserve peut avoir un impact très important et représenter un risque financier.

Il est donc nécessaire de jouer habilement sur ce stock, afin d'optimiser la maintenance et son rôle support de la production dans le but de réduire au maximum les délais d'arrêt des systèmes industriels. [Boucly, 1998]

2.9.1 Les clés de la logistique de maintenance

L'objectif des entreprises étant de pouvoir livrer au client le bon produit, dans les délais et pour le plus faible coût, le service maintenance est tenu d'épouser une démarche de fournisseur et doit pouvoir s'appuyer sur une logistique performante qui reposera sur deux points :

Le réseau de fournisseurs

La logistique de la maintenance s'appuie d'abords sur un réseau de fournisseurs réactif et de confiance. D'un côté, cela permet d'anticiper un tant soit peu la disponibilité des pièces et d'un autre, de jouir de certains "passe-droit" et de bénéficier du réseau de chaque fournisseur.

L'approvisionnement et la gestion de stock des pièces de rechange :

c'est le deuxième point sur lequel repose la logistique en maintenance. La gestion de stock de pièces de rechange doit avoir pour logique de minimiser les réserves de pièces afin de réduire les capitaux immobilisés tout en assurant une disponibilité maximale des pièces.

Pour cela, il faut se référer aux méthodes « classiques » de gestion de stocks, tout en prenant en compte le travail en aval des équipes de maintenance.

2.10 Le choix de politique de maintenance d'un matériel

Les équipements de n'importe quelle installation sont amenés à se dégrader sous l'influence des conditions de fonctionnement et/ou d'environnement (usures, fatigue, vieillissement, altérations physico-chimiques diverses).

La valeur économique engagée pousse tous les partenaires de la fonction maintenance à comprendre parfaitement les différentes étapes de la démarche du choix d'une politique de maintenance d'un matériel dans l'intérêt d'avoir un coût global minimal. À cet effet, toute intervention de maintenance a besoin d'être réfléchie avant d'être réalisée. [Benmoussa and Baameur, 2005]

Ainsi, il faudra décider de façon volontaire :

- La méthode de maintenance à mettre en œuvre : corrective ou préventive (en définissant sa forme et son niveau) et à quelle périodicité intervenir,
- Des moyens économiquement rentables afin de minimiser les coûts de défaillance de la maintenance curative,
- Comment introduire une politique de maintenance efficace.

La politique de maintenance souhaitée du matériel est de passer d'une maintenance caractérisée par des intervalles d'intervention fixes à une maintenance influencée par l'état des équipements qui réunit les aspects de détermination de l'état des ouvrages et équipements en exploitation ; et celui de définition de l'importance stratégique des ouvrages, des équipements et des composants dans le réseau.

Conclusion

Ce chapitre nous a servi à comprendre les notions et les définitions liées à la maintenance, en particulier les concepts en relations avec le management de cette fonction.

Bien évidemment, ce chapitre traite des notions et des concepts entrants dans notre étude par la suite.

Chapitre 3

L'ordonnancement : Principaux Concepts

Introduction

Après avoir défini la maintenance et ses différents concepts, nous nous intéressons dans ce chapitre aux pratiques de l'ordonnancement et plus particulièrement l'ordonnancement de la maintenance, à travers les définitions et l'explication des éléments de base des problèmes d'ordonnancement et la démarche suivie.

3.1 Définitions de l'ordonnancement de la maintenance

La problématique de l'ordonnancement apparaît lors de la réalisation d'un projet complexe, Cela consiste en la capacité à faire face aux différents problèmes rencontrés en organisant dans le temps la réalisation des tâches en tenant compte des contraintes temporelles possibles et celles liées à la disponibilité des ressources requises.

Dans une entreprise industrielle, plusieurs services sont directement intéressés par l'ordonnancement : la production, mais aussi les ventes, la maintenance, la gestion des approvisionnements ou encore la gestion des ressources humaines. La notion d'ordre de travail de maintenance peut être rapprochée de celle d'opérations de production. Il consiste donc à structurer l'affectation de ressources de maintenance à la réalisation d'ordres de travail de maintenance sur des machines du système de production.

3.2 Éléments de base d'un problème d'ordonnancement de maintenance

Tous les problèmes d'ordonnancement partagent un ensemble d'éléments, dont l'état et les propriétés caractérisent le problème en question. Les éléments majeures d'un problème d'ordonnancement des tâches de maintenance sont :

3.2.1 Tâches de maintenance

Une tâche de maintenance est reconnue par sa durée p_i , sa date de début au plus tôt r_i et sa date de fin au plus tard d_i . [Hedjazi and Zidani, 2012]

Ainsi, le coût d'une telle tâche peut se varier comme suit :

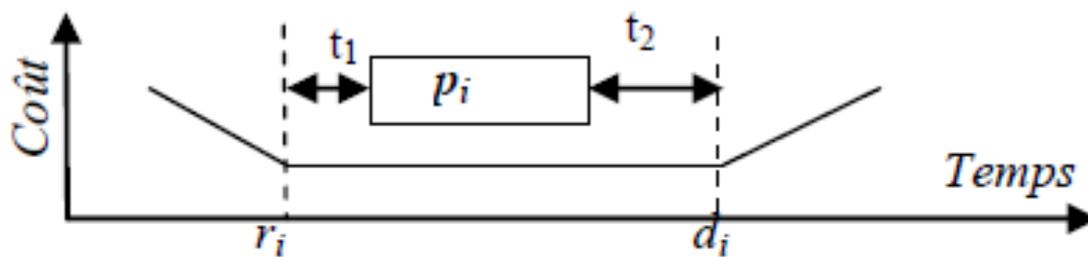


FIGURE 3.1 – Modélisation du coût d'une tâche de maintenance.

La période de temps entre r_i et d_i appelée fenêtre d'optimalité de la tâche durant laquelle le coût d'exécution de la tâche est minimal.

Lorsqu'on se place devant la stratégie de maintenance préventive systématique, l'explication de la courbe de la figure 3.1 est double : d'un côté, si on intervient avant la date r_i , le coût de la maintenance augmente, ce qui signifie que l'on réalise trop souvent les tâches de maintenance préventive.

D'autre part, si on dépasse la date de fin au plus tard, le risque d'une panne de l'équipement augmente, ce qui nécessitera la réalisation des tâches de maintenance corrective, engendrant donc des coûts supplémentaires liés à l'arrêt de la production.

3.2.2 Les opérations

Lorsque la réalisation d'une tâche requiert successivement plusieurs ressources, on dira que chaque ressource effectue une opération de la tâche considérée. La gamme d'une tâche décrit la séquence de ses opérations. [Ghazi, 2007]

Le problème d'ordonnancement est dit "statique" quand l'ensemble des opérations à exécuter au cours du temps est donné a priori. S'il évolue avec le temps, éventuellement de façon non déterministe, alors le problème est "dynamique". Dans ce cas, la solution peut être envisagée à travers une suite de résolution de problèmes statiques, chaque phase débutant par une prise d'informations permettant d'actualiser le modèle du problème à résoudre. [Esquirol and Lopez, 1999]

Une opération peut se réaliser par morceaux (opération préemptive) ou sans interruption (tâche non-préemptive). Certaines opérations sont préemptives répétées. En d'autres termes, l'interruption de ces tâches est autorisée, mais l'exécution doit être recommencée depuis le début.

3.2.3 Les ressources

La ressource est un moyen technique ou humain utilisable pour la réalisation d'une tâche. Elle a une capacité et un temps de préparation et est renouvelable (ouvrier, engin, etc.) ou consommable (pièces de rechange, carburant, etc.).

Elle peut également être :

Disjonctive (non partageable) : la machine ne peut traiter qu'une tâche à la fois.

Cumulative (partageable) : la machine peut traiter plusieurs tâches à la fois en fonction de sa capacité.

Le service de maintenance est composé de M ressources humaines présentes et disponibles en permanence (et qui coûtent donc de l'argent à l'entreprise). Chacune de ces ressources est spécifiée par un profil de compétence. La vitesse de traitement ne dépend pas seulement de la

tâche mais aussi de la compétence qui l'exécute. Ainsi, chaque ressource dispose d'un niveau de qualification pour chacune des compétences requises par les tâches.

Dans ce travail, nous avons considéré les ressources humaines indépendantes dont chacune à ses propres outils de travail. Cela ne peut être toujours vrai, surtout lorsqu'il s'agit d'outils spécifiques de forte valeur dont il est impossible d'équiper toutes les équipes de maintenance.

3.2.4 Les contraintes

Elles expriment des restrictions sur les valeurs que peuvent avoir les variables de décision. Leur prise en compte permet d'avoir un ordonnancement faisable et réalisable. Parmi ces contraintes on distingue :

Les contraintes potentielles : Liant les tâches entre elles, c'est-à-dire que telle opération ne peut être exécutée avant telle autre. Elles peuvent être temporelles (attendre la fin d'une tâche pour lancer la suivante). Elles définiront les gammes de production.

Les contraintes de concurrence : Ce type est lié aux ressources utilisées par les tâches. C'est lorsque deux tâches, utilisant la même machine, ne pourront pas s'exécuter simultanément.

Les contraintes intérieures : Ce sont des conditions dépendantes du système de production et de ses performances (les capacités des machines et des moyens de transport, les dates de disponibilité de la matière première des produits et des moyens de transport).

Les contraintes extérieures : Elles sont imposées extérieurement, indépendantes du système de production, comme, par exemple : les dates de besoin de produits, imposées généralement par les commandes du client, Les niveaux de priorité et d'urgence de quelques commandes et de quelques clients, les retards accordés pour certains produits.

3.3 Les objectifs et les critères d'un problème d'ordonnement

Un problème d'ordonnement est constitué de contraintes et d'un objectif ayant un ensemble de critères, permettant son atteinte. Le but est alors de trouver l'ordonnement réalisable de meilleure qualité possible. Deux types de critères sont à optimiser : les critères liés au temps et ceux liés aux coûts. [Brucker, 2003]

Dans le premier cas, on trouvera par exemple le critère qui mesure la date d'achèvement de l'ensemble de l'ordonnement. Dans le second, on peut citer les critères qui représentent un coût d'utilisation des machines et ceux qui représentent un coût lié à l'attente des opérations avant et/ou après leur traitement.

Les critères les plus choisis pour l'évaluation d'une solution d'un problème d'ordonnement sont :

La durée totale de l'ordonnement : notée C_{max} , est égale à la date d'achèvement de la tâche la plus tardive.

Les dates de fin au plus tard : afin de respecter au mieux les délais, on minimise soit la plus grande avance R_{max} , soit la somme des avances R .

La minimisation d'un coût : qui s'exprimera sous des formes très variées comme par exemple la minimisation des encours, la minimisation du coût du stockage de la matière première, etc.

Dans certains cas, un objectif unique est insuffisant ; par exemple, on peut vouloir limiter les retards, tout en utilisant au maximum les ressources. Il est donc indispensable d'effectuer des compromis et d'aborder le problème sous forme multi-objectif.

3.4 Modélisation de l'ordonnancement de la maintenance

L'ordonnancement de la maintenance a pour but de fixer les dates de début et fin des tâches ainsi que de réunir tous les moyens prévus pour leur réalisation (machines, personnel, outils, pièces de rechanges, etc.)

Il vient entre la fonction chargée d'initier les tâches en affectant une durée à un travail (méthode) et celle chargée de mettre en œuvre l'intervention au moment choisi par l'ordonnancement (réalisation ou lancement). Les activités principales en ordonnancement de la maintenance sont : [Coudert, 2000]

La programmation : action d'intégrer une tâche en attente sur un planning en lui choisissant des dates de début et de fin,

Le lancement : rassemblement des moyens nécessaires à la réalisation d'une tâche de maintenance, pour assurer leur disponibilité au moment choisi,

L'approvisionnement : disponibilité des « consommables » et des pièces de rechange.

Le problème d'ordonnancement de la maintenance revient donc à un problème d'affectation de ressources à la réalisation d'ordres de travail de maintenance sur des machines du système de production, les ressources de maintenances étant constituées des opérateurs de maintenance.

L'ordonnancement des activités de maintenance est bien souvent réalisé de manière manuelle par les responsables de maintenance à l'aide des tableurs.

3.5 Les niveaux hiérarchiques

L'ordonnancement de la maintenance, comme l'ordonnancement de la production, peut être hiérarchiquement décomposé suivant trois niveaux, qui correspondent respectivement aux horizons de prise de décision (long terme, moyen terme et court terme) : stratégique, tactique et opérationnel.

