

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique



DEPARTEMENT : GENIE INDUSTRIEL

General Electric power Services Algérie

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en **Management industriel**

**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

Réalisé par : Affaf CHERGUI

Katia BOUDIA

Présenté et soutenu publiquement le (19/06/2017)

**Composition du jury:**

Président	Mme. Fatima Nibouche	MCA	ENP
Rapporteur/ Promoteur	Mme Nadjwa BOUKADOUM	MAB	ENP
Examineur	Mme Sbiha NAIT-KACI	MAA	ENP
Invité	Mme Wafaa KHAMMAR	Senior Manager	GEPS



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique



DEPARTEMENT : GENIE INDUSTRIEL

General Electric power Services Algérie

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en **Management industriel**

**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

Réalisé par : Affaf CHERGUI

Katia BOUDIA

Présenté et soutenu publiquement le (19/06/2017)

**Composition du jury:**

Président	Mme. Fatima Nibouche	MCA	ENP
Rapporteur/ Promoteur	Mme Nadjwa BOUKADOUM	MAB	ENP
Examineur	Mme Sbiha NAIT-KACI	MAA	ENP
Invité	Mme Wafaa KHAMMAR	Senior Manager	GEPS

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail*

*A la mémoire de mes parents. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous.*

*A ma grande sœur Tinhinane, à qui je ne saurais être assez éloquente pour exprimer ma gratitude pour tous les sacrifices qu'elle n'a cessé de me donner.*

*A mon oncle Oucherif sans son aide, ses conseils et ses encouragements ce travail n'aurait vu le jour.*

*A mes frères et sœurs Fares, Rédha, Mira, Radia et Ramila pour leurs encouragements et soutien pendant tout mon parcours académique.*

*A toute ma famille gisement d'amour et de solidarité.*

*A mon binôme Affaf pour tous les bons moments que nous avons passés ensemble durant notre cursus.*

*A mes amies du 204 à qui je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des sœurs et des amies sur qui je peux compter.*

*A mes Amies Djihane, Nawel, Nihed et Safia.*

*Katia*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail qui m'est d'une précieuse valeur à ma chère famille, notamment mes parents qui n'ont cessé d'apporter l'aide moral dont j'avais besoin durant mon cursus scolaire en général et tout au long de mon parcours étudiantin en particulier,*

*A mes frères Mohamed Salim et Abdennour pour leur adorable contribution aussi petite qu'elle soit et leur patience à supporter tout le stress qui m'a accompagné tout au long de ce travail.*

*Une dédicace spéciale à mon ami Ayoub Ougrine, et également à mes chères amies : Ferial, Hassina, Hiba, Ahlem, Houda, et Imène.*

*A mon binôme Katia, pour tous les moments que nous avons partagés depuis le début de notre cursus à l'ENP.*

*A mes camarades de classe en Génie Industriel : Hakima, Sarra, Naila, Souad, Serine, Nawel, Imène et Nadjema.*

*A tous les AIESECers et spécialement aux membres d'AIESEC in Blida*

*Affaf*

# **Remerciements**

*Louange à Dieu seul, clément et miséricordieux*

*Tout d'abord, nous adressons nos reconnaissances et vifs remerciements à notre encadreur Mme Nadjoua Noual, qui nous a assistées durant toute cette période de stage avec son soutien moral et ses conseils précieux afin de mener à bien notre projet de fin d'études.*

*Nos sincères remerciements vont ensuite à nos encadreurs au niveau de l'entreprise à savoir Mme Wafaa Khammar et Mr Gamal Houssam, pour l'assistance technique qu'ils nous ont prodiguée dans l'élaboration du présent travail.*

*Nous ne pourrions oublier d'exprimer notre profonde reconnaissance à Monsieur Hadj Khalef Redouane pour l'intérêt qu'il a porté à notre projet et pour sa contribution combien utile et précieuse.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude à l'ensemble du personnel de l'entreprise en particulier : Mr Mourad Bourennane, Mr Nazim Ben Bey, Mme Fatima Haddad, Mr Bahet Abdeslam, Mr Mahdi Ben Otmane et Mr Fethi Messai, qui nous ont aidé et permis de travailler dans un cadre et une ambiance agréables.*

*Nous saisissons cette occasion pour destiner à nos professeurs ayant contribué à notre formation nos remerciements les plus sincères, ainsi qu'aux membres du jury qui nous font l'honneur d'évaluer ce travail.*

*Que toute personne ayant participé de près ou de loin, à la réalisation de notre projet, veuille trouver ici le témoignage de gratitude et de remerciements.*

## ملخص:

جنرال الكتريك باور سيرفيس (ج أ ب س)، فرع تابع لأحد التكتلات متعددة الجنسيات، ناشط في الجزائر في مجال صيانة عتاد محطات توليد الطاقة. في مثل هذا القطاع، يعتبر تسيير قطع الغيار واحد من النشاطات الهامة التي يجب على الشركة أن تحرص على تحسينها لضمان الاستدامة وحسن الأداء.

في هذا السياق، يندرج مشروعنا الذي أنجز في شركة (ج أ ب س) الجزائر، بهدف علاج إشكالية الحاجة إلى تحسين طريقة استهلاك قطع الغيار لتوربينات الغاز، وهذا بعد أن تم تشخيصها من خلال الدراسة التحليلية التي قمنا بها في الشركة.

الحل المقترح يتمثل في تصميم نموذج حسابي مقيد لتعيين الطريقة المثلى الواجب اتباعها في تحديد كمية قطع الغيار الموافقة للحاجة الحقيقية التي تعرب عنها عمليات الصيانة الوقائية. النتائج المحققة من خلال تجسيد هذا المشروع، تمثل الوسيلة النموذجية الأكثر نجاعة لتنفيذ أكبر صفقة في تاريخ الشركة، والتي تم عقدها مؤخرا مع الشركة الوطنية لإنتاج الطاقة الكهربائية سونلغاز.

**الكلمات المفتاحية:** الاستغلال الأمثل، قطع الغيار، الصيانة الوقائية، توربينات الغاز.

## Abstract:

General Electric Power Services (GEPS), is a sub-business of a multinational conglomerate, operating in Algeria, in the maintenance services field for power stations. In such domain, spare parts flow management is one of the key activities that has to be continuously improved by the company in order to ensure higher performance.

The present project was developed within this context at GEPS. It started with an analytical study that revealed the necessity of optimizing gas turbine spare parts flow management. Thus, its main aim is to solve this problematic.

The suggested solution consists on developing a mathematical model, for under constraints optimization, that determines the real needs in terms of spare parts used in preventive maintenance.

By the end of this project, the achieved results are considered as a very performant tool for the execution of the most important maintenance contract in company's history, signed recently with the national company of electricity production SONELGAZ SPE.

**Key words:** optimization, spare parts, preventive maintenance, gas turbine.

## Résumé :

General Electric Power Services (GEPS), est un sous-business d'un conglomérat multinational. Il est actif en Algérie dans le secteur de prestation de service de maintenance des centrales électriques. Dans un tel secteur, la gestion des flux de la pièce de rechange représente une activité clé que l'entreprise doit veiller continuellement à améliorer pour garantir sa performance.

C'est dans ce cadre, que s'inscrit le présent travail effectué à GEPS. Il a pour objectif de répondre à un besoin d'optimisation des flux des pièces de rechange des turbines à gaz, identifié lors de l'analyse que nous avons menée au sein de l'entreprise.

La solution proposée consiste à développer un modèle mathématique d'optimisation sous contraintes permettant la détermination du besoin réel en termes de pièces de rechange, utilisées dans la maintenance préventive. Les résultats obtenus suite à la réalisation de ce travail, constituent un outil très performant pour l'exécution du plus grand contrat de maintenance dans l'histoire de l'entreprise, signé récemment avec l'entreprise nationale de production de l'électricité SONELGAZ SPE.

**Mots Clés :** optimisation, pièce de rechange, maintenance préventive, turbine à gaz.

# Table des Matières

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ABRÉVIATIONS

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	11
<b>Chapitre 1 : Généralités sur la maintenance et la gestion des stocks de pièces de rechange.....</b>	<b>13</b>
1.1 Généralités sur la maintenance des équipements.....	14
1.1.1 Définition de la maintenance .....	14
1.1.2 Les types de maintenance .....	15
1.1.3 L'organisation du service maintenance en entreprise .....	16
1.1.4 Le processus opérationnel de maintenance.....	17
1.2 Généralités sur la gestion des stocks de la pièce de rechange .....	19
1.2.1 Définitions et concepts.....	19
1.2.2 Processus de gestion des stocks de la PDR.....	21
<b>Chapitre 2 : Fondements théoriques de la modélisation des problèmes d'optimisation .....</b>	<b>31</b>
2.1 Modélisation des problèmes.....	32
2.1.1 Modélisation sous contraintes .....	32
2.1.2 La programmation mathématique .....	34
2.1.3 Généralisation .....	34
2.1.4 Quelques classes de problèmes d'optimisation .....	35
2.2 Techniques de résolution.....	35
2.2.1 Méthodes exactes .....	36
2.2.2 Heuristique et méta-heuristique .....	37
2.2.3 Résolution des problèmes d'optimisation à l'aide des outils informatique .....	38
<b>Chapitre 3 : Présentation de l'entreprise General Electric.....</b>	<b>40</b>
3.1 Le conglomérat General Electric .....	41
3.2 GE Power en Algérie.....	43
3.3 GE Power Services en Algérie.....	45
<b>Chapitre 4 : Etude de l'existant et formulation de la problématique .....</b>	<b>49</b>
4.1 Aperçu sur la maintenance des turbines à gaz à GEPS .....	50
4.1.1 Le fonctionnement d'une turbine à gaz .....	50
4.1.2 Procédure de maintenance des turbines à gaz .....	52
4.2 Aperçu sur la gestion des PDR à GEPS.....	55
4.2.1 Généralités .....	55
4.2.2 La nature de la demande des PDR.....	56
4.2.3 Les approches utilisées dans la gestion des stocks de la PDR .....	56
4.2.4 La configuration du réseau de circulation de la PDR au sein de GEPS .....	57
4.2.5 Présentation du logiciel ICAM : Infrastructure Contractual Agreement Modeling .....	58
4.3 Analyse de l'existant par rapport à la gestion des PDR au sein de GEPS .....	59
4.3.1 Classification des PDR par ordre d'importance : .....	59
4.3.2 Analyse des pratiques de gestion des pièces capitales .....	60
4.4 Conclusion et formalisation de la problématique.....	64

<b>Chapitre 5 : Contexte du projet et développement du modèle mathématique .....</b>	<b>65</b>
5.1 Présentation du contexte du projet .....	66
5.2 L'élaboration de la solution proposée : .....	68
5.2.1 Première phase : L'étude préliminaire d'un cas d'application .....	68
5.2.2 Deuxième phase : La construction du modèle mathématique.....	73
5.2.3 Troisième phase : La résolution du modèle mathématique .....	78
5.2.4 Quatrième phase : Validation des résultats .....	79
5.3 Bilan et perspectives du projet .....	80
5.3.1 Valorisation des résultats : .....	80
5.3.2 Perspectives de l'étude :.....	84
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>85</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>87</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>91</b>

# Liste des figures

Figure 1: Processus opérationnel de la maintenance .....	18
Figure 2: Typologies des stocks en entreprise.....	20
Figure 3: Processus opérationnel de la gestion des stocks de pièces de rechange .....	22
Figure 4: Fonctionnement d'un cycle de remplacement sans maintenance préventive .....	26
Figure 5: Fonctionnement d'un cycle de remplacement avec maintenance préventive : scénario 1 .....	27
Figure 6: Fonctionnement d'un cycle de remplacement avec maintenance préventive : scénario 2.....	28
Figure 7: Fonctionnement d'un cycle de remplacement avec maintenance préventive : scénario 3.....	28
Figure 8: Fonctionnement d'un cycle de remplacement avec maintenance préventive : scénario 4.....	29
Figure 9: Contribution des business de GE dans le chiffre d'affaire .....	43
Figure 10: Répartition géographique du chiffre d'affaire de GE power .....	44
Figure 11: Organisation de GE Power en Algérie .....	45
Figure 12: Fonctionnement d'une turbine à gaz dans la chaîne de production d'électricité	50
Figure 13: Les composants principaux d'une turbine à gaz.....	52
Figure 14: Impact de l'évolution technologique des pièces sur le planning de maintenance préventive .....	67
Figure 15: Démarche de construction de la solution proposée.....	68
Figure 16: Organigramme de GEPS .....	94
Figure 17: Aperçu sur l'interface Eclipse pour programmation en JAVA.....	123
Figure 18: Aperçu sur l'interface du IBM CPLEX pour le codage du modèle.....	127
Figure 19: Aperçu de l'interface IBM CPLEX pour configurer les données d'entrée .....	127
Figure 20: Aperçu sur l'interface IBM CPLEX pour l'affichage des résultats .....	128
Figure 21: Aperçu sur le fichier excel utilisé pour extraire les données sur CPLEX.....	128

# Liste des tableaux

Tableau 1: Comparaison entre les différents types d'organisation du service maintenance en entreprise .....	17
Tableau 2: Typologie des pièces de rechanges.....	21
Tableau 3: Exemples de turbines à gaz maintenues par GEPS en Algérie.....	47
Tableau 4: Les types d'inspections de démontage d'une turbine à gaz.....	54
Tableau 5: Appréciation des critères d'importance des PDR .....	59
Tableau 6: Classification des PDR par ordre d'importance .....	60
Tableau 7: Présentation des deux sites de l'étude préliminaire .....	69
Tableau 8: Planning de maintenance préventive du site A.....	70
Tableau 9: Planning de maintenance préventive du site B.....	70
Tableau 10: Données d'entrée relatives aux pièces capitales pour l'étude préliminaire .....	71
Tableau 11: Les ordres d'achat prévus pour les pièces capitales dans les deux sites A et B .....	71
Tableau 12: Comparaison des résultats dans le site A .....	81
Tableau 13: Comparaison des résultats dans le site B.....	81
Tableau 14: Gains réalisés dans les deux sites .....	82
Tableau 15: Gain de la gestion mutuelle des deux sites A et B .....	83
Tableau 16: Liste des pièces de rechange d'une turbine à gaz, et leurs prix .....	108
Tableau 17: Evaluation des pièces de rechange par rapport aux critères choisis .....	113
Tableau 18: Historique des arrêts imprévus pour les turbines à gaz de type 9FA dans le monde .....	121
Tableau 19: Scénario 1 d'un exemple de simulation manuelle.....	122
Tableau 20: Scénario 2 d'un exemple de simulation manuelle.....	122

# Liste des abréviations

GEPS : General Electric Power Services.

PDR : pièces de rechange.

HGPI : (Hot Gas Path Inspection) inspection de la partie chaude.

CI : (Combustion Inspection) inspection de la partie combustion.

MI : (Major Inspection) Inspection générale.

CSA : (Contract Service Agreement) Contrat de service.

O&M : Opération & Maintenance.

ICAM : (Infrastructure Contractual Agreement Modeling) Logiciel de modélisation des infrastructures d'exécution des contrats.

S1B : (Stage 1 Buckets) Le kit des aubes du 1<sup>er</sup> étage de la partie turbine.

S1N : (Stage 1 Nozzles) Le kit des directrices du 1<sup>er</sup> étage de la partie turbine.

S1S : (Stage 1 Shrouds) Le kit des sabots du 1<sup>er</sup> étage de la partie turbine.

S2B : (Stage 2 Buckets) Le kit des aubes du 2<sup>eme</sup> étage de la partie turbine.

S2N : (Stage 2 Nozzles) Le kit des directrices du 2<sup>eme</sup> étage de la partie turbine.

S2S : (Stage 2 Shrouds) Le kit des sabots du 2<sup>eme</sup> étage de la partie turbine.

S3B : (Stage 3 Buckets) Le kit des aubes du 3<sup>eme</sup> étage de la partie turbine.

S3N : (Stage 3 Nozzles) Le kit des directrices du 3<sup>eme</sup> étage de la partie turbine.

S3S : (Stage 3 Shrouds) Le kit des sabots du 3<sup>eme</sup> étage de la partie turbine.

CAP : Le kit des couvercles des chambres de combustion.

FN : (Fuel Nozzle) Le kit des injecteurs de fuel.

LN: (Liner) Le kit des tubes de flames.

TP: (Transition Piece) Le kit des pièces de transition.

## Introduction Générale

*« Pour ce qui est de l'avenir, il ne s'agit pas de le prévoir, mais de le rendre possible. »*

*Antoine de Saint-Exupéry*

Dans un contexte économique marqué par une concurrence accrue, le besoin d'améliorer le triptyque coût, qualité et service, est primordiale pour assurer la pérennité de l'entreprise quel que soit son secteur d'activité. Dans ce sens, l'optimisation des processus industriels représente une des démarches les plus répandues, et ce à travers l'amélioration d'une de leurs fonctions clés, où on retrouve notamment la maintenance des équipements, cette activité chargée de maintenir les moyens productifs en bon état de fonctionnement.

Aujourd'hui la définition de la maintenance en entreprise est plus large. Elle désigne toutes les activités des instances de direction qui déterminent la stratégie et les politiques à mettre en œuvre afin de proposer à son client interne la continuité requise du fonctionnement des équipements au meilleur prix. C'est une définition, qui comprend également la maîtrise et l'optimisation des coûts liés à ses activités, et qui peuvent atteindre plus de 50% des coûts totaux de production.

Le succès d'une politique de maintenance, évoque inévitablement le besoin d'un stock de pièces de rechange, géré d'une manière rigoureuse, dans le but d'assurer leur disponibilité au moment des interventions.

Etant à l'intersection entre maintenance et gestion des stocks, la gestion des pièces de rechange représente un levier clé de la performance industrielle, qui, en étant efficace et articulée, permettrait de réaliser des gains capitaux. Cette importance se voit encore plus prépondérante dans le cas d'une entreprise dont le secteur d'activité est la prestation de service de maintenance. Tel est le cas pour General Electric Power Services (GEPS), le prestataire de maintenance qui détient la plus grande part du marché de maintenance des centrales électriques en Algérie. Il propose un large portefeuille de service, dont le client principal est l'entreprise nationale de production de l'électricité : SONELGAZ SPE, responsable de l'alimentation du réseau national en puissance électrique.

Ce positionnement fort par son ampleur, mais sensible en même temps aux défis imposés par l'importance de sa mission, ajoute à la gestion des pièces de rechange au sein de GEPS, un degré plus élevé d'importance. Ceci est clairement justifié par les dépenses conséquentes engendrées par l'acquisition et le stock des pièces de rechange d'une part, et les coûts énormes qui peuvent avoir lieu en cas de pénurie, d'autre part. Il s'agit alors de trouver un compromis entre disponibilité des pièces en stock, et les coûts élevés qu'elle engendre. Cela positionne la prévision de la demande en pièces de rechanges au centre des préoccupations des dirigeants de GEPS, pour prendre des décisions cohérentes tout en s'alignant aux objectifs de l'entreprise. Ces décisions répondent principalement à deux questions étroitement liées : Quand et combien approvisionner ?

Le présent travail s'inscrit dans le cadre d'une démarche d'amélioration, adoptée par GEPS pour optimiser les flux de pièces de rechange qu'elle va gérer dans l'exécution du plus grand contrat de son histoire, signé récemment avec SONELGAZ.

Ce travail, consiste à élaborer un modèle d'optimisation adapté à la gestion de la catégorie la plus importante des pièces de rechange, ayant pour but la réduction des écarts entre les estimations du besoin en ce type de pièces, et le besoin réel.

En vue d'exposer notre travail de manière claire, le présent document est structuré en cinq chapitres répartis comme suit :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation de l'ensemble des notions théoriques et conceptuelles liées à la maintenance des équipements en entreprise et la gestion des stocks de la pièce de rechange ;
- Le deuxième, porte sur les fondements de la modélisation mathématique des problèmes d'optimisation, et leur résolution ;
- Le troisième chapitre présente l'entreprise GEPS en Algérie et son secteur d'activité ;
- Le quatrième chapitre : décrit dans un premier temps, les éléments principaux qui constituent l'environnement du travail de l'entreprise, notamment ceux relatifs à la maintenance des turbines à gaz, et à la gestion des stocks des pièces de rechange correspondantes. Ensuite, il présente l'analyse effectuée sur les pratiques de gestion des pièces de rechange nommée : « les pièces capitales », classées les plus stratégiques pour l'entreprise. Finalement, il expose d'une manière claire la problématique qui fait l'objet de ce travail.
- Le dernier chapitre, constitue notre contribution à la résolution de la problématique. Il comprend toutes les étapes de la conception du modèle d'optimisation de la gestion des flux des pièces capitales, ainsi que la validation de ses résultats.

Les résultats obtenus à l'issue de cette étude, étant très satisfaisants, nous ont incités à suggérer des perspectives d'amélioration, visant à faciliter la mise en œuvre de la solution proposée.

## **Chapitre 1 : Généralités sur la maintenance et la gestion des stocks de pièces de rechange**

*« L'objet de la science est la connexion  
des phénomènes »*

*Ernst Mach*

Tout équipement, quelle que soit la matière dont il est composé, est exposé à des phénomènes d'usure, de fatigue, de rupture et bien d'autres formes de détérioration ; d'où l'apparition de la notion de « Maintenance ». Cette dernière a toujours existé au sens de dépannage et de réparation des équipements défectueux, cependant, au départ, elle était peu ou non formalisée : elle n'était pas nécessairement assurée par un personnel spécialisé, ni encadrée par des méthodes spécifiques. De plus, elle consistait essentiellement à réparer un équipement une fois que celui-ci était défectueux, sans pour autant intégrer la notion du « préventif » c'est-à-dire des interventions visant à prévenir une panne.

L'évolution de la maintenance est due principalement à une prise de conscience croissante des avantages apportés par la maintenance préventive. En effet, il est toujours préférable d'intervenir avant la défaillance pour des raisons de sécurité : une panne qui se produit dans un avion lors du vol, ne peut en aucun cas être traitée sans dégâts matériels et/ou humains très lourds, par contre elle peut être évitée si le traitement est fait avant que la panne ne se produise. De plus, une intervention avant la panne coûte toujours moins cher qu'une intervention après, et permet donc d'épargner des coûts directs et indirects qui peuvent atteindre des montants très élevés.

Les opérations de maintenance font appel à un remplacement des pièces défectueuses, d'où le besoin d'un stock de pièce de rechange.

Le processus de gestion de la pièce de rechange a pour finalité principale, la mise à disposition des équipes de maintenance, les pièces de rechange et plus généralement tous les articles (consommables, matières, etc.) nécessaires aux interventions d'entretien, tout en respectant les délais requis.

Le chapitre présent est consacré aux fondements théoriques de ces deux notions complémentaires : la maintenance des équipements en entreprise et la gestion des stocks des pièces de rechange.

## 1.1 Généralités sur la maintenance des équipements

### 1.1.1 Définition de la maintenance

D'après l'Association Française de la Normalisation [AFNOR] la fonction de la maintenance en entreprise se définit comme étant : « l'ensemble des 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 ». C'est une activité indispensable dans tous les secteurs, et plus particulièrement dans l'industrie, où elle se penche sur les machines et robots des lignes de production.

L'automatisation de ces dernières, la complexité grandissante des tâches à accomplir, ainsi que l'usage intensif des équipements de fabrication, représentent les facteurs majeurs de l'évolution des méthodes et techniques de la maintenance dans le secteur industriel. Une connaissance approfondie des systèmes, et des niveaux de qualification élevés des opérateurs, sont donc, devenus indispensables pour la maîtrise de cette fonction.

La maintenance est indissociable des objectifs conduisant à la réduction et si possible l'évitement des arrêts de production. En général, ces objectifs peuvent être résumés par les points suivants :

- Assurer la production prévue en quantité en assurant une disponibilité maximale des biens de production : Cela consiste à faire constamment des compromis entre les besoins de production et les arrêts nécessaires à la maintenance avant défaillance. Ces efforts doivent avoir comme but de garantir un bon fonctionnement continu des équipements et de prévenir les pannes et les défaillances
- Maintenir la qualité des produits fabriqués : les méthodes de maintenance ainsi que la détérioration progressive des équipements figurent parmi les facteurs majeurs de la non-qualité. Cette dernière coûte très cher à l'entreprise, et nécessite donc la surveillance continue des tolérances admissibles en qualité afin de rectifier les situations problématiques.
- Respecter les délais : Comme les programmes et les calendriers de production ont été réalisés en collaboration entre la production et la maintenance, il est essentiel que le service maintenance respecte ses prévisions de temps d'intervention. Cette responsabilité exige de connaître en tout temps exactement l'état de chaque équipement afin de garantir son fonctionnement durant les périodes prévues.
- Rechercher les coûts optimaux : le service maintenance devra également être capable d'élaborer des devis précis de réparation prenant en compte les coûts directs de l'opération, les coûts d'approvisionnement en pièces de rechange, ainsi que les coûts indirects liés à l'arrêt de l'équipement.
- Respecter les objectifs humains : Les opérations de la maintenance ont toujours été et continueront d'être des opérations à haut risques, tant pour son personnel que pour le reste des employés de l'entreprise, en particulier la production. Toute intervention doit être accompagnée de mesures de réduction des risques.

## 1.1.2 Les types de maintenance

Les actions de la maintenance peuvent être classées en fonction de leurs finalités, de leurs résultats et des moyens techniques d'intervention qu'elles utilisent. Trois catégories majeures ont été définies selon leur apparition au fil du temps [Lalloux, 2009] :

### 1.1.2.1 La Maintenance Corrective

C'est l'ensemble des activités réalisées après la défaillance d'un bien ou la dégradation de sa fonction, afin de lui permettre d'accomplir, au moins provisoirement, une fonction requise. Ces activités comprennent la détection ou/et la localisation de la défaillance et son diagnostic, la remise en état avec ou sans modification.

La maintenance corrective peut être assurée de deux manières différentes : le dépannage provisoire qui donne lieu à la maintenance **palliative** en traitant les symptômes, ou la réparation durable qui donne lieu à la maintenance **curative**, en traitant les causes.

### 1.1.2.2 La Maintenance Préventive

Elle regroupe les activités réalisées selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation du service rendu. Ce type de maintenance se subdivise à son tour en trois sous-types :

- Maintenance Conditionnelle : Elle se traduit par une surveillance des points sensibles de l'équipement, exercée au cours des visites préventives. Ces visites permettent de mesurer des paramètres significatifs et de déclencher l'opération de maintenance si la mesure enregistrée atteint un seuil prédéfini.

- Maintenance Prévisionnelle : C'est une maintenance conditionnelle, mais qui est exécutée sur l'évolution des mesures enregistrées et non pas sur leurs valeurs ponctuelles, elle se fait suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation des paramètres significatifs de la dégradation du bien.
- Maintenance Systématique : Elle se traduit par l'exécution sur un équipement à dates planifiées, ou à volume prédéfini d'unités d'usage atteint, d'interventions dont l'importance peut s'échelonner depuis le simple remplacement de quelques pièces jusqu'à la révision générale.  
Une démarche systématique suppose une parfaite connaissance du comportement de l'équipement, de ses modes et sa vitesse de dégradation. Elle se pratique dans le cas où une sécurité de bon fonctionnement quasi absolue est souhaitée, en remplaçant suffisamment tôt, les pièces ou organes victimes d'usure ou de dégradation.

### 1.1.2.3 La Maintenance Améliorative

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

### 1.1.3 L'organisation du service maintenance en entreprise

Le modèle organisationnel de la maintenance au sein d'une entreprise peut prendre plusieurs formes qui seront des adaptations de trois configurations : organisation centralisée, organisation décentralisée et organisation fonctionnelle.

L'organisation centralisée est basée sur une localisation unique à partir de laquelle les équipes de travail sont assignées pour effectuer les travaux généralement pour toutes les installations de l'entreprise. Les différents métiers sont séparés, pouvant avoir ou non chacun leur propre contremaître, superviseur ou chef d'équipe.

Quant à l'organisation décentralisée, elle repose sur une division géographique des équipements à entretenir, pouvant comporter chacune un atelier et un contremaître avec plusieurs métiers et individus multidisciplinaires.

Alors que dans l'organisation fonctionnelle, les responsabilités sont regroupées par types d'activités majeures telles que la maintenance préventive, la rénovation, les installations nouvelles, les travaux lourds ou spécialisés.

Evidemment, aucune structure organisationnelle ne se retrouve sous une seule forme dans la réalité. En effet, le choix d'un type d'organisation adaptée dépend de plusieurs facteurs prenant en considération les avantages et les inconvénients de chacune des configurations précédemment citées. [Cuignet, 2007].

Le tableau 1 présente les avantages et les inconvénients de chaque type d'organisation du service maintenance en entreprise.

	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
Organisation centralisée	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consolidation de la supervision à travers un personnel homogène et solidaire.</li> <li>• Concentration de l'expertise.</li> <li>• Capacité accrue à répondre à une situation urgente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temps de réponse plus long à la plupart des urgences.</li> <li>• Moins de connaissances des détails des équipements.</li> <li>• Demande un effort de communication plus important entre l'administration et les employés.</li> </ul>
Organisation décentralisée	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduction du temps de déplacement et de communication.</li> <li>• Supervision et suivis plus rapprochés.</li> <li>• Exploitation des qualités multidisciplinaires du personnel.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perte d'expertise commune par le personnel d'encadrement.</li> <li>• Duplication d'équipements, outils et magasins.</li> <li>• Plus de charge administrative pour le superviseur.</li> </ul>
Organisation fonctionnelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Meilleure utilisation d'outillage et des équipements spécialisés.</li> <li>• Economie sur les projets et meilleure efficacité sur les travaux répétitifs.</li> <li>• Utilisation très efficace de l'expertise en termes d'exigences légales et réglementaires</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monopolisation d'équipements, matériaux ou outils qui seraient utiles au reste de l'organisation.</li> <li>• Des tâches répétitives et difficiles à coordonner.</li> </ul>

Tableau 1: Comparaison entre les différents types d'organisation du service maintenance en entreprise [Lalloux, 2009].

#### 1.1.4 Le processus opérationnel de maintenance

Il existe un cheminement de base répandu pour assurer la bonne exécution de la maintenance, il s'agit d'une représentation macroscopique du processus d'intervention. Ce dernier est composé d'un ensemble d'activités connectées par des flux de matière et d'informations [INRS-ND 2294-212-08, 2008]<sup>1</sup>, schématisés dans la figure 1.

<sup>1</sup> INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité) : organisme public de référence dans les domaines de la santé au travail, et de la prévention des risques professionnels et des accidents du travail.

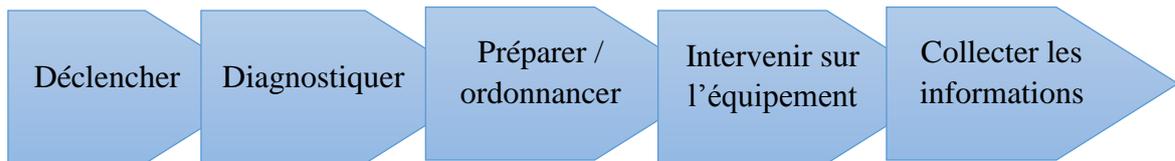


Figure 1: Processus opérationnel de la maintenance

- **Le processus « Déclencher »** : se décompose en deux sous processus : « constater le besoin d'intervention » et « émettre la demande d'intervention ». Le premier est réalisé par le personnel de production (constat d'une panne par un utilisateur ou un personnel d'exploitation) ou par le personnel de maintenance (mise en place d'un échancier). Pour le second, il s'agit d'émettre, de manière orale ou écrite, une demande d'intervention vers le service maintenance. Le produit de ce processus est un ordre d'intervention validé.
- **Le processus « Diagnostiquer »** : c'est un processus complexe qui consiste en un premier temps à observer les symptômes de la défaillance ou de la dégradation, puis à en identifier les causes. Ce processus produit un état diagnostiqué selon la demande d'intervention.
- **Le processus « Préparer / Ordonnancer »** : se décompose en deux sous processus : « Identifier les priorités d'intervention » et « Ordonnancer les actions ». Le premier s'exécute suivant des critères qui sont, en maintenance corrective, des critères d'urgence et en préventif des critères de périodicité. Le second correspond à la préparation des outillages, des pièces de rechange et les intervenants qualifiés. La fin de ce processus est marquée par l'élaboration des actions à réaliser.
- **Le processus « Intervenir sur l'équipement »** : il est composé quant à lui de plusieurs sous processus à savoir : « consigner l'équipement » en le séparant de la chaîne de production pour empêcher l'accès aux personnes non autorisées ; « réaliser les travaux » où il s'agit de la réalisation de l'intervention sur l'équipement lui-même ; « déconsigner l'équipement » qui consiste à rétablir les énergies de l'équipement maintenu ; « réaliser les essais » à travers la vérification de l'efficacité de l'intervention par des tests et des mises à point ; et finalement « remettre en service » qui représente l'interface entre la maintenance et la production et permet de réceptionner l'équipement par cette dernière.
- **Le processus « Collecter les informations »** : il est composé en deux sous processus, à savoir : « réaliser le compte rendu » sous forme écrite ou oral avec toutes les caractéristiques de l'intervention ; et « archiver les informations » qui permet d'obtenir une traçabilité des interventions en vue de réaliser un retour d'expérience.

**L'ensemble des flux circulant entre ces processus comprend :**

- Le flux méthode contenant les procédures, les gammes de maintenance, la gestion de temps, de charge de travail et de personnel.
- Le flux matériel regroupant les outillages, les pièces de rechange, les consommables, etc.

- Le flux base de données de retour d'expérience correspondant en moyenne d'actualisation des connaissances sur les équipements et les conditions d'intervention.
- Le flux planning qui permet de connaître les priorités des interventions, il est en lien direct avec le processus « produire ».
- Le flux équipement qui renseigne principalement l'état de l'équipement concerné.
- Le flux politique représente la politique générale de l'entreprise qui inclut la politique de maintenance.

