

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Industriel

General Electric

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Industriel

Option : Management de l'Innovation

Thème :

Optimisation et modélisation de la maintenance améliorative d'un parc de turbines

Application au sein de General Electric Power Services

Auteur(e)s : Ahmed Adnane ABDENNEBI

Amina SADAQUI

Présenté et soutenu publiquement le (19/06/2018)

Composition du Jury :

Présidente	Mlle Nacera ABOUN	MAA	ENP
Promoteur	Mme Nadjwa NOUAL	MAA	ENP
Examinateur	Mme Sofia AITBOUAZZA	MAA	ENP
Invité	Mr Mourad BOURENANE	Senior Manager	GEPS



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Industriel

General Electric

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Industriel

Option : Management de l'Innovation

Thème :

Optimisation et modélisation de la maintenance améliorative d'un parc de turbines

Application au sein de General Electric Power Services

Auteur(e)s : Ahmed Adnane ABDENNEBI

Amina SADAQUI

Présenté et soutenu publiquement le (19/06/2018)

Composition du Jury :

Présidente	Mlle Nacera ABOUN	MAA	ENP
Promoteur	Mme Nadjwa NOUAL	MAA	ENP
Examinateur	Mme Sofia AITBOUAZZA	MAA	ENP
Invité	Mr Mourad BOURENANE	Senior Manager	GEPS

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à  
mon père pour m'avoir soutenu et épaulé tout au long de mon  
périple.*

*ma mère pour m'avoir toujours protégée et conseillée.*

*la mémoire de ma défunte grand-mère puissions nous toujours  
puiser dans sa force et sa détermination.*

*ma sœur Lylia et mes frères Amine & Omar qui remplissent ma  
vie de joie et de rires.*

*Aucun mot ne sera assez fort pour vous exprimer mon amour.*

*mes cousines Yasmine, Sabrina et Ferroudja pour leur présence  
et leur écoute.*

*Ahmed pour tous les bons moments passés ensemble.*

*ma copine Hind et toute ma promo.*

*Amina*

---

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à*

*Mon grand-père le CAMARADE, que nulle dédicace ne puisse  
exprimer mes sentiments.*

*La mémoire de mon grand-père Abdelhamid, ce grand homme  
qui m'a toujours soutenu dans mon parcours.*

*A ma mère et mon père, qui ont sacrifié leur vie pour notre  
réussite, je ne saurai vous exprimer tout le respect que je vous  
dois, l'amour et la considération que je vous porte.*

*A mes grands-mères, mes frères et sœurs Sarah, Katia et Idir  
pour leur soutien, nul ne pourrait exprimer tout l'amour que j'ai  
pour vous.*

*Amîna, pout tous ces bons moments passés ensemble, sans toi rien  
de cela n'aurait été possible.*

*Lotfi, mon frère, mon ami, jamais je ne pourrais te remercier  
pour tout ce que tu fais pour moi.*

*Tous mes amis de promo, Mehdi, Khaled, Abdelilah, Mustapha,  
Djalil, Najib, les camarades*

*Ahmed*

---

## *Remerciements*

*Tout d'abord nous tenons à remercier vivement notre promotrice Mme Nadjwa Noual pour son écoute, sa disponibilité et ses conseils tout au long de notre projet de fin d'étude et avant, ce travail n'aurait jamais abouti sans sa précieuse aide.*

*Ensuite, nous tenons à remercier notre encadrant en entreprise Mr Mourad Bourennane pour son support, sa disponibilité et sa bienveillance. Ainsi que Mme Wafaa Khemmar, pour son soutien au sein de l'entreprise.*

*Nous exprimons notre gratitude à Ammi Ali, Nazim Skandrani, Fouad Guedouari, Aziz Boukerrat et Elias Benzaghrou, pour le temps qu'ils nous ont accordé et les connaissances qu'ils nous ont transmises.*

*Nos sincères remerciements vont vers Younes Seniani pour sa précieuse aide et Hidayette Khalfi pour ces conseils avisés.*

*Nous tenons également à remercier Mr Housseem Gamal et Mr Lotfi Skandrani pour leur écoute et leurs conseils précieux.*

*Nous ne pouvons oublier de témoigner notre gratitude et nos remerciements les plus chaleureux à nos chers professeurs pour toutes les connaissances et les valeurs transmises tout au long de notre cursus.*

*Nous remercions le Jury de nous faire honneur d'examiner notre humble travail.*

*A toutes les personnes ayant participé de près ou de loin à la réussite de ce travail, Merci !*

*Ahmed & Amina*

---

## ملخص

جنرال الكتريك (ج ا) شركة متعددة الجنسيات، رائدة في مختلف المجالات، مثل الطيران او الطاقات المتجددة. ج ا باور سرفايسس (ج ا ب س) هو الفرع المتخصص في تقديم خدمات الطاقة الكهربائية. و هو مسؤول عن صيانة محطات توليد الطاقة.

في هذا الفرع تم هذا العمل، الذي يهدف الي تحسين عمليات الصيانة في صدد تنفيذ اكبر عقد في تاريخه، الذي عقد مؤخرا مع شركة صناعة الكهرباء ، سونلغاز.

الصيانة مهنة لدى (ج ا ب س)، و التخطيط لها يتطلب اولاً، تحديد العمليات، و ثانياً، اختيار طريقة التخطيط للصيانة. في هذا العمل، تم اختيار التخطيط عبر النمذجة الحسابية، التي مكنتنا من تطوير نموذج تم ايجاد حوله باستعمال برنامج مات لاب.

اخيرا توج هذا العمل بابنتكار تطبيق يسهل استعمال النموذج المبرمج وايجاد الحلول.

**الكلمات الرئيسية:** التخطيط، صيانة، نمذجة حسابية، برنامج.

## Abstract

General Electric is a large multinational global leader in various fields, such as aviation or renewable energies. GE Power Services is the service provider branch, it is responsible for the maintenance of power plants.

It is in this context that the present work has been carried out, which aims to optimize maintenance operations, in the context of the execution of the largest contract of its history signed recently with SONELGAZ

Maintenance is a business function at GEPS, its planning requires in the first place the identification of operations, and in a second place, the choice of the method of maintenance planning. In the present work the choice focused on the planning by mathematical modeling, and thus the culmination in a program representative of the problematic. The latter's resolution requires the use of the MATLAB software.

An application designed to optimize this program has been put in place.

**Key words:** Planning, maintenance, mathematical modeling, program.

## Résumé

General Electric est une grande multinationale leader mondial dans différents domaines, tels que l'aviation ou les énergies renouvelables. GE Power Services est sa branche prestataire de service, elle s'occupe de la maintenance des centrales électriques.

C'est au sein de cette filiale que s'est effectué le présent travail, qui a pour objectif d'optimiser les opérations de maintenance, dans le cadre de l'exécution du plus grand contrat de son histoire avec SONELGAZ.SPE.

La maintenance est une fonction métier chez GE Power Services, sa planification nécessite dans un premier temps l'identification des opérations, et dans un second temps, le choix de la méthode de planification de la maintenance. Dans le présent travail le choix s'est porté sur la planification par modélisation mathématique qui a abouti au développement d'un modèle dont la résolution a été validée par le logiciel Matlab.

Enfin, une application a été conçue dans le but de dynamiser la solution et de faciliter l'usage du programme mathématique.

**Mots clés :** planification, maintenance, modélisation mathématique, optimisation, application.

# Table des matières

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Introduction générale.....	13
Chapitre I : L'état de l'art.....	16
Introduction du chapitre I.....	16
I.1- Généralités sur la maintenance.....	17
Introduction.....	18
1 Définitions.....	18
2 Fonctions.....	18
3 Objectifs.....	19
4 Typologie de maintenance.....	20
4.1 Maintenance préventive.....	20
4.2 Maintenance corrective.....	20
4.3 Maintenance améliorative.....	21
5 Les Niveaux de la maintenance.....	22
5.1 Niveau 1.....	22
5.2 Niveau 2.....	22
5.3 Niveau 3.....	22
5.4 Niveau 4.....	22
5.5 Niveau 5.....	22
Conclusion.....	22
I.2- La planification de la maintenance.....	23
Introduction.....	24
1 La planification par la gestion des actifs.....	24
2 La planification par modélisation mathématique.....	25
2.1.1 La programmation linéaire mixte.....	26
2.1.2 La programmation stochastique.....	26
3 L'optimisation de la planification de la maintenance.....	29
Conclusion.....	29
I.3- Modélisation mathématique.....	30
Introduction.....	31

---



1	Modélisation sous contraintes .....	31
1.1	Problème de satisfaction des contraintes .....	31
1.2	La programmation mathématique .....	32
1.3	Généralisation.....	33
1.4	Quelques classes de problèmes d'optimisation .....	33
1.5	Techniques de résolution .....	34
1.6	Méthodes exactes.....	34
1.6.1	Méthode du Simplexe .....	34
1.6.2	Méthode graphique .....	34
1.6.3	Méthode Branch and Bound .....	34
1.7	Résolution des problèmes d'optimisation à l'aide de l'outil informatique.....	35
1.7.1	EXCEL.....	35
1.7.2	CPLEX .....	35
1.7.3	MATLAB .....	35
	Conclusion .....	35
	Conclusion du chapitre I.....	36
	Chapitre II : Etat des lieux et étude de l'existant .....	37
	Introduction du chapitre II.....	37
II.1	Présentation de l'entreprise General Electric. ....	38
	Introduction.....	39
1	Le conglomérat General Electric .....	39
2	GE en Algérie.....	41
3	Les produits de GE Power .....	41
3.1	Les turbines à gaz .....	41
3.1.1	Le système standard et le système AGP .....	42
3.2	Les turbines à vapeur.....	45
3.3	Les turbines aero dérivatives .....	45
3.4	Autres auxiliaires.....	46
4	Les services de GEPS.....	46
4.1	Les inspections .....	46
4.2	Les contrats de service.....	47
	Conclusion .....	48
II.3-	Analyse de l'état des lieux et présentation de la problématique.....	49
	Introduction.....	50
1	Contexte du projet .....	50

---

2	Conditions d'exécution du contrat Méga Deal .....	51
2.1	Le remplacement du système Hot Gaz Path par le système Advanced Gaz Path .....	52
2.2	La modification et l'installation des chambres à combustion .....	53
2.3	La Miniature Air Gap Inspection Crawler Inspection .....	53
3	Enjeux liés à l'exécution du contrat.....	53
3.1	Amélioration de la capacité .....	54
3.2	Amélioration du cycle de vie des pièces .....	54
3.3	Les gains du nouveau système.....	56
3.3.1	Le gain en quantité de pièces de rechange .....	56
3.3.2	Le gain en disponibilité .....	56
4	Limites de la planification de la maintenance effectuée par GEPS.....	57
	Conclusion .....	60
	Conclusion du chapitre II et formalisation de la problématique .....	61
	Chapitre III : Contributions. ....	62
	Introduction du chapitre III .....	62
	III.1- Contribution et solutions proposées. ....	63
	Introduction.....	64
1	Etude préliminaire et construction des diagrammes de Gantt .....	64
1.1	Le remplacement du système HGP par le système AGP.....	64
1.2	La modification des chambres à combustion .....	64
1.3	La M.A.G.I.C inspection .....	65
2	Modélisation du problème .....	65
3	Résultats et validation du modèle .....	68
3.1	Déroulement manuel .....	68
3.2	Validation par Matlab .....	71
3.2.1	Méthode de résolution .....	71
3.2.2	Outil de résolution .....	72
3.2.3	Modélisation sous Matlab .....	72
3.2.4	Résultats de la validation par Matlab .....	79
4	Les gains générés par la solution proposée.....	80
4.1	Gains directs .....	80
4.2	Gains indirects .....	82
5	Développement d'une application et proposition d'une Interface graphique .....	83
5-1	Différentes interfaces graphiques de l'application .....	84
5-2	Environnement de l'application .....	87

---

Conclusion .....	87
Conclusion du chapitre III .....	87
Conclusion générale .....	88
Bibliographie	
Annexes	

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Améliorations après upgrade .....	44
Tableau 2 : Améliorations apportées par le système AGP. ....	44
Tableau 3 : Gains réalisés par centrale .....	54
Tableau 4 : Gain en pièces de rechange.....	56
Tableau 5 : Comparaison entre HGP et AGP en termes de nombre d'arrêts.....	56
Tableau 6 : Planning des opérations établi par GEPS.....	58
Tableau 7 : Nombres d'arrêts selon le planning de GEPS.....	60
Tableau 8 : Planification modifiée.....	68
Tableau 9 : Comparaison des deux planifications .....	70
Tableau 10: Résultats après validation par Matlab. ....	79
Tableau 11 : Gains de disponibilité en jour après optimisation.....	80
Tableau 12 : Gain en production pour chaque centrale. ....	81
Tableau 13 : Gain en production pour Djelfa .....	82
Tableau 14 : Optimisation de la ressource humaine .....	82

---

## Liste des figures

Figure 1 : Exemple d'organisation du service maintenance .....	19
Figure 2 : Récapitulatif des types de maintenance.....	21
Figure 3 : Plan pour niveler la réserve, .....	27
Figure 4: Business du conglomérat GE. ....	40
Figure 5 : Turbine à Gaz type 9FA. ....	42
Figure 6 : Spécifications techniques du système AGP. ....	43
Figure 7 : Turbine à vapeur.....	45
Figure 8 : Turbine Aero-dérivée. ....	46
Figure 9 : Générateur. ....	46
Figure 10 : Répartition des centrales. ....	51
Figure 11 : Disposition des turbines en cycle combine 2*1. ....	52
Figure 12 : Parties de la chambre à combustion. ....	53
Figure 13 : Schéma récapitulatif des inspections avec leurs périodes pour les deux systèmes. ....	56
Figure 14: Axe des inspections de désassemblage. ....	57
Figure 15 : Facteurs qui influencent la maintenance selon GEPS .....	58
Figure 16: Ecart entre les dates début des opérations .....	66
Figure 17 : Comparaison des deux planifications (avant et après optimisation) en termes de nombre d'arrêts. ....	71
Figure 18 : Evolution des jours d'arrêt par centrale. ....	81
Figure 19 : Interface principale de l'application.....	84
Figure 20 : Interface de saisie. ....	85
Figure 21 : Interface résultats. ....	86
Figure 22 : Interface sauvegarde des résultats. ....	86

---

# Liste des abréviations

GEPS: General Electric Power Services.

SPE : Société de Production d'Electricité.

GEAT: General Electric Algeria Turbines.

CSP : Constraints Satisfaction Problem / Problème de Satisfaction des Contraintes.

AGP: Advanced Gaz Path.

HGP: Hot Gaz Path.

BOP: Balance Of Plant.

COD: Commercial Operational Date / Date de mise en service.

CSA: Customer Service Agreement.

CC: Combined Cycle.

TG/GT : Turbine à gaz.

MAGIC : Miniature Air Gap Crawler Inspection.

CI : Combustion Inspection.

HGPI : Hot Gaz Path Inspection.

MI : Major Inspection.

TX : Contrat de maintenance transactionnel.

CSA : Contractual Service Agreement.

ST/TV : Turbine à vapeur.

GT/TG : Turbine à gaz.

O&M : Operations and Maintenance.

MMP : Multi-Year Maintenance Plan

---

# Introduction générale

*« Si travail et courage ont pris de la hauteur,  
que reste-t-il à faire à qui ne rêve pas »*

*Eugène Guilleux*

Les libéralisations et la mondialisation des économies, les évolutions des techniques et des technologies, la diversification et la montée des risques sous toutes ses formes, en plus d'un contexte marqué par une concurrence accrue, sont autant de facteurs qui obligent les entreprises à toujours se développer, et assurer leur pérennité en améliorant leurs services, et en proposant des produits de meilleure qualité à des prix concurrentiels et dans le respect strict des délais. Dans ce sens, les entreprises doivent anticiper les difficultés à venir, et ceci en améliorant une fonction clé dans la gestion, qui est la planification, une activité importante qui sert à organiser tous les processus de fonctionnement des entreprises.

La planification, une science et un art qui se définit comme étant l'organisation d'un plan, d'une suite ordonnée d'actions qui vise à atteindre des objectifs bien précis. Elle utilise différents outils, informatiques ou mathématiques, elle est employée dans tous les projets et toutes les disciplines, tels que la production où la maintenance et représente un outil clé d'aide à la décision.

La planification de la maintenance étant le sujet de ce travail, son succès est lié inévitablement à une stratégie réfléchie, une politique d'entreprise rigoureuse et une mise en œuvre adaptée et applicable à l'entreprise. Ce succès se voit encore plus prépondérant dans le cas d'une entreprise, qui opère dans plus de 140 pays, dont le secteur d'activités est la prestation de service, on parle ici de GENERAL ELECTRIC (GE) et particulièrement de GE Power Services (GEPS), le prestataire de maintenance qui détient la plus grande part du marché de maintenance des centrales électriques en Algérie. Ce prestataire propose un large portefeuille de services, dont le client principal est l'entreprise nationale de production d'électricité : SONELGAZ Société de Production d'Electricité (SPE), responsable de l'alimentation du réseau national en énergie électrique.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre d'une démarche d'amélioration, adoptée par GE pour optimiser les opérations de maintenance dans l'exécution du plus grand contrat de son histoire, signé avec SONELGAZ SPE, et qui prévoit une meilleure gestion des différentes opérations en s'appuyant sur un modèle de planification adapté aux centrales électriques dont la responsabilité de maintenance incombe à GEPS. Il s'intéresse particulièrement aux opérations liées à une maintenance améliorative que GE, à travers sa filiale GEPS, envisage de mettre en place. Cette mise en place s'accompagne par des engagements en termes de performance et de disponibilité qui doivent impérativement être respectées, justifiant ainsi l'intérêt d'une planification optimisée de cette maintenance.

C'est pour répondre à cet intérêt que notre travail se fixe comme objectif la proposition d'une planification optimisée basée sur la modélisation mathématique, et en vue de l'exposer de manière claire et explicite et de dérouler les résultats obtenus. Nous l'avons structuré en trois grandes parties, réparties comme suit :

La première partie a pour objectif de rassembler les fondements théoriques et conceptuels du travail, et elle contient trois chapitres :

- Le premier comprend des généralités sur la maintenance ;
- Le second aborde la planification de la maintenance ;
- Le troisième concerne les principes de modélisation mathématique ;

La seconde partie du document a pour objectif de synthétiser le contexte et l'environnement dans lequel s'effectue l'étude, elle comporte deux chapitres :

- Le chapitre quatre présente l'entreprise, ses activités et son implantation en Algérie ;
- Le cinquième chapitre ambitionne de mieux cerner la problématique à travers une étude de l'existant qui concerne le contexte du projet caractérisé par le contrat Méga Deal : ses conditions d'exécution et les enjeux qui lui sont liés ;

Enfin la troisième partie qui comprend le chapitre six présente notre contribution à la résolution de la problématique, et élargie le champ des solutions proposées à la proposition d'une application qui a été développée tout en proposant une interface graphique adaptée permettant une restitution simplifiée, pratique et dynamique des solutions apportées par le modèle développé.

Les résultats satisfaisants obtenus à l'issue du déroulement du modèle étudié nous ont poussé à proposer des perspectives d'amélioration en guise de conclusion.

L'industrie de production d'électricité connaît une forte intensité dans le monde du fait de la multiplicité des producteurs et du fort développement démographique, celui-ci engendre une demande importante. L'Algérie, n'est pas épargnée par cette forte demande d'énergie électrique, ce qui nécessite en plus de l'augmentation de la production une garantie de la disponibilité de cette dernière.

SONELGAZ.SPE est le producteur d'électricité qui détient la plus grande part du marché du pays. Et à défaut de détenir et de maîtriser les technologies nécessaires, il fait appel à des constructeurs et des prestataires de renommée internationale, tels que General Electric avec qui il collabore pour assurer des services clés comme la maintenance. Cette collaboration s'est confirmée notamment grâce à la signature du contrat Méga Deal estimé à trois milliards de dollars qui a pour but d'augmenter de manière considérable la capacité de production en énergie électrique du pays à travers la construction et la maintenance de dix centrales électriques d'une capacité totale de plus de 11 GW.

La maintenance prévue dans ce contrat est assurée par GE à travers sa branche Power Services (GEPS). Elle est principalement préventive mais il est également prévu de mettre en place une maintenance améliorative visant l'augmentation de la capacité des puissances installées offrant ainsi au client un avantage concurrentiel. Mais, ceci n'est pas sans risque pour GEPS car cette dernière s'engage à assurer des garanties en termes de performance et de disponibilité et dont le non-respect engagerait des pénalités et des conséquences pouvant aller à la rupture de la relation contractuelle. C'est pourquoi la question relative à la bonne planification de cette maintenance améliorative devient primordiale.

Pour répondre à cette question, nous proposons une planification basée sur la modélisation mathématique, et pour mener à bien ce travail, nous avons décidé d'adopter la démarche suivante déclinée en trois étapes principales :



- 1- Etude de l'existant suivie par une planification des opérations et structuration des tâches à l'aide de l'outil MS Project.
- 2- La modélisation mathématique du problème, présentation des résultats et validation.
- 3- Et enfin, le développement d'une application et de son interface graphique qui permet la restitution des résultats de manière pratique, dynamique et simple.

# Chapitre I : L'état de l'art.

## Introduction du chapitre I

La première partie de ce document a pour but de rassembler les fondements théoriques et conceptuels sur lesquels est basé le présent travail. Elle contient trois chapitres, à savoir : les généralités sur la maintenance, la planification de la maintenance en entreprise et la modélisation mathématique sous contraintes.

---

## I.1- Généralités sur la maintenance.

---

## Introduction

La maintenance se définit comme étant une opération technique qui vise à corriger les dégradations d'un matériel, elle intervient suite à un phénomène de détérioration, d'usure, de fatigue, ou de rupture. Cette opération n'a cessé d'évoluer, jusqu'à englober la notion de prévention, en effet, elle est préventive et corrective.

La maintenance devient ainsi plus avantageuse, le fait de prévenir une panne coûte moins cher que de la réparer, elle permet aussi d'éviter des dégâts irréparables.

Le présent chapitre traite des généralités caractérisant la fonction maintenance.

## 1 Définitions

La maintenance selon l'AFNOR est : « l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ».

On peut donc déduire de cette définition que la maintenance repose sur deux points principaux : le bien sur lequel on agit et la fonction qu'il va accomplir.

Elle représente une fonction importante dans toutes les entreprises, et surtout en industrie, et au vu de son importance, elle est devenue un domaine à part entière, c'est pourquoi on parle désormais de "management de la maintenance", qui se définit toujours selon l'AFNOR comme « toutes les activités des instances de direction qui déterminent les objectifs, la stratégie et les responsabilités concernant la maintenance et qui les mettent en application par des moyens tels que la planification, la maîtrise et le contrôle de la maintenance [...] ».

## 2 Fonctions

La maintenance étant une opération rigoureuse, sa structuration nécessite de la diviser en trois fonctions principales : (Laloux, 2009)

- Fonction méthodologique : il s'agit de la partie théorique de la maintenance, elle consiste en la préparation du travail, l'organisation de la maintenance préventive, la collecte et la gestion de la documentation sur les équipements, le diagnostic et l'analyse de l'historique des pannes.
- Fonction d'ordonnancement : la gestion et la planification des activités selon des périodes définies et des ressources affectées.
- Fonction de réalisation : c'est la partie pratique de la maintenance, et elle consiste à faire exécuter des travaux de maintenance par les équipes multidisciplinaires de l'entreprise ou par des équipes spécialisées en réparations spéciales.

Dans le but d'illustrer ces différentes fonctions le schéma ci-dessous donne un exemple d'organisation de la maintenance dans le domaine de la production :

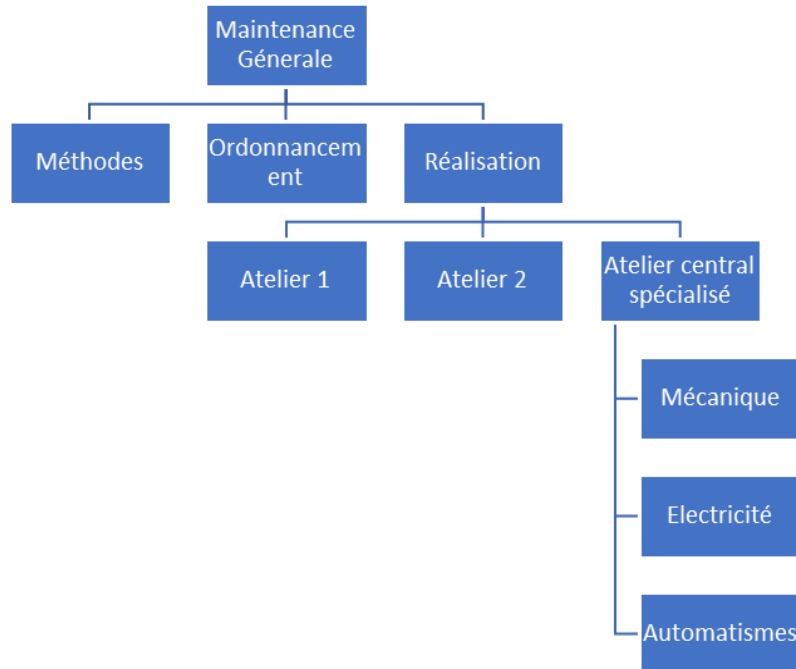


Figure 1 : Exemple d'organisation du service maintenance.

### 3 Objectifs

La maintenance a pour objectif principal de réduire voir éviter tout risque de pannes du matériel de l'entreprise et arrêts de la production. Elle vise également à :

- Respecter les prévisions de production en assurant au maximum la quantité prévue des produits : en effet, en assurant la maintenance des machines, on assure le respect de leurs temps de fonctionnement, et donc la quantité prévue des produits sans pannes ou arrêts imprévus.
- Améliorer la gestion des stocks en maîtrisant les dates de remplacement du matériel.
- Meilleure aide à la décision grâce à l'analyse de l'historique, les bilans machines, les tableaux de bord...etc.
- Respecter les délais, tout en assurant les coûts optimaux : le service maintenance doit respecter les programmes et calendriers de production faits en collaboration avec les services de production, et assurer des devis exacts concernant la réparation, l'approvisionnement...
- Assurer la maintenabilité : l'aptitude du bien à être rétabli ou maintenu dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.

## 4 Typologie de maintenance

Selon L'AFNOR, la maintenance peut être classée selon la finalité, selon le résultat et selon les moyens d'intervention. Les trois catégories principales de maintenance se présentent comme suit :

### 4.1 Maintenance préventive

Maintenance effectuée selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu. Elle doit permettre d'éviter les défaillances du matériel en cours d'utilisation. L'analyse des coûts doit mettre en évidence un gain par rapport aux défaillances qu'elle permet d'éviter.

Elle est exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation du fonctionnement d'un bien. Elle vise essentiellement à augmenter la durée de vie des équipements, leur fiabilité, régulariser la charge de travail et améliorer les conditions de travail du personnel. Elle est divisée en trois catégories :

- Maintenance systématique : elle est exécutée à des intervalles de temps préétablis, ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien.
- Maintenance conditionnelle : elle représente une surveillance des points sensibles de l'équipement ou des machines.
- Maintenance prévisionnelle : c'est une maintenance conditionnelle, qui repose sur des prévisions extrapolées, selon l'évolution des différentes mesures enregistrées et non pas sur les valeurs ponctuelles.

### 4.2 Maintenance corrective

Selon L'AFNOR (norme X 60-010) ce type de maintenance se définit comme étant : « une opération de maintenance effectuée après défaillance ». La maintenance corrective correspond à une attitude de défense suite à une défaillance fortuite, attitude caractéristique de l'entretien traditionnel.

Toutes les actions techniques entreprises visent à rétablir en marche le bien qui subit une défaillance ou une dégradation de sa fonction, il faut ainsi détecter la défaillance, la diagnostiquer, puis remettre le bien en état de réaliser sa fonction principale.

Les actions de maintenance corrective étant très diverses, il est toujours difficile de prévoir la durée d'intervention.

On peut traiter les symptômes des défaillances, de façon provisoire, ceci s'appelle la maintenance palliative, ou alors traiter les causes de ces défaillances, et dans ce cas il s'agit de la maintenance curative, qui est plus coûteuse et plus difficile, mais aussi plus durable.

### 4.3 Maintenance améliorative

L'amélioration des biens d'équipement est un « ensemble des mesures techniques, administratives et de gestion, destinées à améliorer la sûreté de fonctionnement d'un bien sans changer sa fonction requise » (norme NF EN 13306).

On apporte donc des modifications à la conception d'origine dans le but d'augmenter la durée de vie des composants, de les standardiser, de réduire la consommation d'énergie, d'améliorer la maintenabilité...etc. C'est une aide importante si l'on décide ensuite de construire un équipement effectuant le même travail mais à la technologie moderne : on n'y retrouvera plus les mêmes problèmes.