A ceux-ci sont associées trois activités de maintenance principales :

3.5.1 Niveau stratégique : Établir la politique de maintenance

Elle consiste à définir une structure, choisir une orientation et arrêter des objectifs. Les décisions prises ici sont définies par des contraintes non négociables issues de la direction technique (budget, effectifs, espace, sécurité, etc.). La structure est établie en fonction des moyens mis à la disposition du service et des contraintes imposées (ses composantes sont le personnel, les ateliers, les outillages, etc.).

Le choix de l'orientation et la définition des objectifs doivent résulter d'un travail d'analyse réalisé en concertation avec la production, cette dernière ayant des exigences et des attentes, la maintenance ayant des capacités et des compétences [Monchy, 1996].

3.5.2 Niveau tactique : Définir le plan de maintenance tactique

Cela consiste à mettre en place un plan de maintenance et des méthodes de gestion de la structure physique de maintenance permettant d'atteindre les objectifs du niveau politique. Les méthodes de gestion décrivent comment gérer chaque ressource de maintenance de la structure. Le plan de maintenance précise la forme d'action du service, la proportion préventif/curatif visée, les formes de maintenance préventive (systématique, conditionnelle, intervalles et durées d'inspection prévues) et les formes de maintenance curative (dépannage, remise à neuf, amélioration).

On obtient donc un échéancier de travaux préventifs spécifique à chaque équipement avec les procédures d'action décrivant : les opérations à réaliser, les ressources humaines et matérielles requises, les durées opératoires et les procédures de remise en service.

Établir un échéancier est une activité complexe : les paramètres pris en considération étant nombreux et souvent de nature stochastique, cela nécessite une analyse du contexte ainsi que l'évaluation des coûts générés. Les possibilités d'action étant très nombreuses, des choix bien souvent arbitraires doivent être faits, ce qui nécessite de consulter périodiquement les retours d'expérience. Ces consultations permettent soit de valider la stratégie adoptée, soit de la corriger en modifiant différents paramètres. L'échéancier ainsi obtenu devra être intégré à un planning de travaux correctifs au niveau décisionnel opérationnel.

3.5.3 Niveau opérationnel : Définir le plan de maintenance opérationnel

Par la mise en œuvre du plan de maintenance tactique. Ainsi les actions en réponse aux événements aléatoires (correspondant aux défaillances des équipements) et les actions issues de la programmation de travaux préventifs (consignés dans le calendrier établi au niveau hiérarchique supérieur) sont coordonnées .

Nous situons nos travaux au niveau opérationnel. Les connaissances concernant les caractéristiques d'engagement des équipements en production (importance dans le flux, taux d'utilisation, périodes de disponibilité, etc.) et des ressources de maintenance existantes vont permettre d'affecter, précisément, les tâches aux ressources.

Cet ordonnancement est de nature statique, car il ne tient pas compte des tâches de maintenance corrective dont le caractère purement aléatoire nécessite un temps de réaction et d'analyse de la demande pour l'adapter au contexte du travail. Néanmoins, il doit permettre d'intégrer ce type d'intervention dans le planning, suivant l'urgence de l'intervention par rapport à celle des travaux déjà programmés.

3.6 Les objectifs de l'ordonnancement de la maintenance

Un service de maintenance est soumis à de multiples contraintes qui rendent l'activité d'ordonnancement particulièrement difficile à mettre en œuvre. En effet, l'ordonnancement de la maintenance doit gérer des problèmes bien spécifiques dont celui de sa dépendance de la production (arrêts de fabrication, taux d'utilisation des équipements) ou celui relatif à la prise en compte de la sécurité, le suivi des travaux sous-traités, ou encore les différents niveaux d'urgence des travaux de maintenance corrective.

La spécificité de l'ordonnancement de la maintenance se résume dans [Paz and Leigh, 1994] :

La variété et l'incertitude des travaux de maintenance : la durée d'une intervention ne peut pas être connue tant que l'on a pas examiné l'équipement (diagnostic pour les interventions de maintenance corrective). L'évaluation théorique du temps d'intervention peut différer de la durée réelle de cette dernière. En effet, lors du déroulement de l'intervention, des imprévus

(telle une défaillance identifiée durant l'intervention et qu'il faut réparer) peuvent allonger, de manière significative, la durée initiale de cette dernière ;

La durée d'une intervention ne peut pas être connue tant que l'on a pas examiné l'équipement (diagnostic pour les interventions de maintenance corrective). L'évaluation théorique du temps d'intervention peut différer de sa durée réelle pour cause d'imprévu (telle une défaillance identifiée durant l'intervention et qu'il faut réparer) pouvant en allonger, de manière significative, la durée initiale.

La date de réalisation d'un ordre de travail de maintenance préventive peut être retardé mais également avancée par rapport à la date optimale ou à l'intervalle de tolérance de ce dernier [Gits, 1994]. Si à l'arrivée d'une opération de maintenance corrective, toutes les ressources de maintenance sont engagées pour l'intervention de maintenance préventive, un calcul de priorité intervient pour décider de la place d'insertion de l'ordre de travail dans le planning de maintenance. Ce calcul tient compte de la marge permise par l'intervalle de tolérance, des coûts de maintenance générés, des risques encourus sur le plan de la sécurité, de la possibilité de regroupement des interventions par familles ou encore de la volonté de perturber le moins possible le plan de production.

Les objectifs de l'ordonnancement de la maintenance peuvent être décomposés de manière hiérarchique en distinguant les objectifs internes à la maintenance concernant le fonctionnement propre du service de maintenance et les objectifs externes, établis par d'autres services (principalement la production) [Coudert, 2000] .

Ils peuvent se retrouver en conflit de par leur nature. Leur satisfaction impose généralement aux ressources de maintenance d'intervenir sur les machines à des dates bien précises qui ne correspondent pas nécessairement à une optimisation de leur utilisation.

Les objectifs internes sont relatifs :

- aux coûts de maintenance (respect du ratio préventif/correctif déterminé lors de la définition de la stratégie de maintenance ou encore la minimisation de la durée des interventions),
- à l'optimisation de l'utilisation des ressources de maintenance (tels que le respect des horaires des équipes, la minimisation des temps d'attente, le lissage des charges ou le regroupement des tâches de préparation afin d'en optimiser la durée),
- aux règles de sécurité (protection des intervenants pour les travaux dangereux).

Quant aux objectifs externes, ils sont relatifs :

- aux performances des machines (honorer les demandes de réglages et de nettoyage et respecter les demandes d'interventions conditionnelles),
- à la fiabilité d'une machine (honorer les demandes de réparation et d'interventions conditionnelles, respecter les dates d'interventions préventives).

Conclusion

Les études traitant des problèmes d'ordonnancement dans différents domaines ont montré qu'ils partagent dans la forme un ensemble d'éléments, alors que dans le fond, l'état et les propriétés de ces éléments sont caractéristiques du problème en question. Les éléments d'un problème de maintenance sont : les tâches de maintenance, les opérations, les ressources et les contraintes.

L'ordonnancement de maintenance aura donc pour objectif de définir les dates de début et de fin des tâches et de rassembler les moyens nécessaires à leur exécution et ce en suivant 3 niveaux

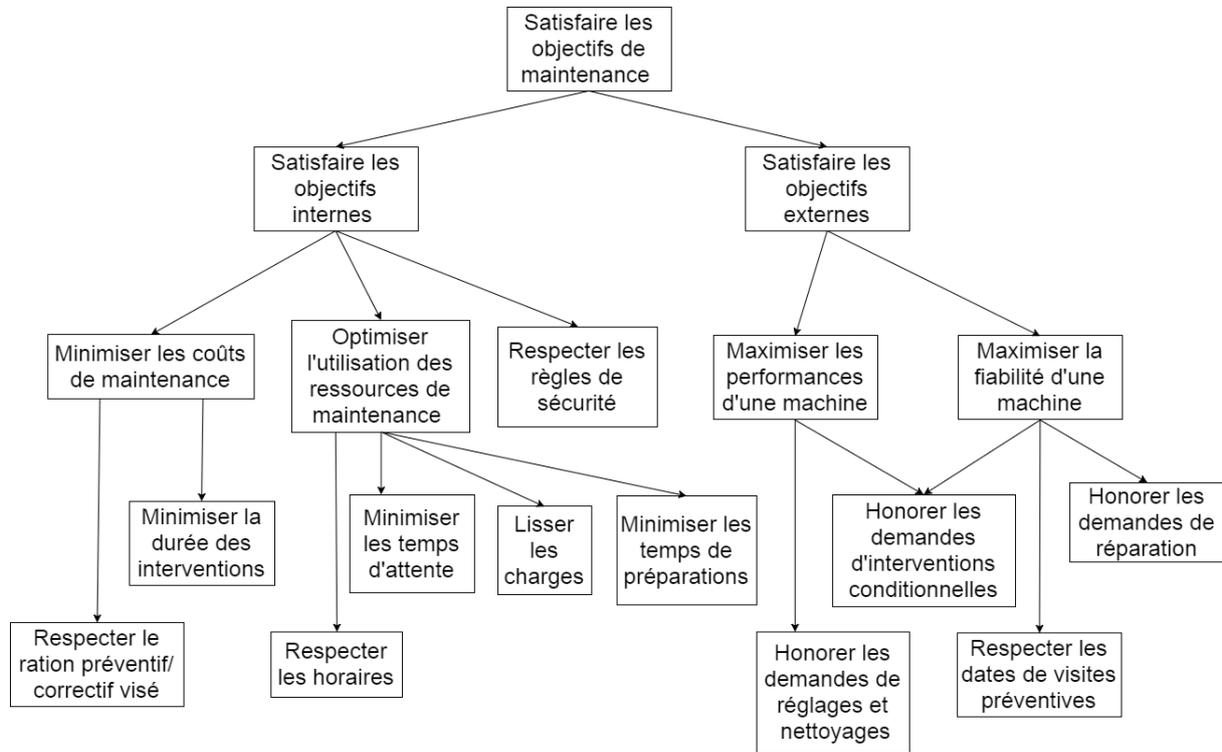


FIGURE 3.2 – Structure hiérarchique des objectifs de l'ordonnancement de la maintenance.

hiérarchiques (stratégique, tactique et opérationnel). La particularité de l'ordonnancement de maintenance est due à la variété des travaux d'entretien et à leur incertitude.

Dans le présent travail, nous élaborerons un programme d'ordonnancement des taches de maintenance des turbines en se basant sur les termes expliqués dans ce chapitre.

Chapitre 4

Étude de l'existant : Étude de la fonction maintenance au sein de GE

Introduction

Toute étude conceptuelle devrait reposer sur une bonne connaissance du système existant, de ce fait, une analyse exhaustive et complète de la situation actuelle est impérative afin de pouvoir cerner les carences et les causes de défaillance du système.

L'étude de l'existant est notre point de passage obligé qui matérialise notre premier contact avec le domaine d'étude.

Pour ce faire, nous sommes appelés à collecter le plus d'information possible à travers des requêtes à base d'interviews auprès des postes concernés par notre étude.

Notre méthodologie consiste en une description détaillée de l'organisme, il commence par l'étude des types de maintenance appliqués, une analyse des processus et de la fonction maintenance afin de déceler les problèmes et de projeter des solutions futures.

La maintenance des turbines aérodérivatives

Dans le cadre de la signature d'un contrat CSA entre la Société Algérienne de Production d'Électricité (SPE) et General Electric, cette dernière prend en charge toutes les opérations de maintenance de 37 turbines à gaz mobiles TM2500+. En employant un personnel hautement qualifié dans le domaine cible, GE s'assure de réaliser ces opérations dans les meilleurs délais.

Elles sont réparties sur le territoire national comme suit :

Ces prestations comprennent :

- Une assistance technique et de supervision afin d'assurer l'inspection des équipements couverts des turbines à gaz mobiles TM2500+ dans le cadre des opérations de maintenance programmées et non programmées,
- Réaliser la bonne réparation des pièces de rechange,
- Assurer convenablement la fourniture des pièces de rechange, pièces d'usure, pièce de sécurité et les consommables nécessaires aux activités de maintenance.

4.1 Les types de maintenance appliqués aux TM2500+

Afin d'assurer une maintenance préventive de qualité, l'exécution d'un groupe de tâches à des intervalles déterminés est nécessaire, ayant pour objectif de prévenir la dégradation des niveaux intrinsèques de sécurité et de fiabilité. La maintenance est basée sur le nombre d'heures de flamme en fonction du fuel utilisé (liquide ou gaz).