La fonction de maintenance comprend également la maîtrise et l'optimisation des coûts liés à ses activités, dans le but de pouvoir proposer à son client interne la disponibilité requise des équipements au meilleur prix. Dans ce sens, l'optimisation de la gestion des pièces de rechange des équipements représente un levier clé de performance des activités de maintenance. D'une part, la remise en fonctionnement des actifs après défaillance et donc leur disponibilité dépendent directement de la mise à disposition des pièces qui les composent. D'autre part, ces pièces représentent un poste important du budget de maintenance, tant en termes d'achat que des coûts logistiques (transport, stockage, manutention).

## 1.2 Généralités sur la gestion des stocks de la pièce de rechange

### 1.2.1 Définitions et concepts

#### 1.2.1.1 Les stocks

La notion de stock désigne l'ensemble des biens possédés par l'entreprise, entreposés dans l'attente d'une utilisation ultérieure dans le cycle d'exploitation.

Cette immobilisation matérielle et financière qui permet d'alimenter les utilisateurs au fur et à mesure de leurs demandes, a pour finalité la coordination temporaire entre les besoins des différentes phases de production, allant des opérations d'achats de matières premières jusqu'aux opérations de vente des produits finis.

La marchandise stockée peut être répartie dans des catégories qui diffèrent d'une entreprise à une autre, selon les paramètres de classification choisis, le domaine d'activité et/ou la politique de stockage adoptée. [Rego et al, 2011]. La répartition des stocks la plus répandue inclut les catégories présentées dans la figure 2.

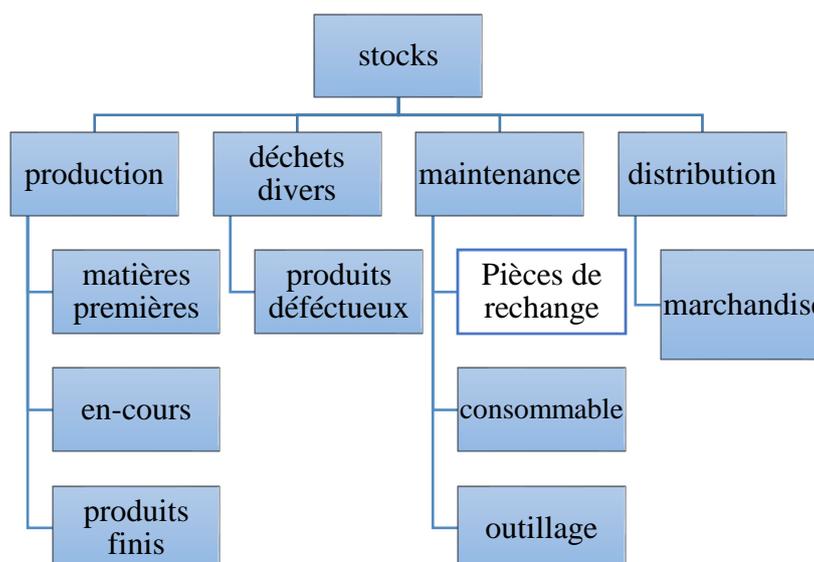


Figure 2: Typologies des stocks en entreprise [Arnoux, 2004]

### 1.2.1.2 La pièce de rechange :

Le terme « pièce de rechange », est souvent utilisé pour désigner : un composant élémentaire, un sous-ensemble ou tout un équipement préservé pour servir ultérieurement à remplacer une pièce défectueuse ou dégradée dans un système donné.

Selon la norme française **NF X 60-012**<sup>2</sup>, une pièce de rechange est définie comme étant : « un article destiné à remplacer une pièce défailante ou dégradée sur un bien donné ».

Cette définition implique clairement qu'il s'agit d'un élément clé de la gestion de maintenance, dont la disponibilité affecte directement les performances de l'entreprise. La classification des PDR (pièces de rechange) peut se faire selon quatre critères, comme le montre le tableau 2. [Fortuna, 2010], [Pimor, 2008].

<sup>2</sup> Norme française de maintenance pour les termes et les définitions des éléments constitutifs des biens et de leur approvisionnement.

<b>Par destination</b>			
<b>Pièces à remplacement programmé</b> Pièce utilisée dans un remplacement dont le moment d'occurrence est estimé selon la fiabilité souhaitée de la pièce installée.	<b>Pièces à remplacement non programmé</b> Pièces utilisées pour des remplacements dont le moment d'occurrence est aléatoire.	<b>Pièces à remplacement exceptionnel</b> Pièces dont la probabilité d'utilisation est très faible, étant donné que leur durée de vie est au moins égale à celle de l'équipement.	
<b>Par origine</b>			
<b>Pièces d'origine</b> Répondent au cahier des charges constructeur et sont fournies par lui.	<b>Pièces équivalentes</b> Répondent au même cahier des charges que la pièce d'origine, mais non fournies par le constructeur.	<b>Pièces interchangeables</b> Différentes de la pièce d'origine mais elles peuvent accomplir leurs fonctions essentielles.	<b>Pièces adaptables</b> Peuvent se substituer à une pièce d'origine mais après un coût d'adaptation.
<b>Par nature</b>			
<b>Pièces de fonctionnement</b> Subissent des détériorations prévisibles et nécessitent un remplacement périodique.	<b>Pièces d'usure</b> Conçues pour recevoir seules ou en priorité les détériorations prévues.	<b>Pièces de structure</b> Pièces dont la dégradation en usage normal est peu probable.	
<b>Par mode de dégradation</b>			
<b>Pièces subissant une dégradation par l'usure</b> Leur durée de vie suit une loi normale	<b>Pièces subissant une dégradation par surcharge aléatoire</b> Leur durée de vie suit une loi de poisson		

Tableau 2: Typologie des pièces de rechanges [Pimor, 2008].

### 1.2.2 Processus de gestion des stocks de la PDR

Le processus de gestion des stocks de la PDR est un processus de support indispensable pour la maintenance des équipements en entreprise. Du coup, il devient impératif au gestionnaire de la pièce de rechange, de bien cerner le fonctionnement de ce processus. Pour ce faire, il convient d'explicitier les activités clés dont il est composé ainsi que les interactions qui les régissent.

La figure 3 présente quatre activités clés dans le processus de la gestion des stocks des pièces de rechange.

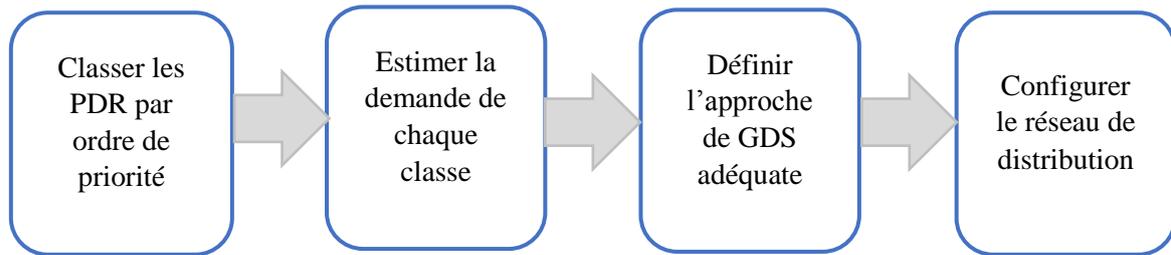


Figure 3: Processus opérationnel de la gestion des stocks de pièces de rechange

### 1.2.2.1 Classification des PDR par ordre d'importance :

Il est déraisonnable d'accorder à chacun des articles le même ordre de priorité dans la gestion des flux en stock, à titre d'exemple, la gestion des fournitures de bureau n'est pas similaire à celle des matières destinées à la production.

Cela montre clairement que la gestion des stocks de la PDR est une gestion sélective basée sur la classification des articles selon des critères d'importance, tels que : la disponibilité sur le marché, le coût de réparation et la fréquence de panne, etc. Plusieurs méthodes ont été développées dans ce sens, parmi lesquelles, on retrouve celles citées ci-dessous.

➤ La méthode PARETO [Collignon, Vermorelle, février 2012] :

La méthode Pareto, figure parmi les moyens fondamentaux utilisés pour une gestion sélective. Il s'agit d'un histogramme dont les plus grandes colonnes sont conventionnellement à gauche et sont décroissantes à droite. Une ligne de cumul indique l'importance relative de chaque partie.

La popularité du principe Pareto, provient d'une part, du fait que la majorité des phénomènes obéissent effectivement à la loi 20/80, c'est à dire 20% des causes produisent 80% des effets, et d'une autre part, de son efficacité comme outil d'aide à la prise de décision, étant donnée la forte influence qui peut avoir lieu si les efforts sont concentrés sur ces 20% des causes.

La classification des articles  $i$  ( $1 \leq i \leq n$ ) dans la gestion des stocks fait souvent appel au principe Pareto. Elle consiste à établir, par rapport à un critère choisi  $C$ , une liste décroissante des articles par leurs valeurs de  $C$  notée  $C_i$ , et y distinguer trois catégories :

- Classe A : Elle est composée des articles constituant 80% des valeurs du critère choisi. C'est l'ensemble des produits les plus importants qui nécessitent une évaluation très fréquente de la politique de gestion.
- Classe B : Composée des articles constituant 15% des valeurs du critère choisi, cette catégorie regroupe des produits moins importants que ceux de la catégorie A, nécessitant une évaluation moins fréquente de leur politique de gestion.
- Classe C : Composée du reste des articles, cette classe peut être gérée avec une évaluation peu fréquente.

Le classement ABC doit être utilisé avec précaution, étant donné qu'il exige l'homogénéité des articles classés. Il est particulièrement répandu dans le domaine de la maintenance et des pièces de rechange. Par ailleurs, l'utilisation du classement ABC ne présente d'intérêt réel que lorsque le nombre d'articles étudiés est suffisamment élevé.

➤ La méthode AMDEC [Diallo, 2006] :

C'est une méthode d'analyse rigoureuse basée sur une logique inductive qui utilise toutes les expériences et compétences disponibles pour examiner systématiquement les modes de défaillance et analyser leurs effets sur les fonctions du système et de ses composants. Son objectif principal est d'identifier les problèmes potentiels pouvant survenir et d'évaluer leur criticité. Elle passe par trois étapes:

- Évalue et note les modes de défaillance suivant trois indices : occurrence (O), sévérité (S) et détection (D) ;
- Calcule l'indice de criticité  $C_r$  pour chacune des causes de défaillance selon l'équation ci-dessous. Cet indice est aussi appelé RPN (Risk Priority Number) dans la littérature  $C_r = S * O * D$
- Hiérarchise les modes de défaillance selon leur indice de criticité.

Les composants prioritaires identifiés par l'AMDEC sont placés sur la liste de pièces de rechange potentielles.

### 1.2.2.2 Estimation de la demande de PDR

Pour chaque catégorie de la liste établie dans le sous processus précédent, il importe d'estimer la quantité requise sur tout le cycle de vie économique de l'équipement qui les fait intervenir. Pour y arriver, il faut estimer le nombre moyen de remplacements à la panne et, le cas échéant, le nombre moyen de remplacements préventifs. Pour ce faire, on retrouve plusieurs types de modèles d'estimation de la demande en PDR, à savoir [Diallo, 2006] :

➤ Estimation d'une demande certaine :

Une demande certaine de PDR décrit le cas où la loi de consommation est connue avec certitude, ou avec un écart négligeable. Ce type de demande est facilement maîtrisé par le gestionnaire étant donné la simplicité des méthodes utilisées pour l'affectation et la planification des tâches et des ressources.

➤ Estimation d'une demande aléatoire : basée sur la loi de dégradation de la PDR

On parle d'une demande aléatoire dans le cas où la consommation de la PDR est aléatoirement distribuée sur l'horizon d'exploitation. Une approche probabiliste est donc adoptée pour l'estimer, en utilisant les caractéristiques des lois usuelles de distribution aléatoire, dont le comportement est connu. Cette démarche consiste à comprendre le comportement de la consommation pour l'aligner avec une de ces lois. Ce comportement est en général, régi par la loi de dégradation de la PDR.

La loi de dégradation d'un composant est une caractéristique qui permettra, entre autres, d'évaluer le risque de sa défaillance, d'estimer le nombre de défaillances sur un intervalle de temps donné, en tenant compte de la stratégie de maintenance en vigueur (taux de service souhaité). Elle est définie par quatre éléments, en l'occurrence :

**R(t) : La fiabilité** du composant, égale à la probabilité que ce composant puisse accomplir ses fonctions requises sur une durée de fonctionnement allant de 0 à t. sur un intervalle de temps, R(t) est nommée fonction de survie du composant.

**F(t) : La mortalité** du composant, égale à la probabilité que ce composant tombe en panne au moins une fois sur une durée de fonctionnement allant de 0 à t. Sur un intervalle de temps donné, F(t) est nommée la fonction de défaillance.

**f(t) : La densité de défaillance**, représente le taux de variation de la fonction de mortalité F(t). Si on pose  $\Delta t$  une variation élémentaire de temps, alors,  $f(t) \cdot \Delta t$  est la probabilité d'avoir une défaillance dans l'intervalle  $]t ; t + \Delta t]$ .

**$\lambda(t)$  : Le taux de défaillance** : représente l'opposé du tax de défaillance relatif f(t). Si on pose  $\Delta t$  une variation élémentaire de temps, alors,  $\lambda(t) \cdot \Delta t$  est la probabilité, si le système est encore en service à l'instant t, de connaître une défaillance dans l'intervalle  $]t ; t + \Delta t]$

Les historiques de pannes sont exploités pour établir la loi de dégradation du composant en fonction de son profil de mission. En l'absence d'historique de pannes et des consommations, on se basera sur les recommandations du fournisseur et éventuellement sur l'avis d'experts. Des historiques de consommation de composants similaires peuvent être aussi considérés pour obtenir un estimé vraisemblable.

- Estimation d'une demande incertaine : basée sur les calculs de prévision

Dans ce cas il s'agit d'une demande dont la loi d'évolution n'est pas connue. On fait appel alors à des méthodes de prévisions qui exploitent l'historique de la consommation pour en tirer le maximum d'information nécessaire à sa maîtrise sans égard au processus de dégradation du composant.

L'historique de consommation des pièces de rechange est influencé par plusieurs facteurs dont certains sont intrinsèques et d'autres extrinsèques. Il peut présenter des pics et des creux qui sont parfois saisonniers ou cycliques. Le choix d'un modèle approprié de prévision doit tenir compte de toutes ces particularités qui affectent la précision de la prévision.

Plusieurs méthodes de prévisions ont été développées pour estimer la demande en PDR. Elles diffèrent par rapport à leur principe de calcul et le type de données qu'elles traitent.

### 1.2.2.3 Les approches de gestion des stocks de la PDR

Bien optimiser ses stocks commence par choisir un modèle de gestion optimal. Même si leur but est le même, i.e. réduire au minimum la quantité stockée pour diminuer les coûts, ces modèles diffèrent d'une entreprise à une autre selon son activité. Dans cette partie du chapitre, trois approches de gestion des stocks de PDR seront abordées.

#### A. Approche basée sur les politiques d'approvisionnement [Furtuna, 2010] :

C'est une approche basée essentiellement sur la détermination de deux paramètres : la date d'approvisionnement et la quantité à commander à chaque fois. En général, il s'agit de faire l'arbitrage entre une date de réapprovisionnement fixe ou variable, et une quantité à commander dans chaque période, fixe ou variable aussi. Quatre modes d'approvisionnement sont alors distingués, à savoir :

➤ Gestion des stocks à flux tendus :

Appelée aussi le « juste à temps », cette méthode consiste à déclencher les approvisionnements suite à une expression de besoins. Elle est réservée uniquement aux business où le client peut accepter un délai relativement court entre sa commande et la livraison.

Une politique de gestion à flux tendus, exige une supply chain parfaitement fiable, permettant une flexibilité importante.

➤ La Gestion Calendaire des stocks :

Un type de gestion adapté à une consommation constante et régulière, il préconise un approvisionnement périodique d'une quantité nommée « le lot économique ». Cette dernière est calculée selon la méthode de Wilson (**voir annexe I**) en ayant comme objectif la minimisation de l'ensemble des coûts liés à l'approvisionnement, tels que : le coût de possession des stocks, le coût de passation de commandes et le coût de rupture.

➤ Le reapprovisionnement périodique :

Une méthode de réapprovisionnement dont le but principal est le maintien du niveau des stocks à un seuil optimal prédéterminé. Le reapprovisionnement se fait à une échéance constante, définie en fonction de la demande moyenne, le délai de réapprovisionnement et le taux de service souhaité. Ce type de gestion est utilisé pour les produits coûteux, périssables ou encombrants, dont la consommation est relativement stable sur une période donnée, c'est un mode qui nécessite des prévisions très fiables de la demande agrégée.

➤ Le point de commande :

Dérivée de la méthode à flux tendu, cette approche apporte un peu plus de flexibilité que les précédentes. Elle consiste à lancer automatiquement une commande lorsqu'un seuil d'alerte de stock minimum est atteint. Il est nécessaire de parfaitement connaître la consommation et ses fluctuations pour un calcul précis de la quantité à commander.

B. Approche basée sur la gestion conjointe des stocks de PDR avec la maintenance  
[Diallo, 2006] :

En s'intéressant à un approvisionnement unitaire, cette approche est utilisée pour des articles encombrants ou dont les coûts d'acquisition, de stockage et de pénurie sont élevés et dont le délai de réapprovisionnement est beaucoup plus court que l'intervalle entre deux pannes qui s'étend sur plusieurs mois ou semestres.

Une des questions qui se pose pour un tel composant est de savoir à quel moment la commande doit être placée sachant que, si elle est trop tardive, il y a un risque de pénurie et si elle est trop anticipée, il y a un risque lié à la possession (coût de stockage, obsolescence, détérioration, vol, etc.). Pour trouver un compromis entre ces deux situations extrêmes, deux modèles ont été développés, le premier est un modèle de base qui s'intéresse uniquement à la maintenance curative, alors que le deuxième projette la problématique sur un plan de maintenance préventive.

- Modèle sans maintenance préventive :

On considère un composant ayant fonctionné sans panne pendant  $t$  unités de temps. A quel instant optimal  $W^*$  ( $W > t$ ) doit-on passer la commande pour espérer obtenir un coût total d'opération minimal (figure 4), sachant que :

$L$  : délai d'approvisionnement du composant de rechange.

$h$  : coût horaire unitaire d'entreposage.

$\pi$  : coût horaire unitaire de pénurie.

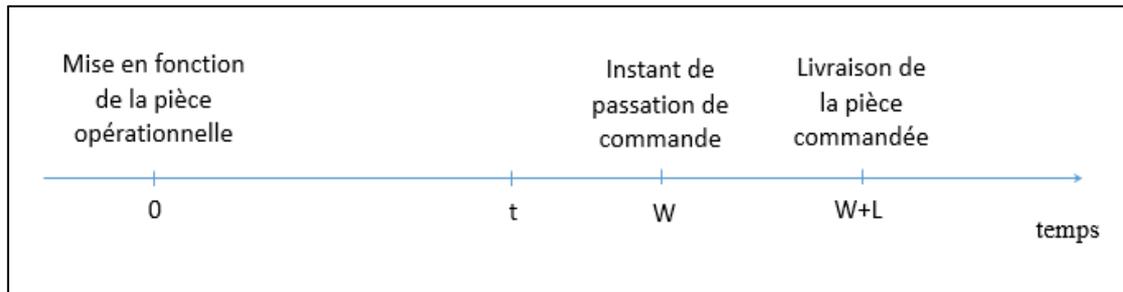


Figure 4: Fonctionnement d'un cycle de remplacement sans maintenance préventive

Le coût total moyen  $CT(W)$  est la somme du coût de stockage  $CS(W)$  de la PDR et du coût de pénurie  $CP(W)$  advenant une panne avant la livraison de la pièce de rechange. La probabilité de pénurie est égale à la probabilité de défaillance entre  $t$  et  $W+L$  sachant que le composant était en vie à  $t$ , et donc le coût de pénurie est donné par :

$$CP(w) = \pi \int_t^{W+L} \frac{f(x)}{R(t)} dx$$

La période de stockage commence avec la livraison de la PDR et se poursuit tant et aussi longtemps qu'il n'y a pas de panne du composant opérationnel. Le coût de stockage total est égal au coût unitaire multiplié par la durée moyenne de stockage :

$$CS(W) = h \int_{W+L}^{\infty} \frac{R(x)}{R(t)} dx$$

L'expression du coût total moyen est égal à la somme des coûts de pénurie et de stockage, donné par :

$$CT(W) = h \int_{W+L}^{\infty} \frac{R(x)}{R(t)} dx + \pi \int_t^{W+L} \frac{f(x)}{R(t)} dx$$

L'instant optimal de lancement de commande  $W^*$  est solution de l'équation :

$$\frac{dCT(W)}{dW} = 0$$

Ce qui donne au final :

$$W^* = \frac{h}{p} * \frac{1}{\lambda} - L$$

- Modèle avec maintenance préventive

Avec le modèle précédent, il n'est pas possible d'envisager des remplacements préventifs encore moins de définir une politique optimale pour procéder au remplacement préventif. Un modèle généralisé avec délai de réapprovisionnement non-constant, a été proposé pour permettre d'énoncer une politique optimale de remplacement.

En plus des paramètres définis précédemment ( $L$ ,  $\pi$  et  $h$ ), le déroulement du processus de remplacement préventif est conditionné par les éléments suivants :

- $t_0$  : le temps de lancement de la commande d'une PDR.
- $t_1$  : la durée de fonctionnement entre deux inspections préventives.
- $t_0 + t_1$  : le temps prévu pour le remplacement préventif.
- $A$  : coût de passation d'une commande normale.
- $A_u$  : coût de passation d'une commande urgente.
- $L_u(t)$  : délai de livraison d'une commande urgente.
- Le composant commence à fonctionner à l'instant 0, et quatre scénarii de panne sont présents :
  - S'il tombe en panne avant  $t_0$  une commande d'urgence est passée, et le composant sera installé une fois reçu.
  - S'il tombe en panne après  $t_0$  mais avant  $t_0 + L$  il s'agit d'un cas de pénurie.
  - S'il tombe en panne après  $t_0 + L$  le composant est déjà en stock et donc il sera placé.
  - Il ne tombe pas en panne avant  $t_0 + t_1$

Ce déroulement peut se faire suivant un des quatre scénarii suivants :

➤ Scénario 1 : La panne se produit avant  $t_0$

La commande normale n'ayant pas encore été placée, il faut donc assumer le coût de la commande d'urgence et les coûts liés à la pénurie qui est représentée par le trait rouge sur la figure 5 :

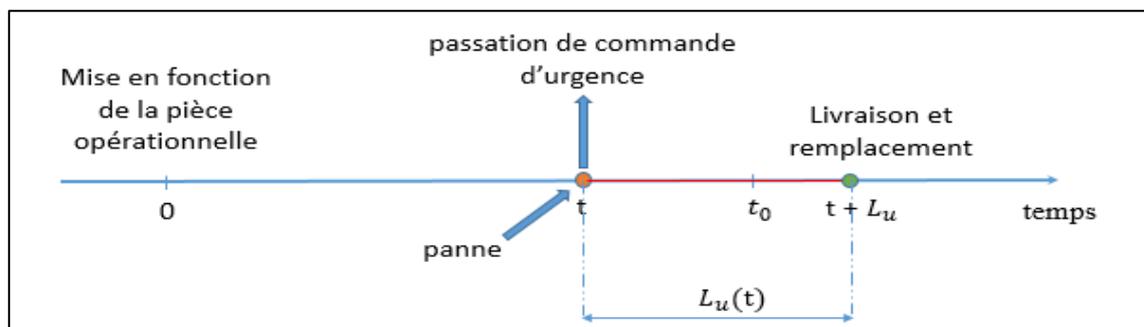


Figure 5: Fonctionnement d'un cycle de remplacement avec maintenance préventive : scénario 1

Le coût engendré est :  $CT_1 = [A_U + \pi L_u(t)] \int_0^{t_0} f(t) dt$

La durée moyenne de remplacement est :  $D_1 = \int_0^{t_0} [t + L_u(t)] f(t) dt$

- Scénario 2 : La panne se produit entre  $t_0$  et  $t_0 + L$

La panne se produit après le passage de la commande normale, mais avant la livraison de la pièce de rechange. Il faut donc assumer les coûts liés à la pénurie (le trait en rouge sur la figure 6) et à la passation de commande normale.

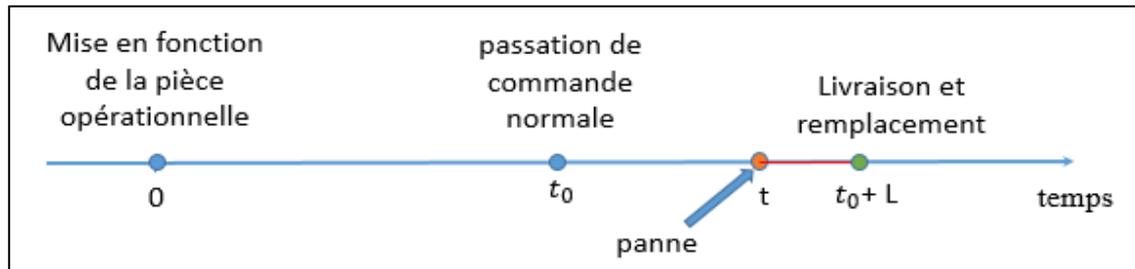


Figure 6: Fonctionnement d'un cycle de remplacement avec maintenance préventive : scénario 2

Le coût est égal à :  $CT_2 = [A + \pi (t_0 + L - t)] \int_{t_0}^{t_0+L} f(t) dt$

La durée moyenne de remplacement est :  $D_2 = (t_0 + L) \int_{t_0}^{t_0+L} f(t) dt$

- Scénario 3 : La panne se produit après  $t_0 + L$  mais avant  $t_0 + t_1$

La panne a lieu après la livraison de la PDR mais avant l'instant du remplacement préventif. Il faut donc assumer les coûts liés à la passation de la commande normale et au stockage de la PDR jusqu'à son utilisation dans l'inspection prévue (le trait jaune sur la figure 7).

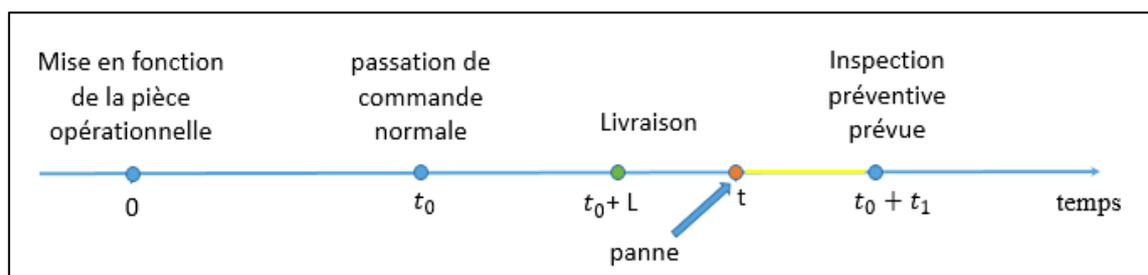


Figure 7: Fonctionnement d'un cycle de remplacement avec maintenance préventive : scénario 3

Le coût qui correspond à ce cas est :  $CT_3 = [A + h(t - t_0 - L)] \int_{t_0+L}^{t_0+t_1} f(t) dt$

Et la demande moyenne est donnée par l'expression :  $D_3 = \int_{t_0+L}^{t_0+t_1} f(t) dt$

- Scénario 4 : Aucune panne ne se produit avant le remplacement préventif à  $t_0 + t_1$

Les coûts à assumer sont reliés à la passation de la commande normale et au stockage de la PDR pendant une durée qui correspond au trait jaune sur la figure 8.

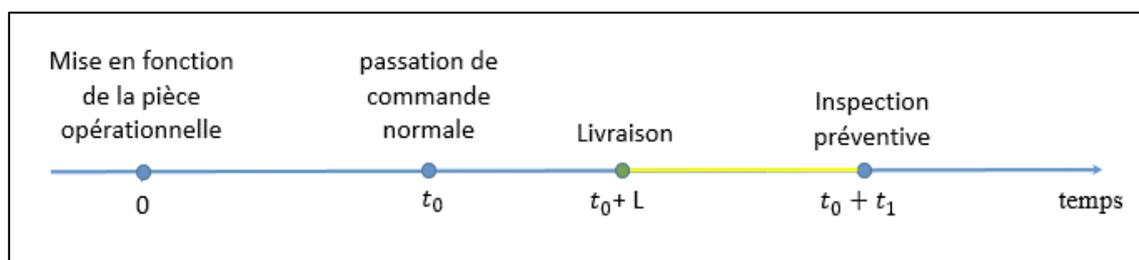


Figure 8: Fonctionnement d'un cycle de remplacement avec maintenance préventive : scénario 4

Le coût supporté dans ce cas est :  $CT_4 = [A + h(t_1 - L)] \int_{t_0+t_1}^{\infty} f(t) dt$

La durée moyenne de remplacement est égale à :  $D_4 = (t_0+t_1) \int_{t_0+t_1}^{\infty} f(t) dt$

Le coût total  $CT(t_0, t_1)$  et la durée moyenne de remplacement  $D(t_0, t_1)$  sont calculés respectivement par la somme des coûts moyens engendrés et des durées moyennes de remplacement pour chaque scénario.

Le modèle est utilisé en vue de déterminer les valeurs de  $t_0^*$  et  $t_1^*$  optimales qui minimisent le coût total moyen  $\overline{CT}(t_0, t_1)$  qui est le rapport du coût total  $CT(t_0, t_1)$  sur la durée moyenne de remplacement  $D(t_0, t_1)$ .

#### 1.2.2.4 Localisation des magasins de stockage de la PDR [Roux, 2011]

L'organisation du réseau logistique des pièces de rechange doit permettre de rationaliser les coûts liés aux pièces de rechange (achat, transport, stockage, distribution) tout en assurant le service attendu par les sites utilisateurs. A cet égard, le choix porte sur une des deux configurations : la mutualisation entre les sites ou la gestion indépendante.

Afin d'explicitier les enjeux de la mutualisation par rapport à la gestion indépendante, il convient d'envisager la comparaison entre deux cas :

**Cas 1** : 5 sites d'un même groupe industriel, utilisateurs d'une même pièce de rechange en provenance d'un même fournisseur (approvisionnements de chaque site en direct du fournisseur)

**Cas 2** : un site parmi les 5 joue le rôle de plate-forme de stockage et de distribution (réceptionne les pièces en provenance du fournisseur et les redistribue aux 4 autres sites, consolide les besoins en provenance des sites et gère les prévisions et les commandes vis-à-vis du fournisseur).

Par rapport au cas 1, le cas 2 présente les avantages suivants :

- Possibilité de massification du transport du fournisseur vers le site de distribution,
- Massification des achats et possibilité de bénéficier de conditions plus favorables,

- « Lissage » des consommations et de l'expression de besoins au fournisseur : le caractère erratique des consommations de chaque site peut être atténué par le cumul des consommations sur les cinq sites,
- Réduction des stocks de pièces de rechange.

En effet, dans le cas où le lead-time du fournisseur (c'est-à-dire le temps entre le déclenchement de la commande et la livraison de marchandise) est supporté par le site de distribution et où celui-ci peut offrir des lead-time réduits aux 4 autres sites, une réduction globale des stocks de protection peut être obtenue.

Pour chacun des quatre sites, la période T de réapprovisionnement est réduite permettant ainsi une diminution de la quantité à tenir en stock. Pour le site distributeur, le stock à tenir augmente (dans la mesure où il doit couvrir les défaillances de 5 sites), mais dans des proportions inférieures. Ce qui rend le bilan globalement favorable à la mutualisation.

Il convient en revanche de s'assurer que les coûts logistiques liés à ce maillon supplémentaire dans la chaîne de distribution des pièces de rechange ne sont pas supérieurs aux gains évoqués ci-dessus. En outre, il n'est pas rare d'observer des dispositifs multi-niveaux de stockage, jusqu'à quatre niveaux de stockage pour tirer le meilleur parti de ces effets de mutualisation de stocks entre sites d'une même organisation.

### **Conclusion**

Ce chapitre a donné un aperçu détaillé sur les fondements théoriques de deux domaines étroitement liés, à savoir : la maintenance des équipements en entreprise, et la gestion des stocks des pièces de rechange.

Les notions abordées permettent d'avoir une visibilité sur les principaux éléments qu'un responsable de gestion des stocks de la PDR doit analyser régulièrement, pour atteindre ses objectifs de disponibilité à moindre coût.

## **Chapitre 2 : Fondements théoriques de la modélisation des problèmes d'optimisation**

*« Le langage est-il l'expression adéquate de toutes les réalités ? »*

Nietzsche

La modélisation est un paradigme générique de résolution de problèmes dont l'une des principales caractéristiques est de distinguer deux grandes tâches principales. En premier lieu, modéliser le problème à résoudre : cette première tâche consiste à formaliser le problème à l'aide de concepts dédiés, dans le but de le reformuler de manière plus abstraite ; En second lieu, résoudre le modèle ainsi obtenu, cette étape vise à appliquer des techniques de résolution qui vont permettre de trouver une (des) solution(s) s'il en existe.

L'objet du présent chapitre est de présenter en détails chacune de ces deux étapes. Dans la première section, on s'intéresse donc à la modélisation des problèmes par contraintes appelée également modélisation sous contraintes, ainsi qu'en programmation mathématique. La seconde section sera quant à elle consacrée aux techniques de résolution de ces problèmes.

## 2.1 Modélisation des problèmes

Dans cette première section, les principales notions utiles à la modélisation des problèmes à résoudre sont présentées : du point de vue de la modélisation sous contraintes dans un premier temps, puis du point de vue de la modélisation mathématique.