Les opérations de maintenance améliorative peuvent être :

- De rénovation : C'est l'inspection complète de tous les organes, la reprise dimensionnelle complète ou le remplacement des pièces déformées, la vérification des caractéristiques et éventuellement, la réparation des pièces et sous-ensembles défaillants. C'est donc une suite possible à une révision générale.
- De reconstruction : Il s'agit de l'action suivant le démontage du bien principal et remplacement des biens qui approchent de la fin de leur durée de vie et/ou devraient être systématiquement remplacés ». La reconstruction diffère de la révision en ce qu'elle peut inclure des modifications et/ou améliorations. L'objectif de la reconstruction est normalement de donner à un bien une vie utile qui peut être plus longue que celle du bien d'origine.
- De modernisation : C'est le remplacement d'équipements, d'accessoires, des logiciels par des sous-ensembles apportant, grâce à des perfectionnements techniques n'existant pas sur le bien d'origine, une amélioration de l'aptitude à l'emploi du bien.

Afin de récapituler, les différents types de maintenance le schéma suivant est présenté :

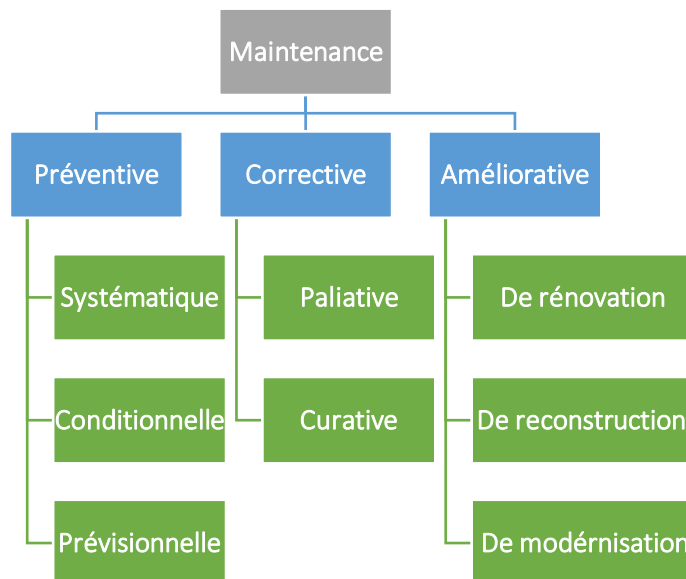


Figure 2 : Récapitulatif des types de maintenance.

## 5 Les Niveaux de la maintenance

Selon (Labrecque, 2014) la maintenance se divise en plusieurs niveaux organisés d'après la complexité de l'intervention et le niveau de qualifications de l'intervenant. Ces niveaux sont :

### 5.1 Niveau 1

Ce type d'intervention peut être effectué par l'exploitant du bien, en utilisant uniquement les instructions d'utilisation, et sans outillage. Il repose sur un stock de pièces faibles, des éléments accessibles et sans ouverture ou démontage de l'équipement.

### 5.2 Niveau 2

Ce type de maintenance repose sur des opérations mineures, du cas de la maintenance préventive tel que le contrôle du bon fonctionnement, les pièces sont procurées sans délais, et à proximité du lieu d'exploitation, il peut être effectué par un technicien habilité de qualification moyenne.

### 5.3 Niveau 3

Effectué par un technicien habilité, il utilise l'outillage prévu dans les instructions de maintenance, ainsi que des appareils de mesure ou de réglage. Ce niveau permet l'identification et le diagnostic des pannes, la réparation par échange de composants ou d'éléments fonctionnels.

### 5.4 Niveau 4

Ce type de maintenance est effectué par une équipe qui comprend un encadrement technique, très spécialisé, dans un atelier spécialisé, ce sont des travaux importants de maintenance corrective ou préventive. Il comprend ainsi le réglage des appareils de mesure utilisés pour la maintenance.

### 5.5 Niveau 5

Il est effectué par le constructeur ou le reconstruteur, avec des moyens bien définis, proches de ceux de la fabrication, il s'agit donc d'une rénovation, d'une reconstruction ou une réparation importante confiée à un atelier central.

## Conclusion

Les aspects généraux de la maintenance ont été déroulés dans ce chapitre. En effet, les détails des opérations de maintenance ont été abordés. Cela permettra de fixer le cadre général de l'étude et d'adapter les concepts cités à la réalité du terrain. A présent un autre volet de la maintenance sera abordé : celui de la planification.



## I.2- La planification de la maintenance.

---

## Introduction

La planification est définie comme étant l'organisation selon un plan. Le plan est une suite ordonnée d'actions dans le but d'atteindre des objectifs. Par extension, planifier veut dire prévoir et décider ce qui doit être fait (buts et objectifs), quand cela doit être fait (échancier de réalisation), quelles sont les ressources nécessaires à sa réalisation et enfin partager les responsabilités. (Maltais, 2012)

La planification s'inscrit dans une dimension temporelle, cela permet de distinguer deux types de planification :

- La planification stratégique : elle porte sur les orientations générales d'une organisation, sa mission, les objectifs qu'elle entend réaliser, ses valeurs et sa philosophie de gestion, les produits et services qu'elle offrira ainsi que les moyens qu'elle compte utiliser pour atteindre ses objectifs durant les années qui suivent - de trois à cinq ans-.
- La planification opérationnelle : porte sur les opérations ou les actions devant être menées à la réalisation d'un objectif à court terme. En l'utilisant on espère assurer le respect des délais, la communication et la coordination des moyens techniques et administratifs afin d'aboutir au but commun.

Au même titre que toute fonction de l'entreprise, la maintenance se planifie, elle s'insère dans le volet opérationnel. La planification de la maintenance constitue un enjeu majeur pour les entreprises, notamment dans l'industrie de production de l'électricité.

## 1 La planification par la gestion des actifs

La gestion des actifs constitue une activité visant à gérer les ressources physiques d'un bien tout au long de son cycle de vie. En partant de sa conception vers sa fabrication, son installation, son exploitation et sa maintenance jusqu'à sa mise au rebut. Ce type de gestion prend en compte tout ce qui assure le profit d'un bien, à savoir : sa capacité de production, les conditions du marché, la conduite des opérations et la maintenance.

Cette approche, appliquée à la maintenance se présente comme une tentative d'unification des techniques et méthodes utilisées par les gestionnaires afin de prendre des décisions dans un contexte souvent incertain. Cette incertitude se manifeste sur le plan économique, avec la fluctuation des marchés sur le long terme et sur le plan technique, avec des installations de plus en plus vieillissantes laissant planer le doute sur leurs durées d'exploitation.

D'après (Aoudjit,2010), selon Sherwin (2000), le problème de gestion des actifs est un problème de maintenance au sens large (Management de la maintenance) où les nouvelles technologies de l'information prennent une place de choix dans la saisie des données de fonctionnement et de dégradation des équipements, dans leur traitement (pronostiques et analyses) et dans la prise de décision.

Quant à Haraldsson (2004), Mohseni (2003) et Schreiner (2004) cités aussi dans (Aoudjit,2010), ils soulignent dans leurs articles le fait que le problème de la gestion des actifs soit un problème de grande taille et qu'il soit très complexe à modéliser. Plusieurs domaines peuvent y être

considérés : le dimensionnement des centrales, les modes d'exploitation, les stratégies de maintenance et d'inspection ainsi que la durée de vie. D'autres aspects sont aussi introduits tels que l'environnement, les lois et les règlements régissant le milieu de la production électrique, les aspects économiques en termes de coûts de maintenance, de perte de production et de pénurie, du prix de vente et des parts de marché.

On souligne dans (Mohseni, 2003) que (Aoudjit,2010) cite dans son mémoire de doctorat, qu'il n'existe aucun modèle ou application informatique capable d'intégrer de manière efficace tous ces domaines. Les difficultés rencontrées sont nombreuses, parmi elles : l'interactivité entre les domaines impliqués (chaque domaine influence l'autre et vice versa). Les règles d'exploitation qui risquent changer en présence de nouvelles sources de production, le contexte économique variable avec les nouvelles contraintes financières, et la nécessité de maintenance qui augmente avec le vieillissement des équipements.

## 2 La planification par modélisation mathématique

En optimisation, on cherche à déterminer parmi un ensemble de solutions réalisables, celle qui va maximiser ou minimiser-selon le cas, la valeur d'une fonction, nommée une fonction-objectif. Le degré de difficulté varie énormément d'un problème à l'autre.

Les méthodes utilisées dans le cadre de la planification de la maintenance varient pour les unes et n'ont pas été établies pour les autres ; cela veut dire que le champ de la recherche dans ce domaine reste grand ouvert et les problématiques de plus en plus complexes. Les méthodes utilisées sont principalement liées à la production dans les réseaux de type thermiques en utilisant la programmation linéaire mixte en nombre entiers et la programmation stochastique. On présentera par la suite d'autres méthodes d'optimisation de la maintenance. Les contraintes liées aux problèmes d'optimisation de la maintenance sont diverses, les auteurs (Gallestey et al., 2002) et (Mukerji et al., 1991) tout deux cités dans (Aoudjit,2010), nous donnent un aperçu non exhaustif des différents types des contraintes pouvant intervenir dans le problème, à savoir :

- Contraintes de réserve ou de limitation sur la capacité disponible pour la maintenance dans chaque période.
- Contraintes de séquence, voulant qu'une unité soit arrêtée tant de semaines après qu'une autre unité soit remise en service.
- Contraintes d'exclusion, voulant que pas plus d'un nombre fixé d'unités ne doivent être maintenues simultanément.
- Contraintes reliées aux ressources humaines et à la technologie.
- Contraintes de budget d'investissement en maintenance.
- Contraintes de fiabilité et/ou de disponibilité du système.
- Contraintes de charge sur le système.

Les critères pouvant être considérés dans cette optimisation sont de plusieurs types :

- Minimiser les coûts de la maintenance.
- Maximiser la disponibilité des équipements.
- Minimiser le ratio coût du cycle de vie par le profit.

- Maximiser la durée de vie ou la fiabilité des groupes.
- Équilibrer ou lisser les investissements en maintenance sur le long terme.
- Équilibrer la charge de travail de la ressource humaine par région.

Plusieurs des critères d'optimisation cités peuvent être combinés afin de résoudre des situations de plus en plus courantes actuellement.

### 2.1.1 La programmation linéaire mixte

La programmation linéaire mixte en nombres entiers est la méthode la plus recensée dans la littérature pour résoudre des problèmes de planification de la maintenance dans le domaine de la production thermique de l'électricité.

Cette méthode généralise la programmation linéaire en imposant à certaines ou à toutes les variables de se restreindre aux entiers. La nature linéaire de la fonction-objectif et des contraintes, permet l'élaboration de méthodes qui exploitent cette structure.

Cependant, le fait que certaines variables soient entières, entraîne une complexité combinatoire qui réduit considérablement la taille des problèmes que l'on peut résoudre.

Les approches pour cette classe de problèmes comprennent l'énumération implicite, les méthodes de coupes et des techniques de relaxations (Nemhauser et Wolsey, 1988). Parmi ces problèmes, celui de l'optimisation de la planification des opérations est un exemple de problèmes de nature combinatoire. (Aoudjit, 2010)

Dans l'article de Chattopadhyay (1998) cité dans (Aoudjit,2010), la planification de la maintenance considère un système sous contrainte d'approvisionnement et la décision de la planification des opérations est considérée plus prioritaire. Ceci à cause du fait qu'une mauvaise planification de la maintenance va directement refléter une augmentation dans le niveau de l'énergie non servie. Le plan de maintenance tient compte de phénomènes reliés, tels que la génération, l'interruption aléatoire de service, l'approvisionnement en carburant et le transport.

Les contraintes du réseau d'interconnexion des équipements sont considérées dans l'étude de (Marwali et Shahidehpour, 1998) (cité dans Aoudjit,2010) pour tenir compte des limitations dues aux lignes de transport. Un plan de maintenance intégré est formulé et résolu par décomposition en un problème principal et des sous problèmes par la méthode de décomposition de Bender (Benders, 1962) cette méthode est citée dans (Aoudjit,2010). La résolution du problème principal donne des solutions pour les variables de décision du plan de maintenance. Dans la deuxième étape, les sous problèmes sont résolus pour minimiser les coûts tout en satisfaisant les contraintes dues au réseau d'interconnexion.

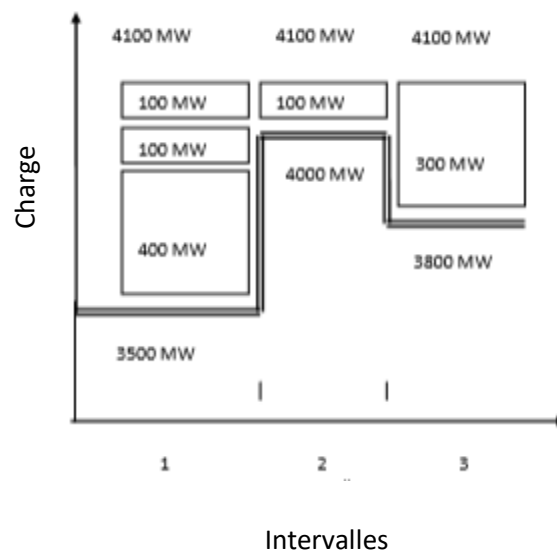
### 2.1.2 La programmation stochastique

*La programmation stochastique est un cadre de modélisation de problèmes d'optimisation qui implique des variables incertaines, caractérisées par des lois de distribution. Elle tente de trouver une solution faisable pour presque toutes les variables considérées tout en maximisant l'espérance d'une certaine fonction de décision et des variables aléatoires. Plus généralement, de*

*tels modèles sont formulés, résolus analytiquement ou numériquement, et analysés afin de fournir des informations utiles pour la prise de décision.*

*Les modèles de programmation stochastiques les plus largement étudiés et appliqués sont les programmes linéaires à deux étapes (two-stage linear programs). Dans ces modèles, une décision est prise dans une première étape. Après quoi, un événement aléatoire se produit affectant les résultats de cette première décision. Par la suite, une décision dite de recours est alors prise dans une seconde étape pour compenser tous les mauvais effets qui pourraient avoir été encourus en raison de la première décision. La stratégie optimale d'un tel modèle est une stratégie unique à la première étape, suivie d'une collection de décisions de recours dans la seconde étape.*

*Diverses approches intégrant des aspects stochastiques, ont été développées notamment pour la planification de la maintenance dans le domaine de la production thermique de l'électricité. Les buts poursuivis dans les tous premiers travaux, étaient ceux dit de nivellement de la réserve et qui sont traditionnels dans ce domaine. Le nivellement de la réserve a été largement utilisé comme index de fiabilité grâce à sa simplicité (Chen et Toyoda, 1988 dans Aoudjit,2010). Cette méthode ne tient pas compte des taux d'arrêts forcés et des incertitudes sur les charges. La figure 3 illustre la situation où cinq unités de production sont planifiées sur un horizon de trois intervalles pour niveler la réserve.*



*tirée de (Garver, 1972) dans(Aoudjit,2010)*

*Figure 3 : Plan pour niveler la réserve.*

*La figure illustre le cas où le pic de charge est égal à 4100MW, suivant trois intervalles où le deuxième nécessite le plus de demande (4000MW) les cinq unités sont planifiées en conséquence afin de garder un niveau constant.*

*Le calcul des risques est évalué par la probabilité de perte de charge (Loss Of Load Probability). C'est la probabilité que la charge sur le système dépasse sa capacité de génération. Le calcul exact du LOLP se fait à travers l'utilisation des tables des probabilités des taux d'arrêts forcés FOR (capacity outage probability table) ou à partir de routines d'approximations. Le FOR est le ratio de la durée ou une unité est en arrêt forcé sur la durée totale de fonctionnement. Nivelier les risques sur les arrêts de production le long de l'année est l'objectif poursuivi dans (Garver, 1972) cité dans la thèse de doctorat de (Aoudjit, 2010). Un comparatif entre la planification basée sur le nivellement de la réserve et le nivellement du risque est réalisé. L'auteur montre que de meilleurs résultats peuvent être obtenus.*

*D'après (Aoudjit, 2010), Chen et Toyoda (Chen et Toyoda, 1988) démontrent que les plans de maintenance peuvent être améliorés en nivelant plutôt le « risque incrémentiel » annuel. Dans la précédente approche le risque est nivelé sur chaque période. Leur méthodologie cherche à nivelier le risque total sur toute l'année. Le risque considéré est le LOLP. Pour contourner la difficulté posée par le problème combinatoire, la résolution du modèle proposé est entreprise selon la méthode de décomposition à deux niveaux.*

*Le problème est subdivisé en un problème principal résolu en premier et en sous problèmes multiples. Le résultat de la résolution du problème principal est un ensemble de charges virtuelles qui sont appliquées dans les sous problèmes pour ressortir des schémas (patterns) de maintenance. Les sous problèmes sont résolus par les algorithmes de type MIP ou par énumération implicite (branch and bound).*

*La méthode est appliquée sur un système comportant 8 centrales avec chacune un certain nombre d'unités totalisant 19 unités. Douze périodes sont considérées et la courbe de charge est supposée connue pour les 12 périodes y compris les pics de charge pour chaque journée de l'année. Les données nécessaires sont la capacité, le taux d'arrêts forcés, la période de maintenance en mois ainsi que l'étendue de la période pendant laquelle la maintenance peut être effectuée (par exemple : 200MW, 0.02, 1, 1~7) pour chaque unité. Comme les unités nécessitent entre 1 et 3 mois de maintenance, le problème est divisé en un problème principal et 3 sous problèmes avec respectivement 7, 8 et 4 unités. Les contraintes de maintenance sont telles que chaque unité doit être maintenue une fois durant la période spécifiée et dans une période, seulement une seule unité peut être entretenue. Les résultats obtenus en égalisant le LOLP ainsi que celle égalisant le LOLP incrémental sont comparées. La méthode proposée montre qu'il y a un risque moindre en adoptant le plan de maintenance ainsi trouvé.*

*Dans (Krishnasamy et al., 2005) cité dans (Aoudjit, 2010), l'objectif est aussi de concevoir un programme de maintenance qui va réduire le risque. Les sous-systèmes qui ne rencontrent pas le critère de risque accepté sont étudiés avec le type ainsi que l'intervalle de maintenance qui doit être appliqué. La probabilité des événements majeurs est décidée sur la base du risque acceptable. Une analyse inversée de l'arbre de défaillance est utilisée pour estimer la nouvelle probabilité d'occurrence de chaque événement de base. Les intervalles de maintenance produisant ces nouvelles probabilités sont calculés.*

### 3 L'optimisation de la planification de la maintenance

*Il est vrai que lorsque nous sommes confrontés à un problème d'optimisation nous recherchons parmi un ensemble de solutions réalisables celle qui est la plus faisable et qui plus est la meilleure. Il a été démontré selon (Stephens et Baritomba, 1998) que ce souhait ne peut pas être exaucé dans le cas général. Les méthodes exactes ne peuvent être définies que dans le cas où le problème d'optimisation possède une structure suffisamment riche et exploitable. Les méthodes exactes concernent principalement les problèmes de : programmation linéaire, programmation linéaire mixte en nombre entier, optimisation convexe et optimisation globale. [...]. (Aoudjit,2010)*

#### Conclusion

Cette partie s'achève avec les concepts essentiels qui régissent la planification de la maintenance. Les deux méthodes de planification les plus utilisés sont : la planification par la gestion des actifs et la planification par modélisation mathématique. Dans ce qui suit les méthodes de modélisation et d'optimisation mathématiques ainsi que les méthodes de résolution usuelles des programmes mathématiques seront abordées.

### I.3- Modélisation mathématique.

---



## Introduction

La modélisation, opération qui consiste en la conception d'un modèle, permet d'analyser des phénomènes réels et de prévoir des résultats à partir d'une ou plusieurs théories à un niveau d'approximation donné. A partir de cette définition, on peut distinguer deux tâches principales : la 1ere, consiste à modéliser le problème à résoudre, cette tâche sert à formaliser le problème, pour l'obtenir de façon plus abstraite. La seconde, consiste à résoudre le modèle obtenu, en appliquant des techniques de résolution qui permettront de trouver la ou les solutions.

L'objet du présent chapitre est de présenter en détails chacune de ces deux étapes. On s'intéresse en premier lieu à la modélisation des problèmes en utilisant des contraintes, ce modèle s'appelle la modélisation sous contraintes, en second lieu on s'intéresse aux techniques de résolution de ces problèmes.

## 1 Modélisation sous contraintes

C'est un paradigme de programmation qui permet de résoudre des problèmes combinatoires tels que la planification et l'ordonnancement. (Bonnans, 2006)

### 1.1 Problème de satisfaction des contraintes

C'est un ensemble fini de variables, chacune peut prendre une valeur dans un domaine fini de valeurs possibles qui lui est associé. Des contraintes portant sur des sous ensemble de variables représentent des conditions à satisfaire et restreignent l'ensemble des valeurs pouvant être affectées simultanément à ces variables. Plus formellement, un problème de Satisfaction des Contraintes (CSP) est un triplet  $(X, D, C)$  avec :

- $X$  un ensemble  $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  de variables ;
- $D$  un ensemble  $\{D_1, D_2, \dots, D_n\}$  de domaines telque  $X_i$  appartient à  $D_i, i = 1 \dots n$  ;
- $C$  un ensemble  $\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$  de contraintes ou chaque  $C_i$  définit un sous – ensemble du produit cartésien des domaines des variables sur lesquelles elle porte :

$$C_i(X_{i_1}, \dots, X_{i_k}) \text{ inclut } D_{i_1} * \dots * D_{i_k}$$

La notion de domaine désigne l'ensemble des valeurs que peut potentiellement prendre une variable, elle fait référence à des ensembles de natures potentiellement très différentes :

- Un ensemble d'entiers non contigus : il est possible d'utiliser un ensemble d'entiers quelconques, par exemple :  $D = \{8,10,15\}$  ;
- Un ensemble de valeurs symboliques : on peut représenter des mois, par exemple :  $D = \{\text{mars, juin, aout}\}$  ;
- Un intervalle de réels : on peut définir un ensemble de réels en définissant les bornes inférieures et supérieures ;
- Un intervalle d'entiers : on peut définir un ensemble d'entiers contigus, toujours en spécifiant les bornes inférieures et supérieures, par exemple :  $D = \{1, \dots, 10\}$  ;

Chaque variable possède ainsi un domaine initial qui contraint la valeur qu'on peut lui affecter. On parle de variables continues si le domaine de définition appartient à  $\mathbb{R}$ , ou pour tous sous-ensemble continu, et on parle de variable discrète si le domaine de définition appartient à  $\mathbb{N}$  ou  $\mathbb{Z}$ .

On distingue trois grandes catégories de problèmes selon le type de variables existantes, discrètes, continues ou les deux en même temps, on parle alors respectivement de CSP discret, continu ou mixte.

Enfin, les contraintes sont élaborées pour les relier les unes aux autres, il existe cependant différentes natures de contraintes :

- Contraintes dynamiques : on ajoute une précondition qui doit être vérifiée avant de pouvoir considérer la contrainte ;
- Contrainte globale : on peut utiliser une relation prédéfinie, avec une signification précise ;
- Contrainte en intention : c'est une relation entre plusieurs variables définie par une expression arithmétique ;
- Contrainte en extension : dans ce cas on définit explicitement la liste des n-tuplés autorisés ;
- Contrainte par morceaux : différentes parties du domaine sont associés à différentes contraintes ;

### Solution d'un problème de satisfaction des contraintes

Affecter à chaque variable une valeur du domaine peut être une solution potentielle, le produit cartésien des domaines de variable est donc l'ensemble des solutions potentielles, et l'évaluation d'un CSP est une affectation de valeurs aux variables.

La solution d'un CSP est un n-uplet  $S = (S_1, S_2 \dots S_n)$ ,  $S_i$  appartient à  $D_i$  quel que soit  $i$ , pour lequel toute contrainte  $C_j$  est satisfaite.

Selon les situations, résoudre un CSP peut consister à trouver une, toutes ou la meilleure des solutions possibles, et pour ce dernier cas, il faut fournir un moyen d'évaluer la qualité d'une solution, souvent sous forme d'expression arithmétique défini sur un sous-ensemble de variables du problème et qu'on va utiliser pour quantifier la qualité d'une solution donnée.

## 1.2 La programmation mathématique

La description de la planification et de l'ordonnancement d'activités au sein de grandes organisations est décrite par le terme de programmation. L'idée est de trouver un moyen d'exprimer un objectif à maximiser ou à minimiser en fonction des valeurs des grandeurs, et d'exhiber des liens mathématiques entre ces grandeurs.

La programmation mathématique permet donc de décrire la minimisation ou la maximisation d'une fonction-objectif définie sur des variables soumises à des contraintes.

Un problème de programmation mathématique a la forme générique suivante :

$max$  (ou bien  $min$ )  $f(X_{k1}, \dots, X_{kn})$  avec  $(X_1, \dots, X_n)$  naturels

S/C

$$G_i(X_{i1}, \dots, X_{ini}) = 0 \quad \text{avec } i, l \text{ naturels}$$

$$H_i(X_{j1}, \dots, X_{jni}) = 0 \quad \text{avec } j, l \text{ naturels}$$

$G_i$  et  $H_i$  contraintes saturées.

Il consiste à trouver des variables qui minimisent la valeur correspondante de la fonction-objectif. Cette minimisation peut faire intervenir ou non des contraintes à satisfaire liées à la nature des variables, entières, réelles, donc le problème peut être discret, continu ou mixte selon les variables. (Rao, 1996)

### 1.3 Généralisation

Beaucoup de problèmes de satisfaction de contraintes et d'optimisation s'avèrent mixtes, d'où l'extension du formalisme CSP classique au formalisme d'optimisation sous contraintes (CSOP).

Ce formalisme sert à traiter des problèmes d'optimisation qui font intervenir des contraintes fortes, c'est pourquoi il est considéré comme une extension du CSP, il est défini par un quadruplet  $(X, D, C, f)$  avec :

- X un ensemble  $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  de variables ;
- D un ensemble  $\{D_1, D_2, \dots, D_n\}$  de domaines telque  $X_i$  appartient à  $D_i, i = 1 \dots n$  ;
- C un ensemble  $\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$  de contraintes ou chaque  $C_i$  définit un sous – ensemble du produit cartésien des domaines des variables sur lesquelles elle porte :
 
$$C_i(X_{i1}, \dots, X_{ik}) \text{ inclut } D_{i1} * \dots * D_{ik}$$
- F une fonction objectif définie sur un sous ensemble de X éventuellement constante. (Berger, 2010)

### 1.4 Quelques classes de problèmes d'optimisation

Aujourd'hui, tous les systèmes susceptibles d'être décrits par un modèle mathématique sont optimisables. la qualité des résultats et des prédictions dépend de la pertinence du modèle, de l'efficacité de l'algorithme et des moyens pour le traitement numérique. Pour cela, l'optimisation est découpée en sous-disciplines, qui se chevauchent suivant la forme de la fonction objectif et celles des contraintes. On en distingue cinq classes mais cette liste est loin d'être exhaustive. (Berger, 2010)

- Lorsque la fonction-objectif et les contraintes sont linéaires, on parle d'optimisation linéaire. Ce cas comprend des situations où certaines ou toutes les variables doivent prendre des valeurs entières.
- Lorsque la fonction-objectif est une forme quadratique et les contraintes sont linéaires on parle d'optimisation quadratique.
- Lorsque certaines contraintes dépendent de variables aléatoires on parle d'optimisation stochastique.

- La programmation dynamique utilise la propriété qu'une solution se compose nécessairement de sous-solutions optimales pour décomposer le problème en évitant l'explosion combinatoire. Elle est donc utilisée lorsque la fonction-objectif est une somme de fonctions monotones croissantes dont les arguments sont des inconnues distinctes.

## 1.5 Techniques de résolution

Dans la résolution des problèmes d'optimisation, il est important de formuler le problème sous forme d'un problème linéaire, pour pouvoir utiliser différentes méthodes de résolution. Ces problèmes peuvent être résolus à l'aide de plusieurs méthodes déjà existantes, ce présent point introduit en détails la mise en œuvre par la programmation par contraintes ou modélisation sous contraintes.

## 1.6 Méthodes exactes

Ces méthodes donnent une garantie de trouver la solution optimale pour une instance de taille finie dans un temps limité et de prouver son optimalité, à savoir :

### 1.6.1 Méthode du Simplexe

C'est la méthode privilégiée de résolution des programmes linéaires formulés dans la pratique, car performante, elle fournit des solutions de base. Très importante dans les approches de décomposition ou les procédures de re-optimisation itératives, elle est donc la plus utilisée.

Algébriquement, le simplexe se définit comme la détermination d'une suite de base adjacente réalisable, alors que géométriquement, c'est le fait de trouver un point associé à la solution optimale en se déplaçant d'un point extrême à un autre du polyèdre des contraintes. (Perrot, 2014)

### 1.6.2 Méthode graphique

Dans le cas d'une programmation linéaire à deux variables, on peut envisager une résolution graphique. Les contraintes où apparaissent des inégalités, correspondent géométriquement à des demi-plans et leur intersection forme l'ensemble des variables satisfaisant toutes les contraintes. La fonction objectif  $F$  correspond une droite qui est égale à une constante.

La constante précédente qui définit la droite doit être la plus grande possible (dans le cas d'une maximisation) et rencontrer l'ensemble des variables qui satisfont les contraintes.