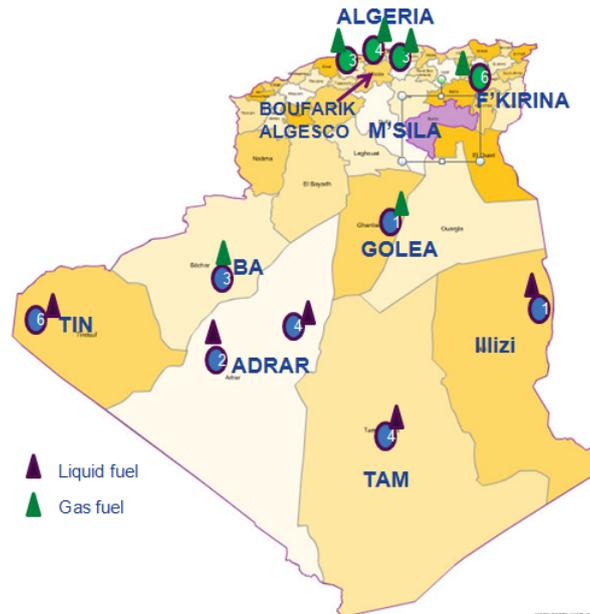


FIGURE 4.1 – La répartition des turbine LM2500+ sur le territoire national

Deux facteurs déterminent l'étendue des réparations :

1. Correction de la cause principale de panne et de tout élément résultant des endommagements secondaires.
2. Remplacement ou réparation des éléments non conformes au critère d'inspection établi et défini sur le manuel technique.

4.1.1 Entretien selon état

L'entretien selon état entre dans les catégories d'entretien préventif programmé et d'entretien correctif non programmé.

L'entretien préventif : est décrit comme entretien programmé basé sur les heures de fonctionnement ou de celles programmées pour répondre à certains événements ou associées aux deux ou comme résultat des conditions de contrôle.

L'entretien correctif : est décrit comme entretien non programmé effectué pour corriger un dysfonctionnement résultant d'une panne ou d'une défaillance imminente détectée par une inspection et/ou par l'évaluation de l'état.

Lors du fonctionnement, les éléments suivants sont contrôlés : vitesse du générateur de gaz, vitesse de la turbine de puissance, générateur de gaz et température du gaz d'échappement, moteur et vibrations de l'équipement entraîné, pression d'huile et durée de fonctionnement de pointe et normal.

Dans le cadre de la philosophie d'entretien selon état, les mesures d'entretien programmé demandent l'arrêt qui peut être effectué en parallèle avec des intervalles de 4000 heures ou de 6 mois et de 8000 heures ou de 12 mois.

Le tableau suivant résume les opérations de maintenance et les contrôles des TM2500+, leurs durées, ainsi que la main d'oeuvre nécessaire pour chaque opération,

Tableau 4.1 – Les niveaux de maintenance préventive systémique des TM2500+

Prestations	Périodicité en nombre d'heures de fonctionnement	Type de spécialiste	Durée de l'inspection	Observation
Endoscopie et Inspection semi-annuelle de l'ensemble	4000 h	2 mécaniciens, 1 contrôle	2 jours	Dépend de la qualifications des agents mis à disposition, disponibilité outillage; source électrique ... etc
Endoscopie et Inspection annuelle de l'ensemble	8000 h	2 mécaniciens, 1 contrôle, 1 spécialiste générateur	3 jours	Dépend de la qualifications des agents mis à disposition, disponibilité outillage; source électrique ... etc
Endoscopie	4000 h	1 mécanicien	1 jour	Consignation et préparation turbine, disponibilité source électrique au niveau turbine ... etc
Remplacement sur site du module turbine à gaz	12500 h (liquide), 25000 h (gaz)	2 mécaniciens, 1 contrôle	10 jours	Présence des moyens de manutention sur site; Palonnier, grue, forklift et nacelle
Remplacement en atelier client des parties chaudes	12500 h (liquide), 25000 h (gaz)	2 mécaniciens	10 jours	Outillage spéciale disponible en atelier; pont roulant de 5-10 tonnes; prise électrique, air comprimé ... etc
Inspection et réparation des parties chaudes (Hot Section) (Marche en fuel)	12500 h (liquide), 25000 h (gaz)	Shop level 4 + vendors	90 jours	Atelier niveau 4 GE. 90 jours à compter de la date d'induction des équipements dans l'atelier niveau 4 de GE jusqu'à la fin des travaux, excluant transport terrestre et/ou dédouanement

Inspection des systèmes de commande	25000 h	1 contrôle	1 jour	Spécialiste contrôle
Inspection complète (Révision générale, MOH)	50000 h	Shop level 4 + vendors	120 jours	Atelier niveau 4 GE. 120 jours à compter de la date d'induction des équipements dans l'atelier niveau 4 de GE jusqu'à la fin des travaux, excluant transport et/ou dédouanement
Remise en état majeur de la turbine de puissance 6-pack	(selon l'état de la turbine)	Shop level 4 + vendors	75 jours	Atelier niveau 4 GE. 75 jours à compter de la date d'induction des équipements dans l'atelier niveau 4 de GE jusqu'à la fin des travaux, excluant transport terrestre et/ou dédouanement
Inspection du générateur	8000 h	2 spécialiste du générateur, 1 mécanicien	1 jours	Spécialiste générateur
Tests de performance sur site	Après remplacement turbine réparée ou à la commande du client	1 contrôle	1 jour	Si on utilise l'instrumentation du site, pas de problème lors des démarrages... etc

Il convient de souligner que la durée des prestations mentionnées dans le Tableau 4.1 est la durée maximum promise par GE au client pour la réalisation de ces prestations. La durée réelle quant à elle est proche de la durée promise et dépend de la qualification des agents mis à disposition pour la réalisation des tâches, de la disponibilité de l'outillage et de la source électrique, etc.

Le shop level 4 est le dernier niveau de maintenance, il s'occupe de l'inspection et de la réparation des parties chaudes et des inspections complètes. Le constructeur des pièces de maintenance se trouve au Brindisi en Italie. La durée de l'inspection quant à elle n'inclue pas le cycle logistique d'import/ export.

L'ensemble de l'entretien est divisé en trois niveaux de base conformément au niveau de complexité et à la capacité de l'atelier.

Entretien externe sur le site – Niveau I

C'est le niveau le plus simple de l'entretien et il comprend les deux catégories suivantes :

Entretien préventif : Tâches programmées sur la base de l'équipement des heures de fonctionnement ou jours calendrier.

Entretien correctif : Tâches non programmées et réalisées pour corriger un dysfonctionnement.

L'entretien externe sur le site comprend tous les travaux situés à l'extérieur de l'équipement ainsi que les inspections programmées du générateur de la turbine, le nettoyage (lavage par eau) et le changement de la turbine du générateur ou les composants de l'équipement entraîné (si nécessaire).

Entretien interne sur le site - Niveau II

Atelier de réparation de moyenne taille; ce niveau d'entretien comprend un démontage complet et le remplacement de la totalité des modules assemblés tels que le compresseur à haute température, la turbine à haute pression, et d'autres composants.

Entretien hors site - Niveau II

Atelier de réparation de taille importante; l'objectif de ces travaux fournit tous les niveaux de l'entretien ainsi qu'une réparation complète du générateur de gaz.

Le schéma 4.2 résume les étapes expliquées précédemment :

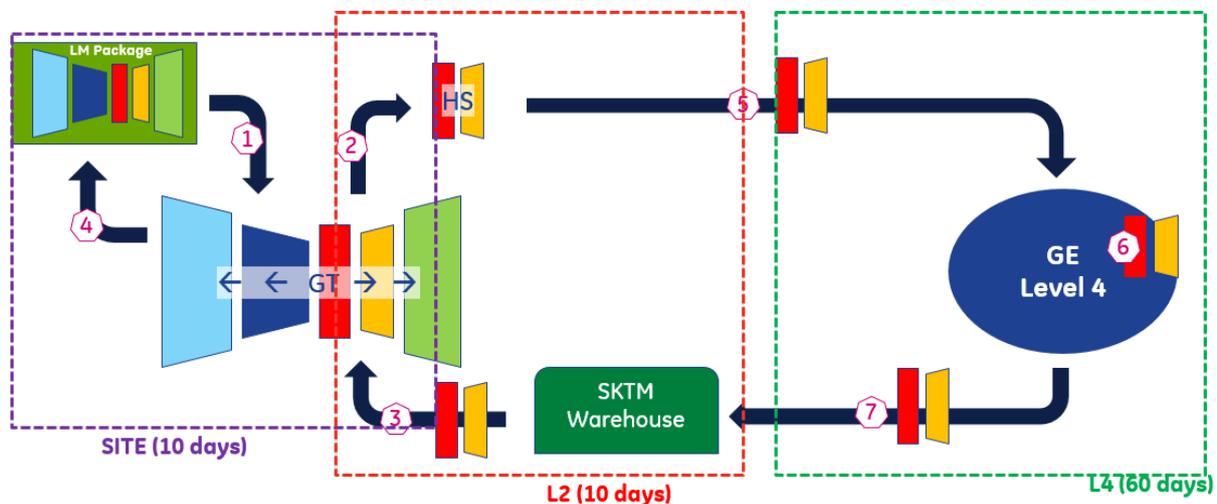


FIGURE 4.2 – Cartographie de l'échange modulaire de la partie chaude

Tel que :

1. Retirer la turbine à gaz de l'emballage.
2. Retirer la partie chaude de la TG
3. Installer la partie chaude de rechange (du stock SKTM)
4. Réinstaller la turbine à gaz
5. Expédier la partie chaude de la TG au shop level 4
6. Remise à neuf de la HS au shop level 4
7. Renvoyer la HS réparée au stock de SKTM

Dans le cadre du présent projet, nous nous sommes intéressés à la prestation "Remplacement sur site du module turbine à gaz" appelée aussi "Engine Exchange" car elle possède la plus longue durée de réalisation par rapport aux autres opérations de maintenance (en excluant les opérations qui se font au GE level 4, en Italie)

4.2 Analyse des processus de maintenance

4.2.1 Proposition d'une représentation des processus de maintenance

La formalisation choisie [Berger and Guillard, 2000] pour représenter le processus d'intervention de maintenance définit notamment les concepts de "processus", "sous-processus", "entité externe" et "information".

Un processus est exprimé sous forme d'objectifs pour donner un sens et un but, aux actions à réaliser. Un sous-processus met en exergue les points fondamentaux du processus. Une entité externe est une unité, un service ou un organisme externe qui joue un rôle majeur (acteur principal) dans la réalisation du processus étudié. Enfin, une information exprime les relations existantes entre les entités, les processus et les sous-processus.

Toute représentation graphique des processus peut comporter plusieurs représentations avec des niveaux de détail différents [Berger and Guillard, 2000]. Nous avons adopté deux niveaux d'abstraction : une vue macroscopique et une vue détaillée correspondant respectivement à une **cartographie relationnelle** identifiant clairement les relations principales existantes entre le processus examiné ainsi que les autres processus ou entités externes, et à une **cartographie détaillée** permettant la visualisation des interrelations existantes entre le processus examiné et les autres processus précisant la composition de ce dernier.

4.2.2 Cartographie relationnelle

Il s'agit d'une représentation macroscopique du processus général d'intervention de maintenance. Cette cartographie (figure 4.3) permet de situer le processus général d'intervention de maintenance par rapport à son environnement et d'identifier ses interactions avec ce dernier.

Dans les entités externes, nous retrouvons les acteurs ayant une influence sur ce processus : le client, les ressources humaines, etc.