### 2.1.1 Modélisation sous contraintes

Cette sous-section introduit le formalisme utilisé en programmation par contraintes pour modéliser les problèmes à résoudre, à savoir [Bonnans, 2006]

#### 2.1.1.1 Problème de satisfaction des contraintes (CSP)

Un CSP est défini par un ensemble fini de variables, chacune pouvant prendre une valeur dans un domaine fini de valeurs possibles qui lui associé, des contraintes portant sur des sous-ensembles de variables représentent des conditions à satisfaire et restreignent l'ensemble des valeurs pouvant être affectées simultanément à ces variables. Plus formellement, Un 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 :  $X_i \in D_i, i = 1, \dots, n$  ;
- $C$  un ensemble  $\{C_1, C_2, \dots, C_l\}$  de contraintes où chaque  $C_i$  définit un sous-ensemble du produit cartésien des domaines des variables sur lesquelles elle porte :  $C_i(X_{i1}, \dots, X_{ik}) \subseteq D_{i1} \times \dots \times D_{ik}$

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

- Un ensemble de valeurs symboliques : on peut vouloir représenter des couleurs, par exemple :  $D = \{\text{rouge, bleu, vert}\}$ , ou encore des jours de la semaine, par exemple  $D = \{\text{lundi, mercredi, samedi}\}$  ;
- Un ensemble d'entiers non contigus : il est possible d'utiliser un ensemble d'entiers quelconques, par exemple :  $D = \{5, 8, 12\}$  ;
- Un intervalle d'entiers : on peut également définir un ensemble d'entiers contigus, en compréhension, ne spécifiant que les bornes inférieure et supérieure de l'intervalle, par exemple :  $D = \{1, \dots, 10\}$  ;

- Un intervalle de réels : de la même façon, on peut définir en compréhension un ensemble de réels, en ne déclarant que ses bornes inférieure et supérieure, par exemple :  $D = [-\pi, \pi]$ .

Chaque variable possède ainsi un domaine initial qui contraint la valeur qu'on peut lui affecter. Si sa valeur est à chercher dans  $\mathbb{N}$ , dans  $\mathbb{Z}$  ou dans tout ensemble discret de valeurs, on parlera de variable discrète. Si sa valeur est à trouver dans  $\mathbb{R}$  ou dans tout sous-ensemble continu de valeurs, on parlera de variable continue. En fonction du type des variables du problème, on pourra donc distinguer trois grandes catégories de problèmes de satisfaction de contraintes : selon qu'il ne contient que des variables discrètes, que des variables continues, ou bien à la fois des variables discrètes et continues, on dira d'un CSP qu'il est discret, continu ou mixte.

Une fois que le domaine initial est défini pour chaque variable, les contraintes sont élaborées pour relier les unes aux autres, restreignant les combinaisons de valeurs autorisées. Cependant il existe aussi des contraintes de différentes natures :

- Contrainte en extension : étant donnée un sous-ensemble de variables, on définit explicitement la liste des tuples autorisés, par exemple  $(a, b, c) \in \{(1, 2, 3), (4, 5, 6)\}$  ;
- Contrainte en intension : une expression arithmétique définit une relation entre plusieurs variables, par exemple :  $(x - 5)^2 + (y - 2)^2 \leq 1$  ;
- Contrainte dynamique : on ajoute une précondition qui doit être vérifiée avant de pouvoir considérer la contrainte ;
- Contrainte dite globale : on peut utiliser une relation prédéfinie, à la signification précise, comme par exemple :  $f([a, b, c])$  qui impose à des variables d'un sous-ensemble de  $X$  de devoir prendre chacune une valeur différente de celle des autres ;
- Contrainte par morceaux : on associe différentes contraintes à différentes parties du domaine des variables sur lesquelles elles sont définies ;
- Contrainte douce : on autorise une telle contrainte à être violée par une solution potentielle, ce qui est utile dans le cas où le problème posé est trop contraint pour avoir une solution.

### 2.1.1.2 Solution d'un CSP

Une solution potentielle du problème consiste à affecter à chaque variable une valeur de son domaine. L'ensemble des solutions potentielles est donc représenté par le produit cartésien des domaines des variables, et l'évaluation d'un CSP est une affectation de valeurs aux variables. Il faut distinguer entre une solution qui est une évaluation satisfaisant toutes les contraintes et une instantiation qui est dite consistante si elle satisfait toutes les contraintes portant sur ses variables.

La solution d'un CSP est un  $n$ -uplet  $S = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ , avec  $S_i \in D_i \forall i$ , pour lequel toute contrainte  $C_j \in C$  est satisfaite, c'est-à-dire, aucune contrainte  $C_j(X_{j_1}, \dots, X_{j_k})$  n'est violée quand chacune des variables  $X_{j_i}$  sur lesquelles elle porte se voit affecter sa valeur correspondante  $S_{j_i}$  dans la solution.

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

### 2.1.2 La programmation mathématique

Le terme de programmation fait ici référence à la description de la planification et de l'ordonnancement d'activités au sein de grandes organisations. L'idée était, d'une part, d'exhiber des liens mathématiques entre des grandeurs variables représentant des quantités à produire ou des niveaux d'activité ; d'autre part, de trouver un moyen d'exprimer un objectif à maximiser ou minimiser en fonction des valeurs de ces grandeurs. La programmation mathématique permet 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 :

$$\text{Max (ou bien Min)} f(X_{k_1}, \dots, X_{k_{n_f}}) \text{ avec } k_1, \dots, k_{n_f} \in N$$

S/C:

$$g_i(X_{i_1}, \dots, X_{i_{n_i}}) = 0 \text{ avec } i, i_1 \in N.$$

$$h_j(X_{j_1}, \dots, X_{j_{n_j}}) = 0 \text{ avec } j, j_1 \in N$$

$$X_p \in R, p \in P \subseteq N$$

$$X_q \in Z, q \in Q \subseteq N, P \cap Q = \emptyset$$

Il consiste à trouver les valeurs des variables qui minimisent la valeur correspondante de la fonction objectif. En outre, cette minimisation peut faire intervenir ou non des contraintes à satisfaire liées à la nature des variables. Certaines variables peuvent être entières, d'autres réelles, et à l'instar d'un CSP, un problème d'optimisation peut être discret, continu ou mixte selon le type des variables qui le constituent.

Le langage de modélisation en usage pour exprimer des problèmes d'optimisation se veut le plus simple possible et utilise une syntaxe basée essentiellement sur celle des mathématiques [Rao, 1996].

### 2.1.3 Généralisation

Le formalisme CSP est considéré comme le cadre le plus naturel pour coder les problèmes faisant intervenir des contraintes. Cependant, de plus en plus de problèmes s'avèrent mixtes de satisfaction de contraintes et d'optimisation. D'où l'extension du formalisme CSP classique au formalisme d'optimisation sous contraintes (CSOP).

Le cadre de CSOP sert à traiter des problèmes d'optimisation faisant intervenir des contraintes fortes et peut donc être considéré comme une extension de CSP classique avec une fonction à optimiser relative à une évaluation numérique de chaque solution. Plus formellement, un CSOP 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 tels que  $X_i \in D_i, i = 1 \dots n$  ;
- $C$  un ensemble  $\{C_1, C_2, \dots, C_t\}$  de contraintes où chaque  $C_i$  est une relation portant sur un sous ensemble de  $X, i = 1 \dots t$ ,
- $f$  une fonction-objectif, définie sur un sous-ensemble de  $X$ , éventuellement constante.

C'est à l'étude et au développement de méthodes de résolution dédiées à ce type spécifique de problèmes que se consacre ce rapport, dans le cas particulier des CSOP qui impliquent à la fois des variables discrètes et des variables continues, [Berger, 2010].

### 2.1.4 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 celle des contraintes, on en distingue cinq classes mais cette liste est loin d'être exhaustive [Berger, 2010] :

- L'optimisation linéaire étudie le cas où la fonction objectif et les contraintes sont linéaires. On retrouve aussi dans les problèmes d'optimisation linéaire des cas où certaines ou toutes les variables sont contraintes de prendre des valeurs entières.
- L'optimisation quadratique étudie le cas où la fonction objectif est une forme quadratique avec contraintes linéaires.
- L'optimisation non linéaire étudie le cas général dans lequel l'objectif ou les contraintes (ou les deux) contiennent des parties non linéaires, éventuellement non-convexes.
- L'optimisation stochastique étudie le cas dans lequel certaines des contraintes dépendent de variables aléatoires.
- 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 utilisable lorsque la fonction objectif est une somme de fonctions monotones croissantes dont les arguments sont des inconnues distinctes.

## 2.2 Techniques de résolution

Cette section introduit en détails le cadre générique de résolution mis en œuvre par la programmation par contraintes ou modélisation sous contraintes.

Dans la résolution des problèmes d'optimisation, il est souvent important de pouvoir formuler le problème étudié sous forme d'un programme linéaire pour lequel il existe de nombreuses méthodes de résolution.

Ces dernières permettent de cerner le problème en indentant sa fonction objectif et Ses contraintes. Ces problèmes linéaires peuvent être résolus à l'aide de plusieurs méthodes déjà existantes.

### 2.2.1 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 :

#### 2.2.1.1 Méthode du SIMPLEXE

Aujourd'hui encore la plus utilisée des méthodes de résolution en programmation linéaire, la méthode du simplexe, développée en 1947 par G. Dantzig. Elle reste cependant la méthode privilégiée de résolution des programmes linéaires formulés dans la pratique. Ceci est dû à ses performances et également à sa capacité à fournir des solutions de base, très importantes dans les approches de décomposition ou encore dans des procédures de ré-optimisation itératives.

D'un point de vue géométrique, étant donné qu'une solution d'un programme linéaire se trouve toujours sur un point extrême du polyèdre des contraintes, le simplexe consiste à se déplacer d'un point extrême à l'autre, le long des arêtes du polyèdre, jusqu'à trouver le point associé à la solution optimale. Algébriquement, le simplexe s'interprète comme la détermination d'une suite de bases adjacentes réalisables telles que les valeurs associées de la fonction objectif soient croissantes [Perrot, 2014].

#### 2.2.1.2 Méthode Branch & 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].

#### 2.2.1.3 Méthode graphique :

Dans le cas d'une programmation linéaire a 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].

## 2.2.2 Heuristique et méta-heuristique

D'après "Annals of Operations Research", "Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization" et "Local Search Algorithms for Combinatorial Problems":

- Une heuristique : c'est une technique de résolution qui permet d'avoir des solutions réalisables et ne garantit pas la qualité des solutions obtenues en termes d'optimalité. Les algorithmes de ces méthodes sont spécialisés à un problème bien précis.
- Une méta-heuristique : c'est une stratégie générique qu'il faut adapter à chaque problème, pour déterminer une technique heuristique pour un problème particulier.

Compte tenu des difficultés de la taille importante des variables que rencontrent les méthodes exactes, où le temps de calcul devient prohibitif, il est préférable d'opter aux heuristiques et les méta-heuristiques pour la résolution du problèmes qui nécessitent énormément de temps, ces méthodes formant un outil significatif pour la résolution efficace des problèmes posés, exploitent au mieux les problèmes d'optimisation dont le but de trouver une solution de qualité raisonnable en un temps de calcul aussi réduit que possible. On retrouve :

### 2.2.2.1 Méthodes de trajectoire

Les méthodes de recherche locale passent d'une solution à une autre dans l'espace des solutions candidates (l'espace de recherche) noté  $S$ , jusqu'à ce qu'une solution considérée comme optimale soit trouvée ou que le temps imparti soit dépassé. La méthode de recherche locale la plus élémentaire est « la méthode de descente ».

Algorithme : La méthode de descente

- 1) Solution initiale  $S$
- 2) Répéter
- 3) Choisir  $S'$  dans un voisinage  $N(S)$  de  $S$
- 4) Si  $f(S') < f(S)$  alors  $S = S'$
- 5) Jusqu'à ce que  $f(S') \geq f(S), \forall S' \in N(S)$

L'inconvénient majeur de la méthode de descente est son arrêt au premier minimum local rencontré. Pour améliorer les résultats, on peut lancer plusieurs fois l'algorithme en partant d'un jeu de solutions initiales différentes, mais la performance de cette technique décroît rapidement. Pour éviter d'être bloqué au premier minimum local rencontré, on peut décider d'accepter, sous certaines conditions, de se déplacer d'une solution  $s$  vers une solution  $S' \in N(s)$  telle que :  $F(S') > f(S)$  [Anghinolfi et Paulucci, 2009].

### 2.2.2.2 Les algorithmes génétiques

Cette méthode d'optimisation itérative est basée sur la théorie de l'évolution des espèces dans leur milieu naturel. Son objective est d'identifier le coût optimal de l'exploitation du stock ainsi que le vecteur optimal des trois paramètres suivants : le taux de défaillance, le taux de réparation et le niveau du stock.

Principe de la méthode :

Ayant une fonction objectif (coût des stocks de PDR en fonction des trois paramètres précédents), l'algorithme sera initialisé par une population de chromosomes distribués aléatoirement sur tout le domaine de définition de chaque paramètre. Pour l'évolution des populations et la génération de nouvelles solutions, l'algorithme utilisera les trois opérateurs génétiques suivants :

- La sélection : consiste à conserver à chaque fois la meilleure solution entre celle en cours et la précédente.
- Le croisement : permet l'exploration de l'espace de recherche en créant de nouveaux individus à partir de croisement des solutions précédentes. Cet opérateur est essentiel pour la convergence de l'algorithme.
- La mutation : permet de muter certains individus sélectionnés afin de changer de direction et d'explorer d'autres solutions. Ce mécanisme d'exploration va permettre d'éviter les optimums locaux.

Ces opérateurs seront affectés de probabilité d'occurrence, l'algorithme recherchera alors la combinaison optimale des paramètres correspondant à la meilleure solution. A chaque génération est créée une nouvelle population avec le même nombre de chromosomes. Au fur et à mesure des générations, les chromosomes vont tendre en général vers l'optimum de la fonction objectif. [Zerrari et Mouss, 2009]

## 2.2.3 Résolution des problèmes d'optimisation à l'aide des outils informatique

### 2.2.3.1 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].

### 2.2.3.2 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 l'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].

### 2.2.3.3 Matlab : Optimization Toolbox

L'Optimisation Toolbox propose des fonctions permettant de minimiser ou d'optimiser 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 des 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, 2017].

### Conclusion

Ce chapitre a fait ressortir la portée de la modélisation des phénomènes rencontrés en industrie à partir des observations et des hypothèses, et ce en déterminant les calculs numériques et algébriques à effectuer, les fonctions à représenter et leurs domaines, ainsi que les simulations à effectuer sur certains paramètres.

## **Chapitre 3 : Présentation de l'entreprise General Electric**

*« Aucun de nous, en agissant seul, ne peut atteindre le succès. »*

Nelson Mandela

La présente étude a eu lieu au sein de General Electric Power Services Algeria, branche de General Electric (GE) une grande multinationale Américaine en Algérie.

L'origine de GE remonte au célèbre inventeur américain Thomas Edison, qui fonda, en 1878, la Société Edison Electric Light. En 1889, l'ensemble des activités de cette dernière a été rassemblée sous la bannière Edison General Electric Company. En 1892, la fusion de cette société avec Thomson-Houston Electric a donné naissance à General Electric (GE). Ce rapprochement avait comme objectif de réunir les efforts de ses deux anciens concurrents afin de fournir des solutions complètes d'installations électriques.

### 3.1 Le conglomérat General Electric

General Electric est aujourd'hui un conglomérat multinational américain, dont le siège se trouve en Fairfield (Connecticut), et emploie environ 300.000 personnes. Il est actuellement présent dans plus de 140 pays, répartis en sept (7) régions à savoir : Australasia, Canada, Latin America, Middle East North Africa and Turkey, Russia and CIS, Sub-Saharan Africa, Greater China, ASEAN.

Depuis sa création, le conglomérat GE développe et acquière de nouvelles technologies et services qui ont considérablement élargi et modifié la portée de ses activités, citées ci-dessous [**General Electric, 2016**] :

- **Renewable energy (Les énergies renouvelables)** : Rend les sources d'énergie renouvelables abordables, accessibles et fiables pour ses clients partout dans le monde. Avec l'un des portefeuilles technologiques les plus étendus de l'industrie, Renewable Energy crée de la valeur pour ses clients avec des solutions de technologies éoliennes, hydroélectriques et des nouvelles technologies à faible teneur en carbone, dans plus de 40 pays dans le monde.
- **Oil & Gas** : Sert tous les segments de l'industrie du pétrole et du gaz, depuis les opérations de forage, d'achèvement, de production et de pétrole, jusqu'au transport par gaz naturel liquéfié et pipelines. En outre, Oil & Gas fournit des solutions de production et de compression industrielle aux segments de raffinage et pétrochimie, elle fournit également des solutions d'intégrité de pipeline et une large gamme de technologies de détection, d'inspection et de surveillance. Ce business exploite l'innovation technologique à partir d'autres segments de GE, tels que l'aviation et les soins de santé, afin d'améliorer continuellement les performances, la production et la productivité de l'industrie pétrolière et gazière.
- **Aviation** : Conçoit et produit des moteurs d'avions commerciaux et militaires, des composants numériques intégrés, des systèmes d'énergie électrique et des systèmes aéronautiques. Le business des moteurs à réaction d'aéronefs, les services de réparation et de maintenance des composants y compris les ventes de la pièce de rechange a une concurrence cruciale.
- **Healthcare** : Fournit des technologies essentielles de soins de santé aux marchés développés et émergents. Ce business possède une expertise dans l'imagerie médicale, les solutions numériques, la surveillance et le diagnostic des patients, la découverte de médicaments, les technologies de fabrication biopharmaceutique et les solutions d'amélioration de la performance.

Les produits et les services sont vendus dans le monde entier principalement dans les hôpitaux, les établissements médicaux, les entreprises pharmaceutiques et biotechnologiques et le marché de la recherche en sciences de la vie.

- **Transportation** : Fournisseur des industries ferroviaires, minières, maritimes, stationnaires et de forage. Les produits et services proposés par le transport incluent : locomotives : en fournissant du fret, les locomotives à passagers ainsi que des services ferroviaires pour aider à résoudre les défis du rail ; services : en développant des partenariats qui prennent en charge les services de conseil, les pièces de rechange, les solutions logicielles intégrées et l'analyse de données ; solutions digitales : en proposant une suite de solutions logicielles permettant aux clients de réduire les coûts opérationnels, d'accroître la productivité et d'améliorer la qualité et la fiabilité des services ; exploitation minière : en fournissant des équipements et des services miniers ; Marine et forage : en proposant des moteurs diesel maritimes et des moteurs diesel à énergie stationnaire pour les plates-formes de forage terrestres et offshore.
- **Energy connections & lighting (les connexions d'énergie et l'éclairage)** : Elle conçoit et déploie des technologies de pointe qui transmettent, convertissent, automatisent et optimisent l'énergie pour assurer une alimentation électrique sûre, efficace et fiable.
- **GE capital** : Elle offre une gamme variée de solutions financières et de services associés aux entreprises et aux consommateurs. Ces solutions incluent les prêts commerciaux, les contrats de location, la gestion des biens d'équipement, les financements et investissements immobiliers, les assurances, les cartes de crédit, certains crédits personnels à la consommation ainsi que d'autres services financiers.
- **GE Power (énergie)** : Fournit à l'industrie, au gouvernement et à d'autres clients dans le monde entier des produits et des services liés à la production d'énergie. Elle utilise des ressources telles que le pétrole, le gaz, le charbon, le diesel et le nucléaire pour produire de l'énergie électrique et comprennent des turbines à gaz et à vapeur. Ce business à son tour se divise en sous business, à savoir :
  - **Gas power systems (Systèmes d'alimentation en gaz)** : Offre un large éventail de turbines à gaz et turbine aérodérivée pour les producteurs d'énergie, allant de petites centrales électriques mobiles à des centrales électriques à grande échelle.
  - **Steam power systems (Systèmes d'alimentation à vapeur)** : Offre une technologie d'énergie à vapeur pour le charbon et les applications nucléaires, y compris les chaudières, les générateurs, les turbines à vapeur et les systèmes de contrôle de la qualité de l'air pour aider à produire et à fournir efficacement des performances et des améliorations pendant la durée de vie d'une centrale électrique.
  - **Power services (les Services liés à la production d'énergie)** : Offre des solutions de maintenance, de service et de mise à niveau sur l'ensemble des actifs de l'usine et sur leur cycle de vie opérationnel.
  - **Distributed power (La distribution de l'énergie)** : Fournit des produits et des services basés sur la technologie pour générer une puissance fiable et efficace au point d'utilisation. Le portefeuille de produits comprend des moteurs à gaz industriels hautement efficaces et flexibles.

- **GE Hitachi Nuclear:** Offre des solutions avancées de technologies de réacteurs, y compris des réacteurs, des carburants et des services de soutien pour les réacteurs à eau bouillante, par une coentreprise « Hitachi et Toshiba », pour la sécurité, la fiabilité et les performances des flottes nucléaires.

Cependant, La concurrence mondiale pour les produits et services de production d'énergie est intense. La demande de production d'électricité est globale et, par conséquent, est sensible aux environnements économiques et politiques de chaque pays.

Le graphe en camembert dans la figure 9, représente les parts du chiffre d'affaire de chaque activité dans le monde [**General Electric, 2016**] :

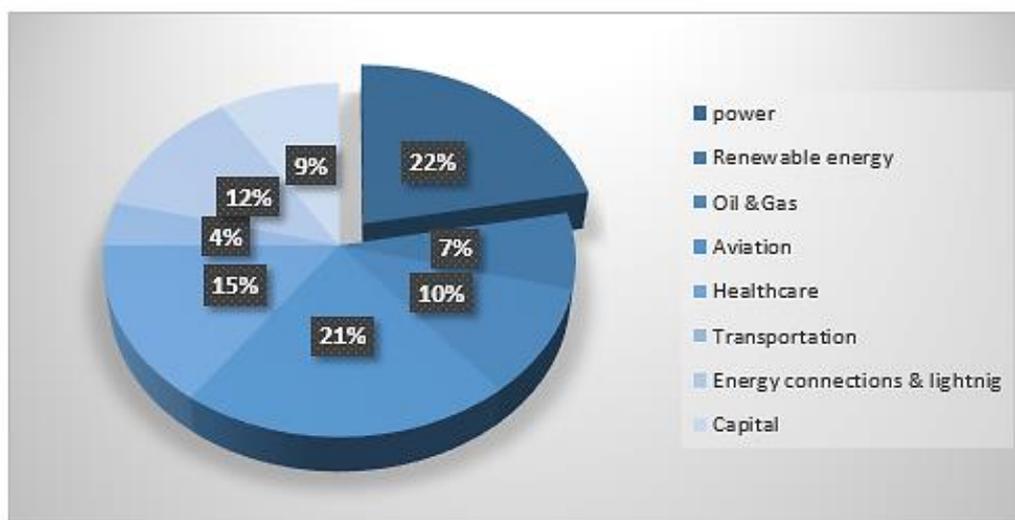


Figure 9: Contribution des business de GE dans le chiffre d'affaire

### 3.2 GE Power en Algérie

GE Power est un leader mondial dans les technologies de la production d'électricité, présent dans 5 grandes régions et emploie plus de 57000 employés. Son chiffre d'affaire pour l'exercice 2016 est de 26,8 milliards de dollars, répartis sur les cinq régions selon les proportions montrées sur le graphe de la figure 10. [**General Electric, 2016**]

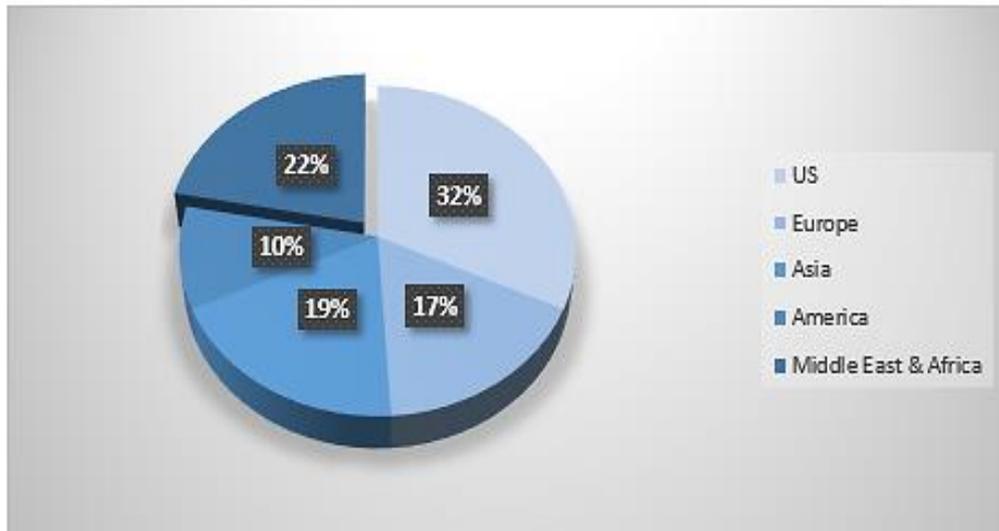


Figure 10: Répartition géographique du chiffre d'affaire de GE power

GE power est présente en Algérie depuis plus de 40 ans avec sa branche : GE Power Algeria, dont le siège social se trouve dans la micro zone industrielle de Hydra, wilaya d'Alger. Elle offre un portefeuille de services varié, comportant : l'installation des centrales électriques, la maintenance, la réparation ainsi que les solutions de mise à niveau et d'optimisation des équipements installés.

GE Power Algeria est le principal fournisseur de l'entreprise nationale de production de l'électricité SONELGAZ SPE en termes d'installation des centrales électriques ainsi que la maintenance de leurs équipements qui sont principalement : **[General Electric, 2016]**

- **Des Turbines à Gaz :** Machines tournantes thermodynamiques appartenant à la famille des moteurs à combustion interne. Leur rôle est de convertir l'énergie contenue dans un hydrocarbure en énergie mécanique utilisée pour faire tourner un alternateur. Elles fonctionnent selon le cycle de Baryton, qui comprend une phase de compression, une phase de chauffage (combustion) et une phase de détente. On distingue cinq parties principales dans une turbine à gaz :
  - L'admission d'air
  - Le compresseur
  - Les chambres de combustion
  - La partie turbine
  - L'échappement
  
- **Des Turbines à Vapeur :** Dispositifs rotatifs destinés à utiliser l'énergie cinétique d'un fluide liquide (l'eau) ou gazeux (vapeur, air, gaz de combustion) pour faire tourner un arbre solidaire des pales de la turbines. Une turbine à vapeur comprend deux étages assurant chacun une ou deux fonctions :
  - La détente de la vapeur qui correspond à la conversion de l'énergie potentielle en énergie cinétique.
  - La conversion de l'énergie cinétique en couple de rotation de la machine par le biais des aubages mobiles.

- **Des Turbines Aéro-dérivatives** : Moteur d'avion dont la fiabilité a diminué, recyclé en générateur d'électricité et ce en étant couplé à un alternateur. Elle est considérée comme étant la meilleure en termes de rendement comparée à ses paires avec un intervalle allant de 38% à 45%. Son principe de fonctionnement est le même que celui d'une turbine à gaz avec des spécificités plus avantageuses.
- **D'autres auxiliaires** : Des équipements indispensables pour le fonctionnement de la centrale électrique. Ils sont installés en vue d'assurer de diverses fonctions nécessaires pour la production de l'électricité. Parmi ces auxiliaires, on retrouve notamment : les générateurs, les postes d'alimentation en fuel, les postes d'alimentation en gaz naturel, les installations de prise d'eau de mer, les chaudières, etc.

L'activité de GE Power Algeria est organisée en deux sous business comme montré sur le graphe de la figure 11: « Gas Power Systems » et Power Services qui opèrent dans différents services.

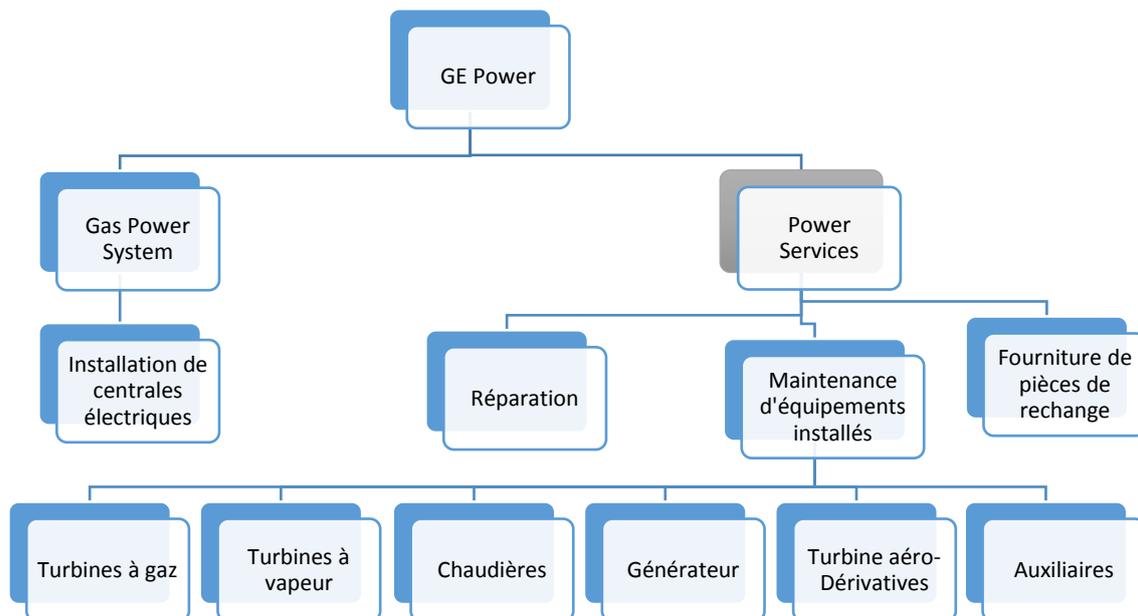


Figure 11: Organisation de GE Power en Algérie

Le présent travail ayant été effectué au sein du sous business Power Services, c'est uniquement ce dernier qui va être détaillé par la suite.

### 3.3 GE Power Services en Algérie

GE Power services (GEPS) en Algérie est principalement responsable de la fourniture des pièces de rechange destinées à la maintenance des centrales électriques y compris la réparation des équipements installés. Elle est gérée sous une organisation matricielle illustrée dans l'organigramme en annexe II.

Son activité consiste en la planification des inspections d'entretien prenant en compte les plans d'exploitation, les priorités de production, les recommandations du fabricant de l'équipement concernant le nombre et les types d'inspections, la planification des pièces de rechange ainsi que d'autres facteurs importants affectant la vie des composants et le bon fonctionnement de la centrale.

Le rôle de la maintenance est crucial pour assurer la disponibilité et la fiabilité des trains de turbines qui, en termes de production d'électricité, se traduit par la maximisation des bénéfices et l'évitement du risque de blessures du personnel et de dommages aux équipements.

Le service de maintenance offert par GEPS en Algérie, diffère d'un client à un autre par rapport à plusieurs facteurs, tels que : la durée du contrat, le type d'intervention, ou encore la limitation des responsabilités. Par conséquent, quatre types majeurs de contrats sont proposés par GEPS en Algérie, à savoir [**General Electric, 2016**] :

- **Contrat de maintenance transactionnel (TX)** : Une réponse à une demande client ponctuelle comprenant une étendue de fourniture répondant à un besoin précis du client. Dans ce cas précis la responsabilité de GE se limitera à fournir au client les prestations en accord avec l'étendue de fourniture spécifiée dans le Contrat. Une fois les travaux terminés, outre la responsabilité légale de garantie, GE aura complété toutes ses obligations vis-à-vis du client.
- **Multi-Year Maintenance Plan (MMP)** : Un engagement à long terme à travers lequel, GE 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. Ce type de contrat permet au client de gérer sereinement la maintenance de sa centrale en maîtrisant ses coûts et sa planification de maintenance.
- **Contractual Service Agreement (CSA)** : C'est aussi un engagement à long terme, 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. De 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)** : Tout comme un contrat de type CSA, un contrat de type O&M est un engagement à long terme qui 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 de GE. 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.

Par ailleurs il est important de signaler que GE Power détient la plus grande partie du marché des installations électriques avec divers types de turbines à gaz implémentées un peu partout sur le territoire national. De plus, les prestations de service de maintenance de GEPS concernent principalement les turbines à gaz. Le tableau 3 en donne quelques exemples [General Electric, 2016] :

Le site	Date début de fonctionnement	Type de turbine (classe)	Nombre d'unité par site	Capacité (MW)	Type de contrat
<b>Kahrama Desalination (Arzew)</b>	2005-2006	9E	3	123	MMP
<b>Oran-Est</b>	2008	6B	2	36	TX
<b>Annaba</b>	2009	6B	2	36	O&M /M MP
<b>Alger Port</b>	2009	6B	2	36	O&M /M MP
<b>Skikda</b>	2005	9FA	2	252	CSA
<b>Koudiet Draouch (El Taref)</b>	2013	9FB	3	269	CSA
<b>Kais (Khenchela)</b>	2019	9FA	4	206	TX
<b>Hassi RMel Fast track</b>	2017	9FA	3	206	TX
<b>Djelfa</b>	2019	9FA	4	216	TX
<b>Oumache (Biskra)</b>	2018	9FA	4	216	TX
<b>Bellara</b>	2019	9FA	4		TX
<b>Naama</b>	2019	9FA	4	189	TX
<b>Hassi Rmel</b>	2019	9FA	2	187	TX
<b>Boufarik Fast track</b>	2017	9FA	3	237	TX
<b>Mostaganem</b>	2020	9FA	4	227	TX
<b>Boutlelis</b>	2019	9FA	2	225	TX
<b>Hadjret Ennous (Cherchell)</b>	2009	9FB	3	269	CSA
<b>Terga (Oran)</b>	2011-2012	GT26	3	276	CSA

Tableau 3: Exemples de turbines à gaz maintenues par GEPS en Algérie

**Conclusion**

Ce chapitre consacré à la présentation de l'entreprise GEPS où le présent travail a été effectué, permet d'avoir une idée claire sur le secteur de prestation de service en maintenance des centrales électriques. Ceci est très important pour bien assimiler l'analyse de l'état des lieux présentée dans le chapitre suivant.