Pour déterminer cette valeur maximale, on fait donc glisser la droite, c'est-à-dire, translation parallèle à la direction de la droite) du haut vers le bas jusqu'à rencontrer l'ensemble des variables satisfaisant les contraintes. Le maximum de  $F$  sur cet ensemble des contraintes est alors atteint (Perrot, 2014)

### 1.6.3 Méthode Branch and Bound

Un algorithme par séparation et évaluation, ou Branch and Bound en anglais, est une méthode générique de résolution de problèmes d'optimisation, basée sur trois axes principaux : l'évaluation, la séparation, et la stratégie de parcours. Elle consiste à trouver un point minimisant une fonction, dans un ensemble dénombrable. Une méthode naïve pour résoudre ce problème est

d'énumérer toutes les solutions du problème, de calculer le coût pour chacune, puis de donner le minimum. Parfois, il est possible d'éviter d'énumérer des solutions dont on sait, par l'analyse des propriétés du problème, que se sont de mauvaises solutions, c'est-à-dire des solutions qui ne peuvent pas être le minimum. La méthode *séparation et évaluation* est une méthode générale pour cela. Cette méthode est très utilisée pour résoudre des problèmes NP-complets, c'est-à-dire des problèmes considérés comme difficiles à résoudre efficacement. (Feautrier, 2005)

## 1.7 Résolution des problèmes d'optimisation à l'aide de l'outil informatique

### 1.7.1 EXCEL

Le solveur d'EXCEL est un outil puissant d'optimisation et d'allocation de ressources. Il aide à déterminer l'utilisation des ressources pour maximiser les objectifs souhaités (telle la réalisation de bénéfices) et minimiser une perte donnée (tel un coût de production). En résumé, il permet de trouver le minimum, le maximum ou la valeur au plus près d'une donnée tout en respectant les contraintes qu'on lui soumet. (Site web Excel, 2017).

### 1.7.2 CPLEX

Initialement, CPLEX est un solveur de programmes linéaires. A ce titre, il repose donc sur une implémentation performante du simplexe primal. Il dispose également du simplexe dual et du simplexe de réseau. Il peut aussi résoudre des programmes linéaires mixtes, en combinant le simplexe, le Branch and Bound et la génération de coupes. Depuis peu, il intègre également une technique à base de points intérieurs et peut traiter des problèmes quadratiques. Actuellement, CPLEX est un des solveurs les plus performants disponibles. Il peut ainsi traiter des problèmes contenant plusieurs dizaines de milliers de variables et plusieurs centaines de milliers de contraintes. Pour les problèmes mixtes, la limite est sensiblement plus basse, mais elle dépend grandement du type de problèmes et du modèle appliqué. (Site web IBM, 2017)

### 1.7.3 MATLAB

L'Optimisation Toolbox propose des fonctions permettant de minimiser ou de maximiser les objectifs tout en répondant aux contraintes. Elle inclut des solveurs adaptés à la programmation linéaire de réels et/ou d'entiers mixtes, la programmation quadratique, l'optimisation non-linéaire et la résolution par moindres carrés non-linéaires. Ces solveurs peuvent être utilisés pour résoudre de problèmes continus et discrets de manière optimale, effectuer des analyses de compromis et incorporer des méthodes d'optimisation aux différents algorithmes et applications. (Site web Matlab, 2018)

## Conclusion

Ce chapitre a abordé la méthode et les différentes étapes de modélisation des problèmes mathématiques ainsi que leur résolution en utilisant la programmation mathématique et les outils informatiques.

## Conclusion du chapitre I

Ce chapitre a fait ressortir les aspects théoriques et conceptuels concernant la maintenance, la planification, la modélisation mathématique, et les différentes méthodes de résolution des programmes. Ces différents aspects constituent la base théorique sur laquelle se base notre travail.

---

## Chapitre II : Etat des lieux et étude de l'existant.

### Introduction du chapitre II

La deuxième partie de ce document a pour objectif de synthétiser le contexte et l'environnement dans lequel s'effectue l'étude. Elle débute par une présentation de l'entreprise et de son secteur d'activité et se poursuit avec une étude de l'existant concernant les processus de maintenance et de planification ainsi que le cadre régissant note étude. Pour finir un diagnostic permettra de cerner le besoin de l'entreprise à l'issue duquel la problématique de planification sera clairement formalisée.

---

## II.1 Présentation de l'entreprise General Electric.





## Introduction

La présente étude a été effectuée au sein de GEPS, une branche de GE, une grande multinationale américaine.

C'est pourquoi ce chapitre est consacré à la présentation du conglomérat GE, ses produits, ses services, ses différents business, notamment GEPS, et leurs répartitions à travers le monde.

## 1 Le conglomérat General Electric

General Electric est une multinationale américaine fondée en 1892, suite à la fusion des deux concurrents : la Edison General Electric Company, fondée elle-même par le célèbre inventeur THOMAS EDISON, et la Thomson Houston Electric, l'objectif étant de fournir des solutions complètes d'installation électrique.

Son histoire a été marquée par plusieurs événements, elle n'a cessé de se développer à travers le temps, pour devenir l'un des acteurs incontournables dans plusieurs domaines, elle a été entre autres l'une des 12 entreprises à former le DOW Jones en 1896, elle est la seule à y être encore aujourd'hui, elle a aussi racheté plusieurs entreprises tel que ALSTOM, et est aujourd'hui considérée comme un modèle d'organisation managérial.

Depuis sa création, le conglomérat GE élargit la portée de ses activités, il emploie aujourd'hui un peu plus de 300000 personnes à travers le monde, car il est présent dans 140 pays. (WEB GE 2017)

Le conglomérat GE offre des produits et services dans 8 domaines d'activités majeures, qui sont :

- **GE Power** : ce business fournit des produits et services liés à la production d'énergie, il travaille essentiellement avec des gouvernements et des industries. Lui-même est divisé en plusieurs sous-business :
  - **Gas Power System** : il propose des turbines à gaz et des turbines aéro-dérivatives pour les producteurs d'énergie.
  - **Steam Power System** : offre une technologie d'énergie à vapeur, qui utilise l'énergie cinétique d'un fluide liquide ou gazeux pour faire tourner un arbre solidaire de la turbine.
  - **Power Services** : Ce business offre des solutions de maintenance et de service.
  - **Distributed Power** : son objectif est de générer une puissance fiable et efficace en fournissant des produits et services basés sur la technologie.
  - **GE Hitachi Nuclear** : S'occupe de la sécurité, la fiabilité et les performances des flottes nucléaires.

- **GE Renewable Energy** : Il offre des solutions d'amélioration des énergies renouvelables éoliennes et hydroélectriques ;
- **GE Oil and Gas** : S'occupe des différentes opérations concernant l'industrie du pétrole et du gaz ;
- **GE Aviation** : Conçoit et produit des composants numériques et des moteurs pour des avions civils et militaires ;
- **GE Energy Connection and Lightning** : S'occupe de l'alimentation électrique grand public ;
- **GE capital** : Fournit des produits et services financiers ;
- **GE health care** : Fournit des technologies de santé telle que l'imagerie médicale ;
- **GE transportation** : S'occupe de l'industrie minière, ferroviaire ou marine ;



Figure 4: Business du conglomérat GE.

## 2 GE en Algérie

Le conglomérat General Electric est présent en Algérie de par les business suivants :

**GE Oil& Gaz** : GE est partenaire de Sonelgaz depuis plus de 30 ans. Des contrats importants ont été signés entre les deux compagnies, le dernier étant le contrat appelé « Méga Deal ». Elles se partagent aussi les deux sociétés ALGESCO et General Electric Algeria Turbines (GEAT).

**GE Aviation** : depuis plus de 25 ans GE est partenaire d'air Algérie, elle fournit 70% de sa flotte.

**GE Health Care** : Elle fournit le matériel médical aux hôpitaux de tout le territoire national.

**GE Power** : S'occupe de la maintenance des équipements des centrales électriques.

GE Power Alegria, branche algérienne de GE Power, ou notre stage s'est effectué, est présente en Algérie depuis plus de 40ans. Son siège social se situe dans la micro zone industrielle de Hydra dans la wilaya d'Alger. Cette filiale représente 22% du chiffre d'affaire des activités de General Electric. (WEB GE-ALGERIA 2017)

GE Power Algeria propose différents services allant de l'installation des centrales électriques à leur réparation en passant par leur maintenance. Elle s'occupe également des solutions de mise à niveau et d'optimisation des équipements installés.

Elle compte parmi ses partenaires l'entreprise nationale de production de l'électricité SONELGAZ SPE. En effet elle est son principal client en termes d'installation des centrales électriques ainsi que la maintenance de leurs équipements qui sont principalement des turbines à gaz, à vapeur, des turbines aéro-dérivatives et d'autres auxiliaires.

La gestion de la maintenance est l'une des opérations les plus importantes en entreprise. Il faut ainsi concevoir un programme efficace, qui prenne en considération la disponibilité des équipements et les coûts de maintenance, ce qui représentent les deux préoccupations essentielles pour la gestion d'une turbine à gaz. Il faut ainsi prendre en considération le niveau de compétence du personnel, les priorités de l'installation, ...

## 3 Les produits de GE Power

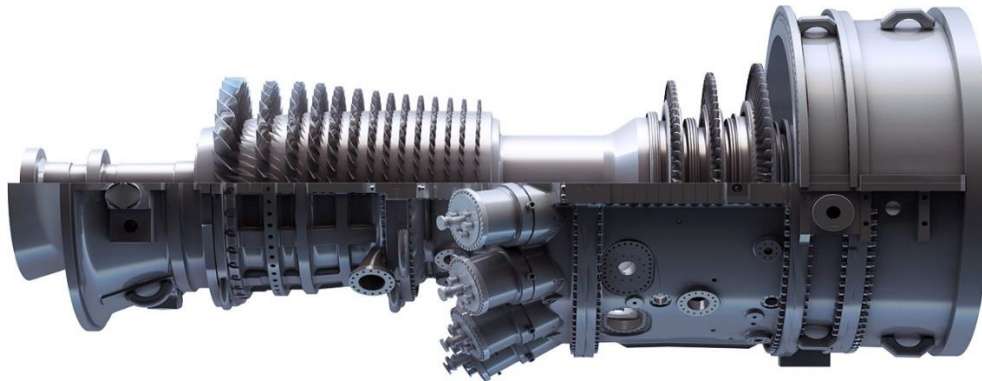
### 3.1 Les turbines à gaz

Ce sont des machines tournantes appartenant à la famille des moteurs à combustion interne. Elles permettent de faire tourner un alternateur en convertissant l'énergie contenue dans un hydrocarbure en énergie mécanique. Elles fonctionnent suivant un cycle de Joules, qui comprend une phase de compression, une phase de chauffage et une phase de détente. La turbine à gaz contient cinq parties principales :

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

GE Power offre une gamme de turbines à gaz dont la capacité varie de 40 à 390 MW. Le présent travail porte sur la maintenance des turbines de type 9FA, qui offrent une multitude d'avantages, on peut citer :

- Une capacité d'adaptation au réseau électrique améliorée, offrant une réduction du temps de démarrage.
- Un rendement et des performances améliorés grâce à la technologie avancée Advanced Gas Path (AGP)
- Une diminution de la consommation de carburant de plus de 30% en mode (baseload) en cycle simple.



*Figure 5 : Turbine à Gaz type 9FA.*

### 3.1.1 Le système standard et le système AGP

Le système standard ou Hot Gas Path (HGP) désigne des pièces capitales des parties chaudes qui ont été initialement installées dans les turbines à gaz.

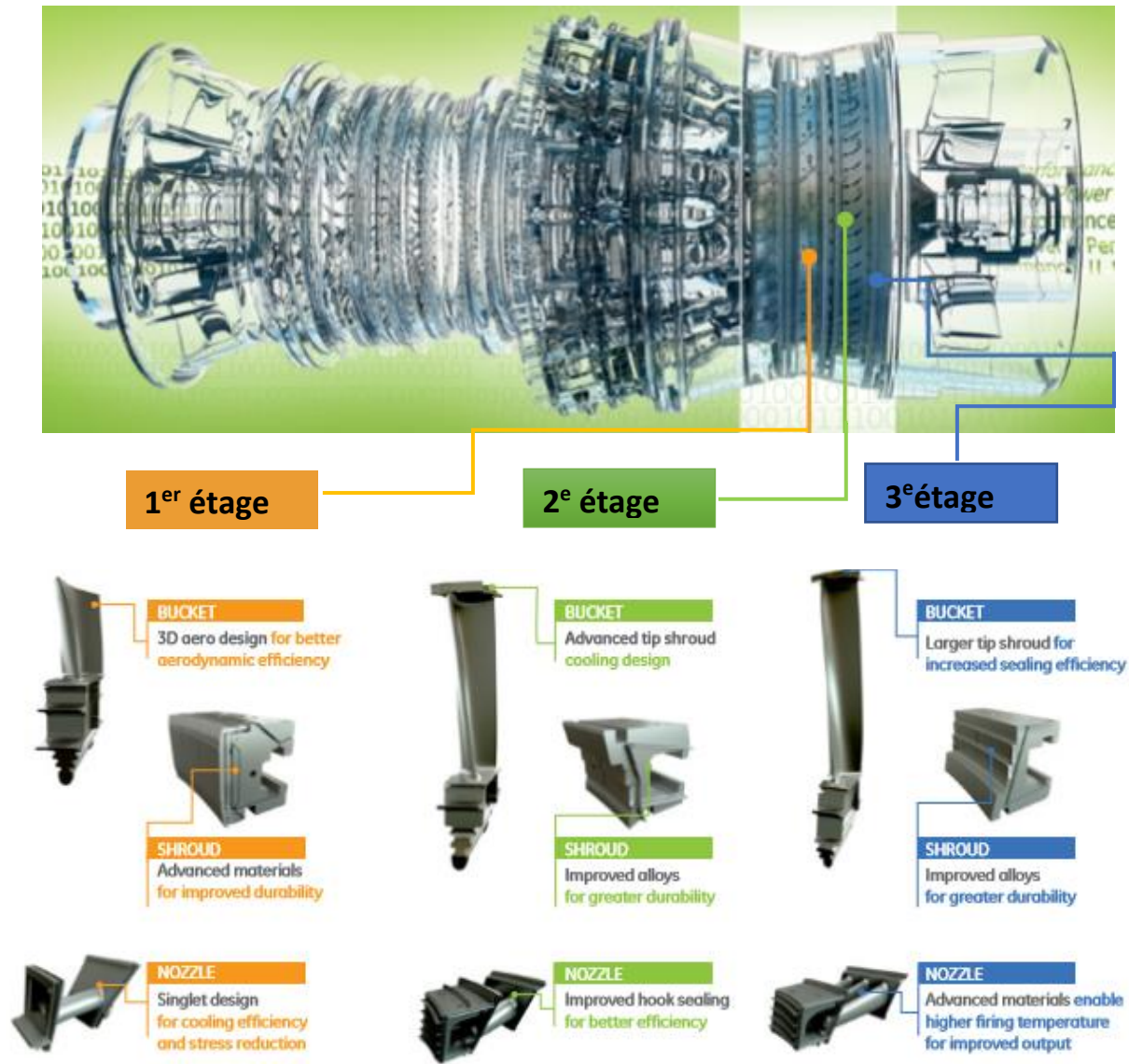
Le système standard se compose comme suit :

- 1<sup>er</sup>, 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> étage directrices Hot Gaz Path.
- 1<sup>er</sup>, 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> étage ailettes turbine Hot Gaz Path.
- 1<sup>er</sup>, 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> étage segment de protection Hot Gaz Path.

Le système Advanced Gas Path désigne les pièces capitales avancées des parties chaudes. Il est composé de :

- 1<sup>er</sup>, 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> étage directrices AGP.
- 1<sup>er</sup>, 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> étage ailettes turbine AGP.
- 1<sup>er</sup>, 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> étage segment de protection AGP.

La figure suivante illustre les trois étages avec leur localisation et les composants améliorés :



Source : ( Brochure AGP Web GE Power 2018)

Figure 6 : Spécifications techniques du système AGP.

Le système HGP a été modifié afin d'obtenir une meilleure étanchéité, c'est ainsi que les matériaux ont été changés pour plus de durabilité et de réduction du stress des composants. Le nouveau revêtement permet d'atteindre des températures plus élevées et donc une plus grande puissance, la technologie de refroidissement a donc subi une amélioration notable.

Le système AGP a pour objectif l'amélioration du rendement (consommation spécifique) et de la puissance des Turbines à gaz et permet également une amélioration de la disponibilité des Turbines à gaz à travers l'extension des intervalles de maintenance.

Le tableau suivant rassemble les caractéristiques techniques de la turbine 9FA pour les deux systèmes. La référence 9F 03 représente le système HGP, et le 9F04 représente la technologie AGP

Tableau 1 : Améliorations après upgrade.

	<b>9F .03</b>	<b>9F .04</b>	<b>ECART</b>
<b>PUISSANCE NETTE EN CYCLE COMBINE (MW)</b>	819	889	70
<b>CONSOMMATION SPECIFIQUE EN CYCLE COMBINE(CC) (KJ/KWH)</b>	6097	5960	137
<b>PUISSANCE NETTE EN CYCLE SIMPLE (SC) (MW)</b>	256	288	32
<b>CONSOMMATION SPECIFIQUE EN CYCLE SIMPLE (SC) (KJ/KWH)</b>	9517	9295	222
<b>INSPECTION (HOURS)</b>	24k HGPI 48k MI	32k HGPI 64k MI	8k 16k

La 9F.03 représente la turbine de type 9 Frame avec système HGP installé, pour la 9F.04 il s'agit de la même turbine avec système AGP. L'upgrade est une amélioration technologique qui concerne la partie Hardware et donc le changement de système des parties chaudes et la partie Software permettant de monitorer la turbine.

Les résultats obtenus démontrent que pour les cycles simples et les cycles combinées la puissance dégagée s'est améliorée (les valeurs des puissances et consommation spécifiques sont données dans des conditions ISO). En effet, elle s'est accrue de 70MW pour les cycles combinés, et de 32 MW pour les cycles simples ; en contrepartie, la consommation spécifique a diminué pour chacun des types de cycle, elle a diminué de 137 KJ/KWH pour les cycles combinés et de 222 KJ/KWH pour les cycles simples.

En plus de ces 2 paramètres, les intervalles de maintenance sont rallongés pour la technologie AGP, l'inspection est passée de 32000 à 64000 heures de fonctionnement, et la Major Inspection est passée de 48000 à 64000 heures, ce qui représente un gain important en termes d'heures de fonctionnement et de coûts. Le tableau suivant résume les améliorations apportées par ce système.

Tableau 2 : Améliorations apportées par le système AGP.

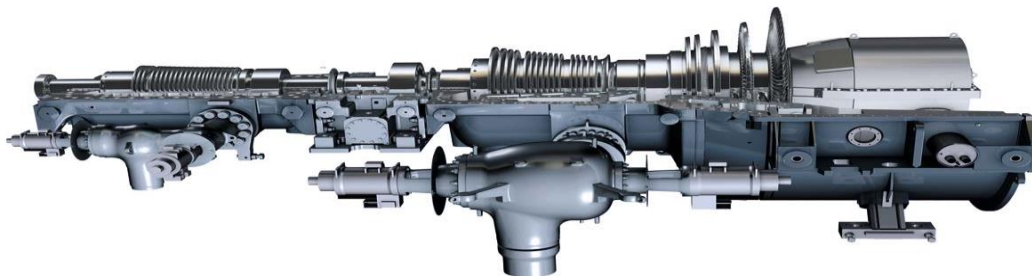
<b>Paramètres</b>	<b>Amélioration</b>
<b>Capacité</b>	L'installation du système AGP garanti une amélioration de la performance d'environ 6%. Cela rejoint la volent d'améliorer la capacité de production d'électricité du pays, ce système étant adaptatif à la demande.

<b><i>Efficacité</i></b>	Le système AGP permet une augmentation de l'efficacité énergétique de l'ordre de 2% tout en réduisant la quantité de gaz utilisée.
<b><i>Flexibilité</i></b>	L'étape de remise en marche d'une turbine est l'une des plus critiques, elle nécessite du temps. Grâce au système AGP ce temps appelé : start-up time est diminué de 30%. En addition à cela, 3% d'augmentation de puissance maximale est enregistrée ainsi qu'une faible émission de gaz NO <sub>x</sub> de l'ordre de 2ppm (20 mg /Nm <sup>3</sup> ).
<b><i>Disponibilité</i></b>	Le système AGP étend l'intervalle de maintenance à 32k H. Les pièces du système AGP ont un cycle de vie de 96k Heures ce qui équivaut à 3 intervalles.

### 3.2 Les turbines à vapeur

Ce sont des dispositifs rotatifs qui permettent l'utilisation de l'énergie cinétique d'un fluide liquide ou gazeux pour faire tourner un arbre solide des pales de la turbine. Elles comprennent 2 étages qui ont une ou deux fonctions, à savoir :

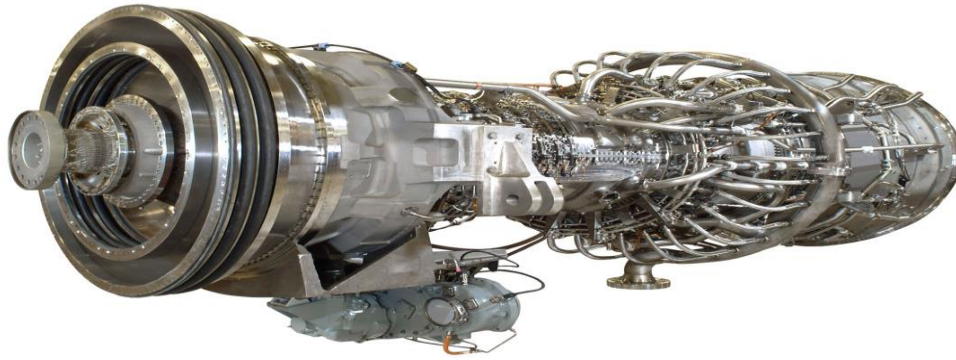
- La détente de la vapeur qui correspond à la conversion de l'énergie potentielle en énergie cinétique.
- La conversion de l'énergie cinétique en couple de rotation de la machine par le biais des aubages mobiles.



*Figure 7 : Turbine à vapeur.*

### 3.3 Les turbines aéro dérivatives

C'est un moteur d'avion dont la fiabilité a diminué, et recyclé en générateur d'électricité, il assure diverses fonctions pour la production d'électricité. Considéré comme étant le meilleur en termes de rendement, il fonctionne grâce au même principe que celui d'une turbine à gaz, mais avec des spécificités plus avantageuses.



*Figure 8 : Turbine aero-dérivée.*

### 3.4 Autres auxiliaires

Tels que les générateurs, les postes d'alimentation en fuel, en gaz naturel, ce sont des équipements indispensables pour le fonctionnement d'une centrale électrique.



*Figure 9 : Générateur.*

## 4 Les services de GEPS

GEPS est une filiale de GE Power, il s'agit du prestataire de service de maintenance et il détient un portefeuille d'inspections important, qui se résume dans ce qui suit :

### 4.1 Les inspections

Plusieurs paramètres sont à prendre en considération : l'approvisionnement des pièces de rechange, le nombre et les types d'inspection, ...

- **Inspection d'exploitation** : Elle se base sur l'établissement des données d'exploitation pendant le démarrage initial d'une nouvelle unité et l'observation du fonctionnement de cette dernière, elle s'effectue après les interventions majeures de démontage. Cette inspection servira de référence pour mesurer la détérioration ultérieure de l'unité.
- **Inspection de veille** : Lorsque l'unité n'est pas en fonctionnement ou hors période de pointe, l'entreprise profite pour effectuer ce type d'inspection, qui inclut aussi l'étalonnage des dispositifs et l'entretien courant des systèmes accessoires. Un exemple connu est celui de l'inspection boroscopique, qui se base sur l'introduction d'un boroscope au sein de la machine, grâce à l'architecture de cette dernière, qui incorpore des dispositifs dans le boîtier du compresseur et de la turbine pour permettre l'inspection des premiers étages de ces deux parties. L'objectif est de surveiller l'état des parties internes de la machine.



- **Inspection de démontage** Plus détaillée que les autres, elle implique l'ouverture de la turbine pour inspecter les parties internes, elle-même se divise en 3 parties, à savoir :
- **Inspection de combustion** (Combustion Inspection (CI)) : Elle permet de remplacer les injecteurs de combustible, les pièces de transition, les couvercles d'extrémités, et les tubes de flamme. C'est une inspection relativement courte, qui survient à l'arrêt. Elle permet de prolonger la durée de vie des parties en aval comme les directrices et les aubes.
- **Inspection de la veine gazeuse** (Hot Gas Path inspection (HGPI)) : Elle comporte l'ensemble de l'inspection de combustion, ainsi qu'une inspection détaillée des directrices de la turbine, des protections du stator, et des aubes de la turbine. L'objectif étant d'examiner les parties exposées aux températures élevées des gaz chauds dégagés par le processus de combustion.
- **Inspection majeure** (MI major inspection) : Elle consiste à examiner tous les composants internes relatifs et fixes de la machine jusqu'à l'échappement. Elle inclut également l'ouverture complète du compresseur.

## 4.2 Les contrats de service

GE Power propose quatre (04) types de contrat de maintenance :

- **Contrat de maintenance transactionnel (TX)** : Ce contrat répond à un besoin précis du client, la responsabilité du constructeur se résume à lui fournir les prestations en accord avec une demande ponctuelle. Une fois sa part du contrat remplie, outre la responsabilité légale de garantie, GE aura complété toutes ses obligations vis-à-vis du client.
- **Multi-Year Maintenance Plan (MMP)** : Ce type de contrat permet au client de gérer sereinement la maintenance de sa centrale en maîtrisant ses coûts et sa planification de maintenance. C'est un engagement à long terme signé entre les parties (3 ans et plus). Le constructeur s'engage vis-à-vis du client sur les prix des pièces et des services ainsi que les délais d'exécution. En contrepartie, le client s'engage sur un volume minimum de commande durant le terme du contrat.
- **Contractual Service Agreement (CSA)** : C'est aussi un engagement à long terme (6 ans et plus), mais dans ce cas GE est responsable de toute la maintenance des équipements en termes de planification, d'exécution et même de gestion des pièces de rechange. Elle s'engage vis-à-vis du client à garantir les performances suivantes : Disponibilité, dégradation de la consommation, dégradation de la puissance. Du point de vue du client, ce type de contrat représente un support de maintenance plus complet par rapport au précédent, dans la mesure où, par exemple, dans un contrat de type MMP, si un arrêt non planifié se produit, le client paiera le service de réparation ainsi que les pièces achetées à cet égard. Par contre, dans un contrat de type CSA, les charges induites par un arrêt non planifié sont complètement supportées par GE. Le paiement dans ce type de contrat est forfaitaire.
- **Operation & Maintenance (O&M)** : Un contrat de type O&M est, comme un contrat CSA, un engagement à long terme (6 ans et plus). Il fournit au client le plus haut niveau de participation et d'engagement de la part du constructeur. Il propose au client les mêmes services qu'un contrat de type CSA mais également la gestion complète de toute la centrale du client par

le personnel du constructeur. Il est important de préciser qu'à travers ce type de contrat, la centrale reste la propriété du client bien que le personnel responsable de la gestion et du bon fonctionnement de la centrale soit le personnel du constructeur

## Conclusion

Une fois l'activité de l'entreprise connue, les aspects de production et de service décrits. On passe en revue dans le chapitre suivant les pratiques de gestion de la maintenance de GEPS. Cela permettra De mieux comprendre le fonctionnement de certains processus au sein de l'entreprise. Pour enfin mettre en avant le besoin réel de l'entreprise à travers une analyse explicative.

## II.3- Analyse de l'état des lieux et présentation de la problématique.

---

## Introduction

Ce chapitre décrit le contexte dans lequel s'effectue notre projet, les conditions et les enjeux liés au contrat Méga Deal. Il présente une synthèse des constatations effectuées au sein de l'entreprise, en se référant au modèle établi par les équipes de GEPS.