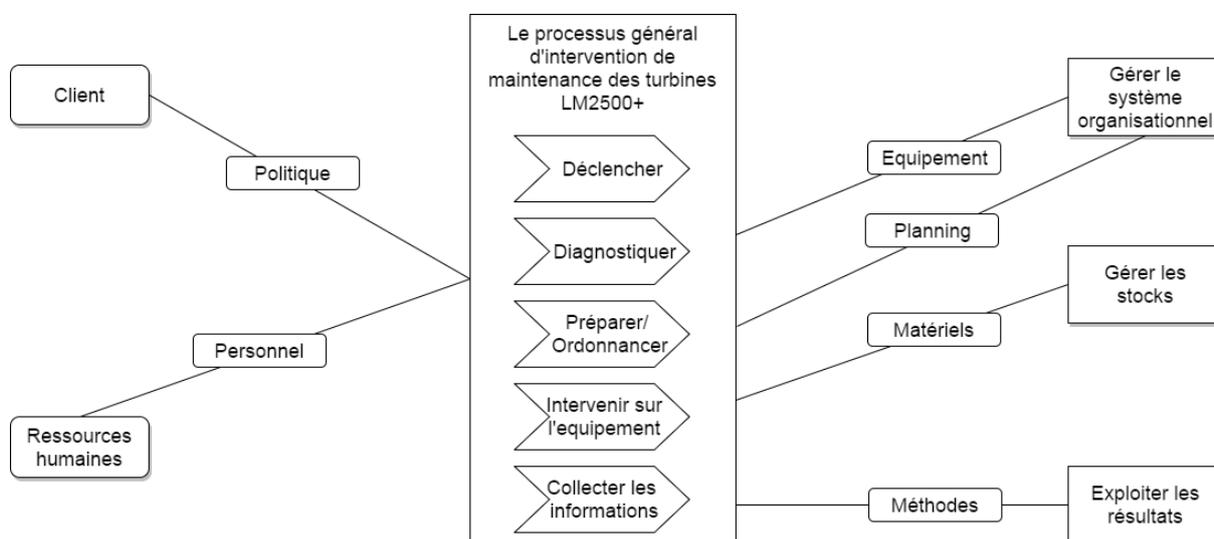


FIGURE 4.3 – Cartographie relationnelle de l'intervention de maintenance des turbines LM2500+

Deux processus, bien qu'a priori internes à la maintenance, sont externes au processus général d'intervention de maintenance : **gérer les stocks** (stocks d'outillages, de pièces de rechange, consommables, etc.) et **exploiter les résultats** (gestion du planning interne de la maintenance) afin d'améliorer la maintenance.

Un ensemble de flux d'informations agit sur le processus général d'intervention de maintenance. Ici, nous ne retenons que les principaux flux; le flux "méthodes" contient les procédures, les gammes de maintenance (curative ou préventive). Il correspond également à la désignation des équipes de maintenance pour les opérations prévues, la gestion du temps et de la charge de travail de l'équipe. C'est à ce niveau d'abstraction, que le flux de gestion de la maintenance est défini. Le flux "matériels" quant à lui comprend les outillages, les pièces de rechange, les consommables, etc.

Alors que le flux "planning" permet d'élaborer un planning prévisionnel et de connaître les priorités d'interventions sur les turbines (en cas de coïncidence entre deux interventions préventives ou curatives).

Le flux "équipement" renseigne principalement sur l'état des turbines : arrêt/marche, heures de marche ainsi que sur les interventions passées. Le flux "politique" correspond à la politique générale de l'entreprise et inclut donc la politique de maintenance. Le flux "personnel" quant à lui correspond à la gestion du recrutement et de la formation des LTA et FE. Enfin le processus général d'intervention de maintenance est subdivisé en plusieurs sous-processus qui sont : "déclencher", "diagnostiquer", "préparer et ordonnancer", "intervenir sur l'équipement" et "collecter les informations".

4.2.3 Cartographie détaillée

La cartographie détaillée consiste principalement en une décomposition en sous processus de la cartographie relationnelle. Du fait de ce nouveau niveau d'abstraction, les flux sont également détaillés pour avoir une cohérence entre les deux niveaux. Une vue d'ensemble de cette cartographie est proposée dans la figure 4.4.

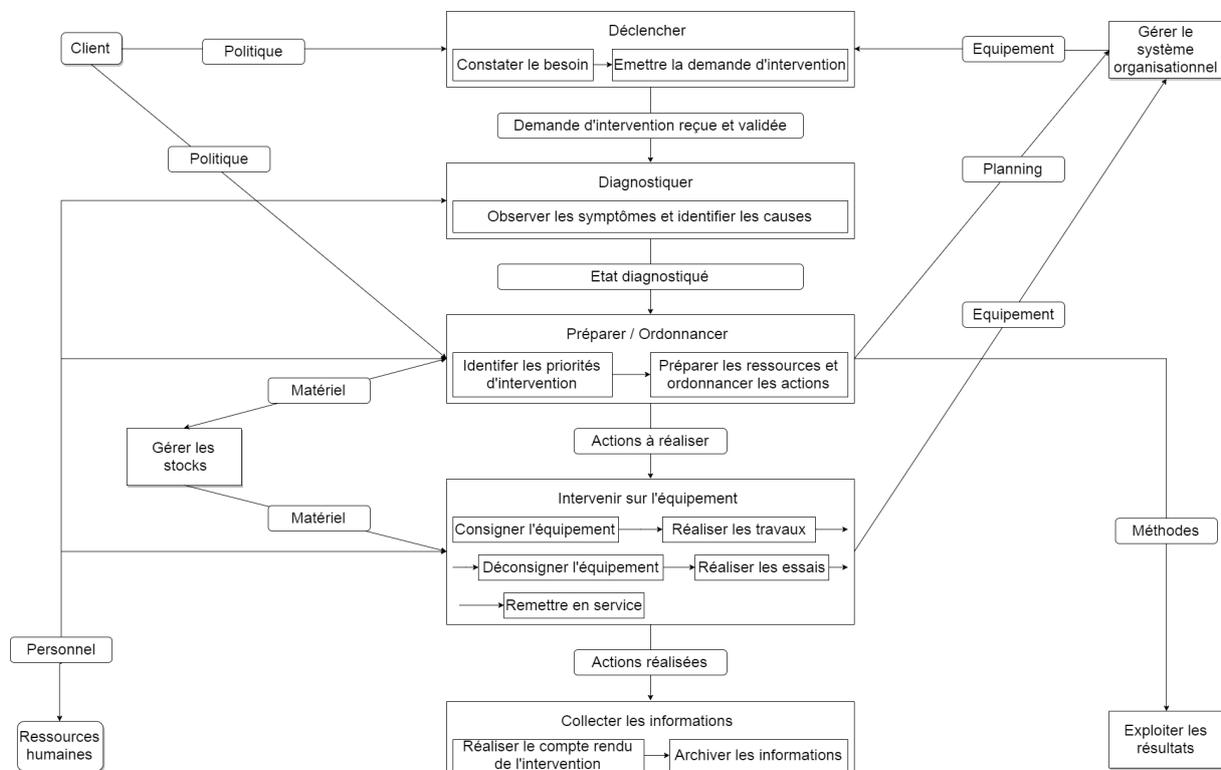


FIGURE 4.4 – Cartographie générique de l'intervention de maintenance des turbines LM2500+

Le processus "déclencher" se décompose en deux sous processus : "constater le besoin d'intervention" et "émettre la demande d'intervention". Le premier est réalisé par le client

(constat d'une panne après une boroscopie ou arrêt inattendu d'une turbine dans le cas d'une maintenance curative ou bien l'achèvement d'un certain nombre d'heures de fonctionnement pour effectuer une maintenance préventive). Pour le second, il s'agit d'émettre (de manière orale et écrite) une demande d'intervention de maintenance. Globalement, ce processus produit une "demande d'intervention validée" qui permet de continuer le processus général. Le processus "diagnostiquer" consiste dans un premier temps à observer les symptômes de la défaillance ou de la dégradation, puis à en identifier la cause. C'est un processus complexe qui, à ce niveau d'abstraction, n'est pas plus détaillé. Il produit un "état diagnostiqué" selon la demande d'intervention.

Le processus "préparer/ordonnancer" se décompose en deux sous-processus : "identifier les priorités d'intervention" et "préparer les ressources et ordonnancer les actions". Le premier s'exécute suivant des critères qui sont en maintenance corrective, comme les critères du niveau d'urgence, et au niveau préventif il existe les critères de périodicité (échancier, inspection). Il faut noter que ces tâches sont souvent discutées et réalisées en accord avec le client. Le second sous-processus correspond à la préparation des outillages, des pièces de rechange. Il permet d'organiser la disponibilité de l'équipe pour l'intervention (1 LTA, 1 mechanical FE, 1 electrical FE). Ces actions seront transformées par le processus "intervenir sur l'équipement" en "actions réalisées".

Ce processus est, quant à lui, composé de différents sous-processus, à savoir :

"Consigner la turbine" : ce sous-processus consiste à couper les énergies de la turbine, à la condamner et à la signaler, c'est à dire à empêcher l'accès à des personnes non autorisées.

"Réaliser les EE" : il s'agit de la réalisation de l'intervention sur turbine. Cela consiste à préparer le package, à retirer l'ancienne turbine et à la remplacer par une autre. La turbine remplacée sera transportée vers le shop pour remplacer ses parties chaudes (HSE) et réparer les anciennes parties dans le shop level 4.

Quant au sous-processus **"déconsigner l'équipement"**, procédure inverse de la consignation, il consiste à rétablir les énergies de la turbine maintenue pour le démarrage.

"Réaliser les essais" : il s'agit de la vérification de l'efficacité de l'intervention par la mise en marche de la turbine pendant 24h non stop. En cas d'échec, des travaux de vérifications sont entrepris et un nouveau test est réalisé. Ce processus est refait jusqu'à la marche sans arrêt de la turbine pendant 24h.

"Remettre en service" : ce sous-processus est à l'interface entre la maintenance et le client, le client peut vouloir mettre en marche la turbine après la réparation ou bien la laisser en arrêt jusqu'au besoin.

Enfin, le processus, "collecter les informations" est décomposé en deux sous-processus : "réaliser le compte-rendu" et "archiver les informations". Pour le premier il s'agit de rendre compte de l'intervention sous forme écrite ainsi que le second permet d'obtenir une traçabilité des interventions de maintenance (sous forme d'historique).

En ce qui concerne les différents flux d'informations, ils demeurent les mêmes que ceux de la cartographie relationnelle. Ils sont ici affectés aux différents processus composant le processus général. Un flux au niveau général peut concerner différents processus au niveau détaillé, c'est le cas de la plupart des flux. Globalement, le processus de maintenance transforme un équipement à maintenir en un équipement maintenu.

4.3 Analyse de la fonction maintenance

Afin de pouvoir identifier les principaux dysfonctionnements du système maintenance des turbines aérodérivatives, nous commençons notre travail par une étude conceptuelle du système actuel.

Une bonne compréhension de la situation du système existant nous a permis de faire une analyse complète et significative afin de proposer des axes d'amélioration.

La collecte de données a été nécessaire afin d'établir une étude de l'existant, pour cela nous nous sommes basés sur le recueil d'informations à travers l'interview du personnel chargé d'exécuter les tâches faisant l'objet de notre étude, des observations faites, des documents et supports de données de l'entreprise disponibles.

La méthode utilisée consiste en la description détaillée de l'organisme établi suite à nos observations et l'application des différentes recommandations faites par les responsables et cadres du service de maintenance

Le service maintenance de GE peut être représenté par l'interaction de quatre composantes, comme le montre la figure 4.5 ci-dessous :

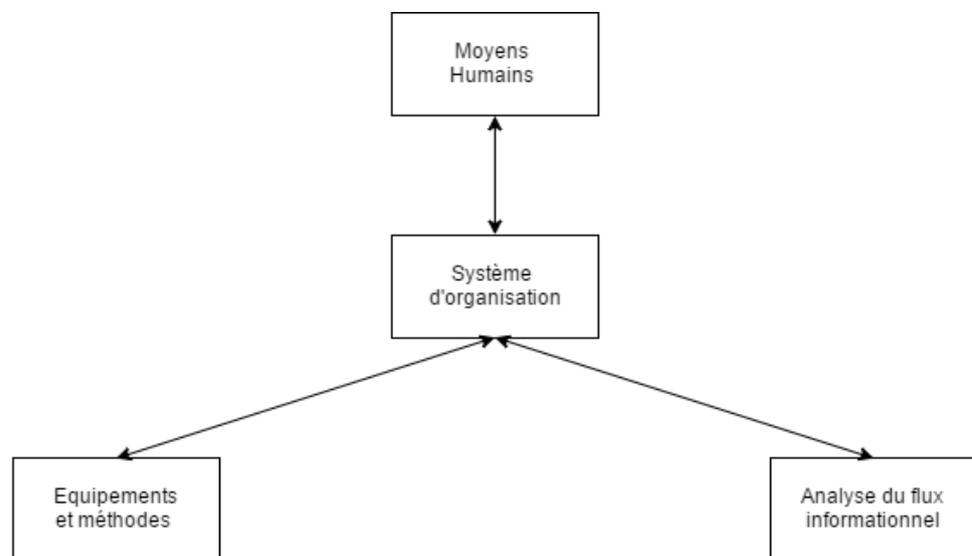


FIGURE 4.5 – Représentation des composantes du service maintenance

Nous décrivons dans ce qui suit les quatre composantes citées ci-dessus, dans le but d'établir une analyse précise du service maintenance. Pour cela, nous nous sommes basées sur l'observation et les entretiens réalisés pendant le déroulement des opérations d'Engine Exchange.