Comme précisé précédemment, les turbines à gaz constituent l'équipement le plus important dans les marchés détenus par GEPS, de ce fait, l'analyse de l'existant élaborée dans ce travail porte principalement sur ce type de turbines.

## **Chapitre 4 : Etude de l'existant et formulation de la problématique**

*« Une cause bien défendue est une cause  
juste. »*

Gheorghe Calinescu

Le présent chapitre s'intéresse en premier lieu à la maintenance des turbines à gaz chez GEPS, où il convient d'explicitier les concepts liés ce type d'équipements et de traiter les différents aspects du service maintenance assuré par GEPS à cet égard. Ensuite il met l'accent sur la gestion des stocks de PDR au sein de ce business, un volet de gestion clé dans sa performance. Finalement, une analyse de l'existant par rapport à la gestion des pièces de rechange est développée dans la dernière section, permettant de cerner la problématique objet du présent travail.

## 4.1 Aperçu sur la maintenance des turbines à gaz à GEPS

### 4.1.1 Le fonctionnement d'une turbine à gaz

La turbine à gaz est une machine motrice à mouvement rotatif et à combustion interne, munie d'un compresseur, des chambres de combustion et d'une partie turbine. La figure 12 illustre le fonctionnement de la turbine à gaz dans une chaîne de production de l'électricité :

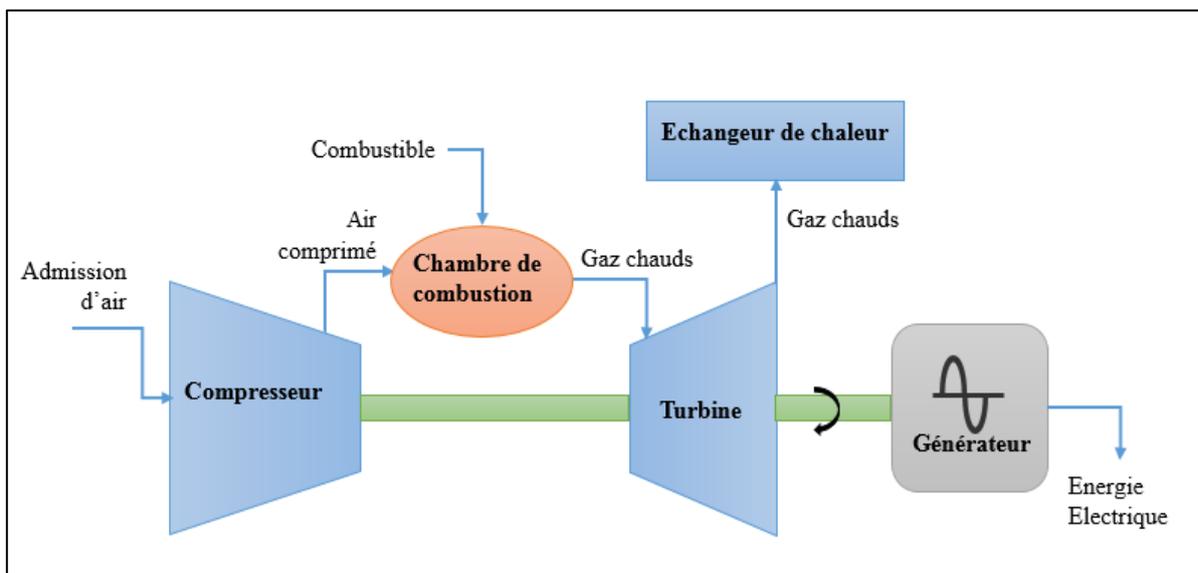


Figure 12: Fonctionnement d'une turbine à gaz dans la chaîne de production d'électricité

L'air atmosphérique, aspiré par le compresseur axial, est comprimé puis refoulé dans la chambre de combustion où est introduit le combustible ; le mélange désiré (air comprimé et gaz sous pression) est obtenu. Une étincelle fournie par une bougie provoque la combustion ce qui va augmenter le niveau d'énergie cinétique.

La chaleur produite dans la chambre de combustion et l'énergie dégagée par le produit de la combustion sont dirigées vers la première roue de la turbine où cette énergie thermique se transforme en énergie mécanique à partir de la rotation de l'arbre.

Une partie de la puissance développée par la turbine sert à l'entraînement du compresseur axial (après son désaccouplement du moteur ou turbine de lancement). L'autre partie de la puissance développée est convertie en énergie utilisable, c'est-à-dire servant à entraîner un Alternateur pour générer de l'énergie électrique.

Etant donné que la problématique traitée dans la présente étude s'intéresse à la gestion de la pièce de rechange, il est opportun de détailler à un certain niveau les composants d'une turbine à gaz [**General Electric, 2016**] :

- 1- **Le compresseur de la turbine à gaz** : est composé de plusieurs étages d'aubes en série. Son rôle est d'aspirer et de comprimer l'air pour l'amener à des vitesses, pressions et températures optimales à l'entrée de la chambre de combustion.
- 2- **Le système de combustion** : est destiné à chauffer l'air qui sort du dernier étage du compresseur afin de lui apporter l'énergie nécessaire de poussée. Il est composé de plusieurs parties, citées ci-dessous :
  - Les injecteurs de combustible (Fuel Nozzles)
  - Les tubes de flammes (Liner)
  - Les Allumeurs ou les bougies (Spark Plug)
  - La pièce de transition (Transition Piece)
  - La chemise de combustion (Flow Sleeve)
  - Le couvercle de combustion (Combustion Casing)
- 3- **La partie Turbine** : récupère l'énergie issue de la combustion des gaz, pour la transférer en énergie rotationnelle au niveau du rotor. Elle est composée principalement de trois étages de :
  - Les aubes rotationnelles (Buckets) : servent à augmenter la vitesse du gaz et donc son énergie cinétique.
  - Les directrices stationnaires (Nozzles) : servent à transformer l'énergie cinétique en énergie
  - Les sabots (Shrouds) : leur fonction est de relier les aubes les uns contre les autres pour affaiblir les vibrations.

En raison de la réduction de pression résultant de la conversion d'énergie à chaque étage, une zone annulaire est nécessaire pour tenir compte de l'écoulement du gaz. Cela augmente la taille des directrices stationnaires et les aubes rotatives pour chaque étage.

- 4- **Les composants de la partie Echappement (Exhaust)** : Ce système transporte les gaz soit vers l'atmosphère ou vers un générateur de vapeur pour récupérer la chaleur.
- 5- **Le boîtier d'entrée (Inlet Casing)** : est situé dans la partie amont de la turbine à gaz. Sa fonction primaire est de diriger l'air vers le compresseur. Dans ce boîtier on retrouve la butée (Thrust Bearing) et les aubes directrices variables (Variable Inlet Guide Vanes).

Ces grandes catégories de composants sont bien illustrées sur la figure 13 dans la page suivante.

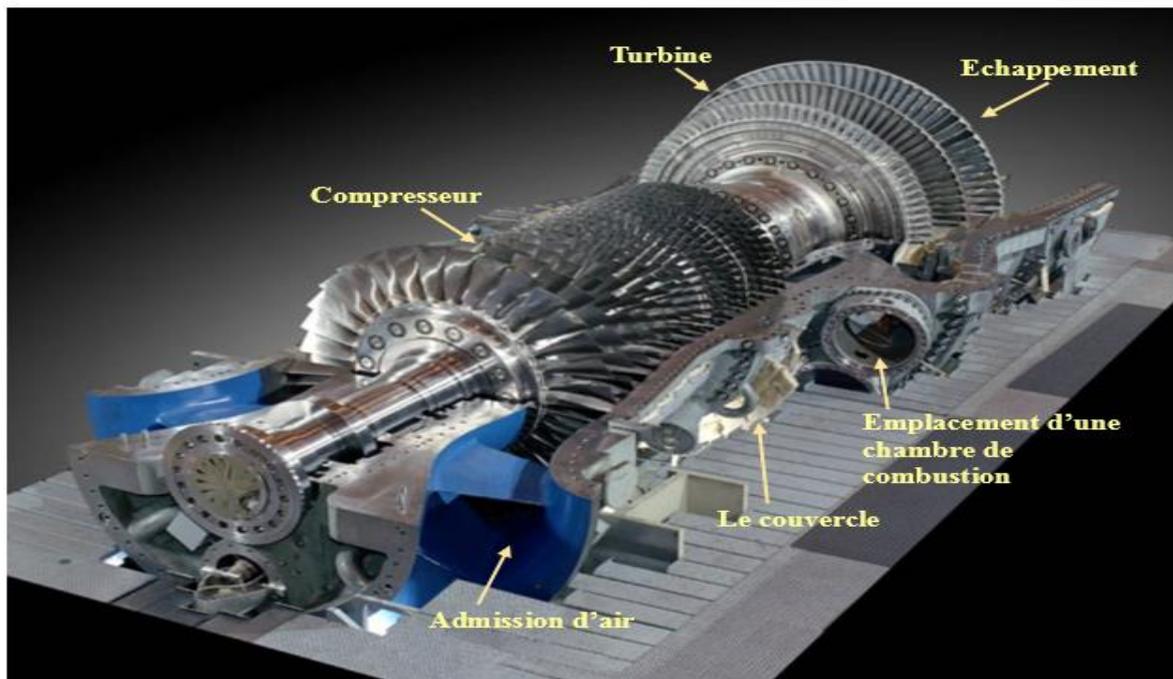


Figure 13: Les composants principaux d'une turbine à gaz

#### 4.1.2 Procédure de maintenance des turbines à gaz

Comme tout équipement rotatif, le fonctionnement de la turbine à gaz nécessite un programme planifié d'inspections périodiques en réparant ou en remplaçant des pièces si nécessaires, afin d'assurer la disponibilité et la fiabilité maximale de l'unité.

Les intervalles d'inspection sont basés sur le jugement technique et l'expérience acquise avec les turbines à gaz, c'est-à-dire, ils devraient être basés sur l'expérience d'exploitation de l'utilisateur, sur les conditions ambiantes tels que l'humidité, la poussière et l'atmosphère corrosive, ainsi sur quelques principaux facteurs, tels que : le nettoyage du compresseur et l'enregistrement des données d'exploitation avant et après l'inspection.

La performance des inspections peut être optimisée pour réduire le temps de panne de l'unité et le coût de maintenance pour un mode de fonctionnement particulier, pour cela on s'attend à ce que le programme de maintenance commence par un travail mineur, et augmente dans une période de temps à une révision majeure.

Les types d'inspection présentés dans cette partie s'inscrivent dans le programme de maintenance préventive établi par GEPS. Elles peuvent être classés de manière générale en fonction de l'état de l'unité de production : "en marche" ou "en arrêt".

Dans le premier type on retrouve les inspections d'exploitation qui sont effectuées lors du démarrage et pendant que l'unité fonctionne, pour indiquer l'état général de la machine et son équipement associé.

Par ailleurs, dans le deuxième type, on retrouve [**General Electric, 2016**] :

- Les inspections de veille permettant d'améliorer la fiabilité de démarrage ;
- Des entretiens préventifs généraux comme par exemple, inspecter le système de batterie, vérifier l'étalonnage des périphériques, changer les filtres, vérifier le niveau d'eau et d'huile, etc. ;
- L'inspection borescopique qui est une inspection visuelle spéciale réalisée à travers l'introduction d'un dispositif de haute technologie pour examiner les organes de la turbine sans l'ouvrir ;
- Et finalement, les inspections de démontage qui consistent principalement en le remplacement des pièces stratégiques c'est-à-dire : très chères et très critiques dans le fonctionnement. Elles nécessitent l'ouverture de la turbine à divers niveaux, et on en distingue trois :

### **1. Inspection de la partie combustion (CI):**

Une inspection de démontage nécessaire pour changer et vérifier les pièces de combustion. Ces pièces nécessitent une attention fréquente car le fonctionnement continu avec un système de combustion détérioré peut entraîner une durée de vie beaucoup plus courte des parties en aval.

Cette révision se concentre sur les pièces de transition, le couvercle, Les tubes de flamme, et les injecteurs de combustible (TP, Cap, Liners, Fuel Nozzle) qui doivent être enlevés et remplacés par des composants nouveaux ou réparés afin de réduire au minimum le temps d'arrêt. Les pièces de combustion ainsi enlevés peuvent alors être nettoyés et réparés après que l'unité ait été remise en fonctionnement pour la prochaine révision.

Ainsi qu'une inspection visuelle doit être faite pour les ailettes et les directrices de la turbine afin de vérifier toute usure ou détérioration, elle aidera à établir le calendrier prévisionnel de l'inspection de la partie chaude.

### **2. Inspection de la partie chaude (HGPI) :**

Elle comporte l'ensemble des pièces de l'inspection de combustion citée ci-dessus ainsi qu'une inspection détaillée des directrices et des ailettes de la turbine.

Comme pour l'inspection de la partie combustion les pièces enlevées : les pièces de la partie combustion ; les directrices ; les ailettes et les sabots des trois étages de la turbine, peuvent ensuite être inspectées dans un service qualifié puis replacées en stock pour une utilisation ultérieure.

### **3. Inspection générale (MI):**

La révision implique une inspection de bride à bride des composants rotatifs et fixes de la turbine à gaz, qui sont soumis à des phénomènes d'usures pendant le fonctionnement en régime normal. Cette inspection inclut les éléments de la partie combustion et la partie chaude. En outre, le cache de la turbine est inspecté pour les fissures et l'érosion, le compresseur, le palier et la partie d'admission d'air sont inspectés pour les fuites, la corrosion, l'érosion et les impuretés.

Pour récapituler, il convient de présenter un tableau comparatif entre ces types d'inspection de démontage, voir tableau 4.

<b>Les inspections de démontage</b>		
<b>1- Inspection de la partie combustion</b>		
<b>Composants clés :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tube de flamme</li> <li>• Injecteur de combustible</li> <li>• Pièce de transition</li> <li>• Le couvercle</li> <li>• Détecteur de flamme</li> <li>• Les bougies</li> </ul>	<b>Inspectés pour :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Des dommages issus d'un objet étranger</li> <li>• Usure anormale</li> <li>• Fissuration</li> <li>• Oxydation / corrosion / érosion</li> <li>• Matériel manquant</li> </ul>	<b>Actions potentielles :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Réparation</li> <li>• Remettre à neuf</li> <li>• Remplacement</li> </ul>
<b>2- Inspection de la partie chaude</b>		
<b>Composants clés :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Composants clés de la partie combustion</li> <li>• Les directrices</li> <li>• Les aubes</li> <li>• Les sabots</li> </ul>	<b>Inspectés pour :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Des dommages issus d'un objet étranger</li> <li>• Usure anormale</li> <li>• Oxydation / corrosion / érosion</li> <li>• Durée de vie restante</li> <li>• Déviation et distorsion des directrices</li> </ul>	<b>Actions potentielles :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Réparation</li> <li>• Remettre à neuf</li> <li>• Remplacement</li> </ul>
<b>3- Inspection générale</b>		
<b>Composants clés :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Composants clé de la partie chaude</li> <li>• Le compresseur</li> <li>• Le rotor</li> <li>• Le palier</li> <li>• Le système d'échappement</li> </ul>	<b>Inspectés pour :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Des dommages issus d'un objet étranger</li> <li>• Usure anormale</li> <li>• Fissuration</li> <li>• Oxydation / corrosion / érosion</li> <li>• Matériel manquant</li> <li>• Les fuites</li> <li>• Le revêtement</li> </ul>	<b>Actions potentielles :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Réparation</li> <li>• Remettre à neuf</li> <li>• Remplacement</li> </ul>

Tableau 4: Les types d'inspections de démontage d'une turbine à gaz

Pour toutes ces inspections, une gestion bien articulée des pièces de rechange est primordiale pour assurer leur disponibilité lors du moment voulu. C'est le nerf de guerre qui assure la compétitivité à l'entreprise. On parle alors de la recherche d'un équilibre qui permettra à l'entreprise d'assurer toutes ses commandes en limitant les coûts de stockage.

## 4.2 Aperçu sur la gestion des PDR à GEPS

### 4.2.1 Généralités

La fourniture de General Electric Power Services (GEPS) comprend les différentes pièces de rechange qui seront fournies avec le matériel nécessaire.

Dans le cas d'un nouveau contrat, il est précisé que GEPS prévoit son stock de pièces de rechange qui sont à sa charge pour le bon fonctionnement des centrales électriques. La liste de PDR doit être remise au maître d'ouvrage pour le suivi au plus tard 6 mois avant le début de la marche semi industrielle établie sur la base de l'expérience de GEPS. Ainsi cette dernière doit livrer le stock de PDR des équipements au plus tard 3 mois avant le début des essais de mise en service.

La répartition des pièces de rechange est nécessaire, d'une part pour la comptabilité et la gestion des stocks, d'autre part pour établir les valeurs à prévoir pour les remplacements ultérieurs. La liste des pièces est établie en désignant [**General Electric, 2016**] :

- **Les pièces d'usure**

C'est les pièces qui par leur fonction sont appelées à subir une dégradation progressive et prévisible. GEPS définit la liste des pièces d'usure ainsi les quantités nécessaires à l'entretien normal du matériel, appareil, instrument et organe constituant la centrale pour une période de fonctionnement donné. Ce lot de pièces de rechange est à lier au programme de maintenance prévisionnel.

A titre d'illustration, pour chaque groupe turbo-alternateur, la quantité de pièces d'usure à fournir sera suffisante pour assurer toutes les inspections des turbo-alternateurs jusqu'à la révision générale comprise.

- **Les pièces de sécurité**

Sont considérées comme les pièces dont la dégradation est concevable sans pouvoir néanmoins en prévoir l'échéance et dont le défaut engage la capacité de production de l'unité. La liste des pièces de sécurité devra prendre en considération les éléments suivants :

- Quantités de matériels identiques pouvant bénéficier d'un même rechange
- Possibilité d'utiliser un matériel de rechange unique des matériels analogues au moyen d'adaptations fonctionnelles ou dimensionnelles.

- **Les pièces des parties chaudes**

C'est les pièces constitutives des turbines à gaz, fonctionnant à très hautes températures.

Cette liste comprend les pièces suivantes :

- Aubes
- Directrices
- Segments de protection
- Pièces de transition
- Tubes de flamme
- Injecteurs
- Chemise de combustion
- Caisse intérieure gaz chauds
- Tubes d'interconnexion

#### 4.2.2 La nature de la demande des PDR

GEPS maintient un grand volume de PDR pour couvrir les exigences des propriétaires de turbines à gaz. Le système d'approvisionnement des pièces doit donc être conçu pour une réponse rapide. Cependant, il existe des périodes de forte demande où certaines parties peuvent ne pas être facilement disponibles pour les inspections prévues.

Pour cela, il convient de distinguer deux natures de demande des PDR relativement à deux types de maintenance :

- La première demande relève du besoin exprimé par la maintenance préventive. Elle est calculée à partir du planning des inspections programmées dans ce sens. Il en résulte alors, que cette demande peut être connue avec certitude en termes de quantité requise et du moment de son utilisation.
- Quant à la deuxième demande, elle représente le besoin supplémentaire émis par les actions de maintenance corrective non planifiée. Il s'agit donc d'une demande incertaine qui est calculée à partir des prévisions de pannes.

#### 4.2.3 Les approches utilisées dans la gestion des stocks de la PDR

Avant d'aborder le processus d'approvisionnement des pièces et fournitures nécessaires aux interventions, il importe de distinguer les types d'achats que l'on retrouve. Tout d'abord, il y a la nature du matériel faisant l'objet d'une réquisition : est-ce une pièce nécessaire à l'intervention ou une fourniture diverse (outil, graisse, produit quelconque, ...) non attribuable à un équipement donné ? Ensuite, et plus important encore, il faut juger de l'urgence de la réquisition : est-ce une pièce ou une fourniture que l'on doit obtenir rapidement pour effectuer l'intervention ou peut-on planifier son achat ? La façon de procéder sera très différente dans chacun des cas car les motifs et les contraintes ne sont pas les mêmes.

En fonction des coûts d'achats, la difficulté d'approvisionner et les délais relatifs à chaque référence, GEPS trouve des difficultés à définir l'approche de gestion la plus appropriée pour chaque catégorie de PDR.

- **Approche basée sur la gestion à flux tendu :**

C'est une méthode qui n'est utilisée que dans le cas des arrêts d'inspection non planifiés, lorsque les résultats du diagnostic de la panne révèlent l'endommagement de certaines pièces qui ne sont pas disponibles en stock.

Toutefois, le problème avec cette méthode se pose dans le cas où les pièces identifiées pour le remplacement s'avèrent très critiques dans leur approvisionnement. La commande deviendra urgente étant donné que le temps d'arrêt d'une machine est souvent bien plus coûteux que la réparation elle-même.

GEPS essaye d'optimiser ce processus d'approvisionnement en fonction du facteur temps pour réduire au minimum les délais d'intervention. Pour ce faire, le personnel affecté à l'intervention devrait en être responsable et on devrait lui confier l'autonomie et les outils nécessaires pour effectuer l'achat rapidement sans passer par le système traditionnel des achats.

- **Approche basée sur la politique de point de commande :**

L'approvisionnement des PDR au sein de GEPS se fait pour la plupart des articles, selon la méthode du point de commande, celle-ci consiste à définir le niveau de stock qui déclenche l'ordre d'achat, de façon à être livré juste au moment de l'utilisation de la dernière pièce.

Cette technique est utilisée essentiellement en raison de la criticité de la pièce de rechange, car elle demande un suivi permanent des stocks entraînant un coût de gestion élevé et un niveau de stock (point de commande) qui doit permettre de satisfaire les besoins durant le délai allant de la date de déclenchement de commande à la date de livraison. Quand la fréquence de remplacement de l'article est relativement basse, le délai de réapprovisionnement est suffisamment court par rapport à la durée entre deux remplacements, et de plus le prix de l'article est très cher, alors la méthode de point de commande tendra plutôt vers une approche de gestion conjointe de la maintenance préventive.

- **Approche basée sur la gestion conjointe des stocks de PDR et la maintenance préventive :**

Dans cette méthode, les paramètres d'approvisionnement de PDR sont définis à partir du planning de maintenance préventive, tout en respectant l'interchangeabilité, les contraintes d'entreposage, les exigences de l'exploitant et la politique de réparation des pièces. C'est l'approche de gestion utilisée pour l'approvisionnement des pièces de la partie chaude.

#### 4.2.4 La configuration du réseau de circulation de la PDR au sein de GEPS

Les contributions majeures à l'indisponibilité d'un système défailant de gestion des stocks sont relatives au temps opératoire de maintenance (sécurisation, diagnostic, démontage, réparation, remontage, calibration et tests de remise en route) ou encore à la disponibilité sur site du technicien de maintenance (disponibilité et durée de déplacement sur site). Cependant, dans son objectif de mondialisation, GEPS montre que le contributeur majoritaire de cette indisponibilité reste le processus de circulation de la pièce de rechange. La circulation de PDR dans le cadre du service de maintenance assuré par GEPS, comprend deux cas d'approvisionnement :

- L'achat de nouvelles pièces fabriquées par GE aux USA.
- Le cycle de réparation des PDR : phase d'envoi de la PDR endommagée du site à phase de récupération de la PDR après sa réparation dans un des shops spécialisées.

Par ailleurs, ces PDR ne sont pas stockées ni gérées de la même façon. En effet, chaque site d'exploitation possède son propre magasin de stockage qui est géré, dans la plupart des cas, suivant les règles imposées par son exploitant.

Le processus de réparation conserve lui aussi cette indépendance entre les sites, dans la mesure où chaque pièce envoyée pour réparation reste la propriété du client du site d'où elle est sortie, et elle ne pourra être récupérée que par lui.

Cette configuration décentralisée est due principalement aux facteurs suivants :

- Les centrales électriques ne sont pas possédées par le même client, et donc une interchangeabilité de PDR entre les sites nécessitera des formalités qui sont souvent compliquées.
- Les contrats de GEPS sont distincts d'un client à un autre par rapport à leurs types, les conditions d'exploitation des machines, ainsi que les exigences du client par rapport au taux de service souhaité.
- La technologie des turbines maintenues diffère d'un site à un autre, ce qui rend l'interchangeabilité très limitée, à voir impossible.

#### 4.2.5 Présentation du logiciel ICAM : Infrastructure Contractual Agreement Modeling

Il est primordial de bien différencier la gestion du magasin de la gestion des stocks, même si leurs domaines sont facilement définissables, les confusions restent très fréquentes. Cette différenciation est nécessaire pour mieux introduire l'ICAM comme étant un logiciel utilisé par GEPS pour la gestion des stocks, dans le sens où il modélise l'approche de gestion basée sur la maintenance préventive.

Il permet aux utilisateurs de créer des modèles pour l'exécution des contrats en termes de PDR, et de prévoir également la manière dont le contrat sera exécuté sur sa durée, en suivant les étapes ci-dessous :

- **La configuration** : une fois le site et les équipements identifiés, l'utilisateur doit sélectionner les pièces/ kits appropriés. Le profil d'exploitation permet à l'utilisateur d'entrer des données d'exploitation relatives à l'équipement, comme le nombre d'heures d'allumage et d'arrêt, ainsi que le stock qui permet à l'utilisateur de configurer et gérer l'utilisation des kits pour les sites et les installations.
- **La détermination du planning préventif** : cette étape détermine le calendrier pour les sites / turbines qui ont été configurés, et le calcul des coûts et prix encourus pour les pièces, le service et les réparations fournis par GE.
- **La facturation** : Permet de régler les composants de la facture du contrat qui servira à facturer le client.
- **Analyse de la marge** : elle permet à l'utilisateur de modifier les données opérationnelles et les données financières pour tout modèle, et mettre à jour la version choisie du contrat avec les derniers coûts et prix relatifs aux pièces et aux services fournis par GE et créer donc une nouvelle facture pour le modèle.
- **Les démarches administratives** : permet de consulter et générer des rapports.

En suivant les étapes précédentes, ICAM a pour objectifs :

- Etablir un modèle pour les liquidités financières et les événements opérationnels en se basant sur les pièces, services et nombre de réparations.
- Effectuer un examen de la marge et une analyse financière.
- Effectuer une analyse des risques.

### 4.3 Analyse de l'existant par rapport à la gestion des PDR au sein de GEPS

#### 4.3.1 Classification des PDR par ordre d'importance :

En plus de leur classification par rapport au rangement du magasin de stockage, au sein de GEPS, une petite recherche menée avec les gestionnaires et les responsables a révélé que l'importance des PDR est déterminée en fonction de quatre principaux critères :

- Le prix d'acquisition : il représente le prix d'achat de la pièce et de sa livraison en temps normal.
- La fréquence de panne : elle mesure combien de fois la pièce doit être remplacée durant le cycle de vie total de l'équipement.
- La facilité de l'approvisionnement : ce critère estime à quel point il est facile de s'approvisionner avec une nouvelle pièce en cas d'un stock nul pour un besoin urgent. Il comprend la disponibilité de la pièce sur le marché et le délai de son approvisionnement.
- La criticité de la panne dans le système : permet de mesurer l'impact que peut avoir la pièce s'il elle subit une défaillance au cours de l'exploitation de la turbine.

L'ensemble des PDR délivrées par GEPS pour une turbine à gaz, est constitué de plus de 700 pièces et modules. Ce nombre étant très grand pour une analyse à quatre critères, il est recommandé de commencer par une analyse de Pareto par rapport à l'un des critères et de continuer ensuite avec une analyse à trois critères, appliquée sur la liste réduite aux catégories A et B.

Pour cette première étape, il convient de choisir le critère qui présente le plus de dispersion entre les articles et qui correspond dans le cas du présent travail, au prix d'acquisition (**voir Annexe III**)

En vue de faciliter l'analyse, les trois autres critères, étant qualitatifs, nous les avons évalués sur une échelle de zéro à trois, à l'aide des responsables de GEPS. Le tableau 5 explique l'appréciation exprimée par chaque note pour chacun des critères.

	<b>Fréquence de panne</b>	<b>Facilité d'approvisionnement</b>	<b>Criticité de défaillance</b>
<b>Zéro (0)</b>	Nulle	Très abordable	Impact négligeable
<b>Un (1)</b>	Faible	Facile	Impact minime
<b>Deux (2)</b>	Moyenne	Moyenne	Impact moyen
<b>Trois (3)</b>	Forte	Difficile	Impact très important

*Tableau 5: Appréciation des critères d'importance des PDR*

Le calcul du degré d'importance d'un article donné se fait selon le principe de la méthode AMDEC en introduisant un critère de criticité  $C_r$  égale au produit des trois critères déjà présentés.

Les résultats du calcul (**voir annexe IV**) ont permis l'identification de quatre catégories :

La catégorie I : composée des 13 pièces de la partie chaude de la turbine, appelée les pièces capitales.

La catégorie II : composée des pièces coûteuses mais dont la fréquence de panne est faible.

La catégorie III : composée des pièces moins coûteuses dont la fréquence de réparation est élevée

La catégorie IV : composée des pièces qui ne sont pas critiques.

Le tableau 6 exprime les appréciations accordées à chaque catégorie pour chacun des critères :

		Catégorie I	Catégorie II	Catégorie III	Catégorie IV
Critères de classification	Prix d'acquisition	Elevé	Elevé	Moyen	Moyen
	Fréquence de remplacement	Elevée	Faible	Moyenne	Nulle
	Facilité d'approvisionnement	Difficile	Difficile	Moyenne	Facile
	Criticité de panne	Elevée	Elevée	Moyenne	Moyenne

Tableau 6: Classification des PDR par ordre d'importance

Cette classification est validée par l'entreprise, elle justifie également l'intérêt majeur que GEPS porte pour les pièces de la catégorie I. D'ailleurs, on les appelle : les 13 pièces capitales, dans le jargon de l'entreprise. C'est la raison pour laquelle, nous nous intéressons particulièrement à cette catégorie de pièce dans la suite de l'analyse de l'existant.

#### 4.3.2 Analyse des pratiques de gestion des pièces capitales

Etant donné leur criticité en termes de coût d'acquisition, fréquence de remplacement, mode d'approvisionnement et criticité de panne, les pièces capitales ont fait l'objet d'une analyse qui porte sur la nature de leur demande ainsi que l'approche utilisée dans la gestion de leur stock.

#### 4.3.2.1 Nature de la demande des pièces capitales :

Comme il a été déjà précisé précédemment (voir paragraphe 4.2.2), la nature de la demande des PDR au sein de GEPS est de deux types : une demande aléatoire, relative aux inspections imprévues, et une demande certaine qui relève des besoins exprimés par la maintenance préventive.

De ce fait, l'analyse d'un échantillon significatif de l'historique des pannes, permettra de justifier la nature la demande de la catégorie I. Il s'agit de considérer les PDR remplacées dans chaque panne, et de les classer ensuite selon la fréquence de remplacement. Cette dernière représente effectivement la contribution de la maintenance corrective non planifiée à la définition de la demande des pièces. Ainsi, les catégories de PDR ayant de basses fréquences, vont forcément avoir une demande certaine calculée à partir du programme de maintenance préventive indépendamment des inspections non planifiées. Cette déduction reste valable dans le cas où le planning de maintenance pourrait être perturbé par les inspections de pannes imprévues, étant donné que le nombre de remplacements préventifs durant le cycle de vie de la turbine à gaz est connu au préalable.

Comme application, un historique de pannes faisant appel à une maintenance corrective nous a été fourni en indiquant, pour chaque incident, les pièces concernées par le remplacement correctif (**Voir Annexe V**).

Cet historique ne concerne que les turbines à gaz, de type 9F installées un peu partout dans le monde. Cette étendue géographique très large permet d'absorber la corrélation des résultats avec les conditions d'exploitation. De plus, il s'agit d'un historique de six ans, c'est-à-dire, deux cycles de maintenance de la partie chaude et un cycle de maintenance générale. Cela permet alors de confirmer que l'échantillon présenté est significatif pour l'étude.

Les résultats de l'analyse des pièces concernées par la maintenance corrective montrent que les 13 pièces de la partie chaude, classées en catégorie I, ont une demande plus ou moins certaine indépendante des inspections imprévues. On considère alors, qu'aucune panne ne se produit avant le temps de l'inspection préventive (**voir paragraphe 1.2.2.3.B « scénario 4 »**) et le calcul se résumera à déterminer le temps optimal de déclenchement de la commande, qui minimise le coût total engendré. Cela paraît simple à faire, or, la prise en compte d'autres facteurs ajoute une certaine complexité à la détermination de ce temps optimal.

Ces facteurs sont principalement liés à la particularité que présentent les pièces capitales. Chaque pièce possède deux types de durée de vie :

- La durée de vie totale : c'est la durée au bout de laquelle la pièce ne peut plus être utilisée, ni réparée.
- La durée de vie de réparation : appelée aussi le cycle de réparation, c'est la durée au bout de laquelle, la pièce doit être remplacée, et envoyée pour réparation et remise à niveau. On en déduit alors que la pièce peut être réparée un nombre limité de fois égale à :

$$\text{nombre de réparation} = \frac{\text{durée de vie totale}}{\text{durée de vie de réparation}} - 1$$

De plus, il faut prendre en compte que la durée de réparation est de l'ordre de 4 à 6 mois.