### 1 Contexte du projet

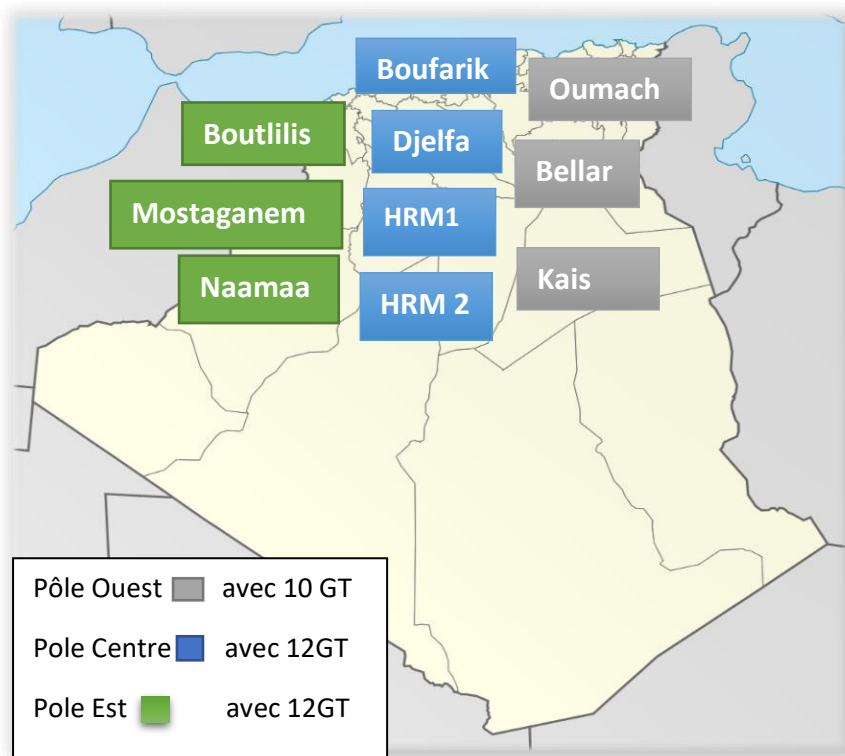
Les parts de marché de GEPS en Algérie ne cessent de s'accroître notamment grâce à la signature le 20 Avril 2017 du contrat dit Méga Deal avec SONELGAZ SPE. Un contrat estimé à trois milliards de dollars, il s'agit du plus grand contrat de l'histoire de GEPS et ce à travers le monde. Ce contrat de service de maintenance érigé selon un contrat CSA d'une durée de 20 ans prévoit la maintenance de 10 centrales électriques et inscrit une action améliorative visant la mise en place du système d'efficacité énergétique AGP. Ceci nécessite la modification préalable des kits de chambres à combustion.

La réalisation de cette maintenance améliorative a également été associée au besoin de réalisation des inspections sur les générateurs. Ce constat pousse l'entreprise à concevoir des plans de maintenance avec la précision la plus accrue.

Par ailleurs, il est utile de préciser que le contrat Méga deal prévoit en plus de la maintenance améliorative :

- La supervision et l'assistance technique lors des opérations de maintenance (planifiée et de routine).
- La réparation et la fourniture des pièces de rechange.
- La fourniture de consommables et la formation du personnel pour un parc de turbines.

Ce parc de dix centrales est constitué de 34 turbines à Gaz de type 9 Frame version 03 (9F.03) et de 17 turbines à vapeur, en cycle simple ou bien combinés disposées sur trois (3) pôles : est, ouest et centre comme indiqué sur la figure suivante :



*Figure 10 : Répartition des centrales.*

GEPS est responsable des opérations sur les turbines, sur les équipements Balance Of Plant (BOP), et du bon fonctionnement de la structure en général.

## 2 Conditions d'exécution du contrat Méga Deal

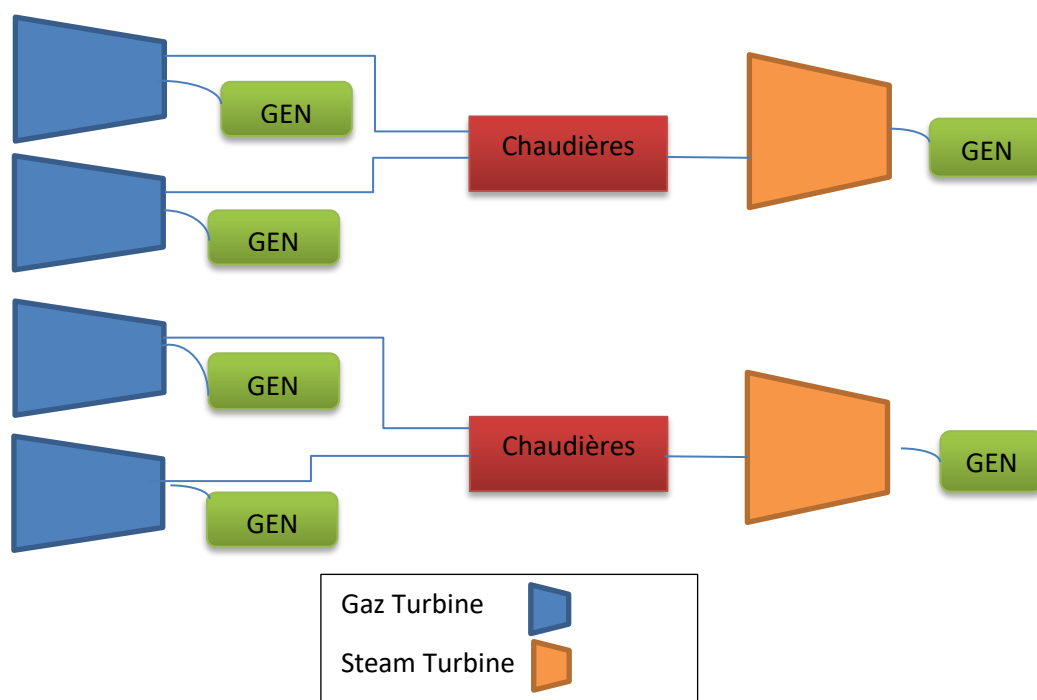
L'exécution du contrat « Méga Deal » dans sa partie maintenance prévoit comme précisé plus haut une action améliorative des parties chaudes appelée un « upgrade ». Cet upgrade fixe un certain nombre d'objectifs notamment le rallongement de la durée de vie des pièces de rechange et la diminution de la consommation du gaz. L'atteinte de ces objectifs nécessite une planification des opérations préalablement identifiées. Ce flux d'opérations alimente une décision qui se chiffre, soit en perte pour le client ou bien en pénalité pour le prestataire.

Cette planification intervient après le projet de construction des centrales électriques qui prend forme dans trois pôles : est, ouest et centre. En effet le début de la maintenance améliorative prévue dans le contrat est lié à la fin de construction des centrales et installation des équipements qui doit se faire conformément à un planning de dates de mise en service appelées Commercial Operational Dates (COD).

Une fois l'installation et la mise en service de chaque turbine faite, des tests de performance sont effectués. Chaque centrale est composée de cycles combinés ou bien de cycles simples.

Un cycle combiné est constitué de deux turbines à gaz connectées à une turbine à vapeur par le biais d'une chaudière, quant au cycle simple il n'est constitué que d'une seule turbine à gaz.

Chaque turbine fait tourner un générateur. Elles sont aussi entourées d'équipements appelés BOP permettant de faire fonctionner la centrale et de produire l'électricité.



*Figure 11 : Disposition des turbines en cycle combiné 2\*1.*

Après installation et mise en service de la turbine à vapeur, des tests de performance sont à nouveau effectués afin de déterminer la conformité du cycle combiné aux exigences clients.

Une bonne gestion de la maintenance passe par une bonne préparation, à ce titre l'identification des opérations constitue un enjeu majeur.

Dans le cadre l'exécution du contrat les opérations suivantes sont prévues :

### 2.1 Le remplacement du système Hot Gaz Path par le système Advanced Gaz Path

Il s'agit d'une opération de maintenance extraordinaire, elle constitue une maintenance améliorative. Le nouveau système de la veine gazeuse appelé Advanced Gaz Path permet à la turbine de résister à une température plus importante que le système précédent, il permet aussi à la flamme de brûler plus longtemps et donc d'économiser jusqu'à 3 milliards de m<sup>3</sup> de consommation en gaz sur 20 ans (Projet d'amélioration du rendement des centrales électriques de technologie GE, 2016).

Le contrat de service stipule que le système AGP doit être installé au plus tard à la première maintenance planifiée, cette opération est suivie par le test de performance relatif à l'installation de ce nouveau système.

Le revêtement (Coating) des pièces du système AGP lui permet de résister à des chaleurs élevées et rallonge la vie de ces pièces. Ainsi, les pièces du système AGP doivent être changées chaque 32K heures contre 24k pour le système HGP comme décrit dans la section (3.1.1).

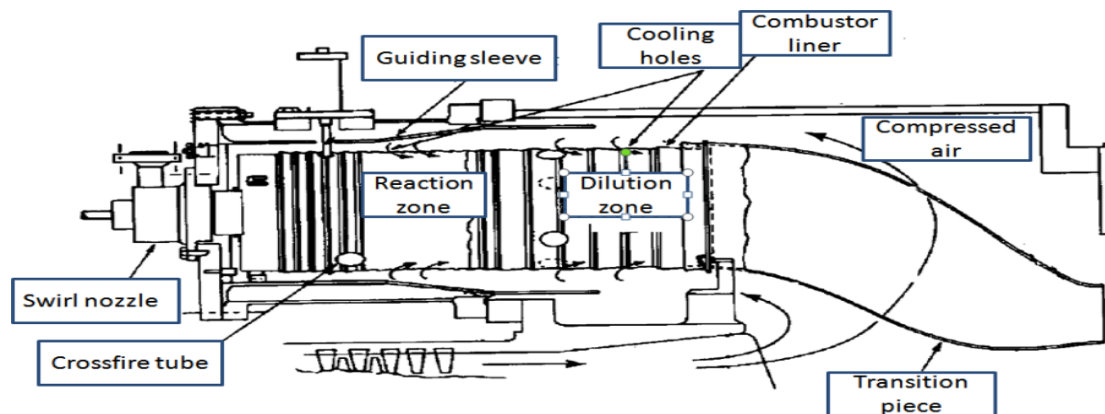
## 2.2 La modification et l'installation des chambres à combustion

Cette étape a été déduite d'un besoin, celui d'adaptabilité des chambres à combustion au système AGP. Elle est scindée en deux parties : la modification de celle-ci dans un atelier de réparation, et son l'installation sur site.

La chambre à combustion, composant de la turbine 9 FA est constituée de quatre éléments :

- ✓ CAP : Le kit des couvercles des chambres de combustion.
- ✓ FN : Le kit des injecteurs de fuel (Fuel Nozzle) dans les chambres de combustion.
- ✓ LN : Le kit des tubes de flammes (Liner) des chambres de combustion.
- ✓ TP : Le kit des pièces de transition (Transition Piece).

Ces éléments doivent subir certaines transformations physiques ou chimiques qui vont leur permettre de s'adapter au système AGP.



*Figure 12 : Parties de la chambre à combustion.*

Ces transformations constituent un travail que GE Power Services soustraite chez son partenaire ALGESCO.

## 2.3 La Miniature Air Gap Inspection Crawler Inspection

La M.A.G.I.C inspection est l'une des inspections critiques qui touchent le générateur ; elle s'effectue une seule fois durant la vie de cet équipement, elle nécessite l'arrêt de la turbine. Cette inspection est effectuée par un spécialiste à l'aide d'un robot et d'une caméra (Remote Access Camera) cet appareil permet une bonne visualisation des organes de l'alternateur.

## 3 Enjeux liés à l'exécution du contrat

La maintenance a un coût qui peut s'élever de manière considérable si les bonnes décisions ne sont pas prises en temps voulu. Elle doit suivre des étapes structurantes, la première est l'identification des opérations.

Dans le cadre de cette étude, l'intérêt s'est focalisé sur les opérations de maintenance inscrites dans le cadre du contrat Méga deal précédemment citées, Les opérations à effectuer pour rappel sont les suivantes : le remplacement du système HGP par le système AGP, la modification des chambres à combustion 9FA .03, l'installation des chambres à combustion modifiées 9FA.04 et enfin la M.A.G.I.C Inspection.

L'importance de la planification de ces opérations se traduit par les enjeux liés à l'exécution de ce contrat. En effet GEPS garantit à son client une augmentation de la disponibilité en plus de l'amélioration attendue de la capacité et de la durée de vie des pièces. Le non-respect de ces garanties se traduit en pénalités et en pertes pour GEPS. Afin de mieux illustrer l'impact d'une mauvaise planification de la maintenance améliorative, il nous a paru important de présenter les garanties qui lui sont liées :

### 3.1 Amélioration de la capacité

Le tableau ci-dessous résume les gains en capacité pour chacune des centrales concernées par le contrat « Méga Deal ».

Tableau 3 : Gains réalisés par centrale.

	Nombre de Cycles	Nombre de turbines à gaz	Nombre de turbines à vapeur	Puissance Nette Système « Standard » MW	Puissance Nette Système AGP MW	Gains en MW	Consommation spécifique Système « Standard » KJ / kWh	Consommation spécifique Système AGP KJ / kWh	Economie Conso Spé KJ / kWh
<b>Cycles Simples 1*1</b>				265	288		9517	9295	
<b>Boutelilis</b>	2	2	0	530	576	46	19034	18590	444
<b>Hassi R'mell</b>	2	2	0	530	576	46	19034	18590	444
<b>Hassi R'mel2</b>	3	3	0	530	576	46	19034	18590	444
<b>Boufarik</b>	3	3	0	530	576	46	19034	18590	444
<b>TOTAL</b>		10	0			<b>184</b> ↑			<b>1776</b> ↓
<b>Cycles Combinés 2*1</b>				819	889		6097	5960	
<b>Bellara</b>	2	4	2	1638	1778	140	12194	11920	274
<b>Djelfa</b>	2	4	2	1638	1778	140	12194	11920	274
<b>Kais</b>	2	4	2	1638	1778	140	12194	11920	274
<b>Mostaganem</b>	2	4	2	1638	1778	140	12194	11920	274
<b>Naama</b>	2	4	2	1638	1778	140	12194	11920	274
<b>Oumache</b>	2	4	2	1638	1778	140	12194	11920	274
<b>TOTAL</b>		24	12			<b>840</b> ↑			<b>1644</b> ↓

La garantie d'amélioration de performance est basée sur le calcul de la puissance et de la consommation spécifique pour chaque équipement. Cette garantie est basée sur deux essais de performance effectués avant installation du système AGP, il s'agit du test « Pre-Upgrade » et après installation de celui-ci, il s'agira donc du test « Post-Upgrade ». Ces essais doivent être effectués cent (100) jours avant et après installation de l'AGP. GEPS garantit une amélioration de 4.6% de la puissance nette de la Turbine à gaz ainsi qu'une baisse de 1.4% de la consommation spécifique, soit un gain total de 1024 MW sur l'ensemble des centrales et 3420 KJ/kWh de consommation spécifique en moins.

### 3.2 Amélioration du cycle de vie des pièces

Les parties de la turbine qui sont sujettes à des maintenances régulières et qui nécessitent un investissement particulier sont :

Les parties chaudes, composés de :

- Le kit des aubes (Buckets) du 1er étage de la partie turbine.
- Le kit des directrices (Nozzles) du 1er étage de la partie turbine.
- Le kit des sabots (Shrouds) du 1er étage de la partie turbine.
- Le kit des aubes (Buckets) du 2eme étage de la partie turbine.
- Le kit des directrices (Nozzles) du 2eme étage de la partie turbine.



- Le kit des sabots (Shrouds) du 2eme étage de la partie turbine.
- Le kit des aubes (Buckets) du 3eme étage de la partie turbine.
- Le kit des directrices (Nozzles) du 3eme étage de la partie turbine.
- Le kit des sabots (Shrouds) du 3eme étage de la partie turbine.

Les chambres à combustion, composées de :

- ✓ FN : Le kit des injecteurs de fuel (Fuel Nozzle) dans les chambres de combustion.
- ✓ LN : Le kit des tubes de flammes (Liner) des chambres de combustion.
- ✓ TP : Le kit des pièces de transition (Transition Piece).
- ✓ CAP : Le kit des couvercles des chambres de combustion.

Celles-ci sont des pièces d'usure qui doivent être changées suivant les recommandations du constructeur, basées sur le nombre d'heures de marche pour les cycles combinés ou le nombre de démarrages pour les cycles simples (car les centrales en cycle simples sont allumés au besoin).

Les inspections effectuées sur la turbine à gaz équipée d'un système HGP sont les suivantes :

- Inspection des chambres à combustion : effectuée chaque 8000H ;
- Inspection des parties chaudes : effectuée chaque 24000H ;
- Inspection majeure effectuée toutes les 48000H ;

Les éléments des chambres à combustion peuvent être réparés à deux reprises, tandis que les pièces constituant les parties chaudes de la turbine ne peuvent l'être qu'une seule fois.

Par déduction, le cycle de vie des pièces dans le système standard s'élève à : 48000 Heures pour les chambres à combustion et 72000 Heures pour les parties chaudes.

Quant aux inspections effectuées sur les turbines équipées du système AGP, elles se résument à deux :

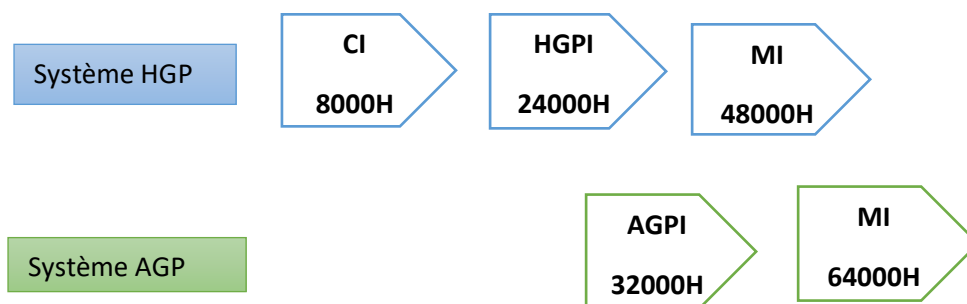
Inspection des parties chaudes : elle s'effectue au bout de 32000H.

Inspection majeure : elle s'effectue au bout de 64000H.

Les pièces constituant l'AGP et les chambres à combustion ne peuvent être réparées qu'une seule fois.

Par déduction, le cycle de vie des pièces AGP et des chambres à combustion s'élève à 96000H.

Le schéma suivant résume l'amélioration du cycle de vie des pièces :



*Figure 13 : Schéma récapitulatif des inspections avec leurs périodes pour les deux systèmes.*

### 3.3 Les gains du nouveau système

Les gains de l'installation du système AGP sont multiples, ils sont présentés ci-dessous :

#### 3.3.1 Le gain en quantité de pièces de rechange

Les calculs qui suivent sont effectués sur la base de la durée du contrat qui est de 20 ans, pour une seule turbine et avec comme hypothèse 8000 heures de marches annuelles.

Tableau 4 : Gain en pièces de rechange.

Nombre de Kits à acheter	Kits Chambres à Combustion	Kits Parties Chaudes
<b>Système HGP</b>	4	3
<b>Système AGP</b>	2	2

Une économie de 2 Kits de Chambres à Combustion et d'un Kit de Parties Chaudes est observée pour chaque turbine. On en déduit le gain total qui s'élève à 68 Kits de chambres à combustion et 34 kits de parties chaudes pour l'ensemble des turbines du méga deal.

Le prix d'un seul kit de ces composants peut s'élever jusqu'à six millions de dollars américains.

#### 3.3.2 Le gain en disponibilité

Dans le système standard trois types d'inspections périodiques sont réalisés : l'inspection des chambres à combustion (CI), l'Inspection des Parties Chaudes (HGPI) et l'inspection majeure (MI), tandis que sur les turbines équipées du système AGP seulement deux inspections sont effectuées : l'Inspection sur les parties chaudes (AGPI) et l'inspection majeure (MI). Ces inspections nécessitent des arrêts de la machine Sur une durée de 20 ans et en supposant que la turbine fonctionne 8000 heures annuellement, nous obtenons les résultats contenus dans le tableau suivant :

Tableau 5 : Comparaison entre HGP et AGP en termes de nombre d'arrêts.

Nombres d'inspections	CI	AGPI / HGPI	MI
<b>Système HGP</b>	13	3	4
<b>Système AGP</b>	-	2	3

Les inspections HGPI, MI et CI ne sont pas indépendantes, surtout lorsqu'il s'agit des inspections de désassemblage, cela est illustré dans le schéma suivant

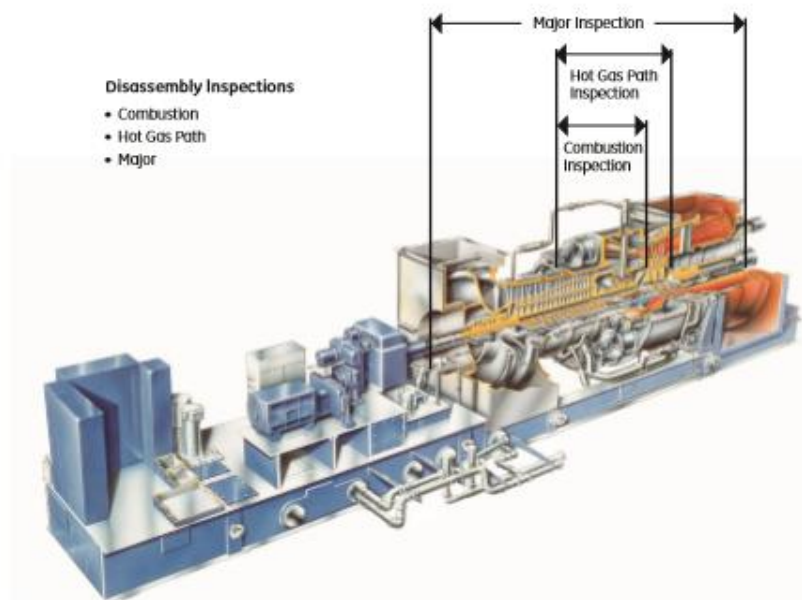


Figure 14: Axe des inspections de désassemblage.

Le nombre d'arrêts pour inspection est donc de 6 arrêts dans un système « standard ». Tandis qu'il est de 5 arrêts seulement dans le système AGP.

D'une part, les inspections des parties chaudes se font tous les quatre ans dans le système AGP contre trois ans dans le système standard. L'inspection des chambres à combustion est quant à elle éliminée dans le système AGP, elle se fait chaque année dans le système standard. D'autre part, l'inspection majeure se fait tous les huit ans dans le système AGP, contre quatre ans dans le système standard. Cela témoigne du gain important de cette opération car la mobilisation des ressources est à la charge du client SPE.

#### 4 Limites de la planification de la maintenance effectuée par GEPS

La planification proactive de la maintenance est nécessaire afin de maximiser l'utilité dans le but de maintenir la meilleure fiabilité et une bonne disponibilité, l'implémentation de la maintenance planifiée est donc nécessaire. Celle-ci a des bienfaits dans l'évitement des inspections forcées (non programmées dues à un accident), des pannes et réparations non planifiées.

La figure suivante décrit les facteurs du processus de planification de la maintenance, l'environnement et le mode d'usage permet de pondérer ces facteurs. Les parties de la turbine qui nécessitent le plus d'attention sont celles qui sont exposées au processus de combustion ainsi que les parties exposées aux gaz chauds dégagés du système de combustion.

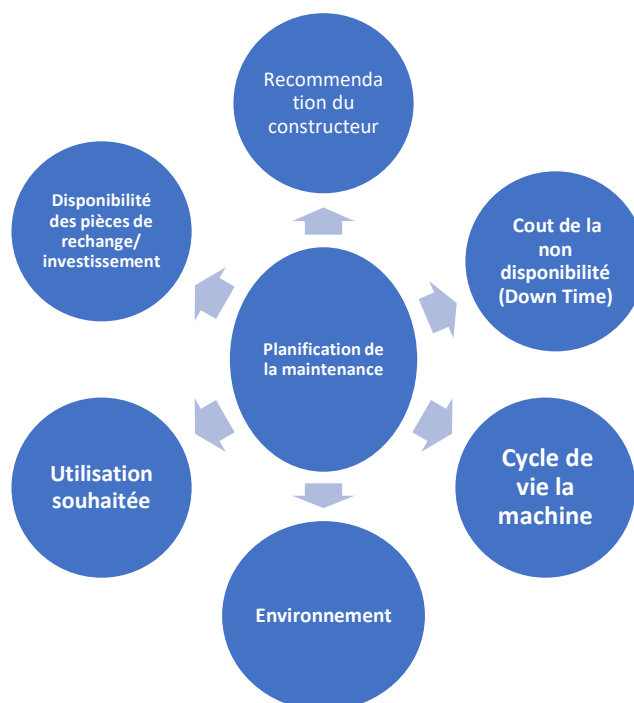


Figure 15 : Facteurs qui influencent la maintenance selon GEPS.

GEPS a mis au point un planning prévisionnel, essayant ainsi de faire coïncider certaines opérations afin d'augmenter la disponibilité et de minimiser le risque de non-respect de ses engagements. Ce planning est arrêté en émettant des conditions sur les heures de marche, il est préparé sur Excel et n'est pas dynamique. Le tableau suivant illustre ce planning :

Tableau 6 : Planning des opérations établi par GEPS.

NA : Non Applicable

Pole	Plant	Sites	GT #	COD Espéré	MAGIC inspection (Générateur)	Date de début de modification des chambres à combustion ALGESCO	Dates de début du remplacement des AGP
Est	Combined	KAIS	GT11	31-Jan-19	23-Mar-20	31-Aug-18	5-Jul-20
Est	Combined	KAIS	GT12	31-Mar-19	21-May-20	31-Aug-18	5-Jul-20
Est	Combined	KAIS	GT21	31-May-19	21-Jul-20	31-Aug-18	2-Nov-20
Est	Combined	KAIS	GT22	31-Jul-19	20-Sep-20	31-Aug-18	2-Nov-20
Est	Combined	KAIS	ST10	13-Jan-20	5-Mar-21	31-Aug-18	NA
Est	Combined	KAIS	ST20	17-Feb-20	9-Apr-21	31-Aug-18	NA
Est	Combined	OUMACHE	GT11	5-Apr-19	26-May-20	31-Aug-18	7-Sep-20
Est	Combined	OUMACHE	GT12	5-Apr-19	26-May-20	31-Aug-18	7-Sep-20

Est	Combined	OUMACHE	GT21	5-May-19	25-Jun-20	31-Aug-18	7-Oct-20
Est	Combined	OUMACHE	GT22	5-May-19	25-Jun-20	31-Aug-18	7-Oct-20
Est	Combined	OUMACHE	ST10	20-Apr-20	11-Jun-21	31-Aug-18	NA
Est	Combined	OUMACHE	ST20	20-Apr-20	11-Jun-21	31-Aug-18	NA
Ouest	Combined	NAAMA	GT11	19-Nov-18	10-Jan-20	31-Aug-18	23-Apr-20
Ouest	Combined	NAAMA	GT12	5-Dec-18	26-Jan-20	31-Aug-18	23-Apr-20
Ouest	Combined	NAAMA	GT21	29-Aug-19	19-Oct-20	31-Aug-18	31-Jan-21
Ouest	Combined	NAAMA	GT22	29-Aug-19	19-Oct-20	31-Aug-18	31-Jan-21
Ouest	Combined	NAAMA	ST10	4-Jan-20	24-Feb-21	31-Aug-18	NA
Ouest	Combined	NAAMA	ST20	4-Feb-20	27-Mar-21	31-Aug-18	NA
Ouest	Combined	MOSTAGANEM	GT11	20-Dec-21	10-Feb-23	31-Aug-18	4-Jul-23
Ouest	Combined	MOSTAGANEM	GT12	20-Dec-21	10-Feb-23	31-Aug-18	4-Jul-23
Ouest	Combined	MOSTAGANEM	GT21	20-Jan-22	13-Mar-23	31-Aug-18	4-Aug-23
Ouest	Combined	MOSTAGANEM	GT22	20-Jan-22	13-Mar-23	31-Aug-18	4-Aug-23
Ouest	Combined	MOSTAGANEM	ST10	4-Jul-23	24-Aug-24	31-Aug-18	NA
Ouest	Combined	MOSTAGANEM	ST20	4-Aug-23	24-Sep-24	31-Aug-18	NA
Centre	Combined	DJELFA	GT11	3-Aug-19	23-Sep-20	31-Aug-18	1-Feb-21
Centre	Combined	DJELFA	GT12	17-Aug-19	7-Oct-20	31-Aug-18	1-Feb-21
Centre	Combined	DJELFA	GT21	17-Sep-19	7-Nov-20	31-Aug-18	1-Mar-21
Centre	Combined	DJELFA	GT22	1-Oct-19	21-Nov-20	31-Aug-18	1-Mar-21
Centre	Combined	DJELFA	ST10	1-Feb-21	25-Mar-22	31-Aug-18	NA
Centre	Combined	DJELFA	ST20	1-Mar-21	22-Apr-22	31-Aug-18	NA
Est	Combined	BELLARA	GT11	30-Nov-19	20-Jan-21	31-Aug-18	4-May-21
Est	Combined	BELLARA	GT12	30-Nov-19	20-Jan-21	31-Aug-18	4-May-21
Est	Combined	BELLARA	GT21	30-Dec-19	19-Feb-21	31-Aug-18	3-Jun-21
Est	Combined	BELLARA	GT22	30-Dec-19	19-Feb-21	31-Aug-18	3-Jun-21
Est	Combined	BELLARA	ST10	30-Aug-20	21-Oct-21	31-Aug-18	NA
Est	Combined	BELLARA	ST20	30-Sep-20	21-Nov-21	31-Aug-18	NA

Ouest	Simple	BOUTELILIS	GT	1-Jul-18	1-may-19	31-Aug-18	1-may-19
Ouest	Simple	BOUTELILIS	GT	2-Jul-18	2-may-19	31-Aug-18	2-may-19
Center	Simple	HRM 1	GT	1-Dec-18	1-Oct-19	31-Aug-18	1-Oct-19
Center	Simple	HRM 1	GT	11-Dec-18	11-Oct-19	31-Aug-18	11-Oct-19

Cependant, et après avoir discuté avec les différents responsables nous avons constatés que ce planning ne prenait pas en considération un certain nombre de points :

- La période de pic de charge n'est pas prise en compte : en effet, sur ce planning plusieurs opérations peuvent s'effectuer entre la date du 1<sup>er</sup> Juin et celle du 1<sup>er</sup> Septembre. Or, en pratique cela n'est pas réalisable car durant cette période de forte demande en électricité, les turbines ne peuvent pas être arrêtées pour des inspections.
- La contrainte de dispatching n'est pas respectée : en effet, le réseau national étant sujet à des fluctuations, celui-ci doit garder un équilibre constant qui se résume parfois à l'impossibilité d'arrêter la totalité des machines en même temps. Ce qui est le cas pour les cycles simples de Boutelilis et Hassi R'mel 1, or dans ce cas, cette contrainte n'est pas respectée.
- La modification des chambres à combustion : cette étape constitue un enjeu majeur, car elle doit s'effectuer avant le remplacement du système HGP par le système AGP. Cela constitue une opération des plus critiques pour la réalisation du planning.