4.3.1 Étude du système organisationnel

L'organisation actuelle de la maintenance des turbines aérodérivatives se présente comme suit :

À ce niveau, nous allons décrire les différents postes qui sont en relation avec la fonction maintenance afin de définir les responsabilités et les missions relatives à chaque poste.

Le Customer Performance Manager (CPM) :

A partir des besoins établis par SPE (le client), le CPM a pour fonction de traduire ses objectifs en plan d'exécution qui permettra l'établissement des plannings prévisionnels des opérations de maintenance afin d'assurer le bon fonctionnement des 37 turbines réparties sur le territoire national.

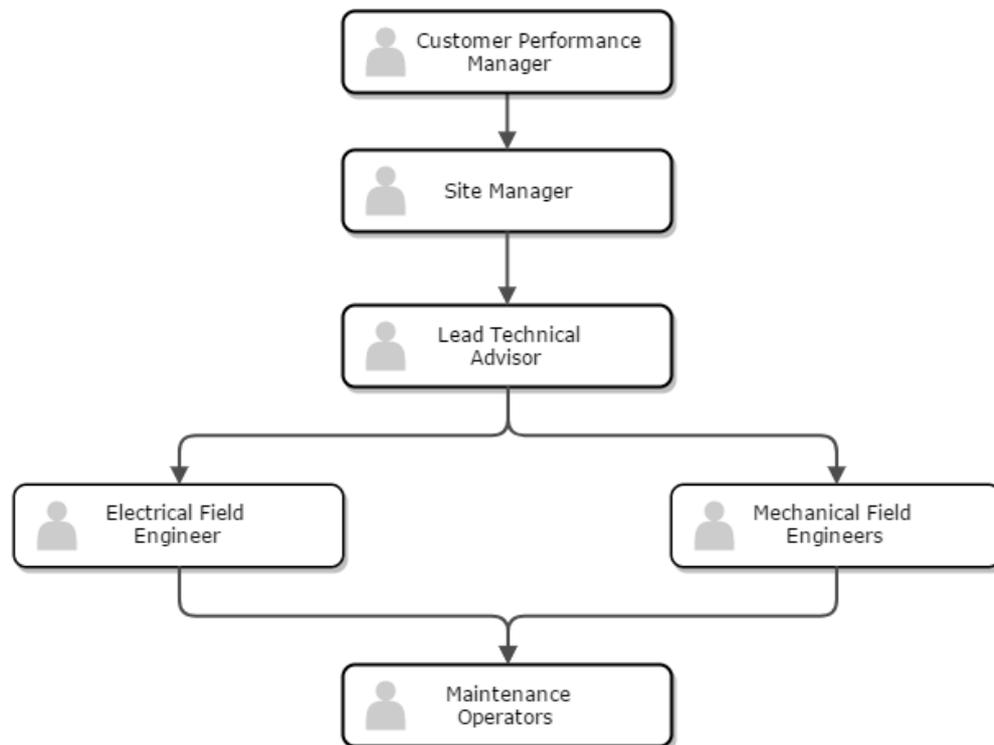


FIGURE 4.6 – L'organisation hiérarchique du service maintenance

Les principales missions du CPM se résument à :

- L'élaboration du planning prévisionnel des opérations de maintenance préventives,
- L'évaluation des besoins de l'intervention (pièces de rechange, outils, main d'oeuvre, transport, etc.),
- La gestion et le suivi des projets.

Le Site Manager (SM) :

Ses attributions consistent à préparer les conditions de démarrage des EE, se matérialisant par la désignation des LTA et FE devant assurer le suivi des travaux. Il s'assure ensuite de la mise à disposition des centrales, des ressources humaines et du matériel tels qu'évalués et programmés par le CPM.

Il a pour missions principales :

- La coordination et la supervision de l'exécution du programme de maintenance préventive et des opérations de maintenance curative,
- Le management du personnel placé sous son autorité,
- Assurer la disponibilité des équipements de levage (en coordination avec le client qui se charge de cette mission),
- Assurer le suivi et la gestion des pièces de rechange et des consommables.

Le Lead Technical Advisor (LTA) :

Il est le représentant de GE sur le site client et le 1^{er} responsable sur site lors d'un EE.

Il a pour missions :

- De collaborer avec le SM afin d'assurer la bonne marche des opérations,

- D'assurer la gestion et l'optimisation de l'utilisation des pièces de rechange et des consommables nécessaires,
- De gérer l'ensemble du personnel durant les opérations de maintenance,
- D'assurer et contrôler l'exécution des travaux conformément au planning et spécifications établis par le CPM et le SM.

Field Engineers (FE) :

Les Field Engineers sont chargés d'effectuer la maintenance en s'occupant des opérations de 3^e et de 4^e niveaux avec l'aide de l'ensemble des opérateurs de maintenance assurés par le client.

4.3.2 Étude des équipements et méthodes

Chaque intervention de l'équipe de maintenance sur site nécessite la présence des moyens de manutention ; palonnier, grue, forklift, une nacelle ainsi qu'une boîte à outils spécifique (fly box) qui contient les éléments cités en annexe C.

4.3.3 Les moyens humains

Les opérations de maintenance nécessitent la mobilisation des moyens humains pour la réalisation sur site des opérations d'EE, ils sont répertoriés comme suit :

- 1 Lead Technical Advisor,
- 2 Field engineers (1 Electrical, 1 controle),
- Des opérateurs de maintenance assurés par le client (entre 5 et 15).

4.3.4 Analyse du flux informationnel

Afin d'assurer la traçabilité des interventions de maintenance sur les LM2500+, Le CPM assure l'enregistrement documentaire des opérations à travers :

- La codification des TM2500+ selon leur implantation,
- La création des fiches historiques des interventions préventives et correctives pour chaque turbines.

4.3.5 Diagnostic

Définition du diagnostic :

« Le diagnostic est la description des aspects caractéristiques de la situation de l'entreprise à une période donnée. Il représente une démarche complexe dont le but est d'identifier les principaux dysfonctionnements d'une entreprise et de préconiser des actions de changement et d'amélioration » [L'HOTE, 2002]

Pour mieux cerner les anomalies qui peuvent exister au niveau du système actuel de gestion de la maintenance des TM2500+, nous avons appliqué la méthodologie de LAVINA qui se déroule en quatre étapes : [LAVINA, 1992]

1. La collecte d'informations,
2. L'analyse et l'évaluation des résultats obtenus,
3. La détermination des objectifs à atteindre,
4. L'élaboration du plan d'amélioration.

4.3.6 Collecte d'informations

Pour cerner tous les aspects de la maintenance, on est basé sur :

Les interviews : Il s'agit d'entretien réalisé directement avec les différentes personnes concernées directement ou indirectement par la maintenance des LM2500+.

L'analyse des documents : c'est la consultation des documents du service maintenance, nous citerons comme exemple :

- Les procédures techniques de maintenance des LM2500+,
- Les rapports d'activité,
- L'historique des pannes.

L'observation directe (des situations de travail) : C'est d'observer directement sur le terrain, le travail des différents agents de la maintenance, et ce dans le but de confirmer ou infirmer certaines informations recueillies lors des entretiens.

Dans le cadre de ce projet nous avons eu l'occasion d'assister à 3 opérations d'Engine Exchange dans 3 différents sites ;

4.3.7 Les analyses des résultats

La deuxième étape consistait à dresser un constat basé sur les observations et résultats de l'enquête que nous avons mené. Ce jugement nous a permis d'identifier d'une part, le processus et la politique de maintenance adoptés par l'entreprise et d'autre part, les lacunes engendrées par cela.

Système organisationnel :

Nous avons remarqué que le système organisationnel de l'entreprise présentait les points forts suivants :

- Les missions et responsabilité sont bien définies,
- Une bonne qualification des responsables.

et les lacunes suivantes :

- Absence d'un tableau de bord de performances permettant de faire un management par objectif,
- Absence d'une démarche d'analyse pour les durées d'intervention.

Équipements et méthodes :

Concernant les méthodes appliquées, on a pu constater des insuffisances pour le déroulement des tâches de maintenance et la GDPR qui sont les suivantes :

- L'inexistence de l'analyse du temps de maintenance,
- Inexistence de méthodes précises pour la gestion de pièce de rechange ce qui induit à des ruptures de stocks ; le réapprovisionnement se fait suivant l'historique de consommation,
- La documentation nécessaire à une maintenance correcte et efficace est insuffisante,
- L'insuffisance des moyens et d'outils ; absence de procédure pour la réservation des pièces pour les travaux planifiés, ainsi que la réception qualitative des pièces de rechange,
- Le stock minimum et maximum sont déterminés sur la base de l'expérience,

Moyens humains :

Nous avons noté également que :

- GE recrute le personnel en fonction de besoins ce qui implique une répartition optimale de main d'oeuvre,
- L'existence d'un plan de formation ce qui implique une bonne maîtrise d'outil de maintenance.

Mais il existait un réel manque de qualification en matière d'organisation et d'ordonnancement des opérations de maintenance due à la non-existence de fiche de préparation permettant la description chronologique des opérations à effectuer lors des EE. Aussi, un manque de suivi, d'analyse et de traitement du retour d'expérience.

Conclusion

Cette partie nous a permis de nous familiariser avec la maintenance des turbines TM2500+, et d'établir à partir de nos observations un diagnostic détaillé afin de détecter les anomalies existantes au niveau de la gestion, de l'organisation, et des moyens utilisés pour la maintenance.

Ceci nous a permis par la suite de proposer des solutions adaptées à la problématique étudiée et qui sont détaillées dans le chapitre qui suit.

Chapitre 5

Suggestions pour l'amélioration de la fonction maintenance

Introduction

Suite aux résultats et constats du diagnostic établi, nous allons dans le présent chapitre proposer un plan d'action dont le principal objectif est l'amélioration des performances du système de gestion et d'organisation de la fonction maintenance.

Les axes proposés dans ce chapitre décrivent les actions à entreprendre pour améliorer l'efficacité des prestations du service maintenance. Dans ce cadre, nous avons structuré notre plan d'actions autour de cinq axes principaux qui sont les suivants :

5.1 Les axes d'amélioration

5.1.1 Axe 1 - Ordonnement des travaux de maintenance

La fonction principale de l'amélioration étant l'ordonnement, les interventions de maintenance (correctives ou préventives) doivent être maîtrisées par les agents de maintenance afin d'assurer une utilisation rationnelle et optimale des différents facteurs qui sont ; les délais et moyens de réalisation ainsi que les ressources humaines.

L'ordonnement des tâches de la maintenance a pour mission :

- De prévoir la chronologie du déroulement des différentes tâches,
- De planifier les travaux de maintenance ainsi que la répartition des moyens disponibles,
- D'optimiser les délais des interventions en analysant les durées prévues et les durées de réalisation,
- De contrôler l'état d'avancement des EE,
- D'optimiser les moyens et ressources disponibles.

5.1.2 Axe 2 - Préparation des travaux de maintenance

La préparation des travaux de maintenance s'inscrit dans le cadre de l'organisation de la maintenance de l'entreprise qui regroupe l'ensemble des mesures de planification, de pilotage et d'analyse à entreprendre.

Dans le cadre d'amélioration de la maintenance, nous proposons de :

- Mettre en place un historique complet de toutes les réparations de maintenance subies par chaque équipement,

- Les comptes rendus doivent contenir les indications sur les effets, causes et remèdes standardisés (codifiés) afin d'être traité statiquement.

5.1.3 Axe 3 - Gestion et tenue des pièces de rechange et outillage

Le stock est constitué de :

- Pièces de rechange,
- Pièces standards respectant les normes internationales de GE (vis, boulons, engrenages, etc.),
- Les consommables d'entretien (Voire annexe D),
- Outillage spécifique (fly box).