Sur un planning de maintenance préventive, l'utilisation de chaque pièce peut être multiple, c'est-à-dire une seule pièce peut être installée dans plusieurs inspections, mais, elle reste contrainte de deux autres paramètres :

- Le nombre de fois où elle est installée : égale au nombre de cycles d'exploitation qu'elle peut servir, et qui est lui-même calculé par :

$$\text{nombre de cycles d'exploitation} = \frac{\text{durée de vie totale}}{\text{durée de vie de réparation}}$$

- La disponibilité de la pièce après sa réparation : déterminée par la position chronologique de la date de sa récupération par rapport à la date de l'inspection où on cherche à l'installer, sachant que la date de récupération est égale à :

*Date de récupération*

$$= \text{date de dernière installation} + \text{le cycle d'exploitation} \\ + \text{la durée de réparation}$$

Après avoir explicité les particularités des pièces capitales et leurs influences sur la détermination du besoin réel pour la maintenance préventive, il convient de présenter, quelle est l'approche adoptée par GEPS face à ce type d'enjeux.

#### **4.3.2.2 Approche de gestion des stocks des pièces capitales :**

A GEPS, les pièces capitales, font partie des pièces gérées par une approche basée sur le calendrier de la maintenance préventive. Pour cela, l'ICAM est utilisé pour déterminer les paramètres d'approvisionnement : quand et combien acheter de nouvelles pièces ? Et cela en simulant l'exécution du contrat.

Dans un premier temps, cette fonctionnalité ainsi expliquée peut qualifier le logiciel comme un outil de détermination du besoin réel en pièces pour chaque contrat, tandis que ce n'est pas le cas, du moment où les responsables se rendent compte, au fur et à mesure de l'exécution du contrat, qu'il existe un écart entre le besoin réel et le besoin déterminé par ICAM. Dans certains cas, cet écart s'accumule et prend des valeurs importantes à la fin du contrat, produisant de ce fait de très lourdes pertes dans les dépenses de GEPS. Ces pertes prennent encore une ampleur beaucoup plus grave dans le cas des pièces capitales.

L'analyse portée sur l'utilisation de l'ICAM par les responsables de GEPS a dévoilé que la génération des modèles d'exécution des contrats est une fonctionnalité très basique du logiciel. En effet, ce qu'on appelle simulation par le logiciel, est en réalité une visualisation d'un modèle défini par un spécialiste qu'on va nommer « the modeler », ou encore le modélisateur, qui lui aussi ne suit pas une démarche structurée pour construire le modèle de détermination du besoin.

Le « modeler » parcourt à l'aide de l'ICAM, le planning de maintenance fourni par le responsable du site, et détermine pour chaque inspection, quelle pièce va être installée parmi celles disponibles en stock, selon les paramètres du processus de réparation de la pièce et ses caractéristiques. Le choix peut se faire entre plusieurs pièces neuves ou réparées, et le niveau des stocks est mis à jour au fur et à mesure. L'ICAM sert alors à vérifier la faisabilité du modèle et à convertir les besoins de PDR en ordres d'achat.

Les écarts identifiés par les responsables des sites dans la détermination des besoins, montrent que cette démarche de construction du modèle est loin d'être optimale. Ceci se justifie par le fait que le « modeler », même avec l'aide de l'ICAM, suit un raisonnement limité sans aucun objectif d'optimisation. En d'autres termes, pour une inspection donnée dans le planning de maintenance, le « modeler » choisit la pièce qui satisfait uniquement la contrainte de la disponibilité, par conséquent, si plusieurs pièces sont disponibles en stocks, le choix est aléatoire.

En raison des coûts de réparation qui sont toujours inférieurs au coût d'achat pour le cas des 13 pièces capitales, il est certain qu'une grande possibilité d'optimisation existe, à travers la maximisation de l'utilisation des pièces, pour en acheter le minimum. De ce fait, une opportunité de gain se manifeste pour GEPS en optimisant la détermination du besoin des 13 pièces capitales.

## 4.4 Conclusion et formalisation de la problématique

*« Il n'y a rien de constant si  
ce n'est le changement. »*

Bouddha

La problématique a été décelée lors de l'étude de l'existant effectuée au sein de GEPS, où nous avons constaté une anomalie relative à la détermination du besoin en PDR pour la maintenance préventive, et plus précisément les pièces capitales classées dans la catégorie la plus importante de PDR.

Le constat en question, porte sur la méthode que GEPS utilise pour déterminer ses besoins en cette catégorie de PDR, étant donné que la gestion de cette dernière est régie par des contraintes relatives à la possibilité de réutiliser les pièces, un nombre limité de fois, après réparation.

Pour un contrat donné, le responsable élabore à l'aide d'un logiciel de modélisation de l'exécution des contrats, un modèle de calcul des besoins en PDR basé sur le déroulement d'un simple scénario d'utilisation des pièces durant les inspections du calendrier de maintenance préventive. Ce déroulement consiste à choisir pour chaque inspection si la pièce à installer est une pièce neuve ou bien réparée, tout en respectant les caractéristiques des pièces, et en prenant en compte les paramètres du processus de réparation.

Le modèle ainsi obtenu exprime le nombre de PDR nécessaire pour l'exécution du contrat, or une telle démarche, étant fondée principalement sur un raisonnement limité, est loin d'être efficace. Elle est susceptible de produire de grands écarts dans la détermination du besoin, et donc de lourdes pertes en termes de dépenses. Ces constatations ont été validées par les responsables de GEPS, faisant ainsi l'objet de notre problématique.

En effet, GEPS se trouve dans l'obligation de se protéger contre l'impact néfaste que cette anomalie peut engendrer, et spécialement dans le cas des pièces capitales du moment où elles sont très coûteuses.

Face à une telle situation, la solution jugée la plus propice consiste à mettre en place une méthode de détermination du besoin en PDR, régie par un raisonnement structuré, dans la mesure de garantir des résultats optimaux, tout en gardant à l'esprit que la réduction des stocks et l'amélioration du taux de service des pièces de rechange ne sont pas antagonistes.

Le besoin de résoudre cette problématique par GEPS, se justifie encore plus, par la signature récente d'un grand contrat de maintenance de 20 ans avec l'entreprise nationale de production d'électricité SONELGAZ. Le marché octroyé, appelé « le Méga Deal » concerne 10 centrales électriques, avec un total de 34 turbines à gaz de type 9FA. En termes de gestion de PDR, si on considère un minimum d'un seul kit de sécurité pour chacune des 13 pièces capitales, alors la gestion de cette catégorie de PDR se traduira par la gestion d'un total de 668 kits de pièces capitales.

La finalité principale de ce travail, consiste à développer un modèle mathématique d'optimisation sous contraintes, destiné à gérer efficacement le flux des pièces capitales dans l'ensemble des sites du « Méga Deal ».

## **Chapitre 5 : Développement du modèle mathématique**

*« Cela semble toujours impossible...  
jusqu'à ce qu'on le fasse. »*

Nelson Mandela

Le dernier chapitre du travail présente les étapes de construction de la solution proposée, commençant par la mise en contexte qui facilite la compréhension de l'environnement de la problématique, et passant après au développement du modèle mathématique correspondant, et validation de ses résultats. Pour terminer, ce dernier chapitre donne lieu à une suggestion d'amélioration du modèle d'optimisation par l'ajout d'une nouvelle fonctionnalité.

## 5.1 Présentation du contexte du projet

Le 20 Avril 2017, SONELGAZ, a octroyé un marché de trois milliards de dollars à GEPS. Il s'agit du plus grand contrat de l'histoire de cette dernière et ce à travers le monde. Le système d'efficacité énergétique mis en place permettra de délivrer une puissance électrique de 420 mégawatts supplémentaires en Algérie.

Le contrat porte notamment sur des prestations de services de maintenance érigé selon un contrat CSA de 20 ans, pour 10 centrales électriques, composées en total de 34 turbines à gaz. Au même temps, GEPS doit assurer le développement d'une chaîne d'approvisionnement des PDR basée sur la politique de maintenance en guise de garantir la performance des installations. De plus, les pièces capitales feront l'objet de la mise à niveau de leur gestion technologique.

Dans un contrat de type CSA, le paiement du service de la maintenance est forfaitaire, GEPS se porte garante de la performance des installations, et prend en charge toutes les dépenses de maintenance qui en résultent. Ceci justifie suffisamment l'intérêt qu'a GEPS pour la mise en place d'une gestion optimisée de PDR et notamment les pièces capitales.

Le présent travail s'inscrit dans une démarche d'amélioration des pratiques de gestion des PDR au sein de GEPS, adoptée en vue d'optimiser le flux destiné à satisfaire les besoins du « Méga Deal ».

Rappelons que la finalité principale est de développer un modèle de gestion des flux de PDR, qui minimise le nombre de pièces achetées en maximisant leur utilisation. Nous nous intéressons à la catégorie de PDR la plus stratégique, composée de 13 pièces capitales, en l'occurrence :

- S1B : Le kit des aubes (Buckets) du 1<sup>er</sup> étage de la partie turbine ;
- S1N : Le kit des directrices (Nozzles) du 1<sup>er</sup> étage de la partie turbine ;
- S1S : Le kit des sabots (Shrouds) du 1<sup>er</sup> étage de la partie turbine ;
- S2B : Le kit des aubes (Buckets) du 2<sup>eme</sup> étage de la partie turbine ;
- S2N : Le kit des directrices (Nozzles) du 2<sup>eme</sup> étage de la partie turbine ;
- S2S : Le kit des sabots (Shrouds) du 2<sup>eme</sup> étage de la partie turbine ;
- S3B : Le kit des aubes (Buckets) du 3<sup>eme</sup> étage de la partie turbine ;
- S3N : Le kit des directrices (Nozzles) du 3<sup>eme</sup> étage de la partie turbine ;
- S3S : Le kit des sabots (Shrouds) du 3<sup>eme</sup> étage de la partie turbine ;
- 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 flames (Liner) des chambres de combustion ;
- TP: Le kit des pièces de transition (Transition Piece)

C'est l'ensemble des pièces de la partie chaude de la turbine, elles nécessitent une attention particulière dans la maintenance, et constituent les composants clés qu'on doit remplacer dans les différents types d'inspections préventives (voir tableau 4 dans la section 4.1.2).

Dans la dernière évolution technologique proposée par GEPS, qui correspond d'ailleurs à la technologie implémentée dans les sites du Méga Deal, ces pièces sont devenues sujettes d'un même calendrier de maintenance préventive. En effet, l'inspection de la partie combustion (CI) a été intégrée dans celle de la partie chaude (HGPI), c'est-à-dire, dans les sites concernés par cette nouvelle technologie, l'inspection dédiée uniquement à la partie combustion est ajustée de façon à ce qu'elle coïncide avec l'inspection de la partie chaude, où toutes les 13 pièces sont impérativement remplacées. La figure 14 clarifie la différence :

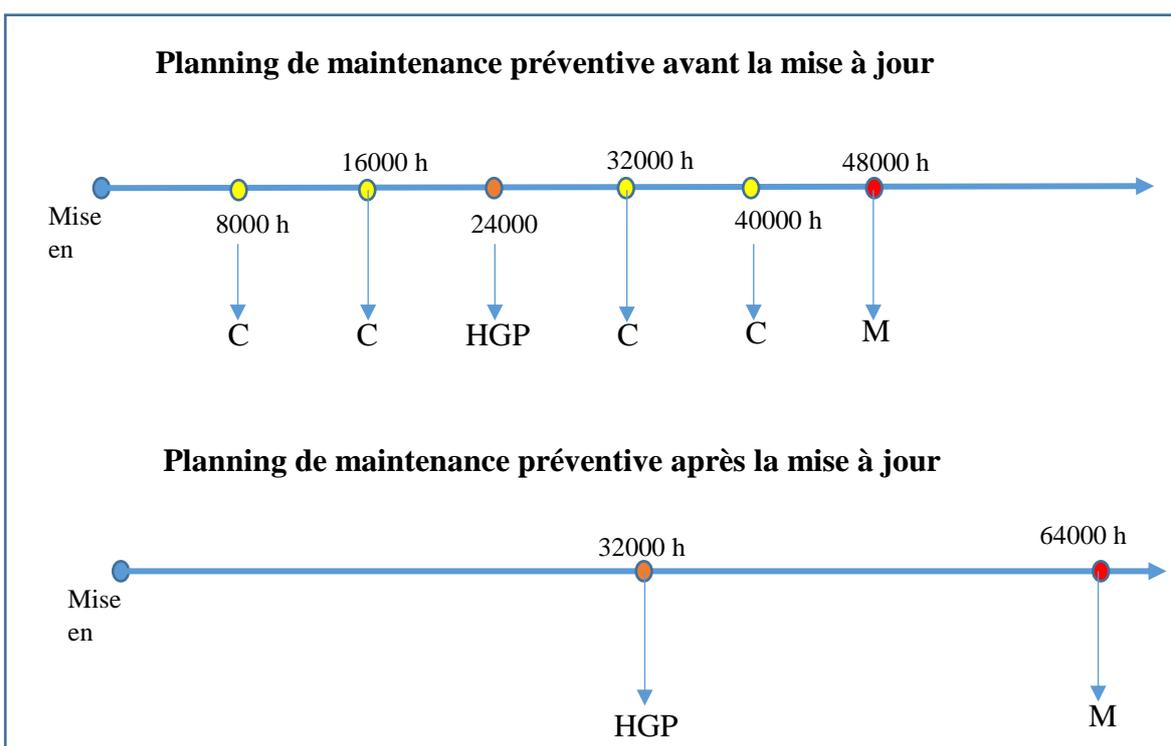


Figure 14: Impact de l'évolution technologique des pièces sur le planning de maintenance préventive

L'intervalle de temps entre deux inspections de la partie chaude correspond à la durée maximale de fonctionnement continu que ces pièces peuvent supporter, au bout de ce temps elles doivent être remplacées. Nous rappelons également, que les pièces désinstallées dans une inspection peuvent être réutilisées après une réparation dans des ateliers spécialisés. Cette réutilisation est faite dans les limites imposées par la durée de vie totale de la pièce, la durée au bout de laquelle la pièce ne peut plus être réparée.

D'une autre part, ces pièces désinstallées lors d'une inspection préventive, sont remplacées par des pièces semblables, qui peuvent, elles aussi, être des pièces réparées. Il en résulte alors que le levier principal de l'optimisation visée par notre travail réside dans le fait d'exploiter au maximum cette caractéristique de réutilisation, et éviter ainsi l'achat excessif de nouvelles pièces, d'autant plus que l'ensemble des coûts de réparation de chaque pièce sur toute sa durée de vie, restent inférieurs aux coûts liés à l'acquisition d'une nouvelle pièce semblable.

Finalement il faut signaler que, sur une période de fonctionnement, le nombre d'heures de marche enregistré pour une turbine donnée, n'est pas égal au nombre d'heures calculés simplement à partir de nombre de jours compris dans cette période, car le fonctionnement d'une turbine peut être influencé par plusieurs facteurs externes tels que : le nombre d'allumages, les arrêts forcés, la vitesse de rotation et le type du fuel. On parle alors, d'un nombre d'heure de marche équivalent calculé en fonction des conditions d'exploitation de la turbine selon une formule précise.

## 5.2 L'élaboration de la solution proposée :

Les problématiques rencontrées en management, s'identifient chacune à sa propre situation et son unique contexte, qui ne sont jamais communs en tous les points avec d'autres problématiques. C'est pourquoi, chaque cas particulier requiert un modèle propre à lui pour sa résolution.

C'est dans cette optique que le présent travail a eu lieu, le but ultime étant de développer un modèle mathématique qui permet l'optimisation de la consommation des PDR dans la maintenance préventive. Pour ce faire, une approche de construction par contingence générique est adoptée. Il s'agit de dérouler manuellement un cas d'application, de manière à bien exploiter les notes et les observations qu'il génère, en vue de caractériser la structure de la solution optimale et de construire le modèle correspondant. Ce même cas d'application va servir par la suite comme outil de validation, qui permet entre autres de corriger le modèle au fur et à mesure jusqu'à l'obtention d'un résultat complètement satisfaisant. Dans cette phase de validation, l'utilisation de plusieurs exemples d'application peut s'avérer plus intéressante, dans le sens où elle facilite la correction du modèle en offrant une vision plus large.

Il en résulte alors que le travail est subdivisé en quatre phases majeures, présentées dans la figure 15 :



Figure 15: Démarche de construction de la solution proposée

### 5.2.1 Première phase : L'étude préliminaire d'un cas d'application

La première phase du projet consiste à suivre le processus de consommation des PDR dans un exemple donné, en vue d'en tirer les observations et les notes nécessaires à l'identification des leviers d'optimisation.

Cette phase du projet a été effectuée au sein de GEPS par rapport à deux centrales électriques, actuellement en marche avec la dernière version technologique des pièces, et que nous allons dénommer : site A et site B, pour des raisons de confidentialité exigées par l'entreprise.

Ces deux sites, comportent, chacun, trois (3) trains de production d'électricité, entraînés par des turbines à gaz de type 9FB. Ces dernières acceptent une interchangeabilité de PDR, tandis que leurs plannings de maintenance préventive sont indépendants.

Le tableau 7 donne quelques informations générales sur les deux sites :

Site	Type de contrat	Date de mise en marche	Période considérée pour la simulation	Nombre de turbines à gaz
Site A	CSA	Juin 2008	De Février 2017 à Juin 2029	3
Site B	O&M	Mars 2013	De Février 2017 à Mars 2033	3

*Tableau 7: Présentation des deux sites de l'étude préliminaire*

L'idée de base est la même pour chacune des pièces capitales. Il s'agit de dérouler, sur le planning de maintenance préventive de chaque centrale, et en disposant des informations relatives aux caractéristiques des pièces, au processus de réparation et aux stocks, l'utilisation de PDR dans les inspections, en déterminant pour chaque inspection quelle pièce installer ? Est-ce qu'il est préférable d'opter pour une pièce réparée ou bien une nouvelle pièce.

Il s'agit d'une simulation répétitive où chaque itération présente un scénario différent d'installation de PDR pour les inspections, tout en gardant à l'esprit que le planning de maintenance est fixe et que les données d'entrées sont identiques pour tous les scénarii. L'optimum est atteint dans le scénario où les pièces consommées sont exploitées au maximum et donc le nombre de pièces achetées est minimal.

Le nombre d'itération est fini, et dépend de la taille des paramètres du problème, tels que : le nombre de pièces en stocks, le temps de réparation, le nombre de machines et le nombre d'inspections prévu pour chaque machine jusqu'à la fin du contrat. Il est à noter aussi que la simulation porte sur les pièces capitales, une par une, par exemple : la simulation de l'utilisation des pièces S1B est indépendante de celle d'utilisation des S1N.

Les données d'entrées fournies pour chacun des deux sites, sont :

- Les dates des inspections prévues pour la maintenance préventive à partir du moment où le présent projet est lancé, jusqu'à la fin du contrat.
- Les conditions d'exploitation des unités qui permettent de calculer le nombre d'heures de marche équivalent à une durée d'exploitation donnée.
- Les caractéristiques de chacune des pièces capitales en termes de durée de vie et temps de réparation, donnés en nombre d'heures de marche équivalent.
- Le niveau des stocks de chacune des pièces capitales, avec leur cumul actuel d'heures de marche. (Les pièces neuves ont un cumul nul).
- Le nombre des ordres d'achat que GEPS compte lancer pour chacune des pièces capitales. C'est une donnée qui va servir à évaluer les résultats obtenus par la simulation et répondre à la question : combien de pièces peuvent-être économisées ?

**Pour la simulation sur les deux sites A et B, les données ont pris les valeurs présentées dans les tableaux 8 et 9 respectivement :**

- Les plannings de maintenance préventive :

Les turbines du Site A	Dernière inspection	Inspection de la partie chaude	Inspection Générale	Inspection de la partie chaude	Inspection Générale	Inspection de la partie chaude
Unit 1	1/12/2016	15/4/2018	9/1/2021	6/10/2023	2/7/2026	28/3/2029
Unit 3	13/1/2017	28/5/2018	21/2/2021	8/11/2023	14/8/2026	10/5/2029
Unit 2	4/11/2015	3/11/2018	30/7/2021	25/4/2024	20/1/2027	16/10/2029

*Tableau 8: Planning de maintenance préventive du site A*

Les turbines du Site B	Dernière inspection	Inspection de la partie chaude	Inspection Générale	Inspection de la partie chaude	Inspection Générale	Inspection de la partie chaude
Unit 1	12/6/2016	19/5/2019	25/5/2022	6/5/2025	22/5/2028	11/5/2031
Unit 2	26/9/2016	26/10/2019	26/11/2022	26/12/2025	26/1/2029	26/2/2032
Unit 3	4/11/2016	4/12/2019	4/1/2023	4/2/2026	4/3/2029	4/4/2032

*Tableau 9: Planning de maintenance préventive du site B*

- Conditions d'exploitation :

Bien que les deux sites A et B soient exploités par deux clients différents de GEPS, les conditions d'exploitations des trains de production d'électricité sont pratiquement identiques.

Toutes les six turbines fonctionnent en régime de base, c'est-à-dire elles sont continuellement en marche à une charge constante, qui atteint les 60% de leurs charges maximales. Elles sont alimentées généralement par deux types de combustibles : le gaz naturel dans l'utilisation courante et le fuel en cas de besoin. Les deux centrales électriques sont connectées au réseau national à fréquence fixe égale à 50 Hz, imposant ainsi une vitesse de rotation fixe sur les turbines.

C'est à partir de ces conditions d'exploitation, que le nombre d'heures de marche équivalent est calculé pour chaque turbine.

- Données relatives aux pièces :

Elles concernent la durée de vie, le temps de réparation, ainsi que l'état et le niveau des stocks. Elles sont présentées dans le tableau 10.

Pièces	Durée de vie (h)	Temps de réparation (semaines)	Stock initial			
			Site A		Site B	
			Neuves	Réparées	Neuves	Réparées
<b>S1B</b>	72000	24	0	0	0	5
<b>S1N</b>	128000	17	0	0	6	0
<b>S1S</b>	192000	18	0	0	1	0
<b>S2B</b>	192000	22	1	0	5	1
<b>S2N</b>	48000	18	1	0	2	0
<b>S2S</b>	192000	18	1	0	1	0
<b>S3B</b>	192000	18	0	2	3	3
<b>S3N</b>	192000	15	0	2	0	3
<b>S3S</b>	192000	16	0	2	1	0
<b>CAP</b>	192000	16	0	3	0	3
<b>FN</b>	192000	18	0	3	0	3
<b>LN</b>	192000	14	0	3	0	3
<b>TP</b>	192000	15	0	3	0	3

Tableau 10: Données d'entrée relatives aux pièces capitales pour l'étude préliminaire

- Les projections d'ordre d'achats des pièces capitales par GEPS :

Cette information nous a été fournie à partir d'une lecture directe sur l'interface de l'ICAM pour chacun des deux sites, où il suffit de compter à partir de la date de lancement de cette étude, combien de nouvelles pièces sont prévues d'être installées dans les prochaines inspections. Les résultats sont donnés dans le tableau 11 :

Pièces	Ordres d'achat prévus (site A)	Ordres d'achat prévus (site B)
<b>S1B</b>	2	5
<b>S1N</b>	2	2
<b>S1S</b>	2	3
<b>S2B</b>	1	4
<b>S2N</b>	1	8
<b>S2S</b>	1	4
<b>S3B</b>	0	0
<b>S3N</b>	0	2
<b>S3S</b>	0	4
<b>CAP</b>	0	0
<b>FN</b>	0	0
<b>LN</b>	0	0
<b>TP</b>	0	0

Tableau 11: Les ordres d'achat prévus pour les pièces capitales dans les deux sites A et B

**Le déroulement de la simulation pour la consommation d'une pièce donnée, suit les étapes de l'algorithme ci-dessous :**

**étape 1.** Parcourir le planning global de maintenance préventive (comprenant les dates d'inspection des trois turbines) dans un ordre chronologique, et dans chaque inspection :

- a. Identifier quelle est la turbine concernée, et quelle est la pièce à désinstaller.
- b. Identifier quelles sont les pièces disponibles en stock et leurs cumul actuel d'heures de marche.
- c. Décider quelle pièce installer pour cette inspection, parmi les pièces disponibles en stock ou bien une nouvelle pièce achetée.
- d. Mettre à jour le niveau de stocks
- e. Calculer le nouveau cumul d'heure de marche pour la pièce désinstallée, tel que :

$$FFH_i = FFH_i + \frac{D_{jk} - D_{jk-1}}{30} * Eq$$

Avec :

- $FFH_i$  = le cumul d'heure de marche équivalent de la  $i^{\text{ème}}$  pièce
  - $D_{jk}$  = la date de la  $k^{\text{ème}}$  inspection sur la turbine  $j$ .
  - $Eq$  = le nombre d'heures de marche équivalent à un mois d'exploitation
- f. Si le  $FFH_i \geq C_{max} - D_{min}$  (c'est-à-dire la pièce désinstallée ne pourra pas supporter un autre cycle de marche) : la pièce ne peut plus être réinstallée dans les prochaines inspections.  
Sinon (c'est-à-dire la pièce va être réparée et mise à niveau pour une installation ultérieure) : calculer la date à partir de laquelle la pièce sera disponible sur site par la formule suivante :

$$T_i = D_{jk} + R * 7$$

Avec :

- $C_{max}$  = la durée de vie maximale de la pièce
  - $D_{min}$  =  
La durée minimale entre deux inspections d'une turbine
  - $T_i$  =  
la date par laquelle la  $i^{\text{ème}}$  pièce sera de nouveau en stock .
  - $R$  = le temps de réparation nécessaire en semaines.
- g. Si c'est la dernière inspection sur le planning global : aller à l'étape 2  
Sinon : passer à la prochaine inspection dans le planning global, et refaire l'étape 1.

- étape 2.** A la fin du planning, calculer le nombre de pièces achetées durant cette période.
- étape 3.** Refaire l'étape 1 et 2 en changeant la décision d'installation de pièce dans au moins une inspection.
- étape 4.** Comparer les résultats obtenus pour chaque itération et déterminer le scénario optimal.
- étape 5.** Calculer la différence entre le résultat du scénario optimal et le nombre d'ordres d'achat que GEPS compte lancer pour la pièce concernée.

Le principe de la simulation est donc, de tester toutes les combinaisons possibles des installations de pièces sur la période d'exploitation et d'en tirer la meilleure. La résolution de ce type de problèmes consiste à le décomposer en sous-problèmes élémentaires et de les résoudre ensuite du plus petit au plus grand en sauvegardant les résultats intermédiaires. Ce type de résolution est appelé : la programmation dynamique, et nécessite la définition d'une fonction récursive qui régit le passage des solutions optimales partielles à la solution optimale globale

Cependant, la particularité que notre problématique présente, réside dans le fait que la fonction de récursivité est très compliquée à définir. En effet, si la construction de la solution optimale partielle, part du principe où à chaque inspection, le choix de la pièce à installer doit maximiser l'utilisation des pièces disponibles (optimisation locale), cela n'implique pas forcément que le résultat à la fin du planning est optimal (optimisation globale). L'exemple en **annexe VI** illustre bien ce paradoxe.

Ce travail, étant fait manuellement, s'avère très lourd, quand la taille du problème atteint un certain seuil, qui est tout de même très grand. C'est pour cette raison que la simulation faite suivant cet algorithme pour les deux sites A et B peut présenter des résultats améliorés mais qui restent parfois loin de l'optimum.

Toutefois, il faut signaler qu'en dépit de sa lourdeur, cette simulation manuelle a démontré qu'un grand décalage existe dans le calcul des besoins en pièces capitales. En effet, la quantité prévue par GEPS pour la consommation future, dépasse la quantité nécessaire déterminée par la simulation. La différence a atteint un total de 8 pièces capitales pour le site A et 5 pour le site B (**voir le bilan du projet, paragraphe 5.3.1**),

En conclusion, l'étude préliminaire que nous avons menée, a permis non seulement d'identifier la nature du modèle et de comprendre son comportement, mais aussi, de mettre l'accent sur l'ampleur des gains que notre projet peut apporter à GEPS.

## 5.2.2 Deuxième phase : La construction du modèle mathématique

Le principe de la deuxième phase du projet, consiste à traduire les étapes de la simulation manuelle en un langage formalisé permettant une meilleure représentation de la problématique. Pour ce faire, une modélisation mathématique est envisagée, où il convient de recourir à un modèle d'optimisation sous contraintes, étant donné que nous nous intéressons d'une part à optimiser une fonction objectif, à savoir, l'utilisation des PDR sur un planning de maintenance, et d'une autre part à satisfaire un ensemble de contraintes imposées par le système.

La construction du modèle consiste à en définir quatre éléments principaux : les paramètres et les données d'entrée, les variables de décision, les contraintes à satisfaire et finalement la fonction objectif à optimiser.

➤ **Les paramètres et les données d'entrée :**

$E_I$ :	L'ensemble des pièces.
$E_J$ :	L'ensemble des turbines.
$E_K$ :	L'ensemble des inspections.
$D_{jk}$ :	La date de la $k^{ième}$ inspection sur la $j^{ième}$ turbine.
$InitFFH_i$ :	Le nombre d'heures de marche initial de la pièce $i$ .
$EQ_j$ :	Le nombre d'heures de marche équivalent à un mois d'exploitation de la turbine $j$ .
$n$ :	Le nombre de pièces prévues pour être utilisée.
$J$ :	Le nombre de turbines dans le système.
$K$ :	Le nombre d'inspection prévu pour chaque turbine.
$R$ :	Le temps nécessaire pour la réparation de la pièce en nombre de semaines.
$C_{max}$ :	La durée de vie de la pièce concernée, en nombre d'heure de marche équivalent.
$Dmax_j$ :	la durée maximale entre deux inspections de la turbine $j$ , en nombre d'heures de marche équivalents.
$Dmin_j$ :	la durée minimale entre deux inspections de la turbine $j$ , en nombre d'heures de marche équivalents.

➤ **Les variables de décisions :**

Comme expliqué dans l'algorithme de l'étude préliminaire, la décision que nous devons prendre à chaque inspection dans le planning de maintenance, consiste à déterminer : quelle pièce installer parmi celles disponibles en stocks ?

De ce fait, la variable de décision correspondante à notre modèle se définit comme suit :

$$X_{ijk} = \begin{cases} \mathbf{1} & \text{si la pièce } i \text{ est installée dans la } k^{ième} \text{ inspection de la turbine } j. \\ \mathbf{0} & \text{sinon} \end{cases}$$

C'est une matrice booléenne à trois dimensions : le nombre de PDR utilisées dans le site, le nombre de turbine, et le nombre d'inspections préventives par turbine.

Une deuxième variable de décision a été introduite, dans la phase de correction : un tableau booléen dont la dimension est égale au nombre de pièces utilisées.

C'est une variable qui exprime si la pièce a été utilisée dans la simulation ou non, elle est définie alors par :

$$Y_i = \begin{cases} 0 & \text{si la pièce } i \text{ est installée au moins une fois.} \\ 1 & \text{sinon} \end{cases}$$

Nous justifions le rôle de cette variable de décision dans la construction de la fonction objectif.

➤ **Les contraintes :**

- a. La première contrainte ne fait pas intervenir les variables de décision, elle est posée uniquement pour vérifier si l'ensemble des dates entrées correspondent à un planning de maintenance significatif. C'est-à-dire, la durée entre deux inspections successives de la même turbine, respecte les normes recommandées :

$$D_{minj} \leq D_{jk+1} - D_{jk} \leq D_{maxj} \quad \forall j \in E_J \quad \text{et} \quad \forall k \in E_K$$

- b. Pour une même turbine, la pièce  $i$  ne peut en aucun cas être installée dans deux inspections successives. En effet, si elle est installée dans l'inspection  $k$ , elle va être impérativement désinstallée lors de l'inspection  $k + 1$ .

Cela revient à dire que les variables de décision correspondantes ne peuvent pas prendre la valeur 1 simultanément, et donc :

$$X_{ijk} + X_{ijk+1} \leq 1 \quad \forall i \in E_I, \quad \forall j \in E_J \quad \text{et} \quad \forall k \in E_K$$

- c. La décision d'installation d'une pièce  $i$  doit prendre en compte sa disponibilité sur site. Si une pièce est installée, elle ne peut pas être choisie pour une utilisation ultérieure si la date de l'inspection en question est située avant la date prévue pour récupération de la pièce sur site. En termes de relations mathématiques, ceci se traduit par la condition suivante :

$$\text{Si } D_{jk} \leq D_{j'k'} \leq D_{jk+1} + R * 7$$

Alors :

$$X_{ijk} + X_{ij'k'} \leq 1 \quad \forall k, k' \in E_K \text{ avec } k' \neq k, \quad \forall j, j' \in E_J \quad \text{et} \quad \forall i \in E_I$$

- d. L'utilisation d'une pièce  $i$  doit respecter sa durée de vie maximale, et donc le cumul des heures de marches équivalent pour l'ensemble des cycles d'exploitation pour lesquels la pièce  $i$  est installée doit être inférieur ou égal au nombre d'heures de marche maximale que la pièce est supposée satisfaire. Il faut rappeler aussi qu'une pièce installée dans la date  $D_{jk}$  va servir le cycle  $D_{jk+1} - D_{jk}$  et donc la contrainte imposée par la durée de vie de la pièce est exprimée comme suit :

$$\sum_{j=1}^{j=J} \sum_{k=1}^{k=K} X_{ijk} * (D_{jk+1} - D_{jk}) \leq C_{max} \quad \forall i \in E_I$$

- e. Il faut également exprimer l'obligation d'installer une et une seule pièce pour chacune des inspections préventives. Elle correspond à l'inégalité suivante :

$$\sum_{i=1}^{i=n} X_{ijk} = 1 \quad \forall j \in E_J \quad \text{et} \quad \forall k \in E_K$$

- f. La dernière contrainte a été rajoutée dans la phase de correction du modèle, étant donné qu'elle correspond à la définition de la deuxième variable de décision. En effet, si une pièce est utilisée au moins une fois alors la somme des variables de décision de son installation sur toutes les turbines et dans toutes inspections possède une valeur non nulle, et vice versa, si la pièce n'a jamais été utilisée, ladite somme est forcément nulle. On en déduit alors, que cette somme exprime inversement la définition de la variable de décision  $Y_i$ , d'où l'identification des deux contraintes suivantes :

$$\sum_{j=1}^{j=J} \sum_{k=1}^{k=K} X_{ijk} * Y_i = 0 \quad \text{et} \quad \sum_{j=1}^{j=J} \sum_{k=1}^{k=K} X_{ijk} \neq Y_i \quad \forall i \in E_I$$

➤ **La fonction objectif :**

La construction de la fonction objectif correspondante à notre modèle paraît très simple à faire du moment où le but ultime est clair : réduire le nombre de pièces achetées, ou en d'autres termes, maximiser l'utilisation des pièces disponibles en stocks. Cependant, ladite fonction objectif est passée par trois formes avant d'aboutir à un résultat satisfaisant

D'abord, nous avons défini la première forme en se basant sur un raisonnement simple : la réduction du nombre de pièces achetées et la maximisation de l'utilisation des pièces disponibles sont deux objectifs qui relèvent du même principe et donc mènent au même résultat. La fonction objectif a été définie alors comme étant :

$$Max f(X_{ijk}) = \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=J} \sum_{k=1}^{k=K} [InitFFH_i + X_{ijk} * (D_{jk+1} - D_{jk})]$$

Par ailleurs, une simple analyse de l'expression établie, ainsi qu'un déroulement rapide sur un cas d'application, montrent que l'objet de maximisation est une grandeur fixe, qui ne peut en aucun cas être optimisée, vu que les  $X_{ijk}$  doivent satisfaire la 5<sup>ième</sup> contrainte énumérée précédemment. En effet, pour chaque combinaison de  $j$  et  $k$  dans les termes de la triple somme, nous allons forcément avoir un seul  $i$  dont le  $X_{ijk}$  est égal à 1, et donc cela revient à maximiser la double somme sur  $j$  et  $k$  des cycles d'exploitation  $(D_{jk+1} - D_{jk})$  et qui sont fixes par définition.