Le tableau suivant répertorie le nombre d'arrêts par site, pour chacune des opérations de remplacement du système HGP par le système AGP et l'inspection M.A.G.I.C :

Tableau 7 : Nombres d'arrêts selon le planning de GEPS.

Sites – Operations	Inspection M.A.G.I.C	Remplacement du système HGP par le système AGP	TOTAL
<b>Bellara</b>	4	2	6
<b>Djelfa</b>	6	2	8
<b>Kais</b>	6	2	8
<b>Mostaganem</b>	4	2	6
<b>Naama</b>	5	2	7
<b>Oumache</b>	3	2	5
<b>Boutelilis</b>	1	1	2
<b>Boufarik</b>	3	0	3
<b>Hassi R'mel 2</b>	1	1	2
<b>Hassi R'mel 1</b>	2	0	2

## Conclusion

Après avoir passé en revue les modalités du contrat de maintenance Méga Deal ainsi que les conditions et les enjeux de son exécution et en ayant élucidé les limites du modèle existant de planification établi par GEPS, nous sommes parvenus grâce à l'analyse de cet état des lieux à déceler une problématique d'optimisation de planification de la maintenance.

## Conclusion du chapitre II et formalisation de la problématique

La problématique a été décelée lors de l'analyse de l'état des lieux, où nous avons constaté certaines anomalies dans le planning effectué par GEPS. Ce travail a été effectué dans le cadre du contrat de service « Méga Deal » qui prend en charge les opérations suivantes : le remplacement du système HGP par le système AGP, l'inspection M.A.G.I.C et la modification des chambres à combustion.

Ces opérations nécessitent des arrêts de la turbine et donc une indisponibilité de celle-ci. Le modèle de planification utilisé dans le planning effectué par GEPS permet de calculer les dates de début des opérations, il est préparé sur Excel en émettant des conditions sur les heures de marche, il n'est pas dynamique. De plus, le planning mis en place n'est pas optimal car il ne prend pas en considération certaines contraintes importantes et le nombre d'arrêts par site est élevé.

Les lacunes de ce planning doivent être comblées, des améliorations doivent être apportées et une prise en charge des anomalies doit être modélisée sous forme de contraintes afin de garantir une meilleure disponibilité des équipements.

Le remplacement des pièces du système HGP par celle du système AGP étant un gain considérable en matière de disponibilité des machines ne doit pas être compensé par des arrêts supplémentaires mettant à mal cette décision de remplacement.

Garantir la disponibilité de l'équipement tout en respectant les objectifs d'amélioration en termes de gains en puissance et en consommation spécifique nous mène à réfléchir à l'optimisation des temps d'arrêts.

Enfin, l'objectif principal de ce travail est bien cerné, il consiste à développer un programme mathématique capable d'optimiser la planification de la maintenance. Ces résultats seront accessibles via une interface graphique développée pour simplifier l'utilisation du programme.

# Chapitre III : Contributions.

## Introduction du chapitre III

L'objectif de cette dernière partie est de présenter des solutions qui puissent permettre la résolution de la problématique posée et améliorer la gestion du temps des opérations à effectuer. Pour ce faire, cette partie se compose d'un seul chapitre qui aborde les solutions proposées, en commençant par une étude préliminaire ayant conduit à la construction des diagrammes de Gantt, suivie de la modélisation du problème et de la validation des résultats. Une application présentant une interface graphique interactive viendra clôturer cette partie.

---



## III.1- Contribution et solutions proposées.

---

## Introduction

Une fois la problématique posée et la partie théorique passée en revue, la question des différentes étapes de construction de la solution proposée sera abordée. Cette dernière consiste en l'élaboration d'une planification des différentes opérations de maintenance sur les différents sites en utilisant les outils de la modélisation mathématique. L'étape qui suit aborde le contexte dans lequel se déroule la planification. Enfin, le développement du modèle mathématique, son déroulement manuel, et la validation de ses résultats à l'aide de l'outil informatique seront mis en avant, ainsi que quelques suggestions d'amélioration, en plus d'une application capable de piloter le processus de planification, en optimisant toutes les dates de début des opérations grâce au programme, et en affichant les résultats sur une interface graphique interactive.

Les différentes étapes de construction de la solution sont décrites ci-dessous.

### 1 Etude préliminaire et construction des diagrammes de Gantt

La présente étude se fait dans le cadre du contrat « Méga deal » signé entre GEAT et SPE. Il s'agit pour GE d'assurer la maintenance de 10 centrales électriques sur une durée de 20 ans, en effectuant 3 opérations majeures : le remplacement des kits AGP, l'installation des chambres à combustion et la M.A.G.I.C inspection, ces opérations ont été décrites précédemment et se font sur deux parties de la turbine : les parties chaudes et les chambres à combustion.

Nous avons dans un premier temps planifié ces opérations et ce à l'aide du logiciel MS Project comme suit :

#### 1.1 Le remplacement du système HGP par le système AGP

Comme précisé dans le chapitre précédent le remplacement du système HGP par le système AGP est une opération de maintenance améliorative qui s'effectue sur le site. Elle concerne les parties chaudes de la turbine.

Afin de cerner cette opération de remplacement, nous avons planifié à l'aide du logiciel Ms Project chaque étape du processus de remplacement du système de la veine gazeuse. Nous avons ainsi pu déterminer la durée théorique de vingt et un (21) jours pour ce processus, en prenant en compte l'étape cruciale de la préparation et mobilisation. Le digramme de Gantt associé se trouve en Annexe 01.

#### 1.2 La modification des chambres à combustion

La modification des chambres à combustion est une opération qui doit s'effectuer au sein de l'atelier de réparation des turbomachines : ALGESCO, joint-venture entre Sonelgaz Sonatrach et GE Oil & Gaz.

Afin de cerner les détails de cette opération, nous avons effectué un planning des taches affectées à leurs ressources sur le logiciel MS Project. Cela nous a permis d'estimer la durée de cette opération, qui s'élève à vingt-quatre (24) jours pour le processus de qualification. Le digramme de Gantt se trouve en Annexe 02.

La seconde partie de cette étape, est l'installation des chambres à combustion, elle doit se faire sur site, celle-ci correspond aux tâches effectuées lors d'une inspection de combustion et se fait en même temps que le remplacement des AGP. Nous avons aussi planifié cette étape sur le logiciel MS Project. Sa durée a été estimée à onze (11) jours. Le diagramme de Gantt se trouve en Annexe 03.

### 1.3 La M.A.G.I.C inspection

Cette opération concerne le générateur, elle entraîne néanmoins l'arrêt de la turbine, ce qui a suscité notre intérêt, car le but de ce travail est de minimiser les nombres d'arrêts. Cette inspection passe par des étapes que nous avons rassemblées et structurées grâce au logiciel MS Project, nous avons ainsi pu estimer une durée égale à seize (16) jours. Le diagramme de Gantt se trouve en Annexe 04.

Pour synthétiser ces résultats, un diagramme de Gantt global a été élaboré (Annexe05), et nous a permis d'identifier les tâches critiques, et ainsi œuvrer à les optimiser, et minimiser le nombre d'arrêts des opérations et leurs durées.

## 2 Modélisation du problème

L'étude préliminaire est désormais réalisée, elle nous a permis de déceler les tâches critiques matérialisées dans notre cas par les opérations critiques que nous avons illustrées grâce à un diagramme de Gantt en Annexe 05. De plus les lacunes du modèle établi par GEPS précédemment identifiées ont mis l'accent sur la nécessité d'une planification plus rigoureuse tout en essayant de prendre en considération la flexibilité des dates de mise en service.

Pour ce faire nous avons opté pour la modélisation du problème par programmation mathématique, ce qui nous a menés dans un premier temps à réfléchir à deux fonctions-objectif différentes, la première a pour objectif de minimiser le nombre d'arrêts.

Quant à la seconde, elle vise à réduire l'écart entre les dates de début des opérations. Elle se présente sous cette forme :

$$\min(r_{ij}) = \sum_{i=1}^3 w_i (Dd_{ik} - Dd_{jk})$$

$$i \in \{1,2, 3\} ; j \in \{1,2, 3\}$$

avec :

$w_i$  : Poids alloué à l'écart entre deux opérations.

$r_{ij}$  : Ecart entre les dates début des opérations  $i$  et  $j$ .

$Dd_{ik}$  : date de début de l'opération  $i$  sur une turbine  $k$  du cycle,  $k = \{1,2\}$ .

Notre choix s'est porté sur la deuxième fonction, car cette dernière étant linéaire, elle simplifie les opérations mathématiques et aboutit aux mêmes résultats. Aussi, elle s'adapte mieux aux différentes contraintes, qui vont être déroulées dans le programme qui suit :

#### a. La fonction-objectif :

Il s'agit de la deuxième fonction objectif définie plus haut avec pour but de minimiser l'écart entre les dates début des opérations et leurs pondérations respectives.

$$\text{C'est donc la fonction suivante : } \min(r_{ij}) = \sum_{i=1}^3 w_i (Dd_{ik} - Dd_{jk})$$

$$\forall i < j \in \{1,2, 3\}$$

#### b. Les variables :

$Dd_{ik}$  : date de début de l'opération  $i$  sur une turbine  $k$ .

$Dd_{1k}$  : date de début du remplacement du système HGP par le système AGP.

$Dd_{2k}$  : date de début de l'inspection M. A. G. I. C.

$Dd_{3k}$  : date de début de l'installation des chambres à combustion.

$Dd_{4k}$  : date de début de la modification des chambres à combustion.

$Df_{ik}$  : date de fin de l'opération  $i$  sur une turbine  $k$ .

$Df_{1k}$  : date de fin de inspection M. A. G. I. C.

$Df_{2k}$  : date de fin de l'opération de remplacement du système HGP par le système AGP.

$Df_{3k}$  : date de fin de l'opération d'installation des chambres à combustion.

$Df_{4k}$  : date de fin de l'opération de modification des chambres à combustion.

$r_{ij}$  : Ecart entre les dates début des opérations  $i$  et  $j$

$i, j$  : Indices des opérations.

$k, k'$  : Indice des turbines.

$w_i$  : Poid alloué à l'écart entre deux opérations.

Il est à signaler que les pondérations allouées aux écarts entre les dates de début des opérations ont été déduites à partir de l'étude préliminaire qui a permis d'identifier les opérations critiques.

### c. Les contraintes :

#### Contraintes de chevauchement :

L'écart entre les dates début des opérations est au maximum inférieur à 10, la durée maximale des opérations est égale à 21 jours, la figure suivante illustre l'écart optimal entre les opérations :

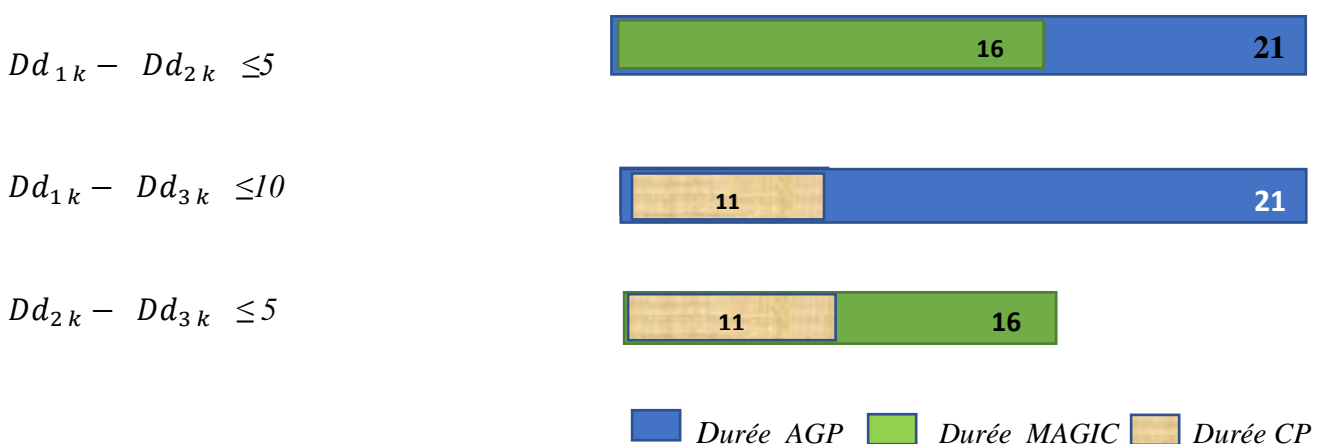


Figure 16: Ecart entre les dates début des opérations

**Contrainte de maximum de durée d'une opération** : Pour que la durée maximale d'un arrêt soit de 21 jours, il faut que toutes les opérations se fassent lors d'un seul arrêt, Ainsi, les opérations 1 et 3 sont incluses dans l'opération 2 qui est la plus longue, et sa durée est de 21 jours.

**La contrainte de pic de charge** : aucune opération ne doit être effectuée entre le 01 juin et le 01 septembre de chaque année  $\forall i$  ou  $j$  :

$$Df_{ik} < 01\text{-Juin} - \text{yyyy}$$

$$Dd_{ik} > 01\text{-Septembre} - \text{yyyy}$$

$$\forall i \in \{1, 2, 3\}$$

**La contrainte de dispatching** : toutes les turbines d'un même site ne doivent pas être à l'arrêt en même temps

$$Df_{ik} < Dd_{jk'} ; \quad k, k' = \{1, 2\} \quad \forall i, j ; \quad k \neq k'$$

$$ij \in \{1, 2, 3\}; \quad j \in \{1, 2, 3\}$$

**Maximum de durée des opérations** : comme maximum pour la durée totale de toutes les opérations nous affectons la valeur de 37 jours qui équivaut à (21+16) somme des durées de remplacement du système AGP et M.A.G.I.C Inspection

$$\sum_{i=1}^3 (Df_{ik} - Dd_{ik}) \leq 37$$

L'opération d'installation des chambres à combustion doit s'effectuer après celle de modification des chambres à combustion. (Cette contrainte est prise en compte dans le programme sous Matlab comme un calcul simple, plus de détails seront donnés dans le volet perspectives).

$$Df_{4k} < Dd_{3k}$$

Ainsi, le programme :

$$\min(r_{ij}) = \sum_{i=1}^3 w_i (Dd_{ik} - Dd_{jk})$$

$$\forall i < j \in \{1, 2, 3\}$$

Sous Contraintes :

- $$\forall k : (1) \quad Dd_{1k} - Dd_{2k} = < 5$$
- $$(2) \quad Dd_{1k} - Dd_{3k} = < 10$$
- $$(3) \quad Dd_{2k} - Dd_{3k} = < 5$$
- $$(4) \quad Df_{ik} < 01\text{-Juin} - \text{yyyy} \quad \& \quad Dd_{ik} > 01\text{-Septembre} - \text{yyyy}$$
- $$(5) \quad Df_{ik} < Dd_{jk'} ; \quad k, k' = \{1, 2\} \quad \forall i, j ; \quad k \neq k'$$
- $$(6) \quad \sum_{i=1}^3 (Df_{ik} - Dd_{ik}) \leq 37$$
- $$(7) \quad Df_{4k} < Dd_{3k}$$

### 3 Résultats et validation du modèle

Le développement du modèle mathématique qui permet l'aboutissement à une planification optimale des opérations à effectuer étant réalisé, nous avons, en une première étape, déroulé manuellement le modèle, ensuite une validation en utilisant l'outil Matlab a été effectuée et nous avons terminé par la présentation des résultats et des différents gains réalisés.

Par ailleurs il est à signaler que pour la validation, nous n'avons pas tenu compte des centrales de Boufarik et de Hassi R'mel 1 car les dates de mise en service des turbines à gaz sont arrivées à échéance avant le développement du programme.

#### 3.1 Déroulement manuel

Il s'agit dans cette étape de corriger les dates des opérations de façon manuelle en prenant en considération les contraintes de pic et de dispatching essentiellement, pour ce fait, il faut :

- Respecter l'ordre chronologique des opérations ;
- Le remplacement des AGP intervient après la mise en service des turbines à vapeur ;
- Respecter les contraintes de pic et de dispatching, et ainsi modifier les dates des opérations dans un intervalle de 10%, selon le type d'opération et les ressources à affecter ;
- Pour les cycles simples, il suffit de faire coïncider l'opération remplacement des AGP avec la M.A.G.I.C. inspection vu l'absence de la mise en service des turbines à vapeur ;

Ainsi, une fois ces conditions respectées, les dates obtenues changent et voici les résultats dans le tableau suivant :

Les dates modifiées apparaissent en jaune et les dates en vert sont celles de l'opération de modification des chambres à combustion au niveau d'Algesco.

Tableau 8 : Planification modifiée.







Pole	Plant	Sites	GT #	COD Espéré	MAGIC inspection (Générateur)	Date de début de modification des chambres à combustion ALGESCO	Dates de début du remplacement des AGP
Est	Combined	KAIS	GT11	31-Jan-19	23-Mar-20	25-févr-20	23-mar-20
Est	Combined	KAIS	GT12	31-Mar-19	23-mar-20	25-févr-20	23-mar-20
Est	Combined	KAIS	GT21	31-May-19	29-avr-20	02-avr-20	29-avr-20
Est	Combined	KAIS	GT22	31-Jul-19	29-avr-20	02-avr-20	29-avr-20
Est	Combined	KAIS	ST10	13-Jan-20	5-Mar-21	NA	NA
Est	Combined	KAIS	ST20	17-Feb-20	9-Apr-21	NA	NA
Est	Combined	OUMACHE	GT11	5-Apr-19	23-avr-20	27-mars-20	23-avr-20
Est	Combined	OUMACHE	GT12	5-Apr-19	23-avr-20	27-mars-20	23-avr-20

Est	Combined	OUMACHE	GT21	5-May-19	11-may-20	14-avr-20	11-may-20
Est	Combined	OUMACHE	GT22	5-May-19	11-may-20	14-avr-20	11-may-20
Est	Combined	OUMACHE	ST10	20-Apr-20	11-Jun-21	NA	NA
Est	Combined	OUMAHCE	ST20	20-Apr-20	11-Jun-21	NA	NA
Ouest	Combined	NAAMA	GT11	19-Nov-18	10-Jan-20	14-déc-19	10-Jan-20
Ouest	Combined	NAAMA	GT12	5-Dec-18	10-Jan-20	14-déc-19	10-Jan-20
Ouest	Combined	NAAMA	GT21	29-Aug-19	19-Oct-20	22-sept-20	19-Oct-20
Ouest	Combined	NAAMA	GT22	29-Aug-19	19-Oct-20	22-sept-20	19-Oct-20
Ouest	Combined	NAAMA	ST10	4-Jan-20	24-Feb-21	NA	NA
Ouest	Combined	NAAMA	ST20	4-Feb-20	27-Mar-21	NA	NA
Ouest	Combined	MOSTAGANEM	GT11	20-Dec-21	10-Feb-23	05-août-23	1-sep-23
Ouest	Combined	MOSTAGANEM	GT12	20-Dec-21	10-Feb-23	05-août-23	1-sep-23
Ouest	Combined	MOSTAGANEM	GT21	20-Jan-22	13-Mar-23	27-août-23	23-sep-23
Ouest	Combined	MOSTAGANEM	GT22	20-Jan-22	13-Mar-23	27-août-23	23-sep-23
Ouest	Combined	MOSTAGANEM	ST10	4-Jul-23	24-Aug-24	NA	NA
Ouest	Combined	MOSTAGANEM	ST20	4-Aug-23	24-Sep-24	NA	NA
Centre	Combined	DJELFA	GT11	3-Aug-19	23-Sep-20	05-janv-21	1-Feb-21
Centre	Combined	DJELFA	GT12	17-Aug-19	23-Sep-20	05-janv-21	1-Feb-21
Centre	Combined	DJELFA	GT21	17-Sep-19	7-Nov-20	02-févr-21	1-Mar-21
Centre	Combined	DJELFA	GT22	1-Oct-19	7-Nov-20	02-févr-21	1-Mar-21
Centre	Combined	DJELFA	ST10	1-Feb-21	25-Mar-22	NA	NA
Centre	Combined	DJELFA	ST20	1-Mar-21	22-Apr-22	NA	NA
Est	Combined	BELLARA	GT11	30-Nov-19	20-Jan-21	24-déc-20	20-Jan-21
Est	Combined	BELLARA	GT12	30-Nov-19	20-Jan-21	24-déc-20	20-Jan-21
Est	Combined	BELLARA	GT21	30-Dec-19	19-Feb-21	23-janv-21	19-Feb-21
Est	Combined	BELLARA	GT22	30-Dec-19	19-Feb-21	23-janv-21	19-Feb-21
Est	Combined	BELLARA	ST10	30-Aug-20	21-Oct-21	NA	NA
Est	Combined	BELLARA	ST20	30-Sep-20	21-Nov-21	NA	NA

Ouest	Simple	BOUTELILIS	GT	1-Jul-18	23-avr-19	27-mars-19	23-avr-19
Ouest	Simple	BOUTELILIS	GT	2-Jul-18	10-may-19	13-avr-19	10-may-19
Center	Simple	HRM 1	GT	1-Dec-18	1-Oct-19	04-sept-19	1-Oct-19
Center	Simple	HRM 1	GT	11-Dec-18	11-Oct-19	14-sept-19	11-Oct-19

Les dates ayant été corrigées, nous avons pu effectuer une comparaison avant et après le déroulement manuel :

Tableau 9 : Comparaison des deux planifications.

Sites – Operations	MAGIC Inspection		AGP Replacement		Total		Improvement
	Before optimization	After optimization	Before optimization	After optimization	Before optimization	After optimization	
<i>Bellara</i>	4	4	2	0 -MAGIC	6	4	2 
<i>Djelfa</i>	6	4	2	0 -STCOD	8	6	2 
<i>Kais</i>	6	4	2	0 -MAGIC	8	4	4 
<i>Mostaganem</i>	4	4	2	2	6	6	Dates corrected
<i>Naama</i>	5	4	2	0 -MAGIC	7	4	3 
<i>Oumache</i>	3	3	2	0 -MAGIC	5	3	2 
<i>Boutelilis</i>	1	2	1	0 -MAGIC	2	2	Dates corrected
<i>Hassi R'mel 1</i>	1	2	1	0 -MAGIC	2	2	Dates corrected
<b>TOTAL</b>							<b>13 arrêts et 3 dates corrigées</b>

0-MAGIC signifie qu'il y a zéro arrêt comptabilisé car cette opération coïncide avec celle de la MAGIC inspection.

0-STCOD signifie qu'il y a zéro arrêt comptabilisé car cette opération est effectuée en même temps que la mise en service des turbines à vapeur.

Nous pouvons remarquer que pour les sites de Bellara, Oumache et Djelfa, le nombre d'arrêts a diminué de deux, tandis que pour les sites de Kais et Naama, les arrêts ont diminué de 4 et 3 respectivement. Pour les sites de Mostaganem, Boutelilis et HRM1, il n'y a pas eu de diminution de nombre d'arrêts mais une correction des dates en fonction des contraintes exprimées.

La figure ci-dessous schématise l'évolution du nombre d'arrêts avant et après déroulement pour chaque site.



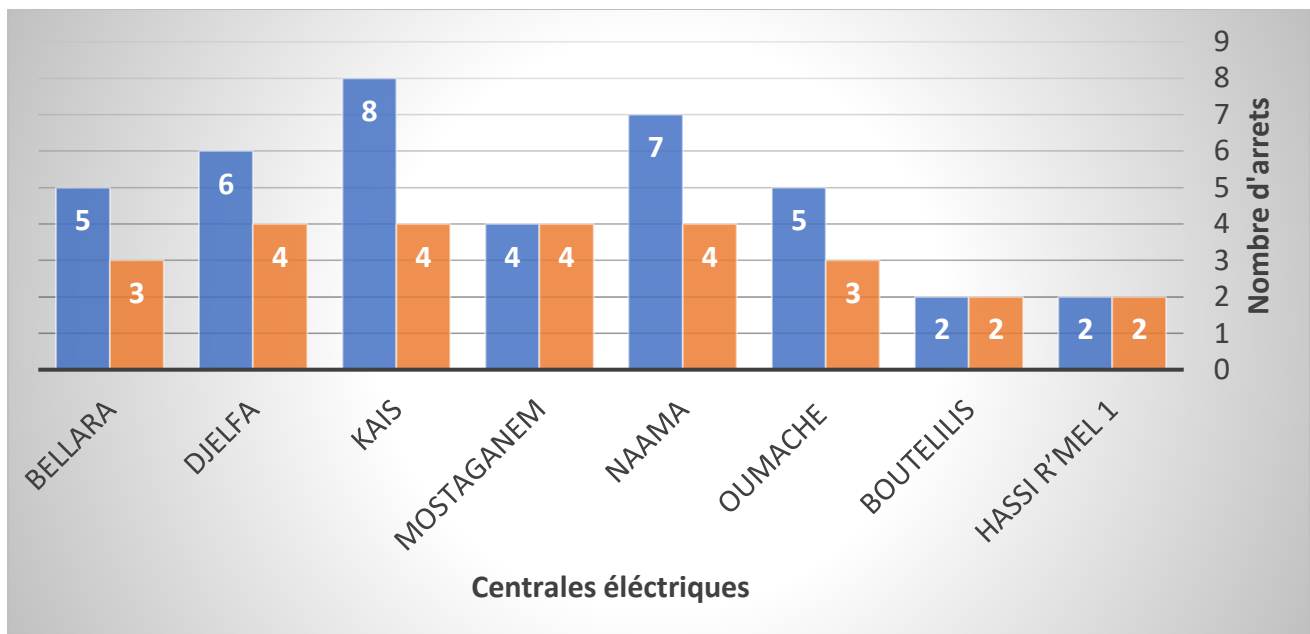


Figure 17 : Comparaison entre les deux planifications (avant et après optimisation) en termes de nombre d'arrêts.

## 3.2 Validation par Matlab

### 3.2.1 Méthode de résolution

Le modèle élaboré se présente sous la forme d'un Programme Linéaire en Nombres Entiers (PLNE), la fonction-objectif est une équation linéaire et les contraintes se présentent sous forme d'équations et d'inéquations linéaires. Les variables de décision sont des dates exprimées en : jour, mois et année.

Les méthodes de résolution numériques utilisées sont multiples, on cite : le Simplexe, la méthode des deux Phase. Le choix de la méthode dépendra des contraintes exprimées.

Dans notre cas, nous sommes en présence de variables dégénérées exprimées par la contrainte (4), la méthode de résolution appropriée est la méthode des deux phases.

Généralement, les variables se présentent sous deux types : quantitatives et qualitatives. Elles sont discrètes ou continues pour les premières, nominales ou bien ordinales pour les deuxièmes.

Les dates sont des variables qui se trouvent à cheval entre ces deux types, elles sont quantitatives car les jours, mois et années peuvent se chiffrer et ordinales car la date exprime une position particulière (jour et mois, année en cours) par rapport à une référence : l'année.

Afin de résoudre ce problème de compatibilité, un codage numérique des dates est indispensable. Les dates sont ainsi transformées en suite de chiffres qu'on appelle timestamp. Cependant, toute opération arithmétique qui s'effectue sur les timestamp génère des résultats qui n'ont pas de sens.

Par exemple, coder la date 01 Janvier 1970 revient à calculer le nombre de secondes qui s'est écoulé depuis cette date, pour le 30 Septembre 2020 cela revient à calculer le nombre de secondes restantes avant d'atteindre celle-ci. L'addition de ces deux dates s'exprime en un nouveau timestamp, sauf que la conversion de celui-ci en date n'a pas de sens.

Le besoin décelé lors de nos recherches a démontré l'importance de l'expression des dates dans les résultats attendus.

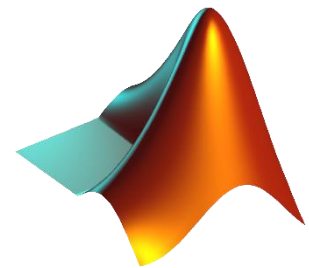
### 3.2.2 Outil de résolution

La nécessité d'exprimer les résultats de nos variables de décision avec une forme particulière nous a poussé à rechercher un outil de résolution capable de générer des résultats dans le format demandé.

La visualisation des résultats est une attente latente exprimée par la direction, de plus la nécessité de mettre au point une interface graphique capable d'interagir avec son utilisateur qui nous a semblé d'une grande valeur ajoutée nous a mené à choisir Matlab comme outil de résolution.