Afin d'avoir la disponibilité des pièces de rechange et d'outillage appropriés nécessaires à l'exécution des interventions de maintenance nous proposons de :

- Prévoir les consommations futures des pièces de rechange à partir des consommations passées en suivant l'historique des interventions,
- Contrôler rigoureusement les pièces de rechange lors de la réception pour accélérer d'éventuelles demandes de changement,
- Respecter les règles de stockages des pièces de rechanges pour éviter les dangers et la dégradation de leurs états,
- Mettre en place un inventaire annuel de l'outillage et cela pour le réapprovisionnement du matériel manquant,
- Assurer la mise à disposition de l'outillage nécessaire pour minimiser le temps d'exécution.

5.1.4 Axe 4 - La mise en place d'un tableau de bord pour la gestion de maintenance

Pour avoir un service de maintenance plus efficace et minimiser les coûts des opérations d'EE, il est nécessaire d'élaborer un tableau de bord permettant d'évaluer les performances de la fonction maintenance et d'entreprendre des actions d'amélioration.

Pour cela la gestion de maintenance doit être établie par :

- Un suivi des coûts de chaque EE,
- Un tableau de bord comportant les indicateurs d'activité et résultats permettant de prendre des décisions justifiées,
- Une analyse des résultats à partir des indicateurs d'activité, dont le but sera de mesurer l'atteinte des objectifs et d'assurer une amélioration en continu,

Pour le choix des indicateurs nous avons pris en compte les paramètres suivants :

- La disponibilité des données,
- Pouvoir mettre à jour d'une façon continue les données reprises dans les ratios,
- Moyens mis à la disposition de la fonction maintenance (personnel et moyens techniques de gestion).

Les indicateurs de suivi

Coût main d'oeuvre :

$$\frac{\text{Montant total des dépenses de main d'oeuvre}}{\text{Montant total des dépenses de maintenance}}$$

Coût de matière :

$$\frac{\text{Montant total des sorties magasin et achats directs}}{\text{Montant total des dépenses de maintenance}}$$

Coût matière sur durée de travail :

$$\frac{\text{Montant total de la masse salariale}}{\text{Nombre total d'heures de travail}}$$

Coût horaire :

$$\frac{\text{Temps réel de travail}}{\text{Temps de présence}}$$

L'utilisation de ces indicateurs permettra aux responsables de service d'avoir une idée précise sur les performances, effectuer des comparaisons avec les résultats précédents et de détecter d'éventuelle écarts ou anomalies, et donc de prendre des mesures correctives appropriées.

Avec cet outil de décision, la gestion de la maintenance se fera d'une manière dynamique.

Tableau 5.1 – Le tableau de bord de la gestion du service maintenance

Ratios	Résultat précédent	Résultat actuel	Objectif	Observations
Coût main d'oeuvre				
Coût de matière				
Coût matière sur durée de travail				
Coût horaire				

5.1.5 Axe 5 - Constitution d'un dossier historique

Afin d'assurer une maintenance uniforme et de qualité, la construction d'un fond documentaire est nécessaire.

Dans le but :

- D'adopter une organisation rigoureuse de suivi technique,
- De posséder un inventaire complet des équipements,
- De mettre à jour et exploiter les historiques.

Les fiches historiques regroupent les renseignements concernant les défaillances (fréquence, importance, localisation) et les interventions réalisées sur la turbine depuis son installation. Ces fiches précisent le numéro d'ordre de l'intervention, de la date ainsi que de la durée d'arrêt de l'intervention et l'identification de toutes les pièces remplacées, etc.

Le dossier historique doit être structuré comme suit :

- Connaître l'état des turbines,
- Lister les actions à entreprendre pour la maintenance effectuée pour chaque turbine (avec leurs types),
- Dresser l'historique des pièces de rechanges consommés,
- Sauvegarder toutes les données de fonctionnement (nombre cumulé d'heures de fonctionnement),
- Les emplacements mises à jour des équipements.

Dans cette partie, nous avons fait ressortir un certain nombre d'axes d'amélioration. Ils nécessitent un engagement de tous les acteurs qui interviennent dans la maintenance pour la réussite de la fonction maintenance.

L'ordonnement des tâches étant l'axe qui offre le plus de potentialités. Par rapport au contexte, il se présente comme étant la méthode la plus apte à accroître l'efficacité des interventions de maintenance. Nous présenterons cette démarche, à la fois à travers sa philosophie et son mode d'emploi concret dans la partie qui suit.

5.2 Ordonnement des tâches de maintenance

L'équipe de maintenance dans l'exécution de ses interventions doit s'impliquer de manière efficace à réduire le temps d'indisponibilité. Pour faciliter aux exécuteurs d'atteindre leur objectif avec brio, nous avons proposé une méthode d'ordonnement basée sur le diagramme de Gantt.

5.2.1 La démarche d'ordonnement

Pour assurer un bon ordonnement des tâches, nous avons proposé une démarche élaborée à partir du principe du diagramme de Gantt, elle est basée sur les quatre étapes suivantes :

1. La décomposition de l'opération d'EE en opérations élémentaires, cette dernière se fait comme suit :
 - Étudier les documents techniques de maintenance,
 - Dresser l'historique des opérations similaires,
 - Entreprendre une observation directe sur le site des opérations d'EE,
 - Évaluer l'expérience des agents de la maintenance à travers les entretiens,
2. La détermination de l'ordre chronologique entre les opérations élémentaires et les relations de précédence.
3. L'affectation à chaque opération élémentaire l'effectif et les moyens nécessaires à sa réalisation.
4. L'application de la démarche du diagramme de Gantt pour déterminer l'ordonnement des tâches et la durée globale nécessaire pour effectuer les opérations de maintenance.

5.2.2 Le diagramme de Gantt

Présentation

La représentation des activités d'un projet sur un graphique de Gantt permet de visualiser les avancements dans la réalisation d'un projet et de déterminer la durée globale de sa réalisation.

Le diagramme de Gantt conduit donc à déterminer de la meilleure manière possible le positionnement des différentes activités d'un projet à exécuter, sur une durée de temps bien déterminée.

Principe

Le diagramme de Gantt, du nom de son développeur Henry Gantt (1861-1919), est un graphe de planning et de prévision visant la mise en évidence des durées et permettant ainsi de contrôler à tout moment l'évolution du projet, en comparant les réalisations aux prévisions. [Ecoto, 1986]

A la fois dans la littérature et dans les entreprises, il est considéré comme le moyen le plus simple et le plus utilisé pour la planification des tâches nécessaires à la réalisation de l'ordonnement.

Dans le cas du problème d'atelier, ce diagramme se compose de plusieurs lignes horizontales, chacune d'entre elles désignant une machine. Les opérations exécutées sur une machine donnée sont représentées sous forme de barres ayant des longueurs proportionnelles à leurs temps opératoires. L'axe des abscisses représentant le temps, les barres sont positionnées aux dates de début d'exécution des opérations. Ainsi, le diagramme de Gantt permet de montrer l'occupation des machines dans le temps, les séquences de traitement sur chaque machine et les dates de fin des travaux.

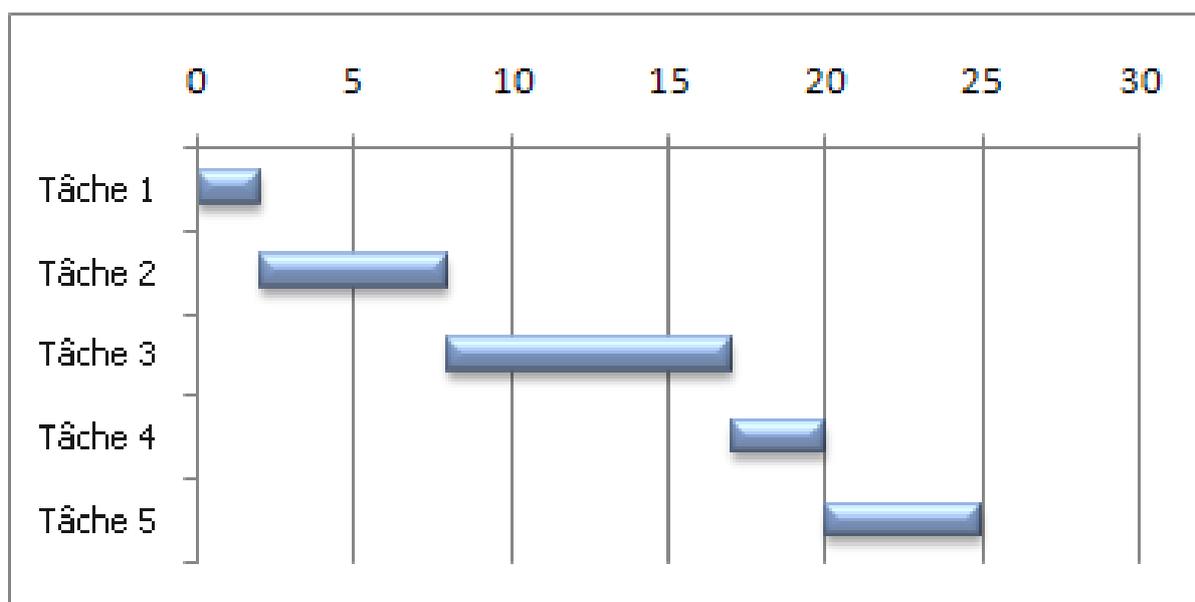


FIGURE 5.1 – Le diagramme de Gantt

Avantages

Le diagramme de Gantt possède les avantages suivants :

- Il est facilement compréhensible par les exécutants à cause de sa clarté et de sa simplicité,
- Il peut servir de base à des plans d'action intermédiaires plus détaillés,
- Il permet de suivre le déroulement des opérations dans le temps,
- Il résume, assez bien, l'analyse du projet établit par les responsables respectifs,

Les opérations d'engine exchange représentent un volume de dépense qui mérite un effort réel d'organisation. En plus, des délais extrêmement stricts sont assignés aux exécuteurs des programmes d'entretien, car le coût d'arrêt de la turbine, de la location d'une grue et d'une nacelle ainsi que l'immobilisation des outillages spécifiques sont très élevés. Toute journée de retard est lourde de conséquences économiques. Inversement, toute journée de marche supplémentaire des turbines est très intéressante. Toute ces considérations rendent nécessaire la mise en place d'une procédure d'ordonnement de maintenance. C'est ce qui nous a conduit à utiliser le logiciel MS Project pour effectuer un diagramme de Gantt ordonnant ces tâches.

Afin de bien ordonner les tâches, il nous a fallu respecter les étapes suivantes :

1. Analyser les tâches à conduire,

2. Placer en ordre logique les tâches, en déterminant les dépendances des tâches entre elles,
3. Déterminer les dates de lancement, les dates d'achèvement ainsi que les temps prévus pour chaque tâche.

5.2.3 Établissement d'une liste des tâches

Tout travail d'ordonnancement commence par l'établissement d'une liste des tâches, ou d'opérations, qui concourent à la réalisation de l'objectif fixé.

Les différentes tâches, effectuées lors d'une opération d'engin exchange, sont regroupées dans le tableau en annexe E. Elles ont été déterminées après consultation des documents techniques internes relatifs aux turbines TM2500+ et du chronométrage des opérations. L'aide apportée par les LTA et les ingénieurs field qui nous ont fait suivre de plus près le déroulement des travaux, nous a permis de diviser les grandes opérations en tâches élémentaires.

5.2.4 Détermination des antériorités

Après avoir établi la liste des tâches, nous avons procédé à la détermination des antériorités. Ce travail consiste à désigner, pour chaque tâche, la ou les tâches qui la précèdent et celles qui la suivent. Ensuite, nous les avons classé en suivant leur ordre logique d'exécution et ceci nous a permis d'établir un bon suivi des opérations du début jusqu'à la fin de l'EE. Ce travail a été réalisé en questionnant le SM, LTA et les FE sur le moment d'exécution de chaque tâche vis-à-vis des autres tâches. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau en Annexe G.

5.2.5 Estimation des durées d'exécution des tâches

La détermination des temps prévus est le fondement même sur lequel repose la fonction d'ordonnancement.

La prévision des temps est indispensable pour :

- Permettre de la meilleure manière la préparation du travail,
- Permettre la comparaison du temps passé au temps prévu,
- Permettre de prévoir les charges du travail.