En vue de remédier à cette défaillance, l'ajout d'un nouveau paramètre relatif uniquement aux pièces, semble apporter l'amélioration voulue, puisqu'il va assurer une certaine distinction entre les pièces par rapport à leurs utilisations dans les inspections.

Le raisonnement pour exprimer l'objectif est resté le même, sauf que cette fois, nous sommes parties du principe que la maximisation de l'utilisation des pièces revient à la minimisation de leurs durées de vie restante. Le paramètre introduit est donc : la durée de vie des pièces et la nouvelle forme de la fonction objectif est donnée par l'expression suivante :

$$\text{Min } f(X_{ijk}) = \sum_{i=1}^{i=n} [C_{max} - \text{InitFFH}_i - \sum_{j=1}^{j=J} \sum_{k=1}^{k=K} X_{ijk} * (D_{jk+1} - D_{jk})]$$

Effectivement, cette expression fait bien l'objet de l'optimisation voulue, toutes les pièces sont utilisées à leur maximum dans le système. Néanmoins, le déroulement du modèle, avec un grand nombre de pièces pour les deux cas d'application, dévoile l'existence d'une autre anomalie dans la fonction objectif. Les résultats obtenus sont supposés utiliser un minimum de pièces si on suit le raisonnement de construction, or, ce n'est pas le cas pour les deux exemples d'application, où le nombre de pièces proposé par le déroulement du modèle est plus grand que celui utilisé par la simulation manuelle, et on constate en même temps que certaines pièces ne sont pas utilisées à leur maximum.

Cette anomalie est expliquée par le fait qu'aucune distinction n'est faite entre les pièces utilisées et celles qui sont neuves, pourtant c'est une opération clé pour prioriser l'utilisation des pièces réparées dans la décision d'installation. Dans ce modèle, le problème se pose dans le calcul de la durée de vie restante des pièces non utilisées. La fonction objectif telle qu'elle est présentée, priorise indirectement l'utilisation d'un maximum de pièces dans le déroulement, afin de ne pas avoir à la fin des pièces nouvelles, dont la durée de vie restante est très grande, car ceci est antagonique avec son objectif de minimisation.

A ce stade, il faut introduire un nouveau terme dans la fonction objectif, permettant la distinction entre les pièces qui sont utilisées au moins une fois et celles qui sont nouvelles. D'après l'analyse des résultats, cette distinction doit porter sur le calcul des durées de vie restantes, dans le sens où il convient de considérer qu'une pièce non utilisée a une durée de vie restante nulle. C'est cette nécessité de distinction qui justifie la définition de la deuxième variable de décision, et l'expression de la fonction devient :

$$\text{Min } f(X_{ijk}) = \sum_{i=1}^{i=n} [C_{max} - \text{InitFFH}_i - \sum_{j=1}^{j=J} \sum_{k=1}^{k=K} X_{ijk} * (D_{jk+1} - D_{jk}) - Y_i * C_{max}]$$

C'est la fonction objectif retenue pour la construction du modèle mathématique représentant notre problématique, elle a été validée par un déroulement sur les deux exemples d'application, et les résultats obtenus sont très satisfaisants.

A la fin de cette phase de construction, il importe de faire appel à une méthode de résolution adaptée, supportée par un outil informatique puissant, dans le but de visualiser les résultats et de corriger le modèle au fur et à mesure. La méthode de résolution que nous avons choisie, est présentée dans le paragraphe suivant.

### 5.2.3 Troisième phase : La résolution du modèle mathématique

La troisième phase du travail, permet de définir le scénario optimal d'utilisation des PDR sur le calendrier de maintenance, et ce à travers la détermination des valeurs de chacune des variables de décision correspondantes à ce cas. Avant de présenter la méthode de résolution choisie pour notre modèle, il convient de le présenter sous sa forme finale :

**Fonction objectif:**

$$\text{Min } f(X_{ijk}) = \sum_{i=1}^{i=n} [C_{max} - \text{InitFFH}_i - \sum_{j=1}^{j=J} \sum_{k=1}^{k=K} X_{ijk} * (D_{jk+1} - D_{jk}) - Y_i * C_{max}]$$

**Sous contraintes:**

$$D_{minj} \leq D_{jk+1} - D_{jk} \leq D_{maxj} \quad \forall j \in E_j \quad \text{et} \quad \forall k \in E_K \dots \dots \dots (1)$$

$$X_{ijk} + X_{ijk+1} \leq 1 \quad \forall i \in E_I, \quad \forall j \in E_j \quad \text{et} \quad \forall k \in E_K \dots \dots \dots (2)$$

$$\text{Si} \quad D_{jk} \leq D_{j'k'} \leq D_{jk+1} + R * 7$$

$$\text{Alors} \quad X_{ijk} + X_{ij'k'} \leq 1 \quad \forall k, k' \in E_K \text{ avec } k' \neq k, \quad \forall j, j' \in E_j \quad \text{et} \quad \forall i \in E_I \dots (3)$$

$$\sum_{j=1}^{j=J} \sum_{k=1}^{k=K} X_{ijk} * (D_{jk+1} - D_{jk}) \leq C_{max} \quad \forall i \in E_I \dots \dots \dots (4)$$

$$\sum_{i=1}^{i=n} X_{ijk} = 1 \quad \forall j \in E_j \quad \text{et} \quad \forall k \in E_K \dots \dots \dots (5)$$

$$\sum_{j=1}^{j=J} \sum_{k=1}^{k=K} X_{ijk} * Y_i = 0 \quad \text{et} \quad \sum_{j=1}^{j=J} \sum_{k=1}^{k=K} X_{ijk} \neq Y_i \quad \forall i \in E_I \dots \dots \dots (6)$$

La méthode du SIMPLEXE (voir paragraphe 2.2.1.1), est jugée la méthode la plus adaptée à la résolution de ce modèle caractérisé par sa linéarité dans la fonction objectif ainsi que dans les contraintes. C'est une méthode très connue pour sa performance de résolutions des problèmes linéaires formulés dans la pratique. Son principe consiste à suivre un processus itératif permettant de se déplacer sur l'espace des solutions réalisables, jusqu'à atteindre la solution optimale. L'exécution de l'algorithme SIMPLEXE devient très lourde quand le nombre des variables de décision est grand. Dans ce cas, l'utilisation de l'outil informatique se montre nécessaire.

Le modèle construit dans le cadre du présent travail, possède des variables de décisions matricielles, dont les dimensions dépendent de la taille du système étudié : le nombre de pièces, le nombre de turbines et le nombre d'inspection par turbines. Par conséquent, la taille du problème que nous allons traiter est suffisamment grande pour susciter l'utilisation d'un logiciel de résolution.

A ce stade, nous avons choisi un solveur de programmes linéaires, qui utilise le principe de la méthode SIMPLEXE et présente une interface de modélisation adaptée au langage C, qui est un langage basique de programmation informatique. Il s'agit du logiciel CPLEX développé par l'entreprise IBM.

Par ailleurs, la codification sur CPLEX du modèle mathématique tel qu'il est formulé au début de cette section, n'est pas possible. Le problème se pose au niveau de la troisième contrainte puisqu'elle est définie par une expression conditionnelle. Les contraintes de ce

type, désignées dans le domaine de l'optimisation sous contrainte par : les clauses bijonctives faisant partie des contraintes dynamiques, ne sont pas supportées par le CPLEX.

Pour pallier à ce problème, il suffit de remplacer la contrainte sujette à l'expression conditionnelle, par l'ensemble de contraintes équivalentes qu'elle regroupe sous cette condition. En d'autres termes, les nouvelles contraintes sont établies à partir de la contrainte principale, en déterminant toutes les combinaisons de  $i, j$  et  $k$  pour lesquelles la condition est satisfaite.

Cela rend la formalisation finale du modèle, très dépendante du cas d'application, dans le sens où, pour dérouler la résolution, il ne suffira pas d'introduire simplement les valeurs des paramètres d'entrées, mais également, il faudra établir un ensemble de contraintes, déterminées par l'utilisateur, en fonction de la condition exprimée.

D'après ladite condition, l'utilisateur doit parcourir le calendrier de maintenance pour identifier toutes les combinaisons de variables de décisions correspondantes à des dates d'inspection espacées par un intervalle de temps qui ne permet pas qu'une pièce donnée soit installée dans ces deux inspections, c'est-à-dire, si elle est installée dans l'une, elle ne peut forcément pas l'être dans la deuxième, et vice versa.

Bien que ce principe soit simple, il s'avère difficile d'exécuter cette étape manuellement quand la taille du problème est grande. De ce fait, nous avons eu recours à un deuxième outil informatique en vue d'automatiser la formation des contraintes à partir du planning de maintenance.

Il s'agit d'un programme informatique codé en langage Java, qui prend en données d'entrée : les dates des inspections et le temps de réparation des en semaines, et fournit en sortie une liste exhaustive des contraintes qui répondent positivement à la condition expliquée précédemment. Le code que nous avons développé dans ce sens est attaché en **annexe VII**.

Ensuite, en remplaçant la contrainte bijonctive dans la formulation du modèle, par la liste obtenue des contraintes simples, le problème de codification du modèle sur CPLEX est résolu. Finalement, le code de modélisation qui permet la résolution de notre problématique sur CPLEX est intégralement présenté dans **l'annexe VIII**.

#### 5.2.4 Quatrième phase : Validation des résultats

Comme expliqué précédemment, le résultat final de la résolution du modèle mathématique proposé, consiste à définir les valeurs prises par chacune des variables de décisions lorsque la fonction objectif atteint son optimum.

Dans le cas de notre problématique, la résolution par le CPLEX permet de visualiser les résultats sous forme d'un tableau de valeurs booléennes attribuées chacune à une combinaison de  $i, j$  et  $k$  de la variable de décision d'installation de la pièce  $i$  dans la  $k^{\text{ème}}$  inspection de la turbine  $j$ . De même pour la variable de décision d'utiliser une pièce  $i$ , un autre tableau booléen est présenté, afin de déterminer la valeur que prend cette variable pour chacune des pièces.

En vue de valider les résultats fournis par le CPLEX, nous avons déroulé le modèle sur les deux cas d'application traités dans la phase de l'étude préliminaire. Ceci dit que les valeurs que nous avons passées en paramètres d'entrée pour le modèle sur CPLEX, correspondent exactement aux données fournies par les responsables des deux centrales électriques A et B, et ce pour chacune des pièces capitales.

Les résultats obtenus sont validés dans un premier temps avec un simple déroulement ayant pour but de voir si la solution affichée est réalisable dans nos exemples d'application. Dans le cas contraire, il convient de revoir l'ensemble des contraintes formulées dans le modèle, de les modifier selon le besoin, et de vérifier encore si elles interprètent intégralement les contraintes réelles.

Ensuite, la validation finale du modèle se fait à travers la comparaison entre les résultats affichés sur l'interface du CPLEX et les résultats obtenus par la simulation manuelle que nous avons effectuée dans la première phase : le modèle est validé si et seulement si le CPLEX affiche des résultats identiques ou meilleurs que ceux obtenus manuellement.

Finalement, il est opportun de dire que tous les cas d'applications que nous avons exécutés sur le modèle élaboré, ont permis de mettre en valeur son aptitude à répondre au besoin d'optimisation des flux de PDR, notamment les pièces capitales.

### 5.3 Bilan et perspectives du projet

Dans cette section, nous allons mettre en valeur la solution proposée, par l'application du modèle sur la gestion des flux de pièces capitales dans les deux sites. Pour ce faire, il semble intéressant de comparer les résultats obtenus avec les ordres d'achat déterminé sur l'interface de l'ICAM, et d'estimer par la suite la valeur du gain réalisé.

Il est à noter que la solution proposée a été validée par l'entreprise, et elle sera mise en place dans le cadre de l'exécution du contrat « Méga Deal » signé récemment.

#### 5.3.1 Valorisation des résultats :

Le modèle proposé dans ce travail, permet l'optimisation de la détermination du besoin en termes de pièces capitales, et les résultats obtenus sont détaillés dans les deux tableaux 12 et 13 pour les deux sites A et B respectivement.

Pièces dans le site A	Besoin déterminé par ICAM	Besoin déterminé par la simulation manuelle	Besoin déterminé par le modèle	Gain Réalisé par le modèle
<b>S1B</b>	5	5	5	0
<b>S1N</b>	5	5	5	0
<b>S1S</b>	5	5	5	0
<b>S2B</b>	5	5	5	0
<b>S2N</b>	14	9	7	7
<b>S2S</b>	5	5	5	0
<b>S3B</b>	5	5	5	0
<b>S3N</b>	5	5	5	0
<b>S3S</b>	8	5	5	3
<b>CAP</b>	6	6	6	0
<b>FN</b>	6	6	6	0
<b>LN</b>	6	6	6	0
<b>TP</b>	6	6	6	0

Tableau 12: Comparaison des résultats dans le site A

Pièces dans le site B	Besoin déterminé par ICAM	Besoin déterminé par la simulation manuelle	Besoin déterminé par le modèle	Gain Réalisé par le modèle
<b>S1B</b>	6	6	6	0
<b>S1N</b>	5	5	5	0
<b>S1S</b>	5	5	5	0
<b>S2B</b>	5	5	5	0
<b>S2N</b>	11	9	9	2
<b>S2S</b>	8	5	5	3
<b>S3B</b>	6	6	6	0
<b>S3N</b>	6	6	6	0
<b>S3S</b>	5	5	5	0
<b>CAP</b>	6	6	5	0
<b>FN</b>	6	6	5	0
<b>LN</b>	6	6	5	0
<b>TP</b>	6	6	5	0

Tableau 13: Comparaison des résultats dans le site B

Cette optimisation consiste en une économie de dix (10) pièces capitales dans le site A et cinq (5) pièces capitales dans le site B. Afin de donner un sens plus expressif à cette quantification, nous allons estimer le gain réalisé en termes de coût, et ce à travers un calcul simple faisant intervenir le prix d'achat de chacune des pièces capitales, voir tableau 14.

**Remarque :** Il faut signaler d'abord, que les valeurs des prix utilisés dans le calcul en question, ont été transformées par les responsables de l'entreprise à l'aide d'une fonction mathématique, pour des raisons de confidentialité. La fonction choisie est une fonction croissante, c'est-à-dire si un prix réel de la pièce  $i$  noté  $X_i$  est supérieur au prix réel de la pièce  $j$  noté  $X_j$ , alors le prix modifié de la pièce  $i$  noté  $X'_i$  reste supérieur au prix modifié de la pièce  $j$  noté  $X'_j$ .

Pièces Capitales	Prix	Gain du site A	Gain du site B	Gain Total
<b>S1B</b>	233,612 \$	0 \$	0 \$	0 \$
<b>S1N</b>	147,251 \$	0 \$	0 \$	0 \$
<b>S1S</b>	94,077 \$	0 \$	0 \$	0 \$
<b>S2B</b>	199,984 \$	0 \$	0 \$	0 \$
<b>S2N</b>	138,303 \$	968,121 \$	276,606 \$	1244,727 \$
<b>S2S</b>	31,866 \$	0 \$	95,598 \$	95,598 \$
<b>S3B</b>	169,115 \$	0 \$	0 \$	0 \$
<b>S3N</b>	130,602 \$	0 \$	0 \$	0 \$
<b>S3S</b>	21,757 \$	65,271 \$	0 \$	65,271 \$
<b>CAP</b>	16,458 \$	0 \$	0 \$	0 \$
<b>FN</b>	31,993.13 \$	0 \$	0 \$	0 \$
<b>LN</b>	50,946.94 \$	0 \$	0 \$	0 \$
<b>TP</b>	138,936 \$	0 \$	0 \$	0 \$

Tableau 14: Gains réalisés dans les deux sites

La valeur affichée du gain total, est égale à **1405,596 \$** c'est une estimation qui nécessite l'application de la fonction inverse de celle appliquée aux prix pour déterminer le gain réel, qui est, d'après les responsables de l'entreprise très important.

Un second avantage qui met en valeur l'apport de la solution proposée, réside dans le fait que les gains obtenus sont croissants en fonction de la taille du problème. En effet, une gestion mutuelle des pièces capitales dans les deux sites A et B maximise encore mieux l'utilisation des pièces.

Ceci a été démontré à travers l'application du modèle sur le cas où les données des deux sites sont regroupées. C'est-à-dire, on considère un exemple où :

- Le calendrier de maintenance est établi par la superposition des deux calendriers de maintenance des deux sites.
- Le stock initial de chaque pièce est égal à la somme des stocks initiaux de cette pièce dans chaque site.
- Le nombre d'ordres d'achat prévus est égal à la somme des ordres d'achat prévus pour chaque site.

Le tableau 15, présente une simple comparaison des résultats obtenus.

<b>Pièces Capitales</b>	<b>Gain total de la gestion indépendante</b>	<b>Gain total de la gestion mutuelle</b>
<b>S1B</b>	0	1
<b>S1N</b>	0	2
<b>S1S</b>	0	2
<b>S2B</b>	0	1
<b>S2N</b>	9	2
<b>S2S</b>	3	2
<b>S3B</b>	0	2
<b>S3N</b>	0	2
<b>S3S</b>	3	2
<b>CAP</b>	0	1
<b>FN</b>	0	1
<b>LN</b>	0	1
<b>TP</b>	0	1

*Tableau 15: Gain de la gestion mutuelle des deux sites A et B*

Partant de ces résultats, il est opportun de souligner la valeur capitale de l'apport du présent travail sur la gestion d'un projet d'une grande ampleur comme le Méga Deal, les PDR destinées aux différents sites du contrat peuvent être gérées mutuellement.

Un autre avantage que nous pouvons également expliciter dans cette section, est la flexibilité du modèle proposé vis-à-vis son utilisation au cours de l'exécution du contrat qui s'étale sur 20 ans.

Comme il a été justifié dans l'étude de l'existant, la demande des pièces capitales est indépendante des besoins de la maintenance curative, (**voir paragraphe 4.3.2.1**), et donc le raisonnement que nous avons adopté dans la conception du modèle est basé essentiellement sur le planning de maintenance préventive. Ceci semble rendre la solution proposée figée et manque de flexibilité, or ce n'est pas le cas. En effet, si au cours de l'exécution du contrat, une panne imprévue se produit concernant une des pièces capitales, alors la perturbation qui en résulte sur le planning de maintenance préventive, peut être prise en considération dans le modèle, en vue de modifier les résultats de manière adéquate.

Dans ce cas, l'utilisateur peut réintroduire les nouvelles dates des inspections établies après l'occurrence de la panne, ainsi que les informations mises à jour des pièces disponibles en stocks en termes de leur cumul d'heures de marche équivalent, et l'exécution du modèle va par la suite, générer le nouveau besoin optimal pour la durée restante du contrat.

### 5.3.2 Perspectives de l'étude :

Comme tout travail, la solution proposée peut faire l'objet d'une amélioration. C'est dans ce sens que nous suggérons deux axes d'amélioration. Le premier consiste à ajouter une nouvelle fonctionnalité dans le modèle proposé, et le deuxième porte sur la forme finale sous laquelle le modèle est présenté.

- La première suggestion est fondée sur deux constats clés :
  - Premièrement, l'élaboration du calendrier de maintenance préventive se fait avec une flexibilité par rapport à la durée imposée sur les intervalles de maintenance. En effet, une marge de 10% des heures de marche de l'intervalle, est accordée pour chacune des pièces et sur toutes les turbines. Ceci étant dit, les dates de maintenance peuvent être ajustées d'une durée de quelques semaines.
  - Deuxièmement, comme pour tout autre article, l'idéal dans la gestion des stocks des pièces capitales est d'avoir exactement une seule pièce livrée juste avant la prochaine inspection où elle va être installée.

A partir de ces deux constats, et dans le cas de la gestion mutuelle de plusieurs turbines, il semble très intéressant d'exploiter la marge accordée dans l'élaboration du planning de maintenance, pour ajuster les dates des inspections de façon à assurer que la durée entre deux inspections consécutives est supérieure ou égale au temps de réparation des pièces. Ce dernier étant variable, plusieurs ajustements sont possibles.

Nous avons pu prouver l'apport de cette opération d'ajustement, par un essai appliqué sur le planning des deux sites A et B, et un gain de quelques pièces a été réalisé. A cet égard, il convient d'ajouter un prétraitement des données dans l'exécution du modèle, permettant d'étendre l'espace de l'optimisation aux scénarii du planning ajusté.

- La deuxième suggestion est une proposition d'amélioration de forme :

Actuellement, pour exécuter le modèle, l'utilisateur doit entrer le planning de maintenance préventive sur l'interface JAVA afin d'avoir l'ensemble des contraintes liées aux dates des inspections, ensuite il copie le résultat sur l'interface du CPLEX dans le bloc « contraintes », pour avoir enfin la solution optimale affichée sur une autre interface de ce logiciel.

C'est une procédure qui pourrait bien être complétée par le développement d'une application qui regroupe toutes ces étapes d'exécution sur une même interface, et ce dans le but de rendre l'utilisation du modèle beaucoup plus pratique.

## Conclusion

Le dernier chapitre du document, présente la solution proposée sous forme d'un modèle mathématique qui répond au besoin identifié dans la problématique. De plus, il met l'accent sur la contribution apportée dans l'optimisation de l'utilisation des pièces capitales au sein de GEPS, et propose enfin une perspective d'amélioration.

## Conclusion Générale

*Le présent n'est pas un passé en puissance.  
Il est le moment du choix et de l'action. »*

Simone de Beauvoir

Le cadre général de la présente étude est la gestion des pièces de rechange dans le secteur de prestation de service de maintenance, et plus particulièrement, l'amélioration de sa performance. Elle a été effectuée au sein de General Electric Power Services, l'entreprise leader de ce secteur en Algérie, avec ses activités de maintenance des centrales électriques implantées un peu partout à travers le territoire national.

La phase initiale de l'étude est une analyse menée au sein de l'entreprise, en s'intéressant spécialement à la maintenance et à la gestion des pièces de rechange des turbines à gaz, l'équipement qui constitue la plus grande part des marchés octroyés à GEPS. Les notes et les constatations générées par cette analyse ont permis, entre autres, la compréhension des enjeux que présente l'environnement de travail dans un tel secteur d'activité.

Cette mise en contexte, a stimulé le besoin d'élaborer une autre analyse, encore plus poussée, dans le sens d'évaluer les approches de gestion de la catégorie des pièces de rechange la plus stratégique. A l'issue de cette analyse, un besoin crucial d'optimisation des flux est cerné, suite à l'identification d'une anomalie dans la méthode que GEPS utilise pour déterminer les besoins de la maintenance préventive pour ce type de pièces. Cette anomalie, étant une source de pertes conséquentes dans les dépenses de l'entreprise, représente une problématique importante que GEPS se trouve obligée de traiter. Une obligation qui se justifie encore plus, par l'engagement récent de l'entreprise dans l'exécution du plus grand contrat de maintenance de son histoire, nommé le « Méga Deal ».

La solution que nous avons proposée repose sur une approche de construction par contingences génériques, et consiste en la mise en place d'une démarche structurée de la détermination du besoin en pièces de rechange capitales, et ce, à travers l'élaboration d'un modèle mathématique d'optimisation sous contraintes, adapté aux caractéristiques de cette catégorie de pièces de rechange.

La première étape dans l'élaboration de la solution, est une étude préliminaire, qui a porté notamment sur le déroulement de plusieurs scénarii d'utilisation des pièces sur le planning de maintenance préventive. L'objectif étant de comprendre le comportement du système et d'en tirer les caractéristiques du scénario optimal, facilitant ainsi la structuration du raisonnement nécessaire pour la conception du modèle.

Ensuite, dans la deuxième étape, nous avons interprété le déroulement de l'étape précédente en un langage formalisé permettant une meilleure représentation de la problématique, et ce en utilisant la modélisation mathématique sous contraintes. La construction du modèle en question, repose sur la définition de ses quatre éléments principaux : les paramètres et les données d'entrée, les variables de décision, les contraintes à satisfaire et finalement la fonction objectif à optimiser.

Une fois le modèle est établi, nous avons choisi dans la troisième étape, la méthode la plus adaptée à sa résolution. La finalité de cette étape est de déterminer, à l'aide du solveur informatique : « CPLEX », les valeurs exactes des variables de décisions, quand la fonction objectif atteint son optimum. L'utilisation du CPLEX a été conjuguée à celle d'un programme informatique codé en langage JAVA dont le but était d'automatiser la linéarisation des contraintes initialement bijonctives

Enfin, la dernière étape de notre contribution, est une étape de validation des résultats obtenus, et ce à travers la vérification de leur réalisabilité. Le modèle obtenu, a été validé par GEPS comme une solution très satisfaisante. En effet, il répond efficacement au besoin d'optimisation exprimé par l'entreprise, lui permettant ainsi une économie conséquente de ses dépenses en termes de gestion des flux de la pièce de rechange.

A l'issue de cette démarche, nous avons suggéré quelques perspectives d'amélioration du modèle par rapport à son déploiement au sein de GEPS, spécialement pour l'exécution du « Méga Deal ».

# **Bibliographie**

---

**A**

---

[AFNOR, 2016] 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.

[Anghinolfi, Paolucci, 2009] Cours des Méthodes de Résolution Exactes Heuristiques et Métaheuristiques, Master Codes, Cryptographie Et Sécurité De L'information, Université Mohammed V, Faculté des Sciences de Rabat Laboratoire de Recherche Mathématiques, Informatique et Applications.

[Arnoux, 2004] Pièces de rechange en maintenance, Technique de l'ingénieur, MT9320.

[Arts, 2013] Spare parts planning and control for maintenance operations.

---

**B**

---

[BERGER, 2010] Modélisation et résolution en programmation par contraintes de problèmes mixtes continu/discret de satisfaction de contraintes et d'optimisation.

[Bonnans, 2006] Optimisation continue : cours et problèmes corrigés, Dunod, Paris.

---

**C**

---

[Collignon, Vermorel, février 2012] Analyse ABC pour les stocks [https://www.lokad.com/fr/definition-\(stocks\)-analyse-abc](https://www.lokad.com/fr/definition-(stocks)-analyse-abc).

[Cuignet, 2007] management de la maintenance-Edition Dunod 2007.

---

**D**

---

[Diallo, 2006], Claver Diallo DEVELOPPEMENT D'UN MODELE D'IDENTIFICATION ET DE GESTION DES PIÈCES DE RECHANGE.

---

**F**

---

[Feautrier, 2005] Algorithmes Branch & Bound Module IAD/RP/RO Master d'informatique Paris 6.

[Furtuna, 2010] guide des travaux pratiques, « *Organisation et gestion des pièces de rechange* », Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail, Direction recherche et ingénierie de formation, Maroc. Disponible sur internet à partir du lien : <http://www.scribd.com/doc/51551562/M16-ORGANISATION-ET-GESTION-DES-PIECES-DE-RECHANGE-TH-RMC>

---

**G**

---

[General Electric, 2016] Documents internes de General Electric.

---

**I**

---

[INRS-ND 2294-212-08, 2008] Processus de maintenance : Retour d'expérience sur les facteurs de risque, INRS-Hygiène et sécurité du travail- cahier de notes documentaires-3<sup>ème</sup> trimestre 2008.

[**Lalloux, 2009**] Le Management de la maintenance selon l'ISO 9001 version 2008- Edition AFNOR 2009.

---

## N

---

[NF X 60-012] Norme de Maintenance : termes & définitions des éléments constitutifs des biens & de leur approvisionnement.

[**Noual, 2016**] Cours de maintenance, département génie industriel, Ecole Nationale Polytechnique, Alger.

---

## P

---

[**Perrot, 2014**] Simplexe Méthodes, Techniques et Outils pour le Raisonnement Basé sur les cours d'E. Fromont<sup>1</sup>, M. Bierlaire<sup>2</sup> et C. Jard<sup>3</sup>. 1 : Université Jean Monnet, 2 : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 3 : Ecole Nationale Supérieure de Cachan.

[**Pimor, 2008**] Logistique, Production, Distribution, Soutien, Dunod, Paris.

---

## R

---

[**Rao, 1996**] Engineering optimization: theory and practice. John Wiley & Sons, New-York.

[**Rego et Al, 2011**] Spare parts inventory control : a literature review, v°21, N° 4, p. 656-666.

[**Roux, 2011**] Entrepôts et magasins Tout ce qu'il faut savoir pour concevoir une unité de stockage. Prix littéraire 2011 de Supply chain magazine avec le concours de Generix Group Sixième édition.

---

## Z

---

[**Zerrari et Mouss, 2009**] Développement d'un Outil d'Optimisation Basé sur les Algorithmes Génétiques, 5th International Conference : Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications, March 22 – 26, Tunisia. Disponible sur internet à partir du lien : [http://www.setit.rnu.tn/last\\_edition/setit2009/Information%20Processing/188.pdf](http://www.setit.rnu.tn/last_edition/setit2009/Information%20Processing/188.pdf)

## Webographie

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00560963/document>

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00560963/document>

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00009238/document>

<http://www.fsr.ac.ma/cours/math/bernoussi/Cours%20C2SI.pdf>

<http://www.logistiqueconseil.org/Fiches/Gestion-des-stocks/Categories-de-stocks.pdf>

<http://www.cegepshebrooke.qc.ca/~desjarfr/tmi/acrobat/chap1%20b.pdf>

<file:///C:/Users/212600392/Downloads/nd2294.pdf>

<http://www.petite-entreprise.net/P-1338-136-G1-quels-sont-les-differents-types-et-les-finalites-des-stocks.html>

<http://www.boutique-formation.afnor.org/2017/ingenierie-industrielle-production-maintenance/maintenance-industrielle-methodes-et-organisation/management-de-la-fonction-maintenance/c1563>

<http://197.14.51.10:81/pmb/Qualite/Management%20de%20la%20maintenance%20selon%20IIISO%209001%202008.pdf>

[http://www.maintenanceandco.com/files/avis\\_experts/La\\_gestion\\_des\\_stocks\\_\\_un\\_cassete\\_te\\_pour\\_les\\_responsables\\_maintenance\\_\\_janvier\\_2012.pdf](http://www.maintenanceandco.com/files/avis_experts/La_gestion_des_stocks__un_cassete_te_pour_les_responsables_maintenance__janvier_2012.pdf)

<https://www-01.ibm.com/software/commerce/optimization/cplex-optimizer/>

<http://www.excel-easy.com/data-analysis/solver.html>

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

### Liste des ouvrages consultés

Santus P., 2009, « *Organisation de la gestion des pièces détachées* », Rapport de travail d'option réalisé au sein du Groupe Atlantic, Option Gestion Scientifique, Ecole des Mines – Paris Tech, Paris. Disponible sur internet à partir du lien :

<http://www.cgs.ensmp.fr/old/options/GS/rapports/09Atlantic.pdf>

Z. S. Hua, B. Zhang, J. Yang and D. S. Tan, A New Approach of Forecasting Intermittent Demand for Spare Parts Inventories in the Process Industries. Source: The Journal of the Operational Research Society, Vol. 58, No. 1 (Jan., 2007), pp.52-61. Disponible sur internet à partir du lien :

<http://www.jstor.org/stable/4622667>

J. Stoll • R. Kopf • J. Schneider • G. Lanza, Criticality analysis of spare parts management: a multi-criteria classification regarding a cross-plant central warehouse strategy. Received: 14 October 2014 / Accepted: 29 January 2015 / Published online: 4 February 2015.

Adnane Lazrak, Amélioration des processus de prévision et de gestion des stocks dans le cas d'une chaîne logistique des pièces de rechange. Ecole des Mines de Nantes, 2015.