Ce choix est justifié par :

- La capacité de déclarer des variables du types date :  $a = \text{datetime}(yyyy,mm,aa)$  ;
- La possibilité d'effectuer des opérations arithmétiques et des comparaisons sur les variables dates grâce à des fonctions telles que :
  - ✓ `datenum(a-b)` : qui donne en résultat la durée d'écoulant entre ces deux dates a et b.
  - ✓ `isbetween(D,a,b)` : qui retourne un résultat booléen exprimant si la date D se trouve entre les dates a et b.
- La capacité de programmer une interface graphique dynamique capable de commander l'exécution des programmes en calculant la valeur demandée ;
- La capacité de compiler les programmes en une application installable sur n'importe quel micro-ordinateur ;



### 3.2.3 Modélisation sous Matlab

Matlab est riche en fonctions permettant d'optimiser les modèles mathématiques.

L'application « Optimisation » contient plusieurs fonctions pour plusieurs types de systèmes suivant des contraintes linéaires ou non linéaires. Cette application permet de générer plusieurs itérations.

Dans le cas d'un PLNE la fonction appropriée est « Linprog ».

Malheureusement, cette fonction ne peut pas s'appliquer à des variables de type date.

Nous avons donc été dans l'obligation d'écrire le système sous forme d'algorithme, cet algorithme s'appelle le Script. Un ensemble de Scripts forment le programme final.

En effet, le programme se compose de plusieurs fonctions.

1. Optimisation des dates de début des opérations par rapport à une centrale en cycle combiné :

#### Variables

STcod : vecteur des 1x2 dates de mise en service des deux (2) turbines à vapeur d'une centrale en Cycle Combiné (CC).

GTcod : vecteur 1x4 des dates de mise en service des quatre (4) turbines à gaz d'une centrale en CC.

T8(i) : date de début de l'inspection sur générateur de turbine à gaz (M.A.G.I.C Inspection).

T10 (i) : date limite de début d'inspection sur générateur de turbine à gaz (M.A.G.I.C Inspection) .

Dd1 (i) : date de début de l'inspection sur le générateur.

Dd2 (i) : date de début du remplacement du système HGP par le système AGP.

Dd3 (i) : date de début de l'installation des chambres à combustion.

Dd4 (I) : date de début de la modification des chambres à combustion.

K, l : indice des turbines à gaz sur un même site.

### Début :

Déclaration et initialisation des variables STcod (1) et STcod (2).

Déclaration et initialisation des variables GTcod (1), GTcod (2), GTcod(3) et GTcod(4).

Calcul de T8 et T10 :  $T8(i) = GTcod(i) + 8000\text{heurs}$  /  $T10(i) = GTcod(i) + 10000\text{heurs}$

Déclaration et initialisation des variables STcod (1) et STcod (2).

Déclaration et initialisation des variables GTcod (1), GTcod (2), GTcod(3) et GTcod(4).

Calcul de T8 et T10 :  $T8(i) = GTcod(i) + 8000\text{heurs}$  /  $T10(i) = GTcod(i) + 10000\text{heurs}$

1ère étape : déclaration des variables, les dates de mise en service des turbines à gaz(GTcod) et des turbines à vapeur(STcod), ainsi que des dates T8 et T10 heures, qui désignent respectivement 8000 et 10000 heures de fonctionnement

**Pour** i = [1,2]

**Si** ( STcod(1) < T8 )

Dd1(i) = T8 ; Dd2(i) = Dd1(i) ; Dd3(i) =Dd2(i)

Cas 1 : la mise en service de la turbine à vapeur survient avant 8000 heures de fonctionnement des turbines à gaz : toutes les opérations se font à T8

**Si** ( 01-06-y < T8 < 01-09-y)

Dd1(i) = T10 ; Dd2(i) = Dd1(i) ; Dd3(i) = Dd2(i)

Application de la contrainte de pic : aucune opération ne peut être effectuée entre le 01-06 et le 01-09 de chaque année, les dates sont repoussées à T10

**Si** ( 01-06-y < T10 < 01-09-y)  
 Dd1(i) = 01/09 /Y ; Dd2(i) = Dd1(i) ; Dd3(i) =  
 Dd2(i)  
**FinSi**

Dans le cas ou même T10 ne satisfait pas la  
 contrainte de pic, on repousse les opérations au  
 01-09

**Sinon Si** ( Dd1(i) < 01 -06 -Y et T10 + 21 > 01-  
 06-Y et T10 + 21 < 01-09-Y )  
 Dd1(i) = 07/05/Y ; Dd2(i) = Dd1(i) ;  
 Dd3(i) = Dd2(i)  
**FinSi**  
**FinSi**  
**FinSi**

La contrainte de pic comprends le fait que les  
 opérations doivent être finies avant le 01-06, dans  
 le cas contraire, les opérations se font le 07-05  
 pour finir à temps

**Si** ( STcod(1) > T8 et STcod(1) < T10 )  
 Dd1(i) = T10 ; Dd2(i) = Dd1(i) ; Dd3(i) =  
 Dd2(i)  
**Si** ( 01/06/Y < T10 < 01/09/Y)  
 Dd1=01-09-Y; Dd2(i) = Dd1(i) ; Dd3(i) =  
 Dd2(i)  
**Sinon Si** ( Dd1(i) < 01 -06 -Y et T10 + 21 > 01-  
 06-Y et T10 + 21 < 01-09-Y )  
 Dd1(i) = 07/05/Y ; Dd2(i) = Dd1(i) ;  
 Dd3(i) = Dd2(i)  
**FinSi**  
**FinSi**  
**FinSi**

Cas 2 : la mise en service de la turbine à vapeur  
 survient entre 8000 et 10000 heures de  
 fonctionnement des turbines à gaz : toutes les  
 opérations se font à T10  
 Toutes les contraintes sont satisfaites comme pour  
 le 1<sup>er</sup> cas

**Si** (STcod > T10 )  
 Dd1(i) = T8 ; Dd2(i)=STcod(1) ; Dd3(i)=Dd2(i);  
**Si** ( 01/06/Y < T8 < 01/09/Y)  
 Dd1(i) = T10 ;  
**Si** (01/06/Y < T10 < 01/09/Y)  
 Dd1(i) = 01/09 /Y  
**FinSi**  
**Sinon Si** ( Dd1(i) < 01 -06 -Y et T10 + 21 >  
 01-06-Y et T10 + 21 < 01-09-Y )  
 Dd1(i) = 07/05/Y ;  
**FinSi**  
**FinSi**  
**Si** ( 01/06/Y < STcod(1) < 01/09/Y)

Cas 3 : la mise en service de la turbine à vapeur  
 survient après 10000 heures de fonctionnement  
 des turbines à gaz :  
 La MAGIC inspection(opération1) se fait à T8, les  
 autres opérations se font à STcod, et toutes les  
 contraintes doivent être vérifiées.

$$Dd2(i) = 01/09 /Y ) ;$$

Sinon **Si** ( $Dd2(i) < 01 -06 -Y$  et  $Dd2(i) + 21 > 01-06-Y$  et  $Dd2(i) + 21 < 01-09-Y$ )

$$Dd2(i) = 07/05/Y ;$$

**FinSi**

**FinSi**

**FinPour**

**Pour**  $i = [3,4]$

**Si** ( $STcod(2) < T8$ )

$$Dd1(i) = T8 ; Dd2(i) = Dd1(i) ; Dd3(i) = Dd2(i)$$

**Si** ( $01-06-y < T8 < 01-09-y$ )

$$Dd1(i) = T10 ; Dd2(i) = Dd1(i) ; Dd3(i) =$$

$Dd2(i)$

**Si** ( $01-06-y < T10 < 01-09-y$ )

$$Dd1(i) = Dd1(i) + ( 01/09 /Y - Dd1(i) ) ;$$

$$Dd2(i) = Dd1(i) ; Dd3(i) = Dd2(i)$$

**FinSi**

**Sinon Si** ( $Dd1(i) < 01 -06 -Y$  et  $T10 + 21 > 01-06-Y$  et  $T10 + 21 < 01-09-Y$ )

$$Dd1(i) = 07/05/Y ; Dd2(i) = Dd1(i) ;$$

$$Dd3(i) = Dd2(i)$$

**FinSi**

**FinSi**

**FinSi**

**Si** ( $STcod(2) < T8$ )

$$Dd1(i) = T8 ; Dd2(i) = Dd1(i) ; Dd3(i) = Dd2(i)$$

**Si** ( $01-06-y < T8 < 01-09-y$ )

$$Dd1(i) = T10 ; Dd2(i) = Dd1(i) ; Dd3(i) =$$

$Dd2(i)$

**Si** ( $01-06-y < T10 < 01-09-y$ )

$$Dd1(i) = 01/09 /Y ; Dd2(i) = Dd1(i) ; Dd3(i) =$$

$Dd2(i)$

**FinSi**

**Sinon Si** ( $Dd1(i) < 01 -06 -Y$  et  $T10 + 21 > 01-06-Y$  et  $T10 + 21 < 01-09-Y$ )

$$Dd1(i) = 07/05/Y ; Dd2(i) = Dd1(i) ;$$

$$Dd3(i) = Dd2(i)$$

Tous les cas précédents (turbine 1 et 2) et toutes les contraintes doivent être déroulés pour les turbines 3 et 4 de chaque site.

On obtient exactement les mêmes résultats.

$$Dd1(i) = 07/05/Y ; Dd2(i) = Dd1(i) ;$$

$$Dd3(i) = Dd2(i)$$

**FinSi**

**FinSi**

**FinSi**

**Si** ( $STcod(2) > T10$ )

$$Dd1(i) = T8 ; Dd2(i) = STcod(2) ; Dd3(i) = Dd2(i);$$

**Si** ( $01/06/Y < T8 < 01/09/Y$ )

$$Dd1(i) = T10 ;$$

**Si** ( $01/06/Y < T10 < 01/09/Y$ )

$$Dd1(i) = 01/09 /Y$$

**FinSi**

**Sinon Si** ( $Dd1(i) < 01 -06 -Y$  et  $T10 + 21 > 01-06-Y$  et  $T10 + 21 < 01-09-Y$ )

$$Dd1(i) = 07/05/Y ;$$

**FinSi**

**FinSi****FinSi****FinSi****Si** ( STcod(2) > T8 et STcod(2) < T10 )Dd1(i) = T10 ; Dd2(i) = Dd1(i) ; Dd3(i) =  
Dd2(i)**Si** ( 01/06/Y < T10 < 01/09/Y)

c ; Dd2(i) = Dd1(i) ; Dd3(i) = Dd2(i)

**Sinon Si** ( Dd1(i) < 01 -06 -Y et T10 + 21 > 01-  
06-Y et T10 + 21 < 01-09-Y )**FinSi****Si** ( 01/06/Y < STcod(2) < 01/09/Y)

Dd2(i) = 01/09 /Y ;

**Sinon Si** ( Dd2(i) < 01 -06 -Y et Dd2(i) + 21 >  
01-06-Y et Dd2(i) + 21 < 01-09-Y )

Dd2(i) = 07/05/Y ;

**FinSi****FinSi****FinSi****FinSi****FinPour**

F=1 ; i=1 ;

**Si** Dd1(4) < Dd1 (1) + 21**Pour** k= [1,4]**Tant que** k < 4**Pour** l=[1,4 ]**Si** l ≠ k**Si** || Dd1(k) – Dd1(l) || < 21**Si** Dd1(k) – Dd1(l) >= 0

Dd1(k) = Dd1(l) + 21 ;

**Sinon** Dd1(l) = Dd1(k) + 21 ;**FinSi****F=0 ; Break;****FinSi**Application de la contrainte de dispatching : toutes  
les turbines d'un même site ne peuvent pas être  
l'arrêt en même temps.**FinSi;****FinPour;****FinTantQue;**

Dd4(i) = Dd3(i) - 27 ;

L'opération 4 : modification des chambres à  
combustion s'effectue 27 jours avant l'opération 3  
d'installation des chambres à combustion,  
l'objectif est de savoir quand envoyer ces kits  
pour modification
$$r = 0.6x (Dd2-Dd3) + 0.2x(Dd2-Dd1) + 0.2x(Dd1-  
Dd3);$$
**FinSi****Si** F= 0 ; **Break****Sinon** i=i+1;

```

FinSi;
FinPour;
FinTantQue;
Si Dd3(4) < Dd3(1) + 21
Pour k = [1,4]
  Tant que k < 4
    Pour l=[1,4 ]
      Si k ≠ l
        Si || Dd3(k) – Dd3(l) || < 21
          Si Dd3(k) – Dd3(l) >= 0
            Dd3(k) = Dd3(l) + 21 ;
          Sinon Dd3(l) = Dd3(k) + 21 ;
        FinSi
      FinSi
    FinSi
  FinSi
FinSi

```

Enfin, l'écart entre les dates début est calculé, en multipliant les pondérations affectées aux opérations par la différence entre les dates. Les pondérations ont été choisies suivant l'étude préliminaire qui a permis d'identifier les opérations critiques.

```

F=0 ; Break;
  FinSi
FinSi
  Si F = 0 ; Break
  Sinon i=i+1;

```

**FIN**

2. Optimisation des dates de début des opérations par rapport à une centrale en cycle simple :

**Variables :**

GTcod : vecteur 1x4 des dates de mise en service des quatre (4) turbines à gaz d'une centrale en CC.

T8(i) : date de début de l'inspection sur générateur de turbine à gaz (M.A.G.I.C Inspection).

T10 (i) : date limite de début d'inspection sur générateur de turbine à gaz (M.A.G.I.C Inspection) .

Dd1 (i) : date de début de l'inspection sur le générateur.

Dd2 (i) : date de début du remplacement du système HGP par le système AGP.

Dd3 (i) : date de début de l'installation des chambres à combustion.

Dd4 (I) : date de début de la modification des chambres à combustion.

Temp : variable date temporaire.

k ,l : indices des turbines à gaz sur un même site.

**Début :**

Déclaration et initialisation des variables GTcod (1), GTcod (2).

Calcul de T8 et T10 :  $T8(i) = GTcod(i) + 8000heures$  /  $T10(i) = GTcod(i) + 10000heures$

```

Pour i= [1,2]
Tant que i<2
Pour j=[1,2 ]
    Si j ≠ i
Si || Dd1(i) – Dd1(j) || =< 21

    Si Dd1(i) – Dd1(j) >= 0
    Temp = Dd1(j) + 21 – ( Dd1(i) – Dd1(j));
Si ( 01/06/ Y < Temp < ((01/06/Y) + 21 ) ;
    Dd1(i) = Dd1(i) + 21 – ( Dd1(i) – Dd1(j) );

Sinon          Dd1(j) = Temp ;
Sinon    Dd1(i) = Dd1(i) + 21 – || Dd1(i) –
    Dd1(j) ||
    FinSi
F=0 ; Break;
FinSi
FinSi
Si F= 0 ; Break
Sinon l=l+1;
FinSi;
FinPour;
FinTantQue;

Pour l= [1,2]
Tant que l<2
Pour k=[1,2 ]
    Si k ≠ 1
Si || Dd3(i) – Dd3(j) || =< 21
    Si Dd3(i) – Dd3(j) >= 0
    Temp = Dd3(j) + 21 – ( Dd3(i) – Dd3(j)

Si || Dd2(i) – Dd2(j) || =< 21
    Si Dd2(i) – Dd2(j) >= 0
    Temp = Dd2(j) + 21 – ( Dd2(i) – Dd2(j) );
Si ( 01/06/ Y < Temp < ((01/06/Y) +
    Dd1(i) = Dd1(i) + 21 – ( Dd2(i) – Dd2(j) );
Sinon          Dd2(j) = Temp ;
Sinon    Dd2(i) = Dd2(i) + 21 – || Dd2(i) –
    Dd2(j) ||;
FinSi
F=0 ; Break;
FinSi
FinSi
Si F= 0 ; Break
Sinon l=l+1;
FinSi;
FinPour;
FinTantQue;

Pour l= [1,2]
Tant que l<2
Pour k=[1,2 ]
    Si k ≠ 1
Si || Dd3(i) – Dd3(j) || =< 21
    Si Dd3(i) – Dd3(j) >= 0
    Temp = Dd3(j) + 21 – ( Dd3(i) – Dd3(j)

```



```

FinTantQue;
Pour l= [1,2]
Tant que k<2
Pour k=[1,2 ]
    Si k ≠ 1
        Dd3(j) );
Si ( 01/06/ Y < Temp < ((01/06/Y) + 21 ) ;
Dd3(i) = Dd3(i) + 21 - ( Dd3(i) – Dd3(j) );
    Sinon      Dd3(j) = Temp ;
    Sinon      Dd3(i) = Dd3(i) + 21 - ||
        Dd1(i) – Dd1(j) ||
        FinSi
F=0 ; Break;
FinSi
FinTantQue;
Si F= 0 ; Break
Sinon l=l+1;
FinSi;
FinPour;

```

**FIN**

### 3.2.4 Résultats de la validation par Matlab

Le tableau suivant rassemble les résultats du nombre d'arrêt après exécution du programme :

Tableau 10: Résultats après validation par Matlab.

<i>Operations</i>	<i>Inspection M.A.G.I.C</i>	<i>AGP Replacement</i>
<i>Bellara</i>	4	0 -MAGIC
<i>Djelfa</i>	4	0 -STCOD
<i>Kais</i>	4	0 -MAGIC
<i>Mostaganem</i>	4	2
<i>Naama</i>	4	0 -MAGIC
<i>Oumache</i>	3	0 -MAGIC
<i>Boutelilis</i>	2	0 -MAGIC
<i>Hassi R'mel I</i>	2	0 -MAGIC

0-MAGIC signifie que l'arrêt ne se comptabilise plus vu que cette opération coïncide avec celle de l'inspection sur générateur.

0-STcod signifie que l'arrêt n'est pas comptabilisé car il s'effectue en même temps que la mise en service des turbines à vapeur.

Nous remarquons qu'un maximum d'arrêts a pu se faire en même temps et que

les résultats sont semblables à ceux du déroulement manuel.

Afin d'illustrer l'intérêt de ces résultats la partie suivante va dérouler les gains générés par l'optimisation.

## 4 Les gains générés par la solution proposée

Une solution dite optimale permet de répondre aux attentes d'un maximum de parties prenantes. Dans le cas présent nous essayons de répondre aux attentes de GEPS qui se rejoignent avec celles du client final qu'est SONELGAZ SPE.







En effet pour Sonelgaz SPE les gains en nombre d'arrêt se traduisent essentiellement par des gains de production et pour GEPS, par des gains de disponibilité en lui économisant d'une part les pénalités qui risquent d'être associées au non-respect des garanties contractuelles et d'autre part, en réalisant des gains liés aux coûts de mobilisation de ressources qui risquent d'être engendrés par plusieurs arrêts.

### 4.1 Gains directs

#### a) Gains en disponibilité :

Pour chacun des sites, nous avons calculé la disponibilité des équipements en jours qui vient s'ajouter à la garantie de disponibilité. Les résultats sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 11 : Gains de disponibilité en jour après optimisation.

Centrales électriques	Nombre de jours à l'arrêt	Nombre de jours à l'arrêt	Gains en jour de disponibilité
	[Avant optimization] (Jours)	[Après optimisation] (Jours)	(%)
Bellara	106	74	31% 
Djelfa	138	106	23% 
Kais	138	74	46% 
Mostaganem	106	106	0% -
Naama	122	74	39% 
Oumache	90	74	18% 
Boutelilis	42	42	0% -
Hassi R'mel 1	42	42	0% -
<b>TOTAL</b>	784	592	<b>24%</b> 

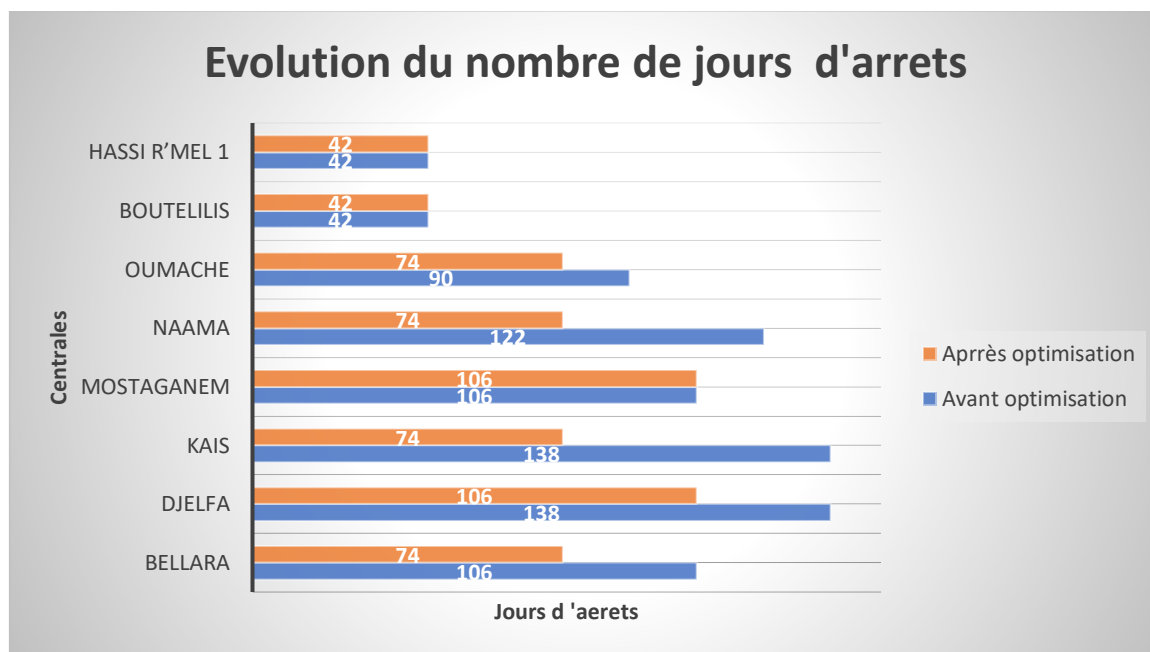


Figure 18 : Evolution des jours d'arrêt par centrale.

Grace à l'optimisation du nombre d'arrêts, nous avons pu augmenter la disponibilité en jour de cent-quatre-vingt-douze (192) jours pour la totalité des centrales étudiées. Le gain le plus important a été réalisé pour la centrale de Kais avec 46% de jour de disponibilité en plus.

Quant aux centrales de Hassi R'mel 2 et de Boutelilis (cycle simple) les dates ont été corrigées mais aucun gain n'a pu être réalisé.

#### b) Gains en production

Le calcul des gains en production est fait suivant les résultats obtenus après déroulement du programme. Les arrêts pour Upgrade (remplacement du système AGP par le système HGP) coïncidant avec l'inspection sur générateur ont été réalisés pour les centrales regroupées dans le tableau ci-après :

Les puissances installées sont données selon les conditions ISO.

Tableau 12 : Gain en production pour chaque centrale.

Centrales	Puissance nette de la centrale 889 MW CC & 288 MW CS	jours disponibilité en plus après Upgrade	Gain énergétique (Production) MWh
Bellara	42 672	32	1 365 504
Kais	42 672	64	2 731 008
Mostaganem	42 672	0	0
Naama	42 672	48	2 048 256
Oumache	42 672	16	682 752
Boutelilis	13824	0	0
Hassi R'mel 1	13824	0	0
<b>TOTAL</b>			<b>6 827 520</b>

Le gain en production pour l'ensemble de ces centrales concernées est d'environ 7 TWh.

La centrale de Djelfa représente le seul cas où l'Upgrade survient après l'inspection sur générateur car la date de mise en service de la turbine à vapeur arrive après 10000h de marche. La puissance installée sur cette centrale en cycle ouvert est de 256 MW par turbine à gaz, le nombre de turbines étant égal à quatre, le gain ainsi calculé est résumé dans le tableau suivant :

Tableau 13 : Gain en production pour Djelfa.

Centrale	Puissance nette de la centrale 265 MW en cycle ouvert	jours disponibilité en plus avant Upgrade	Gain énergétique (Production) MWh
Djelfa	25 440	32	814 080
<b>Total</b>			<b>814 080 MWh</b>

Le gain énergétique dans ce cas est de 800 000 MWh. Ainsi le gain total s'élèvera à environ 8 TWh.

Le gain peut augmenter de manière considérable si de quelconque manière GEPS parvient à rapprocher la date de mise en service des turbines à vapeur.

## 4.2 Gains indirects

L'opération d'optimisation ainsi réalisée permet à l'entreprise de mobiliser des équipes de travail avec des compétences mixtes capables de gérer deux voire trois opérations en même temps.

Faire coïncider les opérations de MAGIC et de AGP nous permet de déployer une équipe à compétences mixtes et d'économiser certains frais de mobilisation car le nombre de ressources déployé est inférieur au nombre des deux équipes réunies, l'équipe mixte est celle de troisième colonne.

Tableau 14 : Optimisation de la ressource humaine.

MAGIC team	AGP team	Shared Team
Un Generator Specialist	Deux ITH Specialists	Deux ITH Specialists
Un MAGIC Specialist	Deux riggers	Deux mechanical TFA
Un mecanical TA	Deux mechanical TFA	Un Controle TA
Un Contrôle TA	Un Controle TA	Un generator Specialist
Un Supervisor	Deux Supervisors	Un MAGIC Specialist
Un instrumentalist	Quatre instrumentalist	Deux Supervisors
Un electrician	Dix mecanical technicians	Quatre instrumentalist
Trois mecanical technicians	Deux welders	Dix mecanical technicians
Un EHS	Deux EHS	Deux welders
Un store keeper	Deux store keepers.	Deux riggers
	Deux electrical technicians.	Deux EHS
	Deux crane operators.	Deux store keeper
		Deux electrical technicians

		<b>Deux crane operators</b>
--	--	-----------------------------

La mobilisation de la ressource humaine est à la charge du client, à savoir SONELGAZ SPE, le manque d'information relative aux frais associés nous a empêchés d'évaluer ce gain mais en dépit de ce manque nous pouvons confirmer que cette mobilisation économise environ 50% de charge une fois le plan optimisée grâce à la solution proposée.

## 5 Développement d'une application et proposition d'une Interface graphique

Après avoir déroulé le programme mathématique, le besoin de visualisation des résultats nous a semblé des plus importants et c'est pour cela que nous avons pris l'initiative de développer une application et de proposer une interface graphique pouvant commander les programmes d'optimisation. Nous avons aussi réussi à compiler ces programmes en une application installable sur n'importe quel ordinateur que nous avons appelé PlanOptimisationApp.

Cette application permet d'obtenir les dates de début des différentes opérations avec exactitude, en prenant en compte toutes les contraintes exprimées dans le programme mathématique, celle du pic de charge, de dispatching ou même de maximum de durée des opérations ; elle exprime le résultat dans le format demandé, jour/mois/année.

Elle permet d'obtenir tous les résultats demandés de manière interactive, elle est aussi dynamique, les dates d'entrée peuvent être changées à tout moment, elle met à jour automatiquement les outputs.

En plus des dates des opérations, cette application permet également d'afficher différentes informations, le type du cycle : simple ou combiné, le nombre d'heure de fonctionnement, et même la date et l'heure d'exécution. Elle permet aussi d'enregistrer les résultats obtenus sur un fichier texte sur le bureau comprenant le nom de la centrale et toutes les dates des opérations.