De ce fait, nous avons chronométré les tâches durant trois opérations d'EE. Nous avons demandé également aux FE le temps leur paraissant le plus réaliste possible pour estimer les durées de chaque tâche, en tenant compte des moyens techniques utilisés, du nombre d'agents disponibles et de leurs qualifications. Nous avons effectué la moyenne des durées utiles des trois tâches avec une marge de sécurité après avoir obtenu l'avis des FE.

Les résultats obtenus des temps prévus, sont donné dans le tableau en Annexe G.

5.2.6 Construction du diagramme Gantt

Le diagramme Gantt a été élaboré après avoir bien défini les tâches élémentaires qui doivent précéder et suivre immédiatement chaque tâche, c'est-à-dire, après une description complète par antécédents et par conséquents (la description par antécédents est suffisante pour décrire l'ordonnancement car de là, on peut déduire l'acheminement par conséquent)

5.2.7 Exploitation du diagramme

La date de début d'exécution du projet correspond à la date de début de la première tâche (tache n° 1 : meeting avec le client). On a fixé cette date pour 8 Mai 2017 à 8h. La date de fin

du projet correspond à la date de fin de la dernière tâche (tâche n° 48 : turbine energizing). En tenant compte des horaires de travail de l'équipe de maintenance : 7 jours par semaine , de 8h à 19h, et en tenant compte aussi d'une heure de pause pour le repas (entre 12h et 13h), la date d'achèvement de l'EE sera donc le 12 Mai 2017 à 10h40. C'est-à-dire que la durée totale du projet est de 4,3 jours.

Cette action d'amélioration vise à renforcer le système de procédure de travail en fournissant un diagramme d'ordonnement des tâches de maintenance qui assure aussi le suivi et le retour d'expérience des opérations.

Nous avons pu par ce diagramme de réduire la durée totale de l'opération de 10 jours à 5 jours qui servira à réduire le coût de ces opérations.

Le SM et le LTA qui sont responsables du suivi de l'opération EE devront donc, s'ils veulent bien respecter ce délai, surveiller de très près les tâches en fournissant tous les moyens nécessaires pour que leur déroulement se fasse aux dates prévues.

Conclusion

A travers ce chapitre nous avons mis en lumière un certain nombre d'axes d'amélioration qu'il convient de mettre en place pour assurer une efficacité maximale du service maintenance. Il s'agit essentiellement de la préparation des travaux de maintenance, la gestion et tenue des pièces de rechange et outillage et la mise en place d'un tableau de bord pour la gestion.

L'analyse des opérations techniques de maintenance nous a permis également de proposer un plan d'ordonnement des tâches susceptible de réduire les journées de travaux de 50%, en tenant compte des volets d'amélioration précédents.

Conclusion générale

C'est dans le souci d'améliorer les performances de son service maintenance que GE nous a confié la mission d'effectuer une analyse du système actuel, afin de relever les dysfonctionnements majeurs et de proposer par la suite des actions pour améliorer les forces du service et remédier aux faiblesses.

Notre étude a commencé par la prise de connaissance des turbines utilisées lors des opérations de maintenance effectuées ainsi que les méthodologies et principes de fonctionnement du service maintenance. Nous nous sommes particulièrement intéressés à la maintenance de type Engine Exchange dû aux coûts qu'engendre cette dernière.

Cette première vue était le point de départ du diagnostic qui nous a permis de relever certaines insuffisances liées aux méthodes de gestion du service maintenance et l'accomplissement des opérations d'EE.

Le diagnostic effectué nous a permis de relever des axes d'amélioration. Parmi les problèmes majeurs issus de cette analyse, nous avons traité en particulier le problème lié à l'ordonnancement et le suivi des opérations d'EE, pour cela, nous avons proposé un diagramme de GANTT énumérant toutes les tâches des opérations, leurs durées et relations avec les autres tâches qui a pour but essentiel de réduire la durée totale des opérations. Après avoir analysé le déroulement des opérations, en tenant compte des recommandations des responsables et acteurs de la maintenance, nous avons pu réduire la durée de ces dernières de 10 à 5 jours en impliquant une réduction des coûts globaux.

Nous avons également constaté d'autres anomalies, touchant essentiellement la gestion et le suivi des opérations. Pour y remédier nous avons proposé un ensemble de recommandations qui constituent le point de départ pour des analyses plus approfondies du service maintenance de l'entreprise par l'élaboration d'un tableau de bord de maintenance, la gestion et tenue des pièce de rechange et des consommables ainsi que la constitution d'un dossier historique de maintenance. La mise en place de ces recommandation aura un impact sur la performance et la réactivité du service. Elles pourront être améliorées ultérieurement par la mise en place d'autres indicateurs de gestion selon la facilité d'extraire les données relatives.

A la lumière de ce mémoire, nous estimons que nous avons contribué à répondre aux préoccupations majeures des responsables de la fonction maintenance. Nous estimons aussi que ce document sera utile pour GE, et pour toutes activités traitant du problème de maintenance.

Appendices

Annexe A

Description de la remorque principale de la turbine à gaz LM2500+

A.1 Remorque principale

A.1.1 Système de ventilation et de combustion

Le système de ventilation d'air et de combustion de l'ensemble GTG fournit l'air de combustion filtré afin d'assurer le fonctionnement du moteur à turbine, et l'air de ventilation filtrée pour le compartiment de la turbine. Un système d'air séparé fournit l'air de ventilation pour le générateur. Le logement du filtre à air de la turbine a été équipé de plates-formes, d'échelles, de capots contre les intempéries, de boîtiers anti-glace, de boîtiers de filtre complets avec des écrans anti-déchets, de pré-filtre et de filtres de haute efficacité.

A.1.2 Échappement de la turbine

Le LM2500+ s'épuise grâce à un rebord situé à l'extrémité de l'enceinte de la turbine, cet échappement axial fournit de faibles restrictions et une voie d'accès direct, en option un amortisseur de bruit fournit au client ou un équipement de récupération de chaleur.

A.1.3 Système d'huile de lubrification de la turbine

Offre simplex et réservoir d'huile de lubrification & nettoyage des filtres.

A.1.4 Patin d'huile de lubrification du générateur

Réservoir d'huile de lubrification minérale, filtre recto-verso et pompe AC.

A.2 Aperçu générateur

Le générateur transforme la puissance sur l'arbre de rotation en énergie électrique lorsqu'il est entraîné par une machine motrice à turbine à gaz LM2500+.

Le générateur est généralement installé sans enceinte et différentes méthodes sont utilisées pour refroidir l'air. L'unité est boulonné au patin principal de l'ensemble turbine à gaz-générateur, en alignant axialement le rotor avec la turbine de puissance. Un accouplement flexible à l'échappement du moteur relie le rotor du générateur à l'arbre de la turbine à puissance.

Le générateur est caractérisé en triphasé, de type exciteur sans balais à deux pôles, équipé d'un système de refroidissement de l'air à circuit ouvert. Pour éviter une dégradation des performances sous haute tension des charges ou à des températures ambiantes, le refroidissement est un facteur essentiel dans la conception du générateur.

Les roulements aux extrémités d'entraînement et de non-entraînement supportent le rotor. Le poids brut du générateur assemblé est d'environ 61 tonnes.

Remorque auxiliaire de la turbine à gaz LM2500+

1. Système de démarrage électro-hydraulique
2. Système de lavage au tuyau d'eau en Arrêt/Marche (filtre à air d'instrument inclus)
3. Patin anti-incendie (Le range bouteille de CO2 principal de réserve)
4. Échangeur de chaleur (Ailette/ventilateur en duplex pour les systèmes d'huile du démarreur/générateur/turbine)
5. Salle de commande
 - Panneau de contrôle de la turbine (PCT)
 - Centre de contrôle du moteur de l'unité (CCM) (En option)
 - Systèmes de batterie avec chargeurs

Annexe B

Description des dispositifs auxiliaires

La turbine LM2500+ est complétée par les dispositifs auxiliaires sous indiqués :

- Système de démarrage ;
- Système d'alimentation du combustible
- Système de lubrification ;
- Système capteurs de contrôle turbine ;
- Système air de refroidissement et étanchéité ;
- Système de ventilation et anti-incendie ;
- Tableau de contrôle turbogénérateur.

B.1 Système huile de lubrification

Le système de lubrification de la turbine à gaz est un système à circuit fermé et à alimentation forcée comprenant le réservoir, les pompes, le circuit de refroidissement, les filtres, les vannes et les dispositifs de contrôle variés, l'alarme et le dispositif de blocage de la turbine.

L'huile de lubrification est envoyée aux deux paliers de la turbine et aux accessoires.

Les pompes d'huile de lubrification aspirent cette huile à partir du réservoir et la déversent dans un collecteur commun où la pression est réglée à une valeur nominale de 1.5 bar ; Avant d'être introduite dans le collecteur, l'huile est refroidie dans un échangeur de chaleur et ensuite filtrée.

Réservoir : Le réservoir d'huile de lubrification est une partie intégrante du soubassement de la turbine. Il est situé sous la zone "accessoires" ; sur lequel sont installés divers dispositifs de contrôle sur les lieux et "à distance" du niveau d'huile, de sa température et de sa pression. Il est possible de procéder à une inspection de la partie interne à travers un hublot normalement fermé.

Le soubassement est muni de connexions pour le remplissage du réservoir, pour le drainage de l'huile et pour la connexion du séparateur de vapeurs d'huile ; il est entre autre muni d'un radiateur à huile.

Pompes : Le système est muni :

- D'une pompe principale huile, conduite ;
- D'une électropompe auxiliaire ;
- D'une électropompe d'urgence.

Pompe principale : La pompe principale de l'huile de lubrification est une pompe volumétrique (à engrenage) à portée constante et entraînée par le réducteur auxiliaire. La pression de refoulement est limitée par la vanne de re-circulation de l'huile étalonnée à 8 bar.

Pompe auxiliaire : La pompe auxiliaire, de type engrenage est utilisée pour maintenir le circuit de lubrification sous pression durant les phases de démarrage et d'arrêt de la turbine, ou plus exactement quand la pompe principale, ayant une vitesse de rotation inférieure à celle du régime, n'est plus en mesure de fournir la portée d'huile nécessaire.

Pompe d'urgence : La pompe d'urgence, de type à engrenage est utilisée pour assurer le refroidissement de la machine durant l'arrêt, dans le cas où la pompe auxiliaire est hors service en raison d'une panne électrique.

Réfrigérant huile : L'huile de lubrification doit être envoyée au collecteur d'huile à une température appropriée pour en garantir la viscosité adéquate, il est donc prévu à cet effet un réfrigérant huile pour maintenir le lubrifiant à la température désirée.

Filtres : Le système de filtration est constitué de filtres sur l'aspiration de la pompe huile principale et sur le collecteur d'aspiration (en commun) des électropompes, de même que d'un filtre sur le collecteur de refoulement huile.

B.2 Système air de refroidissement et étanchéité

Pour le refroidissement interne des diverses parties de la turbine, on utilise l'air prélevé du 2 étage du compresseur et refroidi dans l'échangeur de chaleur air-air.

Pour la pressurisation des étanchéités huile des paliers de la turbine, on utilise l'air prélevé du 1 étage du compresseur par l'intermédiaire d'un éjecteur.

Les parties de la turbine qui sont refroidies par l'air sont :

- la face antérieure et postérieure des roues de la turbine de puissance premier et deuxième étage ;
- les ensembles buses de premier étage ;
- la caisse échappement de la turbine.

La chemise de la chambre de combustion et la pièce de transition gaz chauds ont été conçues de façon à être refroidies efficacement par l'air de refoulement du compresseur.