# **Annexes**

---

**Liste des Annexes**

<b>Annexe I: Le modèle de Wilson.....</b>	<b>93</b>
<b>Annexe II: Organigramme de GEPS en Algérie .....</b>	<b>94</b>
<b>Annexe III: Analyse Pareto des pièces de rechange à GEPS.....</b>	<b>95</b>
<b>Annexe IV: Analyse multicritère des catégories A et B suivant le principe de la méthode AMDEC .....</b>	<b>109</b>
<b>Annexe V: Analyse de l'historique des arrêts imprévus des turbines de type 9FA à travers le monde, depuis 2011. ....</b>	<b>114</b>
<b>Annexe VI: Exemple de déroulement de la simulation manuelle sur un planning de maintenance préventive. ....</b>	<b>122</b>
<b>Annexe VII: Code Java utilisé.....</b>	<b>123</b>
<b>Annexe VIII: Code CPLEX utilisé.....</b>	<b>127</b>

## Annexe I: Le modèle de Wilson

Dans un contexte déterministe, Harris a donné une réponse à la question « combien approvisionner ? ». Il s'agit du concept de quantité économique ou EOQ. Harris a démontré (une formule dite de Wilson) que la quantité optimale d'approvisionnement était égale à :

$$Q^* = \sqrt{\frac{2 * S_d * C_0}{i * C_u}}$$

Avec :

$C_u$  : le Coût unitaire d'un produit.

$S_d$  : la demande par période.

$C_0$  : le Coût de passation d'une commande.

$i$  : le taux de possession par période.

Les hypothèses du modèle de Wilson :

Le coût unitaire d'un produit est constant et indépendant de la quantité commandée.

La demande est connue, continue et constante.

Le coût de passation de la commande est constant et indépendant de la quantité commandée.

Le coût de possession du stock est proportionnel au coût du produit ( $i * C_u$ ).

Le réapprovisionnement se fait en une seule fois.

## Annexe II: Organigramme de GEPS en Algérie

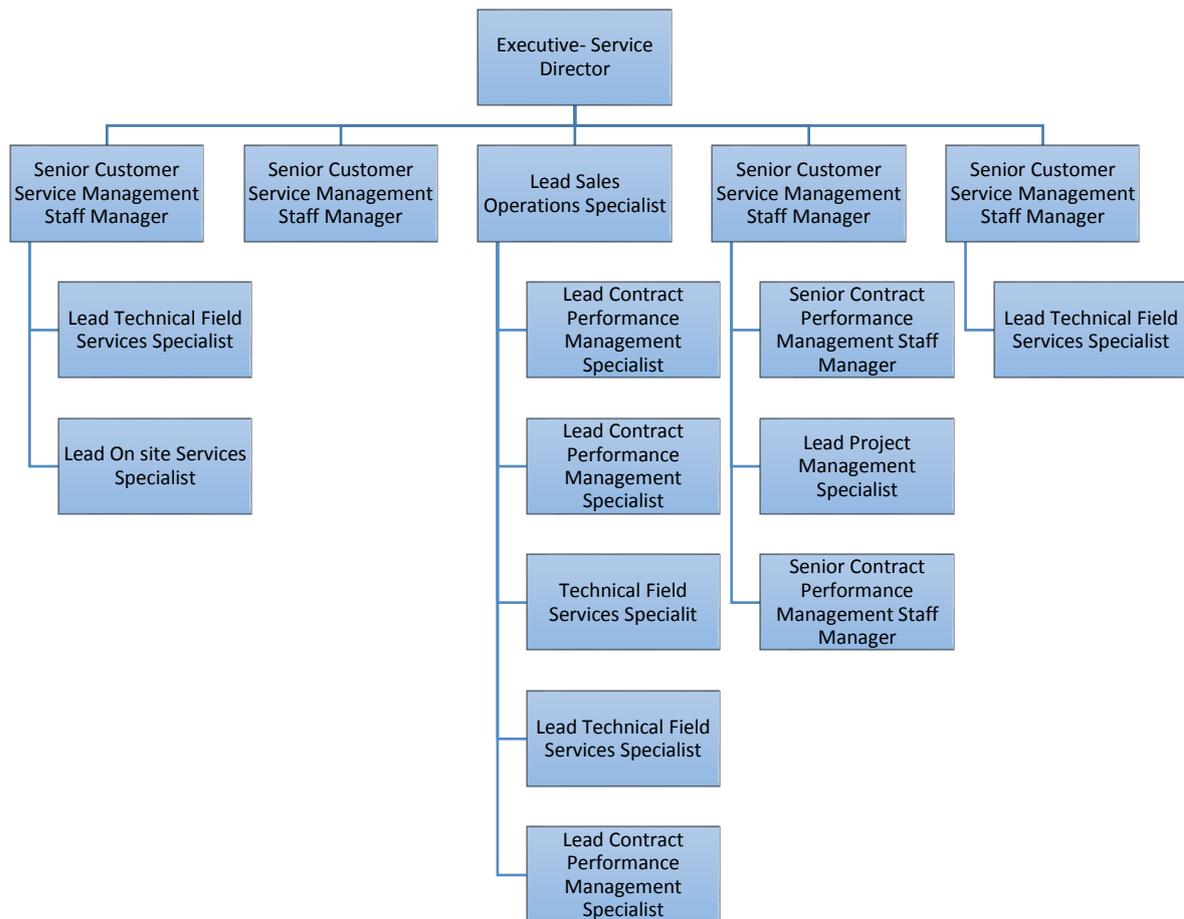


Figure 16: Organigramme de GEPS

### Annexe III: Analyse Pareto des pièces de rechange à GEPS

L'analyse est menée par rapport au prix d'acquisition des pièces de rechange, ci-dessous les résultats obtenus.

Code Couleur : Classe A ■ Classe B ■ Classe C ■

parts	unit price	%	Cumul %
One complete set of rotor blades including their accessories (one left and one right) for the three last stages of the LP rotor. (Buckets)	\$ 281,612	5.83630564	5.83630564
Buckets Stage 1 and accessories	\$ 233,959	4.848711	10.6850166
Air filter cartridges (un complete set per group)	\$ 218,600	4.53040057	15.2154172
Buckets Stage 2 and accessories	\$ 199,984	4.14459773	19.3600149
Set of rotor blades stage n with accessories (n being the number of rotor stage compressor)	\$ 195,626	4.05426476	23.4142797
One complete valve HP regulator	\$ 181,290	3.75716543	27.1714451
SEE GEN LIST	\$ 173,083	3.58708444	30.7585296
SEE ST B	\$ 170,625	3.5361424	34.294672
Buckets Stage 3 and accessories	\$ 169,115	3.50483585	37.7995078
Nozzles Stage 1 and accessories	\$ 147,251	3.05172625	40.8512341
SEE ST C	\$ 146,835	3.04309008	43.8943241
Main compressor of air atomization	\$ 144,366	2.99193797	46.8862621
Transition Pieces and accessories	\$ 138,936	2.8793958	49.7656579
Nozzles Stage 2 and accessories	\$ 138,303	2.86627873	52.6319366
Nozzles Stage 3 and accessories	\$ 130,602	2.70668394	55.3386206
Shrouds Stage 1 and accessories (included)	\$ 94,077	1.94971497	57.2883355
Complete generator exciter	\$ 83,733	1.7353295	59.023665
MI	\$ 81,686	1.6929124	60.7165774
CI	\$ 53,347	1.10560549	61.8221829
ASSY, COMB LINER	\$ 50,946.94	1.05585574	62.8780387
Complete set of moving parts (mechanism)	\$ 42,301	0.87667193	63.7547106
2 Vannes CRV (2 actionneurs par Vanne)	\$ 42,301	0.87667193	64.6313825

1 x ACV	\$ 42,301	0.87667193	65.5080545
1 x ASV	\$ 42,301	0.87667193	66.3847264
One complete set of HP sectors nozzles Assuming Stator Blades means Diaphragms with Nozzles	\$ 40,699.10	0.84347305	67.2281995
COOLER	\$ 39,873	0.82634738	68.0545468
RETAINING RING (MACH)	\$ 32,668	0.6770379	68.7315847
Liste C086	\$ 32,341	0.67026279	69.4018475
Fuel Nozzles & accessories	\$ 31,993.13	0.6630453	70.0648928
<b>SEE ST PUMP LIST</b>	\$ 31,931	0.6617536	70.7266464
Shrouds Stage 2 and accessories	\$ 31,866	0.66040455	71.387051
Liste EXC	\$ 29,978	0.62128199	72.008333
Rotor wedges (one set in installed quantity)	\$ 22,784	0.4721985	72.4805315
STOP/RATIO VLV ASEM(HDWR)	\$ 22,439	0.46504066	72.9455721
Servomotor MOV-SAD-1	\$ 22,359	0.46338374	73.4089559
Servomotor MOV-SAD-2	\$ 22,359	0.46338374	73.8723396
Servomotor MOV-SPD	\$ 22,359	0.46338374	74.3357233
Servomotor MOV-SPD-2	\$ 22,359	0.46338374	74.7991071
Servomotor MOV-SPD-3	\$ 22,359	0.46338374	75.2624908
Servomotor MOV-SPDV-1	\$ 22,359	0.46338374	75.7258745
Servomotor MOV-SSD-1	\$ 22,359	0.46338374	76.1892583
Servomotor MOV-SSD-2	\$ 22,359	0.46338374	76.652642
Servomotor MOV-SSV-1A	\$ 22,359	0.46338374	77.1160257
Servomotor MOV-SSV-3A	\$ 22,359	0.46338374	77.5794095
Servomotor MOV-SSV-3B	\$ 22,359	0.46338374	78.0427932
Servomotor MOV-SSV-4A	\$ 22,359	0.46338374	78.506177
Servomotor MOV-SSV-4B	\$ 22,359	0.46338374	78.9695607

MOV-SAD-1	\$ 21,987	0.45566902	79.4252297
MOV-SAD-2	\$ 21,987	0.45566902	79.8808987
MOV-SPD	\$ 21,987	0.45566902	80.3365678
MOV-SPD-2	\$ 21,987	0.45566902	80.7922368
MOV-SPD-3	\$ 21,987	0.45566902	81.2479058
MOV-SPDV-1	\$ 21,987	0.45566902	81.7035748
MOV-SSD-1	\$ 21,987	0.45566902	82.1592439
MOV-SSD-2	\$ 21,987	0.45566902	82.6149129
MOV-SSV-1A	\$ 21,987	0.45566902	83.0705819
MOV-SSV-3A	\$ 21,987	0.45566902	83.5262509
MOV-SSV-3B	\$ 21,987	0.45566902	83.98192
MOV-SSV-4A	\$ 21,987	0.45566902	84.437589
MOV-SSV-4B	\$ 21,987	0.45566902	84.893258
Shrouds Stage 3 and accessories	\$ 21,757	0.45091208	85.3441701
LCI	\$ 19,873	0.41185783	85.7560279
SENSOR, VIBRATION	\$ 19,873	0.41185783	86.1678857
Set of stator blades stage n with accessories (n being the number of stator stage compressor)	\$ 18,785.29	0.38931784	86.5572036
SEE ST A	\$ 17,982	0.37267607	86.9298797
One bundle of pipes for oil cooler	\$ 17,820	0.36930694	87.2991866
Bundle exchanger (radiator) with water box, gasket, bolts	\$ 17,820	0.36930694	87.6684935
UNIT RTR STUD ASSY-9FA+E	\$ 17,005	0.3524181	88.0209116
CAP ASSY, MULTI NOZZLE	\$ 16,458	0.34109465	88.3620063
Fuel pump rotor	\$ 16,154	0.33478986	88.6967962
One aspiration pump	\$ 16,096	0.33357448	89.0303706
Thermostatic valve of lubrication oil water refrigeration	\$ 15,077	0.31247204	89.3428427

Backup oil pump unit (DC)	\$ 14,774	0.30618104	89.6490237
Main oil pump	\$ 14,053	0.2912514	89.9402751
Fuel flow divider	\$ 13,759	0.28515076	90.2254259
GAS FUEL CONTROL VALVE	\$ 13,592	0.28168665	90.5071125
GAS FUEL CONTROL VALVE	\$ 12,180	0.2524182	90.7595307
GAS FUEL CONTROL VALVE	\$ 11,139	0.23084947	90.9903802
One set of wear parts for the load and speed control system. Primary speed probe (Qty 3) + Emergency over speed probe (Qty 3)	\$ 11,104	0.23011665	91.2204968
	\$ 11,054	0.2290936	91.4495904
TB CNTLS	\$ 10,466	0.21690701	91.6664974
3300 PROXIMITOR SENSOR	\$ 10,466	0.21690701	91.8834044
PURGE VALVE	\$ 9,632	0.19961396	92.0830184
	\$ 9,155	0.18973482	92.2727532
	\$ 9,071	0.18799081	92.460744
Mass rotor control system - I don't know what this is	\$ 8,912	0.18469437	92.6454384
IGV (position transmitter) (one per TG)	\$ 8,641	0.17907503	92.8245134
Bearings (at least in installed qty)	\$ 8,544	0.17707444	93.0015879
Thermostatic valve of air atomization cooling	\$ 8,506	0.17627512	93.177863
By-pass valve for fuel flow control	\$ 8,505	0.17626777	93.3541308
THRUST RING/BRG. ASSY.	\$ 8,293	0.1718788	93.5260096
PURGE VALVE	\$ 8,026	0.16634497	93.6923545
ELEC PURGE VL	\$ 8,026	0.16634497	93.8586995
Auxiliary oil pump unit (AC)	\$ 7,921	0.16416199	94.0228615
TUBE, CROSSFIRE OUTER	\$ 7,869	0.16308652	94.185948
Lifting pump	\$ 7,636	0.15825243	94.3442004
LINING (18.00 T.E.)	\$ 7,488	0.15519282	94.4993933

HYD ACCUMULATOR	\$ 7,399	0.15333239	94.6527256
Safety valve on liquid fuel piping	\$ 7,366	0.1526646	94.8053902
Expansion joints (one set per GT)	\$ 7,120	0.14756203	94.9529523
LINING C.E. 16"	\$ 6,749	0.13987641	95.0928287
16 X 11.75 LNR PADS-DEVN.	\$ 6,692	0.13868188	95.2315106
SEE PV02 LIST	\$ 6,410	0.13283769	95.3643483
HGP	\$ 5,910	0.12247573	95.486824
16 X 11.75 DTP ASSY	\$ 5,872	0.12169008	95.6085141
VALVE, GAS FUEL AUX. STOP	\$ 5,830	0.12083471	95.7293488
Control command instruments	\$ 5,696	0.11804963	95.8473984
Card and electric componants (10% of installed quantity and at least one)	\$ 5,696	0.11804963	95.965448
One set of generator gaskets	\$ 5,331	0.11047481	96.0759228
11.00 X 6.00 DTP ASSY	\$ 5,250	0.10880776	96.1847306
Coal (quantity needed for 01 year and at least 01 complete set )	\$ 4,896	0.10146993	96.2862005
AA STOP VALVE, 8	\$ 4,661	0.09659659	96.3827971
VACUUM BREAKER VALVE	\$ 4,645	0.09625858	96.4790557
Main pump HP	\$ 4,547	0.0942404	96.5732961
PURGE VALVE	\$ 4,216	0.08737827	96.6606744
12 X 12 BRG LINER PADS	\$ 4,138	0.08575185	96.7464262
DIFF CONTROL VALVE	\$ 3,590	0.07441093	96.8208371
FERRAZ FUSE ASEMBLIES	\$ 3,060	0.06340762	96.8842448
Starter motor of fuel flow divider	\$ 3,050	0.06321963	96.9474644
Electric fan for turbine package ventilation	\$ 2,980	0.06176392	97.0092283
I/O BOARD	\$ 2,849	0.05904987	97.0682782
Indicator, probe and transmitters (one of each type)	\$ 2,848	0.05902481	97.127303

Regulator	\$ 2,848	0.05902481	97.1863278
Gaskets, membrane and bladders (Quantity needed for one year, and at least one complete set)	\$ 2,848	0.05902481	97.2453526
Fuses and light (Quantity needed for one year, and at least one complete set)	\$ 2,848	0.05902481	97.3043774
special connectors	\$ 2,848	0.05902481	97.3634022
VALVE,BUTTERFLY	\$ 2,799	0.05800173	97.421404
CONTROLLER BOARD	\$ 2,749	0.05697499	97.478379
VALVE,BUTTERFLY	\$ 2,671	0.05536531	97.5337443
One set of valves, regulators and measuring instruments.	\$ 2,476	0.05131924	97.5850635
One isolation valve	\$ 2,458	0.05093779	97.6360013
GAS ANALYZER CELL	\$ 2,339	0.04848281	97.6844841
11 X 6 LINER PADS	\$ 2,293	0.04751821	97.7320023
	\$ 2,281	0.04728259	97.7792849
CURRENT TRANSFORMER	\$ 2,261	0.04686275	97.8261477
Refrigeration porcelain bushings	\$ 2,204	0.04568026	97.8718279
One analyzer of generator hydrogen purity per group.	\$ 2,146	0.04447965	97.9163076
Pressure indicators / differential pressure	\$ 2,136	0.04426323	97.9605708
Transmitter of pressure / differential pressure	\$ 2,136	0.04426323	98.004834
Voltage transformers (one set of each type)	\$ 2,118	0.04389675	98.0487308
Pulse detectors (a complete set by GT)	\$ 2,035	0.04217677	98.0909076
Turning Motor	\$ 2,014	0.04173751	98.1326451
FLOW METER	\$ 1,905	0.03947149	98.1721166
UNIT RTR STUD ASSY-9FA+E	\$ 1,760	0.03648485	98.2086014
Boost solenoid air atomization	\$ 1,723	0.03569874	98.2443001
VENT VLV ASSEMBLY	\$ 1,704	0.03531399	98.2796141
One thermostatic valve cooling lubricating oil.	\$ 1,704	0.03531396	98.3149281

PRESSURE RELIEF VALVE	\$ 1,672	0.03464255	98.3495706
TEMP TRANSMITTER	\$ 1,657	0.03433414	98.3839048
One coupling for lifting pump (Main and emergency)	\$ 1,581	0.03276904	98.4166738
One coupling for each lubricating oil pump (main, auxiliary, backup)	\$ 1,581	0.03276904	98.4494429
DISPLAY BOARD ASM	\$ 1,519	0.03148253	98.4809254
Flow Sleeves and accessories	\$ 1,497	0.03103198	98.5119574
Drainage valve fuel	\$ 1,493	0.03093796	98.5428953
1 set of burner flame detector per group	\$ 1,465	0.03037181	98.5732671
Flame detection cells (a complete set by GT)	\$ 1,465	0.03037181	98.6036389
HEATER	\$ 1,426	0.02954438	98.6331833
HYDRAULIC OIL FILTER DELT	\$ 1,353	0.02804392	98.6612272
VALVE, CHECK	\$ 1,338	0.02773658	98.6889638
TUBE,CROSSFIRE (FEMALE)	\$ 1,331	0.02759472	98.7165585
Pressure switch low gas pressure	\$ 1,327	0.02750072	98.7440593
Indicator of pump fuel leak	\$ 1,258	0.02606891	98.7701282
TRANSMITTER	\$ 1,220	0.0252933	98.7954215
Servo valve for fuel pump control	\$ 1,216	0.02519472	98.8206162
BAB VANE S/A	\$ 1,182	0.02450256	98.8451188
3-WAY VALVE	\$ 1,169	0.02421965	98.8693384
Key lock computer	\$ 1,139	0.02360993	98.8929483
TUBE, CROSSFIRE (MALE)	\$ 1,133	0.02349069	98.916439
LVDT gas control valve	\$ 1,120	0.02320675	98.9396458
LVDT shut-off valve and expansion	\$ 1,120	0.02320675	98.9628525
LVDT by-pass valve for fuel flow control	\$ 1,112	0.02303986	98.9858924
Anti-surge valves / Transmitter of position (One per GT)	\$ 1,083	0.02244596	99.0083383

TRANSMITTER	\$ 1,049	0.02174779	99.0300861
BAB PRESSURE SWITCH	\$ 944	0.01955944	99.0496456
EFB PRESSURE SWITCH	\$ 838	0.01737266	99.0670182
BAB PRESSURE SWITCH	\$ 838	0.01737266	99.0843909
PRESSURE TRANSMITTER	\$ 836	0.01731786	99.1017087
TRANSMITTER	\$ 815	0.0168842	99.1185929
EFB PRESSURE SWITCH	\$ 806	0.01670449	99.1352974
VALVE,BALL-MNL OPR	\$ 804	0.0166617	99.1519591
SAFETY SHUNT BOARD	\$ 750	0.01553335	99.1674925
Vent valve	\$ 747	0.01549083	99.1829833
Valve venting	\$ 747	0.01549083	99.1984741
PRESSURE TRANSMITTER	\$ 728	0.01508182	99.213556
TRANSMITTER, PRESSURE	\$ 709	0.0146916	99.2282476
VALVE,BALL	\$ 703	0.0145672	99.2428148
EFB VANE S/A	\$ 701	0.01452246	99.2573372
SWITCH DIFF PRESSURE	\$ 700	0.01451696	99.2718542
Differential pressure switch filter / Alarm	\$ 700	0.01451696	99.2863712
CASE PURIFIER	\$ 694	0.01437752	99.3007487
SW,LOW LEVEL TRIP(LS260CD	\$ 689	0.01428568	99.3150344
One set of filters of lifting oil per group.	\$ 679	0.01407366	99.329108
SEAL OIL FILTER ELEMENT	\$ 679	0.01407366	99.3431817
PRESSURE TRANSMITTERS	\$ 677	0.01402528	99.3572069
One set of 6 membranes for the accumulators (batteries)	\$ 654	0.01355174	99.3707587
Pressure transmitters	\$ 648	0.01343983	99.3841985

Pressure transmitter of compressor outlet	\$ 648	0.01343983	99.3976383
VT PRIMARY FUSE	\$ 630	0.01305039	99.4106887
3-WAY VALVE	\$ 620	0.0128398	99.4235285
Variable blades (IGV) control system	\$ 611	0.01265845	99.436187
DIF PRESSURE TRANSMITTER	\$ 607	0.01257583	99.4487628
VALVE, BUTTERFLY	\$ 561	0.01163359	99.4603964
One set of spare parts for maintenance of quick-closing valves HP and MP per group.	\$ 547	0.01134472	99.4717411
HYDRAULIC OIL SUPPLY PRES	\$ 530	0.01099198	99.4827331
PRESSURE TRANSMITTER	\$ 530	0.01099198	99.4937251
Thermostats	\$ 513	0.01062565	99.5043507
Alarm thermostat for package	\$ 513	0.01062565	99.5149764
VALVE, BALL	\$ 512	0.0106064	99.5255828
1 set of burner spark plugs per group	\$ 496	0.01027552	99.5358583
3-WAY VALVE	\$ 490	0.0101583	99.5460166
R/I CONVERTER	\$ 476	0.00986074	99.5558774
TRANSMITTER	\$ 472	0.00979029	99.5656676
OIL LEVEL SWITCH & GAGE	\$ 460	0.00954246	99.5752101
DIF PRESSURE SWITCH	\$ 459	0.00951029	99.5847204
3-WAY VALVE	\$ 434	0.0089948	99.5937152
ELEMENT, FILTER	\$ 430	0.00891852	99.6026337
Limit switch of anti-pumping valves	\$ 425	0.00880225	99.611436
One set of coupling of HP pump per group.	\$ 419	0.00867554	99.6201115
VALVE MANIFOLD	\$ 402	0.00832852	99.62844
Complete set of moving parts (internal mechanism) of each type	\$ 402	0.00832764	99.6367677

DISPLAY BOARD ASSEMBLY	\$ 402	0.0083216	99.6450893
DIF PRESSURE SWITCH	\$ 387	0.00802563	99.6531149
Bearing stop bushing	\$ 380	0.00788548	99.6610004
Limit switch	\$ 371	0.00768786	99.6686882
DIF PRESSURE GAUGE	\$ 339	0.00702348	99.6757117
Three absolute vibration sensors with transducers	\$ 311	0.00645092	99.6821626
Three relative vibration sensors with transducers	\$ 311	0.00645092	99.6886136
SENSOR, VIBRATION	\$ 311	0.00645092	99.6950645
NEEDLE VALVE	\$ 306	0.0063505	99.701415
CHECK VALVE	\$ 293	0.00607436	99.7074893
One gas detection cell	\$ 291	0.00603323	99.7135226
DIFF PRESSURE SWITCH	\$ 273	0.00566363	99.7191862
PRESSURE SWITCH	\$ 268	0.00556006	99.7247463
RELIEF VLV-HO	\$ 268	0.00555235	99.7302986
ENCL DIFF PRESSURE SWITCH	\$ 259	0.00535861	99.7356572
SWITCH DIFF PRESSURE	\$ 258	0.00534014	99.7409974
GAUGE/SWITCH, DIFF PRESS	\$ 247	0.00511163	99.746109
NEEDLE VALVE	\$ 246	0.00510122	99.7512102
BEARING SEAL INBOARD	\$ 238	0.00492771	99.7561379
BEARING SEAL OUTBOARD	\$ 238	0.00492771	99.7610656
Sensors (limit switch) of position (One set per GT)	\$ 237	0.00490602	99.7659716
PRESS SW PS-3.1	\$ 234	0.0048583	99.7708299
NEEDLE VALVE	\$ 234	0.0048583	99.7756882
RELIEF VLV-LP	\$ 232	0.00481049	99.7804987

Three absolute vibration sensors with transducers	\$ 222	0.00460502	99.7851038
Three relative vibration sensors with transducers	\$ 222	0.00460502	99.7897088
VLV NEEDLE	\$ 219	0.00454598	99.7942548
One trip valve	\$ 215	0.004449	99.7987038
DIFF PRESSURE SWITCH	\$ 214	0.00443084	99.8031346
DIFF PRESSURE SWITCH	\$ 210	0.00435385	99.8074885
PRESSURE SWITCH	\$ 208	0.00431849	99.8118069
POPPET VALVE	\$ 203	0.00419831	99.8160053
FILTER & VALVE ASSY	\$ 202	0.00419441	99.8201997
CHECK VALVE	\$ 189	0.00392306	99.8241227
SWITCH	\$ 189	0.00392044	99.8280432
valve venting limit switch	\$ 189	0.00391504	99.8319582
CARTRIDGE	\$ 188	0.00389039	99.8358486
RTD 324	\$ 186	0.00386211	99.8397107
SEAL OIL DRAIN GASKETS	\$ 186	0.00384848	99.8435592
RTD 324	\$ 185	0.00383812	99.8473973
One control valve	\$ 183	0.00379852	99.8511958
3-way solenoid valve	\$ 183	0.00379852	99.8549943
AIR BLEED VALVE	\$ 179	0.00371313	99.8587075
PRESSURE SWITCH	\$ 179	0.00370156	99.862409
BEARING SEAL INBOARD	\$ 174	0.00360902	99.8660181
BEARING SEAL OUTBOARD	\$ 174	0.00360902	99.8696271
Ribbon seals for HP, MP and LP	\$ 170	0.00353247	99.8731596
REDUCING VALVE	\$ 168	0.0034748	99.8766344

POWER SUPPLY	\$ 165	0.00341656	99.8800509
CHECK VALVE	\$ 162	0.00336611	99.883417
PRESSURE SWITCH	\$ 161	0.00333924	99.8867563
3-WAY VALVE	\$ 161	0.00333105	99.8900873
PRESSURE SWITCH	\$ 161	0.00332785	99.8934152
PRESSURE GAUGE 160PSI	\$ 159	0.00330175	99.8967169
Fuel flow measuring instruments (for fuel regulation)	\$ 158	0.00328336	99.9000003
FILTER CARTRIDGE	\$ 157	0.00325073	99.903251
One set of HP filters per group.	\$ 157	0.00325073	99.9065017
PRESSURE GAUGE 100PSI	\$ 155	0.00320684	99.9097086
Differential pressure indicator of fuel filter	\$ 153	0.00316057	99.9128691
GAS RTD ELEMENT	\$ 152	0.00314915	99.9160183
EMERGENCY LIGHT W/BATTERY	\$ 146	0.00301736	99.9190356
PRESSURE SWITCH	\$ 145	0.00301227	99.9220479
3-WAY VALVE	\$ 144	0.00297495	99.9250229
Safety valve	\$ 142	0.00295124	99.9279741
SWITCH, LIMIT	\$ 140	0.00290899	99.9308831
PRESSURE SWITCH	\$ 132	0.00274236	99.9336255
VALVE BALL 3/8	\$ 129	0.00267414	99.9362996
One filter differential pressure indicator	\$ 127	0.00263151	99.9389311
PRESSURE SWITCH	\$ 126	0.00262052	99.9415516
FILTER CARTRIDGE ELEMENT	\$ 123	0.00254791	99.9440995
FILTER	\$ 123	0.00254791	99.9466474
VALVE, SWAGELOK 1/2"	\$ 118	0.00244398	99.9490914

VLV NEEDLE	\$ 117	0.00242098	99.9515124
BALL VLV	\$ 110	0.00227291	99.9537853
One set of filters for gas circuit	\$ 106	0.00219839	99.9559837
NEEDLE VLV	\$ 102	0.00210962	99.9580933
SWITCH, PRESSURE	\$ 101	0.00209993	99.9601933
BUTTERFLY VALVE	\$ 101	0.00209601	99.9622893
REPLACEMENT INDICATOR PLUG	\$ 98	0.00202779	99.9643171
LIGHT COVER LENS	\$ 96	0.00199315	99.9663102
LIGHT FIXTURE	\$ 96	0.00199315	99.9683034
BALL VLV	\$ 94	0.00194484	99.9702482
RTD	\$ 81	0.00168599	99.9719342
PARKER NEEDLE VALVE	\$ 81	0.00167994	99.9736141
AIR RTD ELEMENT	\$ 80	0.00166096	99.9752751
THERMOCOUPLE W/THERMOWELL	\$ 80	0.0016483	99.9769234
NEEDLE VLV	\$ 73	0.00151734	99.9784407
BRUSH HOLDER	\$ 72	0.0014919	99.9799326
QUICK EXHAUST VALVE	\$ 70	0.00145749	99.9813901
RTD GTG-2	\$ 70	0.00144266	99.9828328
VT SECONDARY FUSE-10A	\$ 69	0.00142368	99.9842565
THERMOMETER	\$ 60	0.00124572	99.9855022
THERMOMETER, BIMETAL	\$ 59	0.00122879	99.986731
QUICK EXHAUST VALVE	\$ 57	0.00117987	99.9879108
EMERGENCY LIGHT L-300	\$ 56	0.00116695	99.9890778
Check Valve	\$ 50	0.00104224	99.99012

NEDDLE VLV	\$ 44	0.00091656	99.9910366
Air relief valve	\$ 41	0.00085361	99.9918902
AIR BLEED VALVE	\$ 41	0.00085361	99.9927438
Primary speed probe	\$ 38	0.00078737	99.9935312
Emergency overspeed probe	\$ 38	0.00078737	99.9943186
WRAPPER, INSUL A19B51A1	\$ 37	0.00077116	99.9950897
One set of lubricating oil filters per group.	\$ 34	0.00069518	99.9957849
One set of 40 cartridges for oil filters	\$ 34	0.00069518	99.9964801
THERMOMETER	\$ 32	0.00066815	99.9971482
BUSHING, INSUL A19B34B1	\$ 23	0.00048129	99.9976295
P SWITCH,LOW TANK VACUUM	\$ 20	0.00041875	99.9980483
GASKET - COOLER CLAMP	\$ 18	0.00037787	99.9984261
FILTER COVER GASKET	\$ 18	0.00037099	99.9987971
COOLER SEAL	\$ 18	0.00036541	99.9991625
	\$ 17	0.00036212	99.9995246
BRUSH ASSY (GROUND)	\$ 10	0.00020696	99.9997316
FUSE	\$ 9	0.00018259	99.9999142
CYLINDRICAL FUSE	\$ 1	2.9512E-05	99.9999437
PLC OUTPUT FUSES	\$ 1	2.8766E-05	99.9999725
GASKET 6.00" 150#	\$ 1	2.7531E-05	100
Total of prices	\$ 4,825,180		

Tableau 16: Liste des pièces de rechange d'une turbine à gaz, et leurs prix

#### Annexe IV: Analyse multicritère des catégories A et B suivant le principe de la méthode AMDEC

L'analyse a permis de différencier quatre catégories classées dans un ordre décroissant du produit de leurs appréciations dans les trois critères.