### 5-1 Différentes interfaces graphiques de l'application

Dès que l'on clique sur l'icône de bureau l'interface principale suivante apparaît :

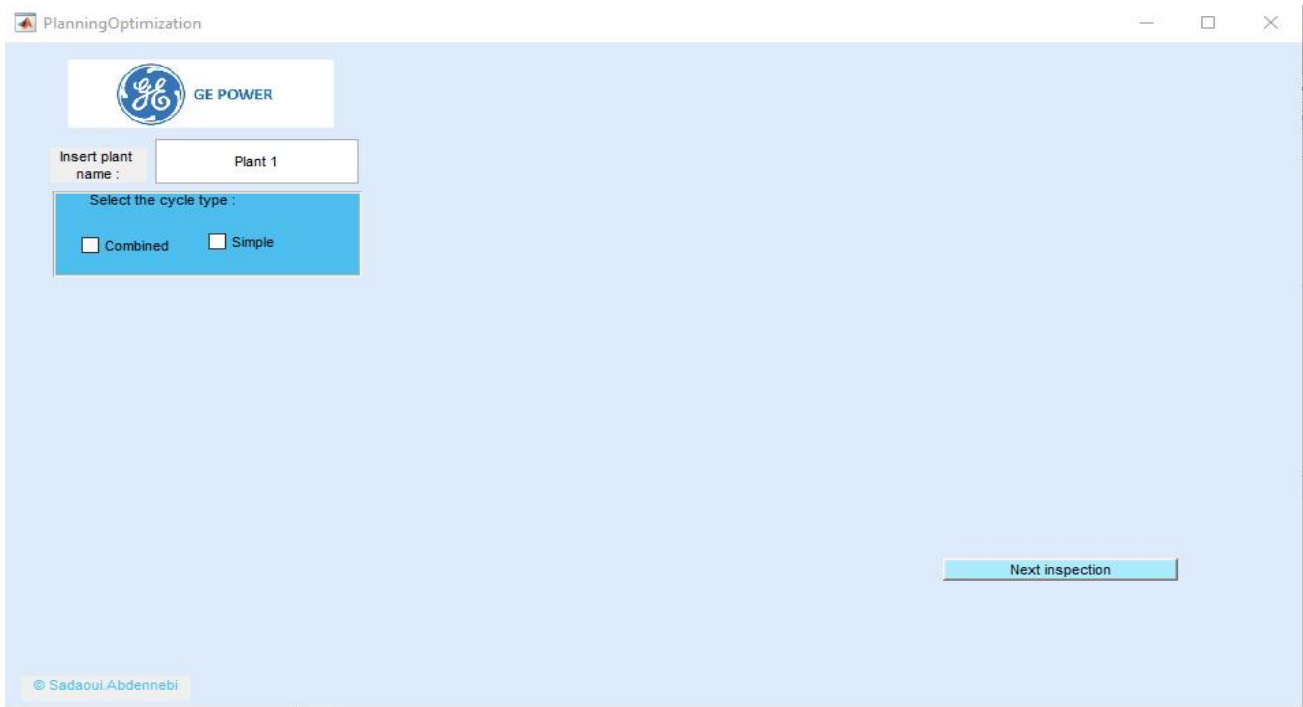
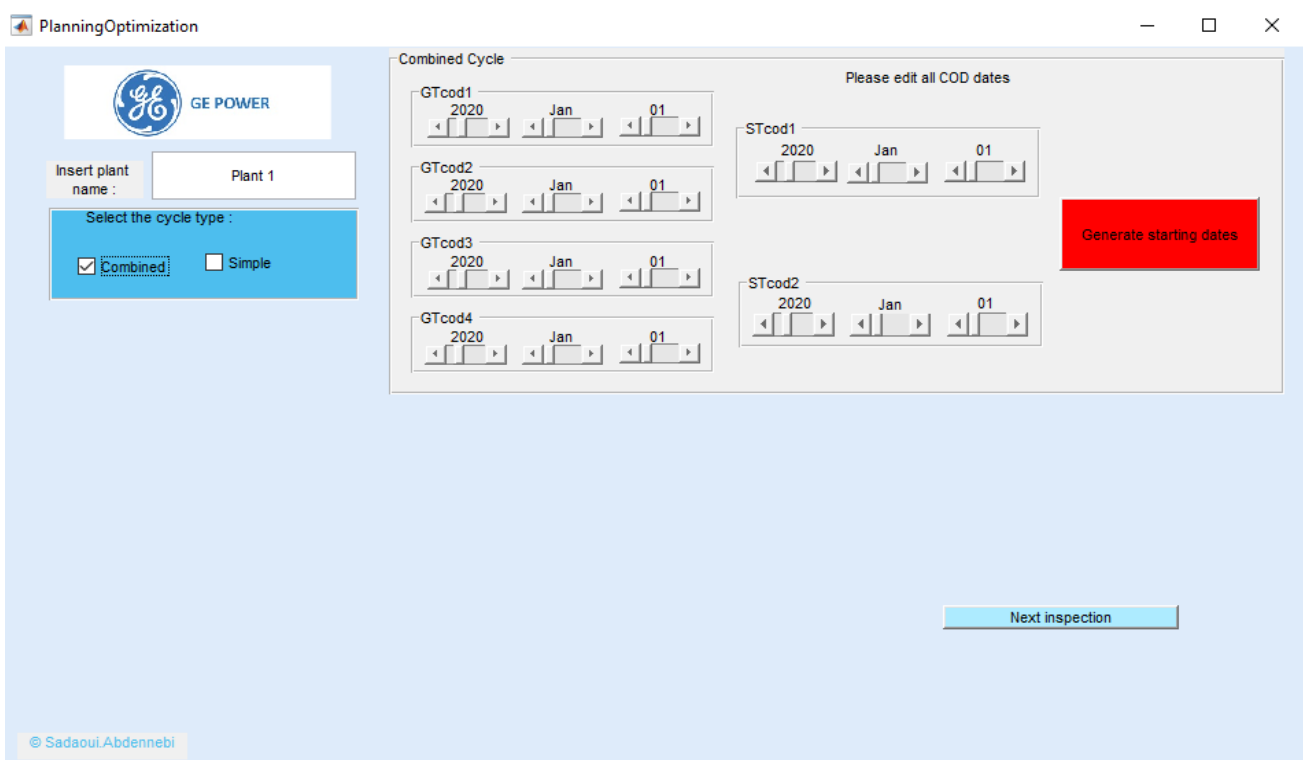


Figure 19 : Interface principale de l'application.

L'utilisateur a ensuite le champ pour sélectionner le type de cycle. Selon ce choix plusieurs champs de saisis apparaissent :

Pour un cycle combiné la disposition ci-dessous apparaît



Pour un cycle simple la disposition ci-dessous apparait

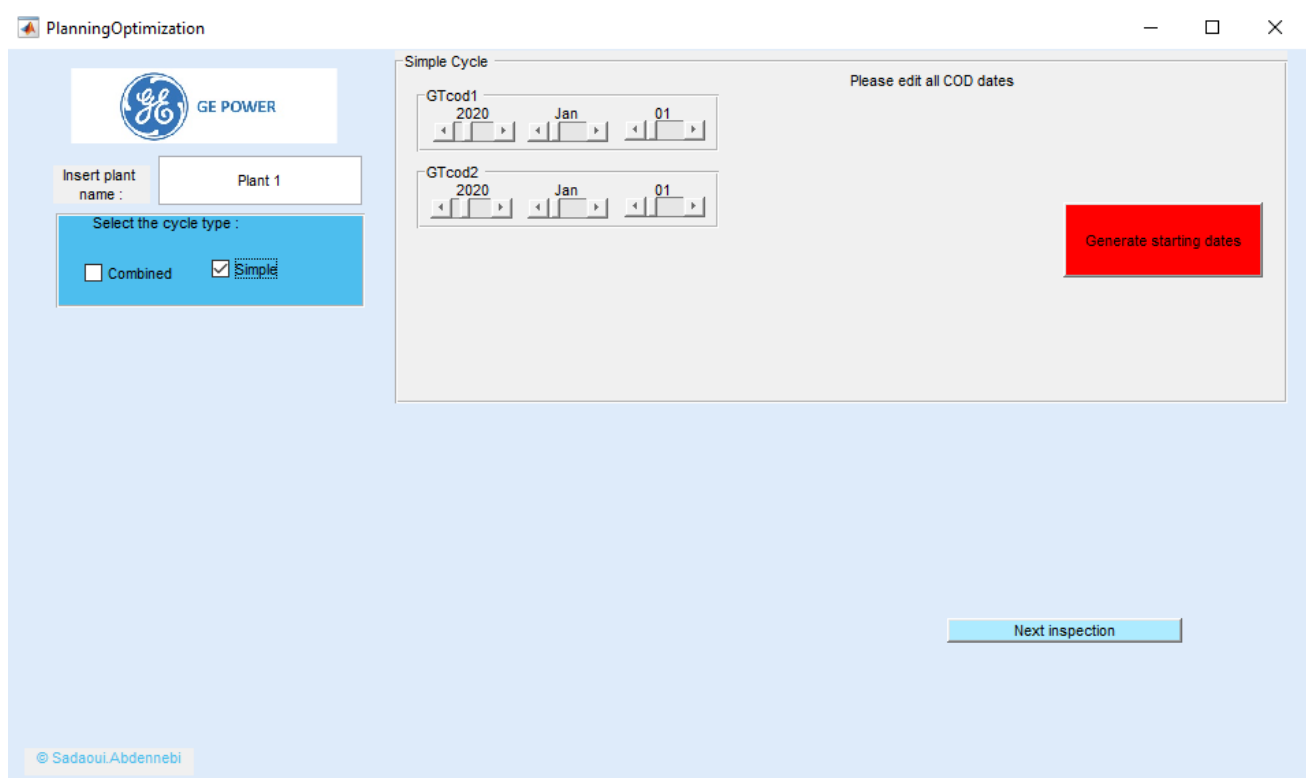


Figure 20 : Interface de saisie.

Une fois que l'utilisateur saisit les données d'entrée à savoir GTcod 1 & 2 pour un cycle simple , GTcod 1,2,3 & 4 et STcod 1 & 2 pour un cycle combiné, il peut appuyer sur le bouton rouge « Generate starting dates » et les résultats du déroulement du programme d'optimisation apparaîtront sous la forme en Figure 21.

A titre d'essai nous avons utilisé les données de la centrale de Kais. Nous avons ainsi pu rentrer les dates de mise en service et par la suite obtenir les dates de début des multiples opérations, nous remarquons sur la figure 21 (première et deuxième colonne) que les dates de l'opération de remplacement du système HGP et les dates de l'inspection sur générateur coïncident.

Les dates d'envoi pour la modification des chambres à combustion apparaissent en troisième colonne.

Nous donnons aussi la possibilité à l'utilisateur de connaître la date de la prochaine inspection programmée à savoir l'inspection de la veine gazeuse et l'inspection majeure.

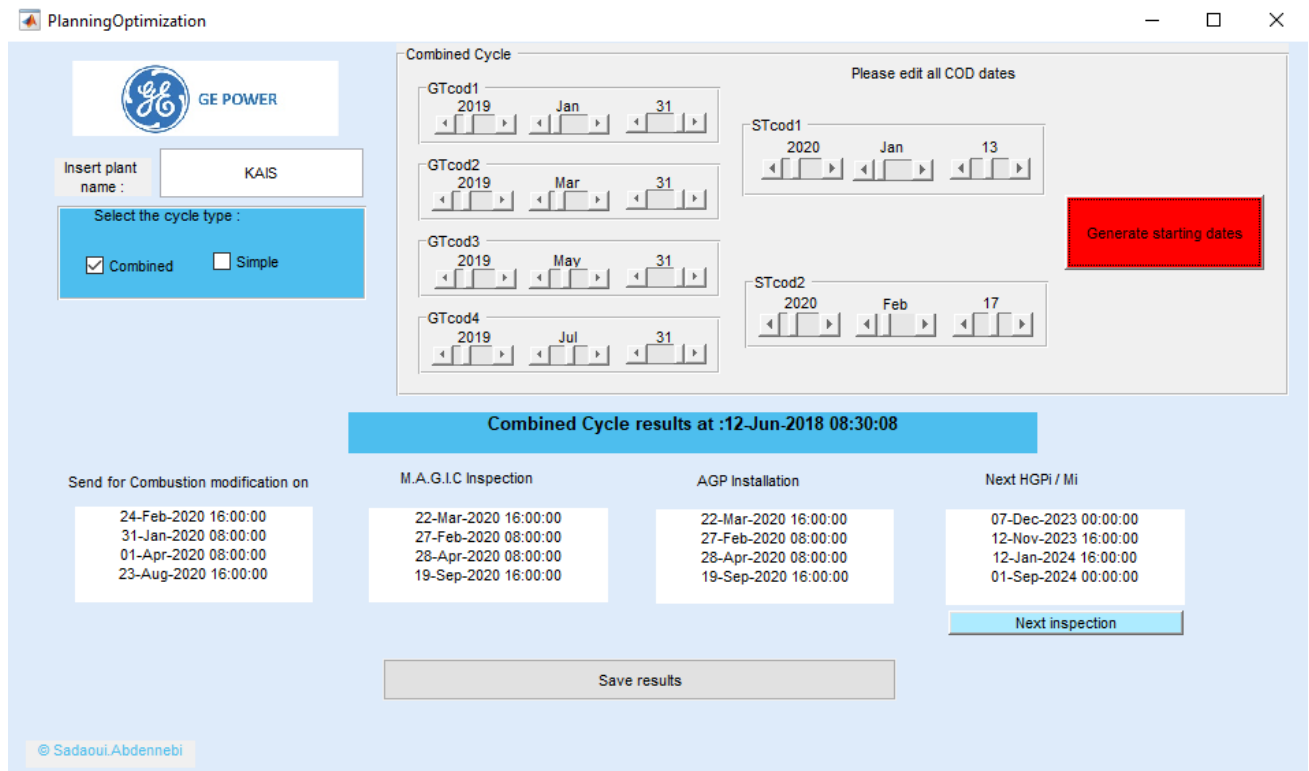


Figure 21 : Interface résultats.

Il sera ensuite possible de générer la date de la prochaine inspection ainsi que de sauvegarder les résultats sous un fichier texte . La dernière figure (figure 22) montre le rapport après exécution du programme, ce rapport est sous forme de fichier texte, il peut servir pour la sauvegarde et l’archivage des données et pour une meilleure communication en interne.



Figure 22 : Interface sauvegarde des résultats.



## 5-2 Environnement de l'application

L'application nommée Plan Optimisation App est développée sous le système d'exploitation Windows10. Nous avons utilisé le logiciel Matlab dans sa version parue en 2016 de référence R2016a.

Les utilisateurs pourront l'installer sur un ordinateur avec le même système d'exploitation que lors de sa conception. Muni du fichier (\*.mcr) pour l'installation, ils n'auront pas besoin de la présence du logiciel Matlab pour le faire fonctionner.

Quant aux droits d'accès nous avons pensé à le restreindre à deux types d'utilisateurs à savoir :

- Les ingénieurs de site : Chaque site étant assigné à un ingénieur.
- Les Contract Performance Managers : Il s'agit des personnes responsables des pôles.

## Conclusion

Nous arrivons au terme de ce chapitre, à l'issue duquel nous avons pu développer une application capable de restituer les résultats du modèle mathématique, ce qui constitue un outil d'aide à la décision pour l'utilisateur. Elle permet d'une part, de planifier et de faire coïncider les opérations à effectuer sur site tout en générant les dates butoirs pour la modification des chambres à combustion et d'autre part, de générer les dates des prochaines inspections durant toute la période du contrat. Ce travail a permis de répondre aux volontés de l'entreprise GEPS et de son client.

## Conclusion du chapitre III

Une fois la planification des opérations effectuée sous MS Project, l'étude préliminaire nous a permis d'aboutir à un diagramme de Gantt, qui met en avant les tâches critiques à optimiser, ce qui nous a par la suite menés à la construction du modèle mathématique, validé dans un premier temps manuellement, ensuite, ces résultats obtenus ont été confirmés grâce à la programmation sous Matlab.

Pour finir une application développée permet de restituer les résultats du programme de manière interactive.

# Conclusion générale

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de l'optimisation de la planification de la maintenance. La méthode utilisée est la planification par programmation mathématique. L'étude a été effectuée au sein de GE Power Services entreprise leader en Algérie dans le secteur du service de maintenance des équipements de production d'électricité au profit des centrales installées un peu partout sur le territoire national et qui a vu ses parts de marchés s'accroître considérablement grâce à la signature en 2017 du contrat de service pour dix nouvelles centrales.

Ces centrales doivent être équipées de turbines munies de la dernière technologie de performance énergétique : le système Advanced Gaz Path. Ce système une fois installé permet de rallonger les intervalles de maintenance, d'augmenter la capacité, la durée de vie et la disponibilité des équipements. Cette installation est prévue dans le cadre d'une opération de maintenance améliorative régie pour le contrat précédemment cité. L'analyse de la planification de cette opération mise en place par GEPS fait ressortir un certain nombre de constats que nous résumons en ce qui suit :

- La réalisation de cette maintenance améliorative nécessite quatre opérations : L'inspection sur générateur, le remplacement du système standard par le système AGP, la modification des chambres à combustion et l'installation de celles-ci. Ces opérations nécessitent des arrêts de machine qui se traduisent en indisponibilités.
- Le planning effectué par l'équipe de GEPS présente certaines lacunes notamment le non-respect des contraintes de pic de charge et de dispatching. De plus, les plannings sont fixes et leur révision est contraignante.

La démarche de résolution adoptée a débuté par la planification des opérations précédentes en sous projets, cela a permis d'estimer les durées de celles-ci et d'en déduire les chemins critiques.

Ensuite, la modélisation mathématique sous contraintes linéaires a fait ressortir un programme mathématique en nombre entier (PLNE) optimisant l'écart entre les dates de début des opérations. En prenant en compte des contraintes de durée, de dispatching et de pic de charge.

Ce programme a ensuite été déroulé manuellement, il a permis d'aboutir à des résultats plus concluants, ces derniers ont été validés par la suite grâce à un outil informatique : Matlab.

Et enfin, pour palier au dernier constat lié à la non flexibilité du planning, une application a été développée tout en proposant une interface graphique qui a permis d'une part de répondre aux besoins de l'entreprise et d'autre part de restituer d'une façon simplifiée et facile les résultats du modèle développé.

Le programme ainsi élaboré nous a permis d'optimiser le nombre d'arrêts des machines dans les différentes centrales. Cette optimisation se traduit par des gains de production et de disponibilité pour le client et assure à GEPS le respect de ses engagements contractuels.

Enfin, des tests d'utilisation de l'application développée ont été menés par différents employés de GE, beaucoup d'avis positifs ont été récoltés et des discussions sont en cours pour définir les droits d'accès par utilisateur qui viendront couronner sa mise en place.

Pour conclure et afin de valoriser encore ce travail, nous proposons quelques perspectives d'amélioration :

- La première s'intéresse à l'ordonnancement des tâches de modification des chambres à combustion au près d'Algesco. Cette tâche étant un préalable à l'opération de maintenance objet de notre optimisation, la programmation de son ordonnancement ne peut qu'enrichir le modèle proposé et donner ainsi des dates plus fiables ;
- La seconde propose la combinaison de ce travail avec le travail précédent effectué par nos consœurs : Boudia et Chergui, au sein de l'entreprise portant sur l'optimisation des flux des pièces de rechange permettant ainsi de réaliser plus de gains car les travaux concernent le même contrat.

Pour finir, nous tenons à souligner que ce travail nous a permis de capitaliser les connaissances acquises durant ces trois années de spécialité, ce qui constitue une fin de cursus mémorable pour nous.

*« The greatest thing in life is experience »*

*Henry Ford*

# Bibliographie

**AOUDJIT**, Hakim. Planification de la maintenance d'un parc de turbines alternateurs par programmation mathématique. 202pages.

Thèse de doctorat, Département de mathématiques et de génie industriel, Ecole Nationale Polytechnique de Montréal : **2010**

**AFNOR**, Créée en 1926, AFNOR est une association régie par la loi de 1901, composée de près de 2 500 entreprises adhérentes. Sa mission est d'animer et de coordonner le processus d'élaboration des normes et de promouvoir leur application : **2018** ,[consulté le 18-03-2018]

Disponible à l'adresse : <https://www.afnor.org/>

**BOUDIA**, Katia., **CHERGUI**, Affaf. Modélisation et optimisation de l'utilisation des pièces de rechange pour les besoins de la maintenance préventive : Cas d'étude : les pièces capitales au sein de General Electric Power Services. 91pages.

Mémoire de fin d'étude, Département de génie industriel, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger :**2017**.

**BEN-DAYA** Mohamed, **AIT KAKI** Daoud et al. Handbook of maintenance management and engineering. Springer. Limited edition United Kingdom : **2009**. ISBN 978-1-84882-471-3

**BERGER** Nicolas, Modélisation et résolution en programmation par contraintes de problèmes mixtes continu/discret de satisfaction de contraintes et d'optimisation, Thèse de doctorat, Informatique Ecole des Mines de Nantes, France, **2010** [consulté le 17-03-2018]

Disponible à l'adresse : <tel.archives-ouvertes.fr/tel00560963>

**EL NAJJAR** Bassim. Journal of quality in maintenance engineering. Volume 9, P 4: **2003**. ISBN 0-86176-899-X

**General Electric**, Documents internes de General Electric pour la maintenance.

**General Electric** , Avanced Gaz Path Brochure.

**LALOUX** Guillaume (AFNOR). Management de la maintenance iso 9001 :2008. France :**2009**  
ISBN 978-2-12-465188-7

**MALTAIS**, Daniel. Planification (stratégique et organisationnelle) dans L. Côté et J.-F. Savard (dir.)

Le Dictionnaire encyclopédique de l'administration publique [en ligne]. **2012** [consulté le 25-05-2018] P.2. Disponible sur : <[www.dictionnaire.enap.ca](http://www.dictionnaire.enap.ca)>.

**MARMIER**, François. Contribution à l'ordonnancement des activités de maintenance sous contrainte de compétences : une approche dynamique, proactive et multicritère, Thèse de doctorat, Automatique, Université de Franche-Comté :**2007** [consulté le 25-05-2018]

Disponible à l'adresse : : [tel.archives-ouvertes.fr/tel00212750](http://tel.archives-ouvertes.fr/tel00212750)

**NOUAL** Nadjwa, Cours de maintenance, Département Génie Industriel, Ecole Nationale Polytechnique, Alger. :**2018**.

Organisation de la maintenance de la machinerie de production dans l'industrie manufacturière. Formation Professionnelle et technique. Canada :**1999**. ISBN 2-550-33732-8

**WALSH** Philip P ,**FLETCHER** Paul. Gaz turbine Performance , Blackwell Science ltd, Australia. :**2004**.

**PALMER** Richard D. Maintenance Planning and Scheduling Handbook, MacGrawHill Handbooks  
Second edition, London.: **2006**.ISBN

**SPARROW** F.T ,**BOWEN** Brian H.. Manuel général de formation dans le modèle de planification à long terme : Modélisation du commerce en Electricité et en Gaz Naturel , Institute for Interdisciplinary Engineering Studies, Potter Engineering Center, USA : **2000**.

**UDAY** Kumar, D.N Murthy. Introduction to maintenance engineering. Wiley. United Kingdom :. 2016. ISBN 9781118487198

## Webographie

<https://products.office.com/fr/excel>

<https://fr.mathworks.com/>

<https://www.ibm.com/analytics/data-science/prescriptive-analytics/cplex-optimizer>

<https://www.ge.com/power>

# Annexes

## Annexe 01



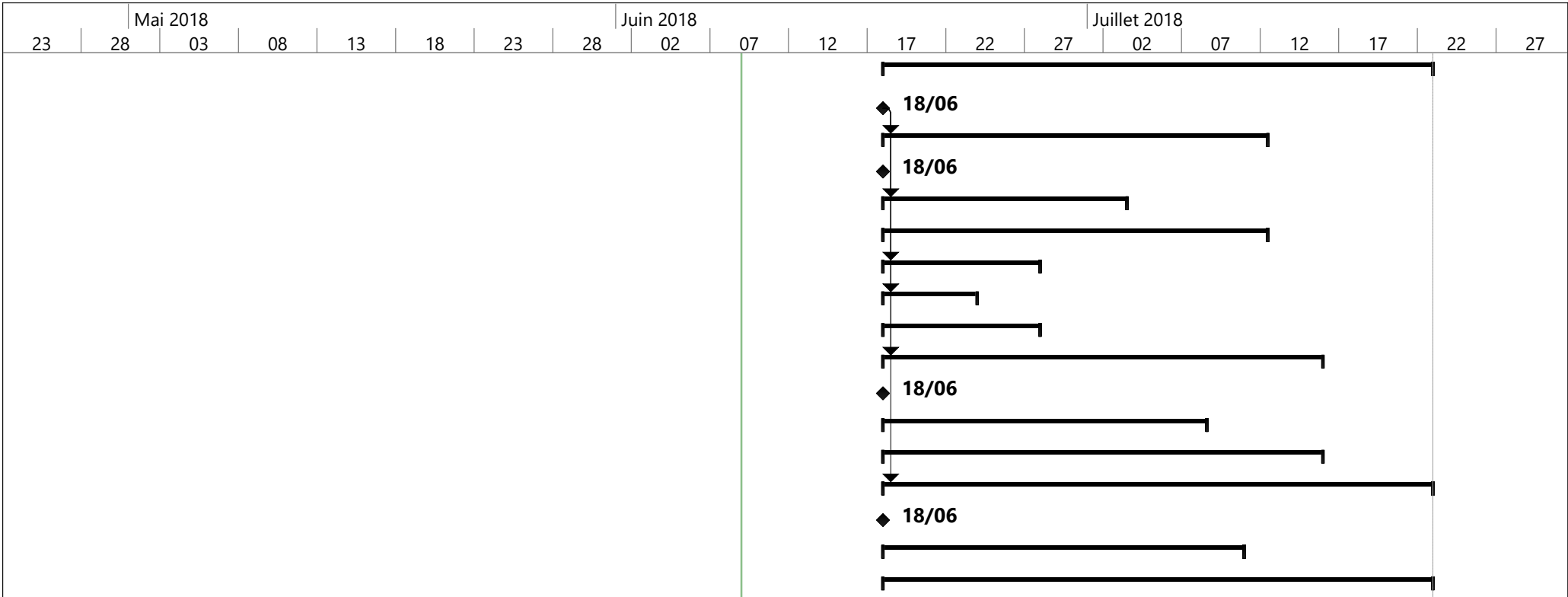
N°	Nom de la tâche	Durée	F	Avril			Mai			Juin			Juillet		
				D	M	F	D	M	F	D	M	F		D	
1	<b>9FA AGP Installation</b>	<b>415 hr</b>		[Barre de tâche continue]											
2	<b>MOBILISATION / Preparation de Site</b>	<b>14 hr</b>		[Barre de tâche continue]											
3	Mobilisation / Preparation de Site	6 hr		[Barre de tâche continue]											
4	Outillage sur site	8 hr		[Barre de tâche continue]											
5	Materiel sur site	8 hr		[Barre de tâche continue]											
6	Montage echaffaudage extern	8 hr		[Barre de tâche continue]											
7	<b>Maintenance GT</b>	<b>373 hr</b>		[Barre de tâche continue]											
8	<b>Disassemble GT</b>	<b>373 hr</b>		[Barre de tâche continue]											
9	<b>Preparation</b>	<b>38 hr</b>		[Barre de tâche continue]											
14	<b>Desassemblage Compartiments GT</b>	<b>97 hr</b>		[Barre de tâche continue]											
20	<b>Desassemblage Piping et System de combustion</b>	<b>72 hr</b>		[Barre de tâche continue]											
24	<b>Desassemblage TG Partie Sup</b>	<b>42 hr</b>		[Barre de tâche continue]											
34	<b>Desassemblage TG Partie Inf</b>	<b>124 hr</b>		[Barre de tâche continue]											
41	<b>NETTOYAGE ET INSPECTION TG</b>	<b>40 hr</b>		[Barre de tâche continue]											
62	<b>TG PLANIFIÉ NON STANDARD</b>	<b>240 hr</b>		[Barre de tâche continue]											
75	<b>SYSTEMES AUXILIAIRE</b>	<b>41 hr</b>		[Barre de tâche continue]											
113	<b>REASSEMBLAGE TG</b>	<b>48 hr</b>		[Barre de tâche continue]											
137	<b>START UP</b>	<b>28 hr</b>		[Barre de tâche continue]											
152	<b>Démobilisation</b>	<b>0 hr</b>		[Barre de tâche continue]											
153	<b>Démobilisation du site</b>	<b>0 hr</b>		[Barre de tâche continue]											

Projet : Upgrade AGP Date : Ven 08/06/18	Tâche	[Barre bleue]	Récapitulatif inactif	[Barre grise]	Tâches externes	[Barre grise]
	Fractionnement	[Barre pointillée]	Tâche manuelle	[Barre grise]	Jalons externes	[Losange]
	Jalon	[Losange]	Durée uniquement	[Barre dégradée]	Échéance	[Flèche verte]
	Récapitulative	[Barre noire]	Report récapitulatif manuel	[Barre dégradée]	Avancement	[Barre bleue]
	Récapitulatif du projet	[Barre grise]	Récapitulatif manuel	[Barre noire]	Progression manuelle	[Barre verte]
	Tâche inactive	[Barre blanche]	Début uniquement	[Carré]		
	Jalon inactif	[Losange]	Fin uniquement	[Carré]		

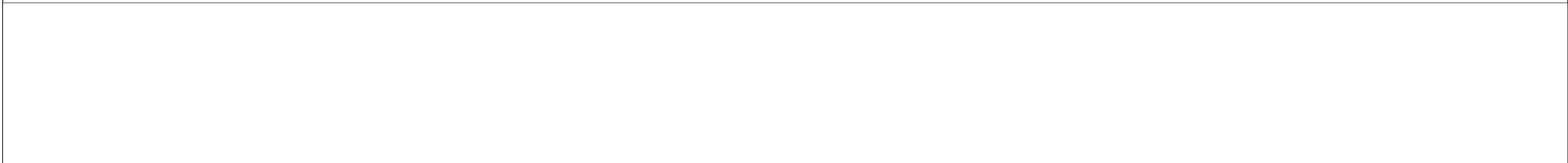
## Annexe 02

N°	Mode Tâche	Nom de la tâche	Durée	Prédécesseurs	Avril 2018							
					24	29	03	08	13	18	23	
1		<b>9FA03-04</b>	<b>380 h</b>									
2		Trial parts	0 hr									
3		<b>cap</b>	<b>275 h 2</b>									
4		Procurement	0 hr									
7		FPQ	180 h 2									
19		PLQ	275 h									
32		<b>liner</b>	<b>128 h 2</b>									
33		FPQ	64 hr 2									
41		PLQ	128 h									
50		<b>FNZ</b>	<b>302 h 2</b>									
51		Procurement	0 hr									
60		FPQ	214 h									
76		PLQ	302 h									
92		<b>TP</b>	<b>380 h 2</b>									
93		Procurement	0 hr									
97		FPQ	252 h									
114		PLQ	380 h									