Annexe C

Special Tooling

Adapter 1/4F by 3/8M

3/8F by 1/4M

3/8F by 1/2M

1/2F by 3/8M

1/2F by 3/4M

3/8F by 1/2M

Adapter, Torque - 12 pt 1/4

(Thin Wall) 5/16

Adapter, Torque (Spline) 5/16

(3/8 Drive - 2 inch Offset) 3/8

Bar, Breaking 1/4 Drive

Bar, Pry 16 Inch

Colorbrite Silver

Crimping Tool, Safety Cable

Crowfoot - 12 Pt 1/4 1 TMRX-8 A

(1/4 Drive) 5/16 1 TMRX-10 A

3/8 1 AN-8508-6A A

Crowfoot, Open End 3/8 1 GFC-012 A

Crowfoot - 12 Pt 5/8 1 GAN-8508-10 A

(3/8 Drive) 11/16 1 GAN-8508-11 A

3/4 1 GAN-8508-12 A

Crowfoot, Flare Nut - 6 Pt 9/16 1 FRH-180S A

11/16 1 FRH-220S A

3/4 1 FRH-240S A

Crowfoot, Open end 1-1/8

(1/2 Drive) 1-1/4

Extension 2 Inch

(1/4 Drive) 4 Inch Wobble

6 Inch

6 Inch Wobble

14 Inch

Extension 3 Inch Wobble

(3/8 Drive) 6 Inch

12 Inch

8 Inch Wobble

Extension 5 Inch

(1/2 Drive) 10 Inch

Extension, Swivel Socket

(3/8 Drive) 3/8 Inch

(3/8 Drive) 7/16 Inch

Flashlight 2 Cell

Gage -

Pocket Rule 6 Inch

Feeler Gage 26 blade

Hammer -

Compothene 24 Oz

Plastic Tip 16 Oz

Soft-Faced 13 Inch

Ball Peen 16 Oz

Ball Peen 32 Oz

Handle, Speed 3/8 Drive

1/2 Drive 1 KB-4 A

Handle, Ratchet 1/4 Drive, 5 Inch

3/8 Drive, 7 Inch

1/2 Drive, 10 Inch

Mechanical Fingers 17-3/4 Inch

Mirror -

Inspection 1-1/4 Inch Dia

Inspection 2-1/4 Inch Dia

Oval Pocket

Pliers -

Bent Needle Nose

Safety Wire Twister 10-1/2 Inch

Diagonal Cutting 5-1/16 Inch

Diagonal Cutting

Needle Nose

Flat Nose

Standard 6 Inch

Adjustable Joint

Punch -

Nylon 3/4 Dia by 12 Inch

Bronze 3/4 Dia by 12 Inch

Pin Set 1/4 Dia

Pin Set 5/16 Dia

Starter 1/4 Dia

Screwdriver -

Common 4 by 1/4 Inch Blade Tip

Common 6 by 5/16 Inch Blade Tip

Common 8 by 3/8 Inch Blade Tip

Phillips No. 1 Pocket Size

Phillips No. 1 6 Inch

Phillips No. 2 12 Inch

Scriber

3/16 Deep Well

7/32 Deep Well

1/4 Deep Well

5/16 Deep Well

3/8 Deep Well

1/2 Deep Well

9/16 Deep Well

Socket - Spline 1/4

(1/4 Drive) 5/16

5/16 Deep Well

5/16 Universal

Socket, Spline 3/8

3/8 Universal

7/16 Deep Well

7/16 Universal

9/16 Deep Well

9/16 Universal

5/8 Deep Well

5/8 Universal

Socket - Torx

Socket - Swivel - 6 Pt 3/8

Socket - 12 Pt 5/16

(3/8 Drive) 5/16 Deep Well

3/8 Square Female

7/16 Deep Well

1/2 Deep Well

9/16 Deep Well

Annexe D

Consumable Materials

Acetone
Antiseize Compound Milk of Magnesia (Unflavored)
Barrier Paper
Chromate Free Primer Paint
Desiccant
Desiccant
Dry Film Lubricant
Dry Ice Fed Spec
Engine Preservation Oil
Epoxy Polymide Topcoat Paint
Fuel System Preservation Oil
Gasket Material
Grease
Hydraulic Fluid
Isopropyl Alcohol
Lint-Free Cloths Local Purchase
Liquid Wrench Local Purchase
Lubricating Oil
Lubricating Oil
Marking Dye
Marking Pen
Marking Pen
Masking Tape
Mastic Sealant
Molybdenum Disulfide Grease
Penetrating Oil
Petrolatum
Plastic Bag
Rust Preventative Concentrate
Rust Preventative Concentrate
Safety Cable (0.032 inch)
Safety Wire (0.020 inch)
Safety Wire (0.032 inch)
Sealant
Sealing Compound
Silicone Rubber Adhesive (RTV 103) Black
Silicone Rubber Adhesive (RTV 106) Red
Shop Rags Local Purchase

Soft Bristle Brush Local Purchase

Soap Solution Local Purchase

Thread Lubricant

Water-Wash Detergent

Water-Wash Rinse Water

Annexe E

Listes des taches de maintenance et leurs durées

n°	Action	Actor	Timing	Remarks & Waste time
1	Meeting with the client	Lead engineer + client	1h	
2	Performing LOTO, work permit issued	Chef de consignation de la centrale, Lead engineer, Electrical engineer	1h	
3	Checking tooling on site (Fly boxes) and available means (crane & manlift)	Lead engineer + electrical engineer + mechanical engineer	2h	from 2h to 2 days can be wasted in this task due to the late delivery of the fly boxes, late crane & manlift, not suitable crane, missing consumables
4	Building a scaffold all around the package	8 operators	5h	Only in the case of a non available manlift. A tradeoff between cost and time is considered, scaffolds are cheaper but manlifts are less time consuming
5	Removal of the air filter module			This operation is done only in the case of a TM with a filter module (available in some sites)
6	a. cables disconnection (from filter house Junction Boxes)	1 operators	1h	
7	b. unbolting the autocleaning expansion joint	4 operators	6h	
8	c. unbolting the air filter module (filter house)	2 operators	1h	
9	d. lifting (removal) of the air filter module (filter house)	6 operators	1h	
10	Removal of the exhaust stack			
11	a. unbolting the exhaust stack	2 operators	2h	

n°	Action	Actor	Timing	Remarks
12	b. lifting (removal) of the exhaust stack	4 operators	1h	
13	Removal of the coupling cover	2 operators	2h	
14	Unbolting then Racking out the tunnel	3 operators	2h	
15	removing the air deflector	2 operators	30 min	Only in the case of TMs with an air deflector
16	removing the roof pannel and beams	4 operators	2h	
17	Removing the spacer liners	3 operators	1,5h	Only in the case of TMs with liners
18	opening the inlet plenum	1 operator	1h	
19	opening the cage	1 operator	1h	
20	Removing the engine center body (bullet nose)	1 operator	1h	
21	unbolting the bellmouth from the CFF (compressor front frame)	2 operators	1h	
22	Unbolting the turbine from the diffuser cone	2 operators	1h	
23	Disconnecting all engine hoses, Tubing and instruments including FOD (foreign objects dammage)	2 operators	8h	
24	Unbolting and jacking out the coupling	2 operators	2h	
25	hydraulic starter and clutch removed	2 operators	2h	Only if the new turbine doesn't have a hydraulic starter mounted

n°	Action	Actor	Timing	Remarks & Waste time
26	opening the empty container then Instaling lift fixture onto the turbine	4 operators	1h	
27	Removal of the engine and installation of gas turbine into the shipping container	4 operators	2h	
28	opening the container then installing the lifting fixture onto the new engine	4 operators	2h	
29	turbine fully installed	6 operators	2h	
30	turbine fully connected (bellmouth + coupling + Hydraulic starter + instruments + tubing + hoses)	6 operators	8h	
31	instrument calibration check	2 operators	4h	
32	Instaling roof panel, roof support beam	4 operators	3h	
33	Installing the filter house liners (spacers)	3 operators	1,5h	Only in the case of TMs with liners
34	Instaling the exhaust stack			
35	a. lifting of the exhaust stack	2 operators	1h	
36	b. bolting the exhaust stack	2 operators	1h	
37	Installing the air filter module (filter house)			
38	a. lifting of the air filter module	4 operators	1h	
39	b. bolting the air filter module	4 operators	2h	
40	c. bolting the autocleaning expansion joint	4 operators	6h	This operation is done only in the case of a TM with a filter module (available in some sites)

n°	Action	Actor	Timing	Remarks & Waste time
41	d. cables connection	2 operators	2h	
42	Installing center body including the wiring and the silicone	1 operator	3h	
43	Closing back the cage	1 operator	1h	
44	Cleaning the inlet plenum	2 operator	1h	
45	Closing the inlet plenum	1 operator	1h	
46	Installing the deflector	2 operators	1h30	If there is a deflector
47	turbine alignment	3 operators	3h	
48	Racking back the tunnel then bolting and torquing	3 operators	3h	
49	Coupling bolts installing and torquing	2 operators	1h	
50	Racking back the diffuser then bolting and torquing	2 operators	2H	
51	installing coupling cover	2 operators	2h	
52	Cleaning MCDs, changing filters, safety wiring...	2 operators	3h	
53	General housekeeping and package cleaning	2 operators	1h	
54	turbine energizing (remove LOTO, Electricial energizing)	Electrical engineer	20 min	

Annexe F

Quelques taches de l'opération Engine Exchange



Bibliographie

- [Benmoussa and Baameur, 2005] Benmoussa, B. and Baameur, S. (2005). *Politique d'optimisation de la maintenance par la fiabilité : Evaluation de l'implantation à SONELGAZ-GRTE, Mémoire de Projet de Fin d'Etudes d'Ingénieur*. Département Génie Industriel, Ecole Nationale Polytechnique, Alger.
- [Berger and Guillard, 2000] Berger, C. and Guillard, S. (2000). *La rédaction graphique des procédures : démarche et technique de description des processus*. Édition AFNOR.
- [Boucly, 1998] Boucly, F. (1998). *Le management de la maintenance, évolution et mutation, 2ème édition*. AFNOR, Paris.
- [Boulenger, 1988] Boulenger, A. (1988). *Vers le zéro panne avec la maintenance conditionnelle, Guides de l'utilisateur*. AFNOR, Paris.
- [Brucker, 2003] Brucker, P. (2003). *Scheduling Algorithms*.
- [Coudert, 2000] Coudert, T. (2000). *Apport des systèmes multi-agents pour la négociation en ordonnancement : application aux fonctions production et maintenance*. PhD thesis, ENI de Tarbes (France).
- [Ecoto, 1986] Ecoto, F. (1986). *Initiations à la recherche opérationnelle*. Ellipses.
- [Esquirol and Lopez, 1999] Esquirol, P. and Lopez, P. (1999). L'ordonnancement. *Economica*.
- [Ghazi, 2007] Ghazi, N. (2007). *Problème d'ordonnancement Open Shop dans un environnement d'atelier d'assemblage cyclique, Mémoire de magister*. Département Génie électrique, Laboratoire de Commande des Processus, ENP, Alger.
- [Gits, 1994] Gits, C. (1994). « structuring maintenance control systems ». *International Journal of Operations and Production Management*, 14.
- [Hedjazi and Zidani, 2012] Hedjazi, D. and Zidani, A. (2012). Contribution à l'ordonnancement des activités de maintenance industrielle sous contraintes de ressources et compétences. In *9th International Conference on Modeling, Optimization SIMulation*.
- [Kaffel, 2001] Kaffel, H. (2001). *La maintenance distribuée : concept, évaluation et mutation*. Collection mémoires et thèses Électronique, université de LAVAL, QUEBEC.
- [LAVINA, 1992] LAVINA, Y. (1992). *Audit de la maintenance*. Editions d'Organisation.
- [L'HOTE, 2002] L'HOTE, G. (2002). « *Le guide du responsable de maintenance* ». Editions Weka, Paris.
- [Monchy, 1996] Monchy, F. (1996). *La fonction maintenance*. Edition Masson.
- [Monchy, 2003] Monchy, F. (2003). *Maintenance, méthodes et organisation 2ème édition*. Dunod, Paris.
- [Paz and Leigh, 1994] Paz, N. and Leigh, W. (1994). « maintenance scheduling : issues, results and research needs ». *International Journal of Operations Production Management*, 14(8).
- [Priel, 2005] Priel, V. (2005). *La maintenance ; technique modernes de gestion*. Entreprise Moderne, Bordeaux.
- [Retour et al., 1990] Retour, D., Bouche, M., and Plauchu, V. (1990). « *Où va la maintenance industrielle* » *Problèmes Économiques, VOL. 2*.

- [Sitayeb, 2005] Sitayeb, F. B. (2005). *Contribution à l'étude de la performance et de la robustesse des ordonnancements conjoints Production/Maintenance - Cas du Flowshop*. PhD thesis, Automatique / Robotique. Université de Franche-Comté.
- [Tsang, 2002] Tsang, A. H. (2002). Strategic dimension of maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*.
- [Vernier, 1999] Vernier, J. (1999). *Fonction maintenance*. Techniques de l'Ingénieur.
- [Zeghloul, 2003] Zeghloul, A. (2003). *Maintenance industrielle, mémoire de Licence professionnelle*. Département « Hydraulique et commandes associées », université de METZ.