Projet : CPPLANNING Date : Sam 09/06/18	Tâche		Récapitulatif inactif		Tâches externes	
	Fractionnement		Tâche manuelle		Jalons externes	
	Jalon		Durée uniquement		Échéance	
	Récapitulative		Report récapitulatif manuel		Avancement	
	Récapitulatif du projet		Récapitulatif manuel		Progression manuelle	
	Tâche inactive		Début uniquement			
	Jalon inactif		Fin uniquement			



Projet : CPPLANNING Date : Sam 09/06/18	Tâche		Récapitulatif inactif		Tâches externes	
	Fractionnement		Tâche manuelle		Jalons externes	
	Jalon		Durée uniquement		Échéance	
	Récapitulative		Report récapitulatif manuel		Avancement	
	Récapitulatif du projet		Récapitulatif manuel		Progression manuelle	
	Tâche inactive		Début uniquement			
	Jalon inactif		Fin uniquement			

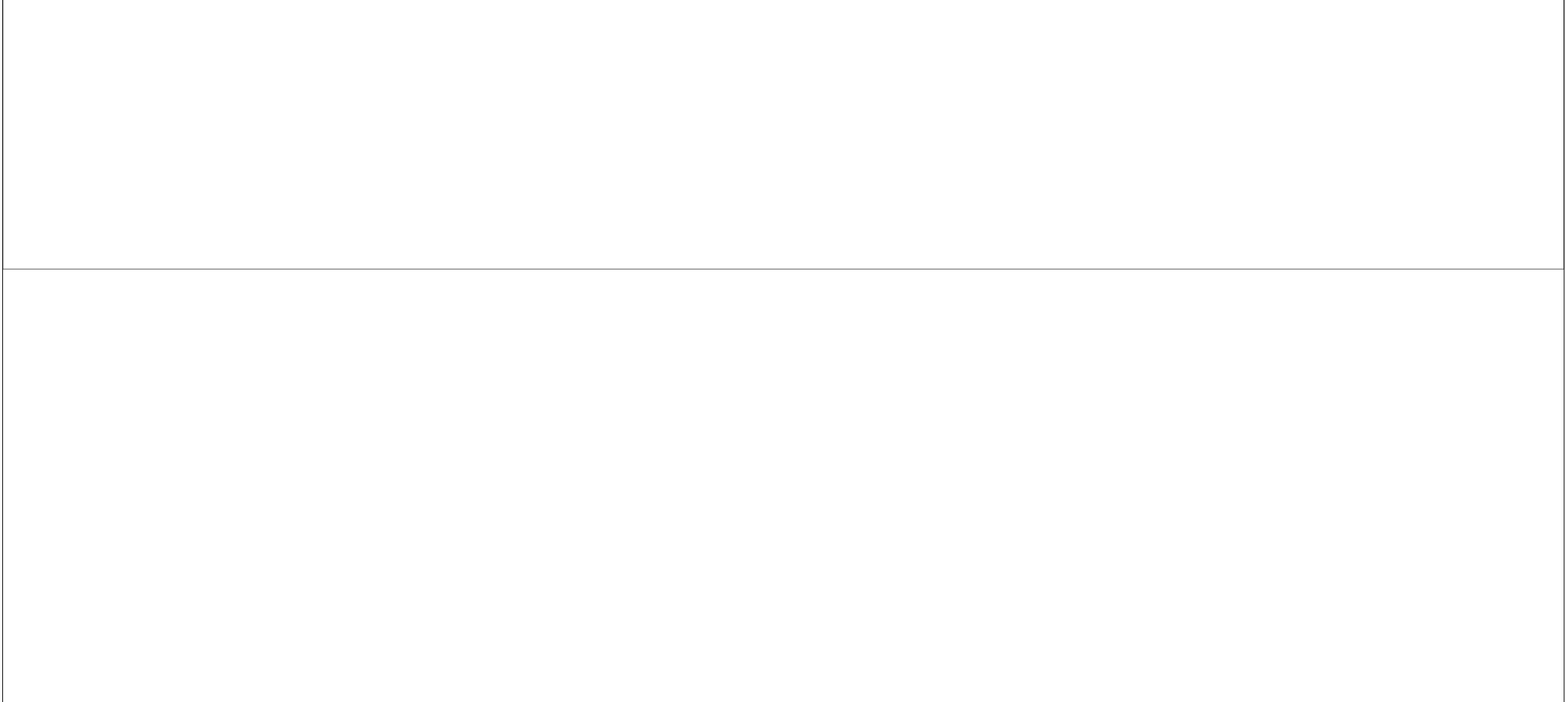


Projet : CPPLANNING Date : Sam 09/06/18	Tâche		Récapitulatif inactif		Tâches externes	
	Fractionnement		Tâche manuelle		Jalons externes	
	Jalon		Durée uniquement		Échéance	
	Récapitulative		Report récapitulatif manuel		Avancement	
	Récapitulatif du projet		Récapitulatif manuel		Progression manuelle	
	Tâche inactive		Début uniquement			
	Jalon inactif		Fin uniquement			

## Annexe 03

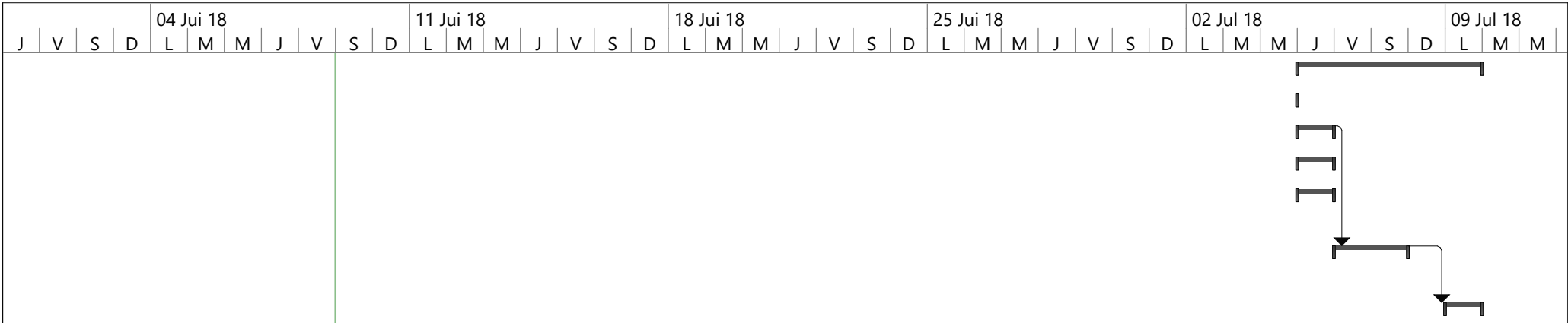


J	V	S	D	23 Avr 18	L	M	M	J	V	S	D	30 Avr 18	L	M	M	J	V	S	D	07 Mai 18	L	M	M	J	V	S	D	14 Mai 18	L	M	M	J	V	S	D	21 Mai 18	L	M	M	J	V	S	D	28 Mai 18	L	M	M
---	---	---	---	-----------	---	---	---	---	---	---	---	-----------	---	---	---	---	---	---	---	-----------	---	---	---	---	---	---	---	-----------	---	---	---	---	---	---	---	-----------	---	---	---	---	---	---	---	-----------	---	---	---



Projet : CombustionPartsInstall Date : Sam 09/06/18	Tâche		Récapitulatif inactif		Tâches externes	
	Fractionnement		Tâche manuelle		Jalons externes	
	Jalon		Durée uniquement		Échéance	
	Récapitulative		Report récapitulatif manuel		Avancement	
	Récapitulatif du projet		Récapitulatif manuel		Progression manuelle	
	Tâche inactive		Début uniquement			
	Jalon inactif		Fin uniquement			

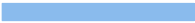









































Projet : CombustionPartsInstall Date : Sam 09/06/18	Tâche		Récapitulatif inactif		Tâches externes	
	Fractionnement		Tâche manuelle		Jalons externes	
	Jalon		Durée uniquement		Échéance	
	Récapitulative		Report récapitulatif manuel		Avancement	
	Récapitulatif du projet		Récapitulatif manuel		Progression manuelle	
	Tâche inactive		Début uniquement			
	Jalon inactif		Fin uniquement			

## Annexe 04

N°	Nom de la tâche	Durée	Prédécesseurs	01 Avr 18							08 Avr 18											
				M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S
1	<b>MAGIC INSPECTION</b>	<b>16 jours</b>																				
2	<b>GENERATOR DISASSEMBLY</b>	<b>5 jours</b>																				
3	generator purging	3 jours																				
4	remove flex link	1 jour	3DD+1 jour																			
5	equipement set up	1 jour	3DD+1 jour																			
6	disconnect neutral	1 jour	3DD+1 jour																			
7	remove collector housing	1 jour	6																			
8	generator lagging removall	1 jour	6																			
9	generator instrumentation disconnection	1 jour	6																			
10	remove bearing cap, bearing journal, hydrogen seal and deflector	1 jour	9																			
11	remove CE UH axial fan blades	1 jour	9																			
12	remove UH cen shield	2 jours	9																			
13	remove CE inner shield, gaz shields	1 jour	12DD+1 jour																			
14	remove access cover at TE to inspect top of end winding	1 jour	12DD+1 jour																			
15	remove UH gaz buffles	1 jour	12DD+1 jour																			

Projet : MAGICInspection Date : Sam 09/06/18	Tâche		Récapitulatif inactif		Tâches externes	
	Fractionnement		Tâche manuelle		Jalons externes	
	Jalon		Durée uniquement		Échéance	
	Récapitulative		Report récapitulatif manuel		Avancement	
	Récapitulatif du projet		Récapitulatif manuel		Progression manuelle	
	Tâche inactive		Début uniquement			
	Jalon inactif		Fin uniquement			

N°	Nom de la tâche	Durée	Prédécesseurs	01 Avr 18							08 Avr 18									
				M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J
16	remove the four inspection triangles at the top and bottom of the stator	1 jour	12DD+1 jour																	
17	<b>GENERATOR INCEPTION</b>	<b>12 jours</b>	<b>2DD+1 jour</b>																	
18	perform till 1836	1 jour																		
19	RTD check	2 jours	15																	
20	field electrical tests	1 jour	18DD+5 jours																	
21	stator visual inspection	1 jour	20DD																	
22	magic inspection	2 jours	21																	
23	wedge tightness tests	1 jour	22																	
24	boroscope inspection under retaining ring	1 jour	23																	
25	stator widening resistance test	1 jour	23																	
26	insulation resistance and PI test	2 jours	23																	
27	DC leakage and hippost test	1 jour	26																	
28	<b>GENERATOR REASSEMBLY</b>	<b>6 jours</b>	<b>17DD+8 jours</b>																	
29	install UH gas buffles	2 jours	26DD																	
30	install CE inner shields, gas shields, UH	2 jours	26DD																	
31	install access cover at TE	1 jour	30																	
32	install four inspection triangles	1 jour	30																	
33	install UH CE end shield	1 jour	30																	

Projet : MAGICInspection Date : Sam 09/06/18	Tâche		Récapitulatif inactif		Tâches externes	
	Fractionnement		Tâche manuelle		Jalons externes	
	Jalon		Durée uniquement		Échéance	
	Récapitulative		Report récapitulatif manuel		Avancement	
	Récapitulatif du projet		Récapitulatif manuel		Progression manuelle	
	Tâche inactive		Début uniquement			
	Jalon inactif		Fin uniquement			

N°	Nom de la tâche	Durée	Prédécesseurs	01 Avr 18							08 Avr 18									
				M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J
34	install flex link between gen terminals and AC bus	2 jours	30																	
35	install bearing cap, bearing journal, hydrogen seal and deflector	1 jour	30																	
36	install generator instrumentatic	1 jour	30																	
37	generator sealing	2 jours	30																	
38	connect neutral	2 jours	30																	
39	install CE UH axial blades	2 jours	30																	
40	install generator lagging	2 jours	30																	
41	Air decay test	2 jours	40																	
42	generator charging with hydrogen	2 jours	40																	

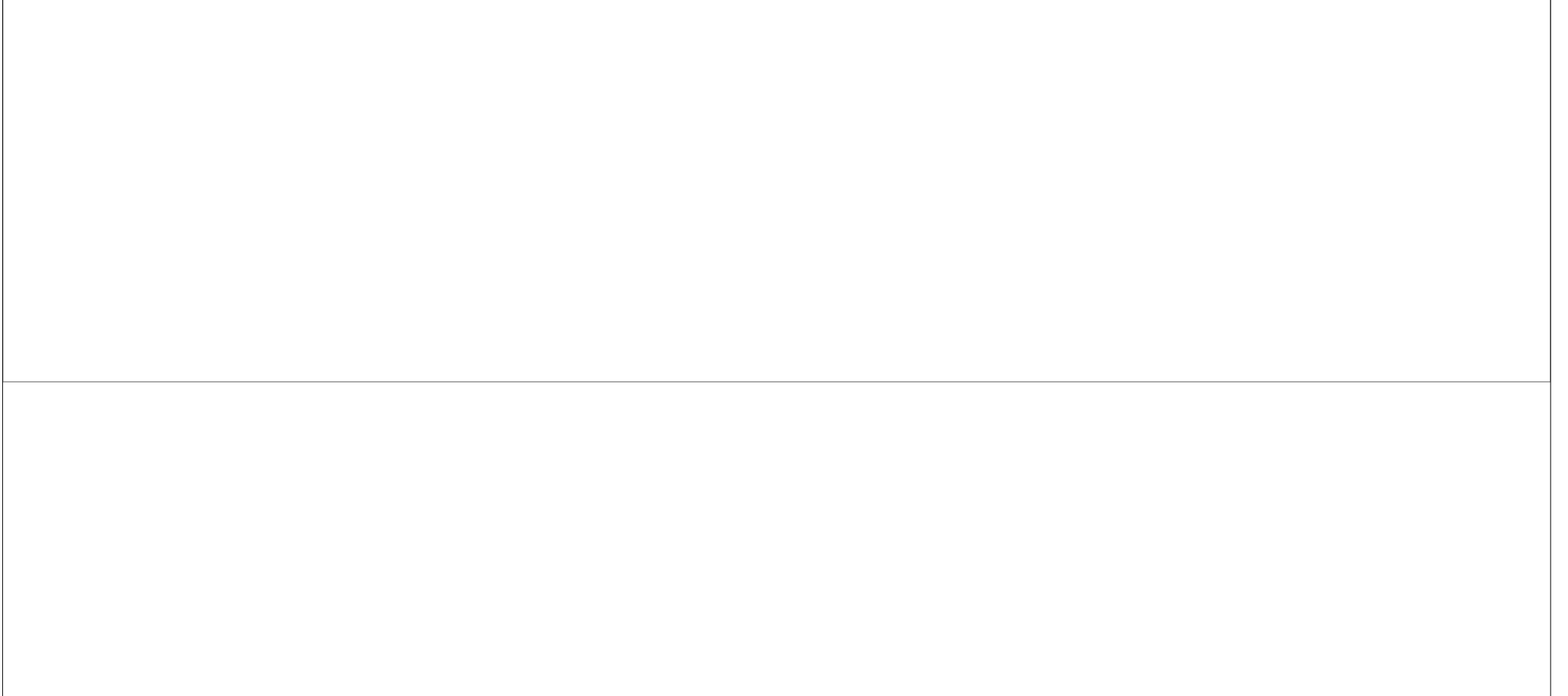
Projet : MAGICInspection Date : Sam 09/06/18	Tâche		Récapitulatif inactif		Tâches externes	
	Fractionnement		Tâche manuelle		Jalons externes	
	Jalon		Durée uniquement		Échéance	
	Récapitulative		Report récapitulatif manuel		Avancement	
	Récapitulatif du projet		Récapitulatif manuel		Progression manuelle	
	Tâche inactive		Début uniquement			
	Jalon inactif		Fin uniquement			



Projet : MAGICInspection Date : Sam 09/06/18	Tâche		Récapitulatif inactif		Tâches externes	
	Fractionnement		Tâche manuelle		Jalons externes	
	Jalon		Durée uniquement		Échéance	
	Récapitulative		Report récapitulatif manuel		Avancement	
	Récapitulatif du projet		Récapitulatif manuel		Progression manuelle	
	Tâche inactive		Début uniquement			
	Jalon inactif		Fin uniquement			

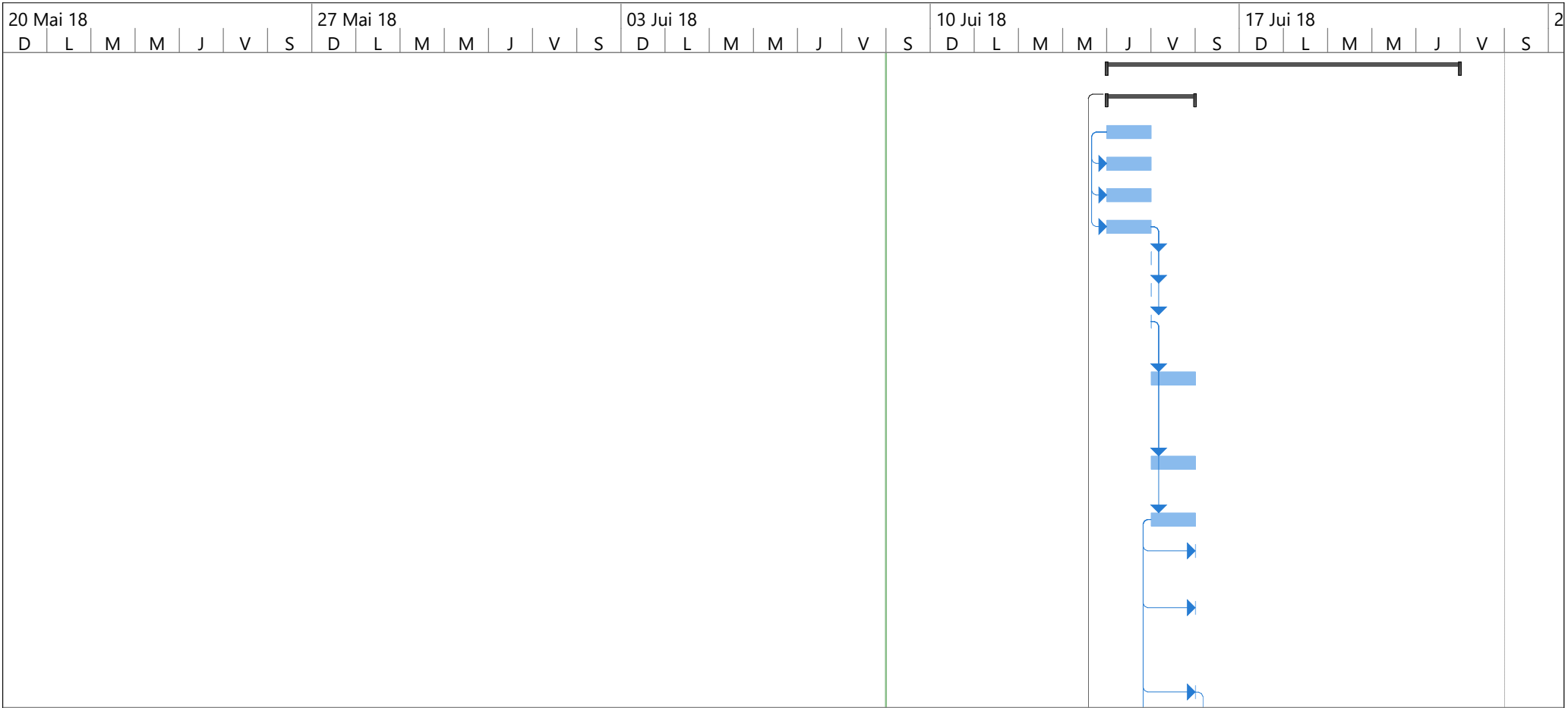


Projet : MAGICInspection Date : Sam 09/06/18	Tâche		Récapitulatif inactif		Tâches externes	
	Fractionnement		Tâche manuelle		Jalons externes	
	Jalon		Durée uniquement		Échéance	
	Récapitulative		Report récapitulatif manuel		Avancement	
	Récapitulatif du projet		Récapitulatif manuel		Progression manuelle	
	Tâche inactive		Début uniquement			
	Jalon inactif		Fin uniquement			



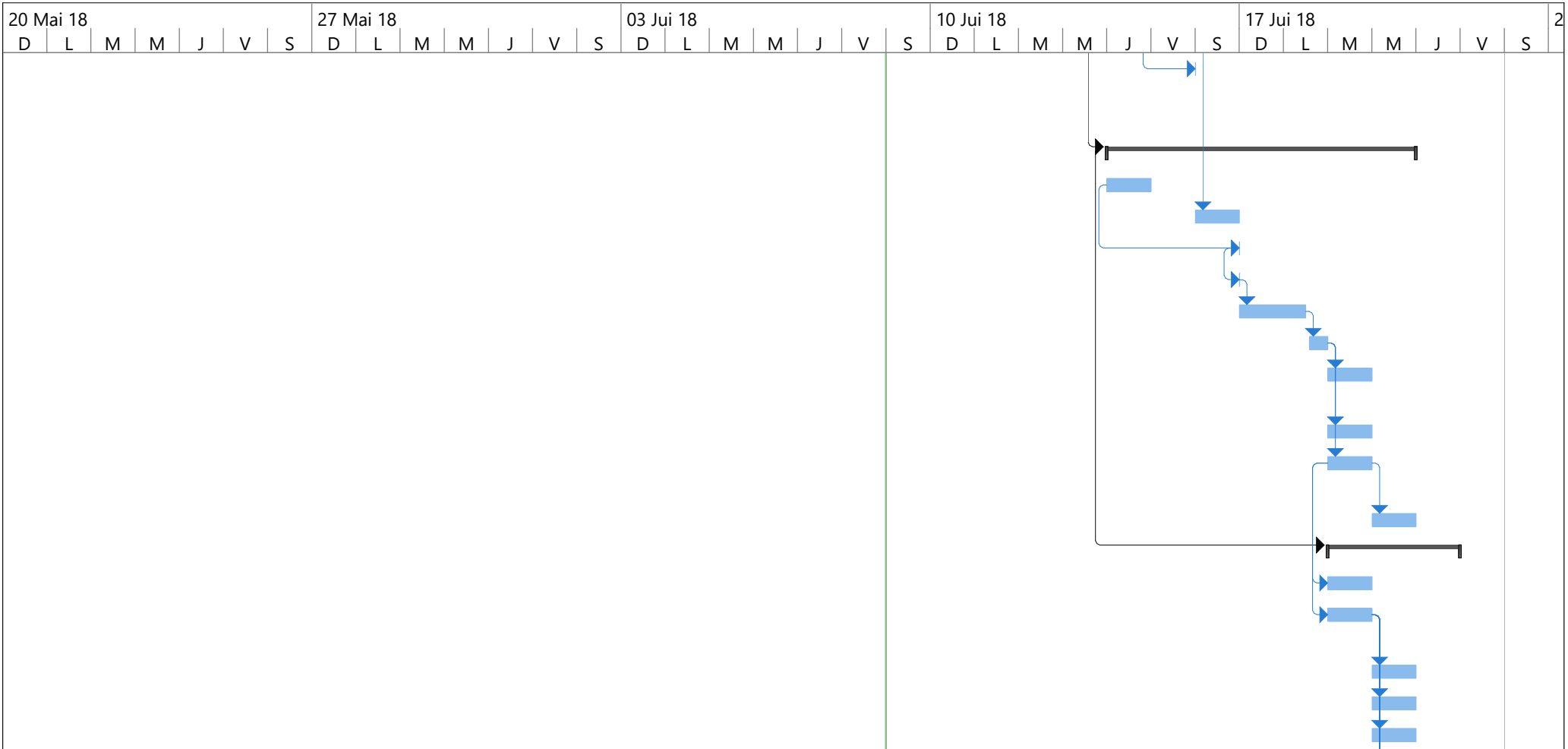
Projet : MAGICInspection Date : Sam 09/06/18	Tâche		Récapitulatif inactif		Tâches externes	
	Fractionnement		Tâche manuelle		Jalons externes	
	Jalon		Durée uniquement		Échéance	
	Récapitulative		Report récapitulatif manuel		Avancement	
	Récapitulatif du projet		Récapitulatif manuel		Progression manuelle	
	Tâche inactive		Début uniquement			
	Jalon inactif		Fin uniquement			





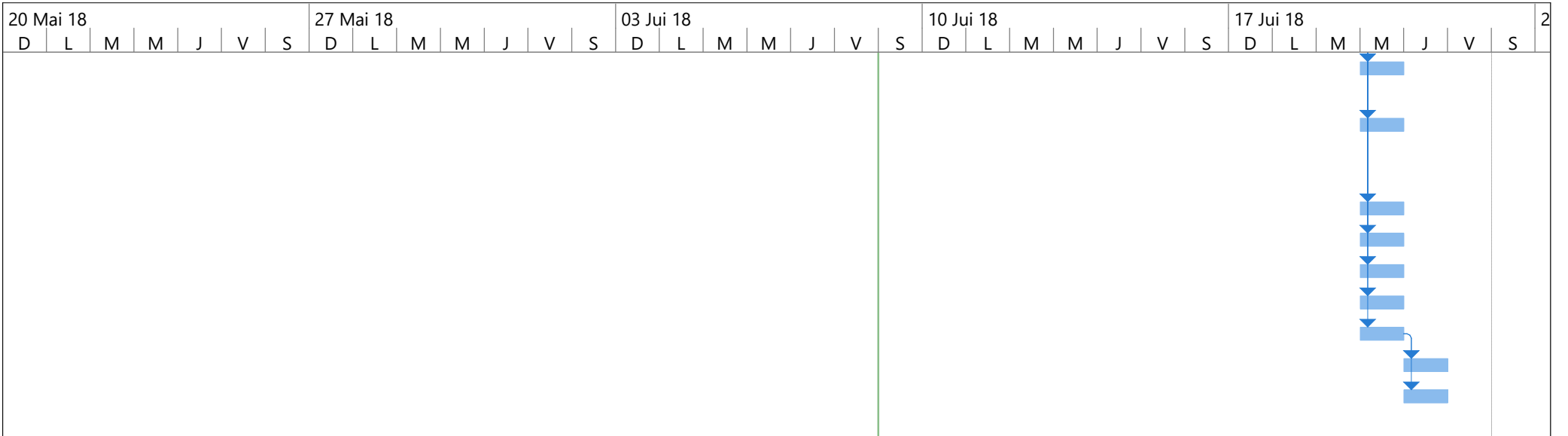
Projet : MAGICInspection  
 Date : Sam 09/06/18

Tâche		Récapitulatif inactif		Tâches externes	
Fractionnement		Tâche manuelle		Jalons externes	
Jalon		Durée uniquement		Échéance	
Récapitulative		Report récapitulatif manuel		Avancement	
Récapitulatif du projet		Récapitulatif manuel		Progression manuelle	
Tâche inactive		Début uniquement			
Jalon inactif		Fin uniquement			



Projet : MAGICInspection  
 Date : Sam 09/06/18

Tâche		Récapitulatif inactif		Tâches externes	
Fractionnement		Tâche manuelle		Jalons externes	
Jalon		Durée uniquement		Échéance	
Récapitulative		Report récapitulatif manuel		Avancement	
Récapitulatif du projet		Récapitulatif manuel		Progression manuelle	
Tâche inactive		Début uniquement			
Jalon inactif		Fin uniquement			



Projet : MAGICInspection Date : Sam 09/06/18	Tâche		Récapitulatif inactif		Tâches externes	
	Fractionnement		Tâche manuelle		Jalons externes	
	Jalon		Durée uniquement		Échéance	
	Récapitulative		Report récapitulatif manuel		Avancement	
	Récapitulatif du projet		Récapitulatif manuel		Progression manuelle	
	Tâche inactive		Début uniquement			
	Jalon inactif		Fin uniquement			

## Annexe 05

N°	Mode Tâche	Nom de la tâche	Durée	Prédécesseurs	Juin							Juillet			Août			
					F	D	M	F	D	M	F	D	M	F				
1		<b>Optimisation des opérations de maintenance</b>	<b>48 jours</b>															
2		<b>CombustionPartsInstallation</b>	<b>11 jours</b>	<b>4DD+10 jours</b>														
3		<b>MAGICInspection</b>	<b>16 jours</b>															
4		<b>Upgarde</b>	21 jours															
5		<b>Modification des chambres à combustion</b>	24 jours	4FD+3 jours														



Projet : Optimisation des opéra Date : Ven 08/06/18	Tâche		Tâches externes	
	Fractionnement		Jalons externes	
	Jalon		Échéance	
	Récapitulative		Chemin de la tâche récapitulative du successeur pil	
	Récapitulatif du projet		Chemin de la tâche de jalon du prédécesseur pilotan	
	Tâche inactive		Chemin de la tâche récapitulative du prédécesseur p	
	Jalon inactif		Critique	
	Récapitulatif inactif		Fractionnement critique	
	Tâche manuelle		Planning de référence	
	Durée uniquement		Jalon de référence	
	Report récapitulatif manuel		Récapitulatif de référence	
	Récapitulatif manuel		Avancement	
	Début uniquement		Progression manuelle	
	Fin uniquement		Marge	