Code couleurs :

Catégorie 1  Catégorie 2  Catégorie 3  Catégorie 4 

Pièce	Fréquence de réparation	Temps d'approvisionnement	criticité de panne	Résultat AMDEC
Buckets Stage 1 and accessories	2	2	2	8
Buckets Stage 2 and accessories	2	2	2	8
Buckets Stage 3 and accessories	2	2	2	8
Nozzles Stage 1 and accessories	2	2	2	8
Transition Pieces and accessories	2	2	2	8
Nozzles Stage 2 and accessories	2	2	2	8
Nozzles Stage 3 and accessories	2	2	2	8
Shrouds Stage 1 and accessories (included)	2	2	2	8
ASSY, COMB LINER	2	2	2	8
Fuel Nozzles & accessories	2	2	2	8
Shrouds Stage 2 and accessories	2	2	2	8
Shrouds Stage 3 and accessories	2	2	2	8
CAP ASSY, MULTI NOZZLE	2	2	2	8
One set of wear parts for the load and speed control system. Primary speed probe (Qty 3) + Emergency over speed probe (Qty 3)	2	1	3	6
3300 PROXIMITOR SENSOR	2	1	3	6

IGV (position transmitter) (one per TG)	2	1	3	6
Air filter cartridges (un complete set per group)	3	2	1	6
SEE ST PUMP LIST	2	1	3	6
SENSOR, VIBRATION	2	1	3	6
Fuel pump rotor	2	1	3	6
One aspiration pump	2	1	3	6
Thermostatic valve of lubrication oil water refrigeration	2	1	3	6
Main oil pump	2	1	3	6
GAS FUEL CONTROL VALVE	1	2	3	6
GAS FUEL CONTROL VALVE	1	2	3	6
GAS FUEL CONTROL VALVE	1	2	3	6
PURGE VALVE	2	1	3	6
PURGE VALVE	2	1	3	6
ELEC PURGE VL	2	1	3	6
Lifting pump	1	2	3	6
TUBE, CROSSFIRE OUTER	2	2	1	4
SEE GEN LIST	2	2	1	4
Bearings (at least in installed qty)	1	2	2	4
Thermostatic valve of air atomization cooling	2	1	2	4
HYD ACCUMULATOR	2	1	2	4
One complete valve HP regulator	1	3	1	3
STOP/RATIO VLV ASEM(HDWR)	1	1	3	3
Fuel flow divider	1	3	1	3
THRUST RING/BRG. ASSY.	1	3	1	3
Auxiliary oil pump unit (AC)	1	1	3	3
SEE ST B	1	2	1	2
UNIT RTR STUD ASSY-9FA+E	2	1	1	2
Backup oil pump unit (DC)	1	2	1	2

Mass rotor control system - I don't know what this is	1	2	1	2
By-pass valve for fuel flow control	1	1	2	2
LINING C.E. 16"	1	2	1	2
RETAINING RING (MACH)	1	1	1	1
LINING (18.00 T.E.)	1	1	1	1
Safety valve on liquid fuel piping	1	1	1	1
One complete set of rotor blades including their accessories (one left and one right) for the three last stages of the LP rotor. (Buckets)	0	3	1	0
Set of rotor blades stage n with accessories (n being the number of rotor stage compressor)	0	3	1	0
SEE ST C		2	1	0
Main compressor of air atomization	0	1	2	0
Complete generator exciter	0	3	1	0
MI				0
CI				0
Complete set of moving parts (mechanism)	0	2	1	0
2 Vannes CRV (2 actionneurs par Vanne)	0	3	1	0
1 x ACV	0	3	2	0
1 x ASV	0	3	2	0
One complete set of HP sectors nozzles Assuming Stator Blades means Diaphragms with Nozzles	0	2	1	0
COOLER	0	1	2	0
Liste C086	0		1	0
Liste EXC	0	1	1	0
Rotor wedges (one set in installed quantity)	0	3	1	0

Servomotor MOV-SAD-1	0	3	3	0
Servomotor MOV-SAD-2	0	3	3	0
Servomotor MOV-SPD	0	3	3	0
Servomotor MOV-SPD-2	0	3	3	0
Servomotor MOV-SPD-3	0	3	3	0
Servomotor MOV-SPDV-1	0	3	3	0
Servomotor MOV-SSD-1	0	3	3	0
Servomotor MOV-SSD-2	0	3	3	0
Servomotor MOV-SSV-1A	0	3	3	0
Servomotor MOV-SSV-3A	0	3	3	0
Servomotor MOV-SSV-3B	0	3	3	0
Servomotor MOV-SSV-4A	0	3	3	0
Servomotor MOV-SSV-4B	0	3	3	0
MOV-SAD-1	0	3	3	0
MOV-SAD-2	0	3	3	0
MOV-SPD	0	3	3	0
MOV-SPD-2	0	3	3	0
MOV-SPD-3	0	3	3	0
MOV-SPDV-1	0	3	3	0
MOV-SSD-1	0	3	3	0
MOV-SSD-2	0	3	3	0
MOV-SSV-1A	0	3	3	0
MOV-SSV-3A	0	3	3	0
MOV-SSV-3B	0	3	3	0
MOV-SSV-4A	0	3	3	0
MOV-SSV-4B	0	3	3	0
LCI	0	3	2	0
Set of stator blades stage n with accessories (n being the number of stator stage compressor)	0	3	1	0
SEE ST A			1	0
One bundle of pipes for oil cooler	0	2	1	0

---

Bundle exchanger (radiator) with water box, gasket, bolts	0	2	2	0
TB CNTLS		1	1	0
Expansion joints (one set per GT)	0	3	1	0

*Tableau 17: Evaluation des pièces de rechange par rapport aux critères choisis*

### Annexe V: Analyse de l'historique des arrêts imprévus des turbines de type 9FA à travers le monde, depuis 2011.

Code Couleurs : Les pannes causées par une des pièces capitales

Site Name	Planned Start Date	Event Description
AL Taweelah A1 P&D Plant	7-Jan-15	295232 - GT13 High Exhaust Temperature Spread - Jan 2015- PAC-20150107-0015 - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1250830
JEDDAH REFINERY	1-Jan-15	Jeddah Refinery Support for Julie
QATIF PROGETTI	4-Jan-15	TA to support alignment for customer.
QATIF PROGETTI	4-Jan-15	TA to support alignment.
QATIF PROGETTI	23-Jan-15	Yanbu NGL - 6B - unit SN 298315 - Forced Outage - Controls troubleshooting
HADJRET EN NOUSS	29-Jan-15	GT 1 SN 298668 BI Compressor & Turbine Damage
HADJRET EN NOUSS	31-Jan-15	GT 1 SN 298668 Forced Outage, Unit DISASSEMBLY
RUSAIL POWER STATION	29-Jan-15	Rusail Exhaust Diffuser Inspection
TAKORADI 2	16-Feb-15	Bearing # 2 replacement
QURRAYAH	9-Feb-15	Qurrayah steam inspection
DERA MURAD (UCH)	16-Feb-15	296769 - Compressor Fouling - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1258838
OMOTOSHO POWER STATION	17-Feb-15	unit troubleshooting after forced outage
KUREIMAT SOLAR POWER PLANT	25-Feb-15	Event to Cover Site Survey
POWER HOLDING COMPANY OF NIGERIA SAPELE	3-Mar-15	890921 - Combustion trouble/high spread trip - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1261534
SKIKDA	1-Mar-15	SKIKDA_298459_forced outage_combustion profile anomaly
DERA MURAD (UCH)	11-Mar-15	296769 - Generator Earth Ground Fault - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1263226
DERA MURAD (UCH)	11-Mar-15	296769 - Generator Earth Ground Fault - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1263226
CAIRO NORTH POWER PLANT	1-Apr-15	Borescope Inspection
TABOUK	1-Apr-15	Comprehensive Smart Borescope inspection

QATALUM	22-Mar-15	298803 - S2B REPLACEMENT - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1264894
SECUNDA	22-Mar-15	890199 - Liner pieces broke off and went through HGP Components - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1264914
QURRAYAH	20-Mar-15	GT-13 Forced Outage – BI
RIYADH PP8	1-Apr-15	D2 High vibration forced outage
QATALUM	15-Mar-15	298801 - LO Pump Coupling Replacement - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1267034
MADINAH	6-Apr-15	TA support madinah based load operation
QURAYYAT	9-Apr-15	Gurayyat Black Out Support
JEDDAH PP3	22-Apr-15	Bearing alignment for GT#1
UPC Power Plant Phase 1 & 2	21-Apr-15	809929 - Unit is having high spread - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1271346
JEBEL ALI STATION D,E,G,K,L	5-May-15	298400 HGPI Forced Outage
UMM AL NAR EAST DESALINATION PLANT	9-May-15	298446 - GT22 May 2015 High Vibration - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1272350
EMAL SMELTER COMPLEX	7-May-15	298811 - GT-11 LCI M1 Channel Failure - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1272546
RIYADH PP11	13-May-15	299014 - Unplanned parts - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1273224
AL Taweelah A1 P&D PLANT	4-Jun-15	810387 - GT14 #3 Bearing failure June 2015 - Call- Out - CS AutoCreated Event – 1276168
FUTILA / ANGOLA	10-Jun-15	TA advisory services for VC3 Calibration
JEDDAH PP3	2-May-15	Bearing alignment for GT#1
JEDDAH PP3	2-May-15	Bearing alignment for GT#1
Taweelah B	13-Jun-15	GT91 Low Flame Trip Investigation and Troubleshooting
QARN ALAM	16-Jun-15	810751 - Bearing and Alarm troubleshooting
AL Taweelah A1 P&D PLANT	12-Jun-15	295230 - GT11 #2 Bearing drain leak and Generator Issues June 2015 - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1278574
QATIF PROGETTI	18-Jun-15	CGT-502 Combustion Trouble/high exhaust spread trip trouble shooting
EL KUREIMAT	21-Jun-15	Kureimat Unit #4 Spread
EMAL SMELTER COMPLEX	22-Jun-15	299163 - GT-51 Generator Oil Leak - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1279118
THYNA	22-Jun-15	call out forced outage- Torque converter
TAKORADI 2	6-Jul-15	Call out work to take care of spread

QARN ALAM	16-Jul-15	G-6403 start up after Forced Outage
AL Taweelah A1 P&D PLANT	31-Jul-15	295231 - GT12 COMPRESSOR BLADE TIPS BROKEN July 2015 - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1286776
SABIYA CCGT POWER STATION	6-Aug-15	270T805 - STG10_CV Valve Outage - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1287648
UGHELLI POWER STATION	11-Aug-15	Warranty work - GT15 Generator recovery
AL Taweelah A1 P&D PLANT	14-Aug-15	295230 - GT11 High Temp Spread on LF Aug 2015 - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1288820
QATIF PROGETTI	25-Aug-15	Qatif Forced outage
KOME OPERATIONS	29-Jul-15	810359 - FN's Change 810359 - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1290806
AL KAMIL POWER PLANT	1-Apr-15	810292 - GT1B - Extended Lean Lean Operation - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1290858
EMAL SMELTER COMPLEX	29-Aug-15	298812 - LCI12 Communication Alarms - Aug2015 - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1291464
QARN ALAM	6-Sep-15	G6403 - S/N 810751 - Forced Outage
RABIGH	6-Sep-15	Rabigh GT#37 Exciter Failure call out Project
WADI AL DAWASIR POWER PLANT	9-Sep-15	Jouba Emergency support Unit 11 & 12
EL KUREIMAT	14-Sep-15	Forced CI Kuriemat GT-4
IBESE	24-Sep-15	TA Services for Aero units at PHC for Distributed Power
CAIRO NORTH POWER PLANT	3-Oct-15	GT-4 298464 CI
AL Taweelah A1 P&D PLANT	12-Oct-15	890163 - GT20 Atom.Air Compressor failed catastrophically-PAC20151011-0093 - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1298232
THYNA	30-Sep-15	Mark Vie issue forced outage- Thyna 3 OFS 1296074
AL-WAJH	20-Oct-15	TA for a blackout incident investigation GT#4 Alwajh
VRIDI POWER STATION	20-Oct-15	TA support for PT installation
POWER HOLDING COMPANY OF NIGERIA CALABAR	31-Oct-15	890934 - Units unable to sync to grid - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1301596
JIZAN POWER STATION	2-Nov-15	(ocp) degradation problem on G.T# 23 in Jizan
VRIDI POWER STATION	30-Oct-15	PT installation and CSW modification
ELEME	4-Nov-15	Trouble shooting after unit tripped

JIZAN	2-Nov-15	Repair for generator rotor in Jizan PP GT 23
IBN SINA	10-Nov-15	SABIC JOBS In GEMTEC
JEBEL ALI STATION D,E,G,K,L	8-Nov-15	GN72 - PAC-20151107-0016 Gen Hazardous gas Alarm (hydrogen leakage)
AL TAWEELAH A1 P&D PLANT	14-Nov-15	810391 - GT18 Lean Lean Red Hot Cross Fire Tubes - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1304126
AL TAWEELAH A1 P&D PLANT	19-Nov-15	295231 - GT12 Lean Lean FO Nov 2015 - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1304872
JIZAN	18-Nov-15	Overhauling Jizan GT16 Gen. Rotor
KOME OPERATIONS	26-Oct-15	809939 - FN change - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1305510
SKIKDA	18-Nov-15	298460 - Sealing/cooling air leak - S2N cooling - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1305520
SKIKDA	22-Nov-15	Cooling & Sealing piping Leak Unit 2
SKIKDA	22-Nov-15	Cooling & Sealing piping Leak Unit 2
SKIKDA	27-Nov-15	337X586 - 298460 TRIP_52G & GENERATOR issue - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1305898
SECUNDA	25-Nov-15	890207 - Leak between Wrapper and Turbine - Call- Out - CS AutoCreated Event - 1306138
SKIKDA	29-Nov-15	298459 - COMBUSTION PROFILE ANOMALY_MARCH '15 - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1306768
SKIKDA	29-Nov-15	298459 - COMBUSTION PROFILE ANOMALY_MARCH '15 - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1306768
QATALUM	3-Dec-15	298801 - S2B REPLACEMENT - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1307220
JEBEL ALI STATION D,E,G,K,L	2-Dec-15	20151130-0666 GT Combustion trouble alarm BORESCOPE INSPECTION
TAKORADI 2	9-Dec-15	“ Troubleshooting of controls System & DXD Setting with relation to the Steam turbine trip”
KOME OPERATIONS	14-Dec-15	811086 - Replacing Generator Rotor - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1308484
JEBEL ALI STATION D,E,G,K,L	10-Dec-15	DEWA GT72 - DLN Tuning After Forced Outage DEC2015
QARN ALAM	9-Dec-15	PDO QAL - Thrust Bearing High Temp DEC 2015 - Mitch Raggio
EL KUREIMAT	16-Dec-15	Callout to cover the Spread of Unit# 3
RIYADH PP11	20-Dec-15	299015 - High Exhaust temperature spreads - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1310498
QARN ALAM	21-Dec-15	G6403- Hot Air Leak from Inspection Manhole - BORESCOPE Inspection
RIYADH PP11	20-Dec-15	exhaust spread on GT-12 (
QATALUM	21-Dec-15	298802 - GCV 3 PASSING - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1310682

OLORUNSOGO POWER STATION	24-Dec-15	Forced Outage- Trouble shooting related to Exhaust plenum causing unit to trip.
CALABAR GENERATION COMPANY LIMITED- CROSS RIVER STATE	4-Jan-16	890936 - Units Unable to transit to Premix steady state - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1312010
UGHELLI POWER STATION	7-Jan-16	Controls HMI Assessment
SECUNDA	14-Jan-16	890199 - Exhaust Spread - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1313916
SOUSSE	18-Jan-16	EKG0023 - Bearing #3 leaking and Bearing#2 damage - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1314672
QARN ALAM	12-Feb-16	QAL - 810751 - Mark V data gathering + Further Troubleshooting
OGORODE GENERATION COMPANY LIMITED- DELTA STATE	5-Feb-16	340X914 - TDI for replacement - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1319876
TAKORADI 2	17-Feb-16	HGPI+Gen Minor
SKIKDA	14-Feb-16	298459 - 298459_High spread trip_Feb 14th' 2016 - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1321550
SKIKDA	14-Feb-16	298459 - 298459_High spread trip_Feb 14th' 2016 - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1321550
SKIKDA	14-Feb-16	Call-out Unit 1 High Spread
SKIKDA	14-Feb-16	Call-out Unit 1 High Spread
AL DUR	21-Feb-16	298942 - S16 Vane Replacement - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1322010
SKIKDA	8-Feb-16	298459 - 298459_Leaks inside GT compartment_Feb 9th 2016 - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1322826
SKIKDA	8-Feb-16	298459 - 298459_Leaks inside GT compartment_Feb 9th 2016 - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1322826
QURAYYAH CCPP	7-Mar-16	forced outage GT5 fire
ARAR	7-Mar-16	Arar March 2016 MI Call out
JEBEL ALI STATION D,E,G,K,L	5-Mar-16	DEWA - GN72 DP Regulator Issue during Startup
QATALUM	3-Apr-16	298804 - F.O. S2B Replacement - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1326376
SKIKDA	9-Mar-16	298459 - 298459_Comb issue_LN#8_Feb 9th 2016 - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1326396

KOME OPERATIONS	10-Mar-16	809939 - CTG-D High Spread FN's Change - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1326582
RIYADH PP10	23-Mar-16	TA Support on GT20 Buckets
QATALUM	29-Mar-16	298802 - GCV - 1 Replacement 1 - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1328928
AL JUBAIL MARAFIQ IWPP	2-Apr-16	298657 - GT12 - S17 Replacement - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1329496
ELEME	14-Apr-16	Parts Sales from GE to customer
RIYADH PP11	18-Apr-16	Dteam valve forced outage
TABUK	20-Apr-16	Control TA Support for Tabuk PP
UGHELLI POWER STATION	17-May-16	Generator Exciter trip on Flashpoint - Genertor Call out
YANBU NGL	24-Jul-16	YNGL – spread troubleshooting
ALJOUF	15-Jun-16	Al Jouf PP Emergency Parts
MAKKAH	22-Jun-16	Control TA support for Makkah PP
SAHIWAL	28-Jun-16	875035 - Forced Outage Event - Generator - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1344632
SAHIWAL	28-Jun-16	875035 - Forced Outage Event - Generator - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1344632
RIYADH PP8	17-Jul-17	GT Unit tripped on excitation issue
QURAYYAH CCPP	20-Jul-16	dummy project: 3rd stage bucket issue
AL Taweelah A1 P&D PLANT	16-Jul-16	890163 - Taweelah GT20 Compressor Failure - 15.07.16 - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1346994
SKIKDA	25-Jul-16	Generator -337X585 collector ring flash-over
SKIKDA	25-Jul-16	Generator -337X585 collector ring flash-over
KOME OPERATIONS	25-Jul-16	810359 - 1 FN change - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1348684
SABIYA CCGT POWER STATION	3-Aug-16	270T805 - STG#10_CV1 Repair 2016 - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1348942
ANNABA	2-Aug-16	TA support on X Fire Tube Troubleshooting 850154
ANNABA	2-Aug-16	TA support on X Fire Tube Troubleshooting 850154
RIYADH PP11	4-Aug-16	299016 - GT13 Tripped and CO2 Released - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1349978
RIYADH PP11	5-Aug-16	Forced Outage For GT13
RABIGH	23-Aug-16	Request for Exciter Specialist for RPP Unit 42
AZ ZOUR NORTH IWPP PROJECT	8-Sep-16	299223 - GT#14 GEN H2 leak-Sep-2016_REV2 - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1357382
BALLOKI	26-Sep-16	875026 - Fire on GT - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1359112
BALLOKI	26-Sep-16	875026 - Fire on GT - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1359112
BIR MCHERGA	6-Oct-16	890316 - Main Oil Pump Failure - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1361854

CALABAR GENERATION COMPANY LIMITED-CROSS RIVER STATE	10-Oct-16	Unit 890937 down on excitation issue. An Excitation TFA needed to resolve the issue
TABUK	8-Oct-16	TA Support for the new TM2500 mobile unit at Duba PP
TABUK	8-Oct-16	TA Support for Duba TM2500 Mobile unit
HADJRET EN NOUSS	18-Oct-16	Unit 270T718 FO Speed Pick up issue
CAIRO NORTH POWER PLANT	20-Oct-16	Event to cover Cairo North forced CI U#3
FERIANA	22-Oct-16	890214 - dovetail S1B damage - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1364184
NAJRAN	2-Oct-16	Najran GT6 Rehab Site Visit.
RAS ABU FONTAS B2	1-Nov-16	298587 - Tripped due to HETS (high exhaust temperature spreads) - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1365606
AL Taweelah A1 P&D PLANT	5-Nov-16	890161 - GT19 Ext.Lean Lean - Cold Shift Swirling on Can 13,14 & 1-Nov 2016 - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1366094
KASSERINE	7-Nov-16	890024 - Rotor marriage coupling repair - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1366662
BHIKKI	7-Nov-16	V01718 - Valve Seat Issue # 2 - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1366704
RIYADH PP10	14-Nov-16	TA callout for GT#33 Loss of Flame Trouble
QURAYYAH CCPP	20-Nov-16	Simens unit overhauling in Gemtec.. this is dummy event only for the job in gemtec
RAS ABU FONTAS B2	4-Dec-16	298588 - Rupture on the lift oil line feeding Generator Brg drive end - Call-Out - CS AutoCreated Event - 1370930 GT 93
RAS LAFFAN LNG 5X6581B	20-Dec-16	850058 - 2016-850058-FO - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1370980
EL KUREIMAT	14-Dec-16	Talent in Motion - Lobna Tawfiq
CAIRO NORTH POWER PLANT	18-Dec-16	Event to cover Forced Outage on GT-4
DUBA	1-Jan-17	3rd Stage Bucket Replacement
QATALUM	1-Jan-17	298803 - Turbine Compartment Gas Leaks - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1377934
AL Taweelah A1 P&D PLANT	3-Jan-17	810387 - BRG # 3 & Turning Gear Issue-GT14 Jan 2017 - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1378024
RIYADH PP11	7-Jan-17	ST10 forced outage damaged
FUJAIRAH POWER AND WATER PLANT	8-Jan-17	890009 - Premix transfer not happening - ER-20170107-0351 - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1378596
MOHAMMEDIA	6-Jan-17	Mohammedia Call out Jan 2017

MOHAMMEDIA	6-Jan-17	Mohammedia Call out Jan 2017
AL DUR	10-Feb-17	298942 - S1B Replacement - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1379282
RAS LAFFAN LNG TRAINS 6/7 AND BARZAN	14-Jan-17	890125 - FO_Compressor_Jan17 - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1379608
TIHAMA - 1 JUAYMAH	13-Jan-17	298493- forced outage actuator issue
SOUSSE	17-Jan-17	Sousse Call Out , Cpntrols Loop Check MkVe migration EGG 0023
QATALUM	17-Jan-17	298804 - CROSS FIRE TUBE REMOVAL - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1380858
AZ ZOUR NORTH IWPP PROJECT	30-Jan-17	ST16 Forced Outage Support- Bearing Inspections
OGORODE GENERATION COMPANY LIMITED- DELTA STATE	27-May-17	890919 - Bearing & Turbine casings Alignment - Call- Out - CS AutoCreated Event – 1382998
RABIGH	2-Mar-17	Rabigh GT#12 stator inspection
AL TAWEELAH A1 P&D PLANT	1-Nov-17	810387 - GT14 Casing Alignment - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1384866
AL KAMIL POWER PLANT	15-Mar-17	810292 - S2N High WS temperature - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1386250
PP12	8-May-17	PP-12 GT # 12 Forced Outage
PP12	1-Mar-17	PP-12 GT # 13 Forced Outage
PP12	4-Apr-17	PP-12 GT # 14 Forced Outage
RIYADH PP12	1-Apr-17	PP-12 GT # 22 Forced Outage
PP12	9-Mar-17	PP-12 GT # 23 Forced Outage
QATALUM	10-Feb-17	298803 - CO2 Panel Failure - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1387296
RIYADH PP11	2-Jan-17	270T825 - Repair Of LP Rotor - Call-Out - CS AutoCreated Event – 1387306
DUBAL	22-Feb-17	DUBAL ST16 Generator Flash-out Inspection
DUBAL	22-Feb-17	DUBAL ST16 Generator Flash Out Inspection
HOFUF (K.S.A.)	24-Feb-17	BI for bearing

Tableau 18: Historique des arrêts imprévus pour les turbines à gaz de type 9FA dans le monde

**Annexe VI: Exemple de déroulement de la simulation manuelle sur un planning de maintenance préventive.**

- Pièce : S2N
- Durée de vie : 48 000 h.
- Intervalle de maintenance : 24 000 h.
- Nombre de cycles toléré : 2 cycles.
- Etat des pièces en stocks : neuves
- Nombre d'unités : 2

➤ Scénario 1 :

Les unités	Unit 1	Unit 2						
Inspections préventives	1 <sup>ère</sup>	1 <sup>ère</sup>	2 <sup>ème</sup>	2 <sup>ème</sup>	3 <sup>ème</sup>	3 <sup>ème</sup>	4 <sup>ème</sup>	4 <sup>ème</sup>
Pièce installée	N1	N2	A	B	N1	N2	N3	N4
Nombre de cycle	0	0	1	1	1	1	0	0
Pièce désinstallée	A	B	N1	N2	A	B	N1	N2
Nombre de cycle	1	1	1	1	2	2	2	2
Pièce jetée					A	B	N1	N2

*Tableau 19: Scénario 1 d'un exemple de simulation manuelle*

Résultat : déroulement avec 6 pièces.

➤ Scénario 2 :

Les unités	Unit 1	Unit 2						
Inspections préventives	1 <sup>ère</sup>	1 <sup>ère</sup>	2 <sup>ème</sup>	2 <sup>ème</sup>	3 <sup>ème</sup>	3 <sup>ème</sup>	4 <sup>ème</sup>	4 <sup>ème</sup>
Pièce installée	N1	N2	N3	A	N1	N2	N3	B
Nombre de cycle	0	0	0	1	1	1	1	1
Pièce désinstallée	A	B	N1	N2	N3	A	N1	N2
Nombre de cycle	0	0	0	0	0	2	2	2
Pièce jetée						A	N1	N2

*Tableau 20: Scénario 2 d'un exemple de simulation manuelle*

Résultat : déroulement avec 5 pièces.

## Annexe VII: Code Java utilisé

La plateforme du logiciel Eclipse, a été utilisée pour le codage d'un programme informatique sur JAVA, destiné à générer les contraintes liées au chevauchement des dates des inspections avec les dates de disponibilité des pièces après leur réparation.

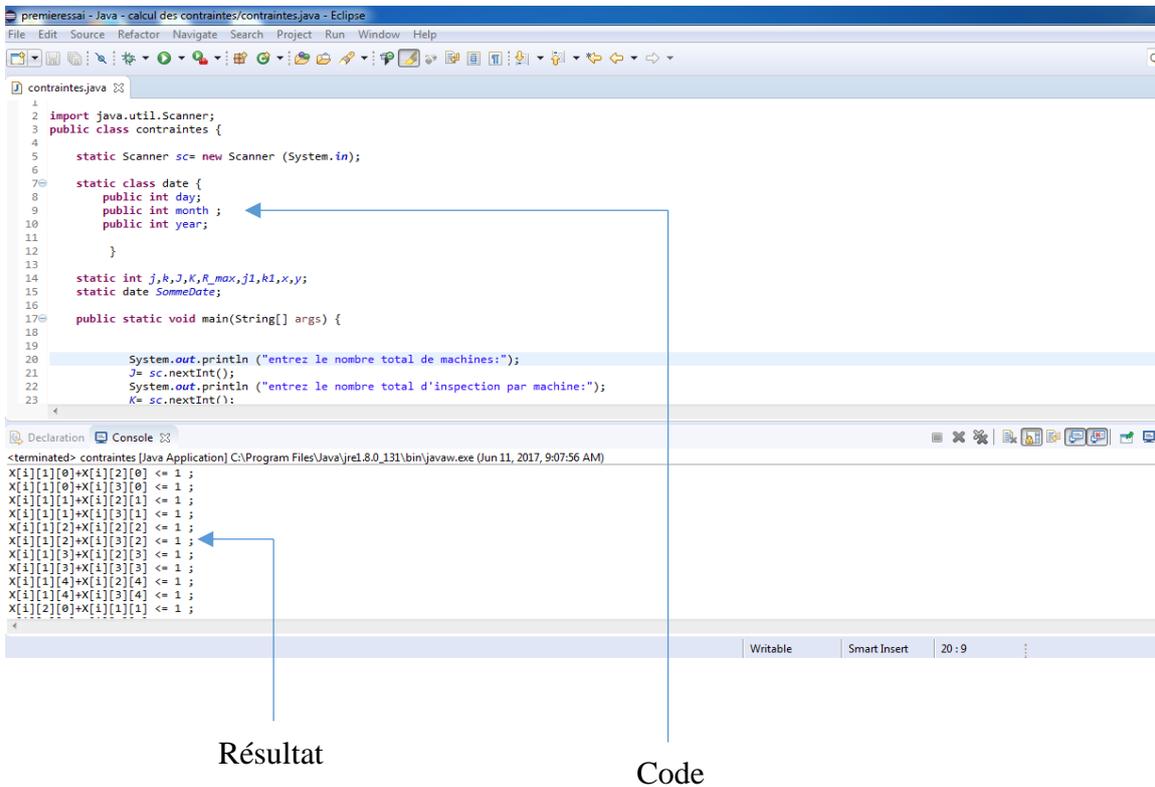


Figure 17: Aperçu sur l'interface Eclipse pour programmation en JAVA

Ci-dessous, le contenu du code utilisé :

```
package secondtrial;

import java.util.Scanner;

public class essai2 {

    static Scanner sc= new Scanner (System.in);

    static class date {

        public int day;

        public int month ;

        public int year;

    }

}
```

```

static int j,k,J,K,R_max,j1,k1,x,y;
static date SommeDate;
public static void main(String[] args) {
    System.out.println ("entrez le nombre total de machines:");
    J= sc.nextInt();
    System.out.println ("entrez le nombre total d'inspection par machine:");
    K= sc.nextInt();
    date Dates[][]= new date [J][K];
    for(j=0; j<J; j++){
        Dates[j]= new date [K];
    }
    for(j=0; j<J ;j++ ){
        System.out.println ("entrez les dates des inspections de la
turbine"+(j+1));
        for(k=0; k<K ; k++){
            Dates[j][k]= new date();
            System.out.println ("la date de l'inspection"+k);
            Dates[j][k].day= sc.nextInt();
            Dates[j][k].month= sc.nextInt();
            Dates[j][k].year=sc.nextInt();
        }
    }
    System.out.println ("entrez le temps de reparation en semaine:");
    R_max= sc.nextInt();
    for(j=0; j<J ;j++ ){
        for(k=0; k<K-1 ;k++ ){
            AddDate(Dates[j][k+1], (R_max*7)%30,
((R_max*7)%365)/30,(R_max*7)/365);
            for(j1=0; j1<J ;j1++ ){
                if(j1==j) continue;
                for(k1=0; k1<K ;k1++ ) {
                    x= diffDate (Dates[j][k], Dates[j1][k1]);

```

```

        y= diffDate (Dates[j1][k1],SommeDate);
        if(x==1 && y==1)
            System.out.println
("X[i][\"+(j+1)\"][\"+k+\"]+X[i][\"+(j1+1)\"][\"+k1+\"] <= 1 ;");

    }}
}}}

```

```

public static void AddDate (date D0, int D, int M, int Y){
    SommeDate=new date();
    if (D0.day+D>=31) {
SommeDate.day=D0.day+D-31;
if(D0.month+1+M>12){
    SommeDate.month=D0.month+1+M-12;
    SommeDate.year=D0.year+1+Y;
        }
else {
    SommeDate.month=D0.month+M;
    SommeDate.year=D0.year+Y;
    }
        }

else {
    SommeDate.day= D0.day+D;
    if(D0.month+M>12){
        SommeDate.month=D0.month+M-12;
        SommeDate.year=D0.year+1+Y;
    }
    else {
        SommeDate.month=D0.month+M;
        SommeDate.year=D0.year+Y;
    }
}
}

```

```
        }  
    }  
  
    }  
public static int diffDate (date D1, date D2 ){  
    if (D1.year > D2.year)  
        return 0;  
    else {  
        if (D1.year < D2.year)  
            return 1;  
        else {  
            if ((D1.month - D2.month)*30 + (D1.day - D2.day) < 0)  
                return 1;  
            else return 0;  
        }  
    }  
}
```

## Annexe VIII: Code CPLEX utilisé

Ci-dessous, un aperçu sur l'interface du logiciel IBM CPLEX utilisé pour le codage du modèle mathématique.

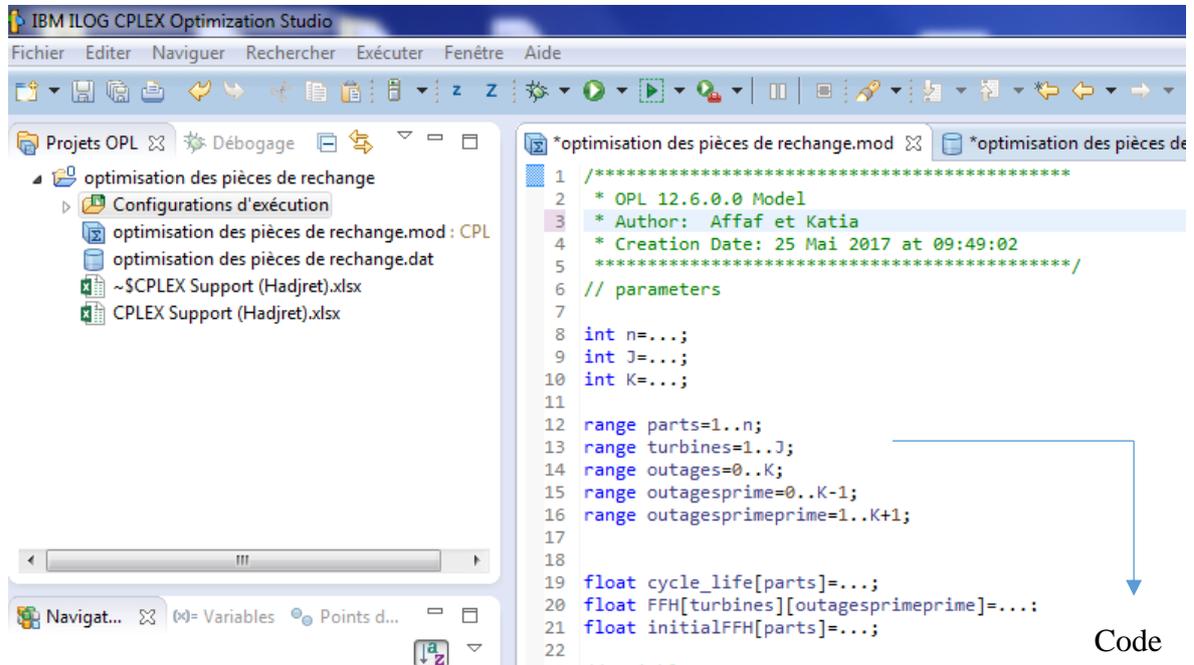


Figure 18: Aperçu sur l'interface du IBM CPLEX pour le codage du modèle

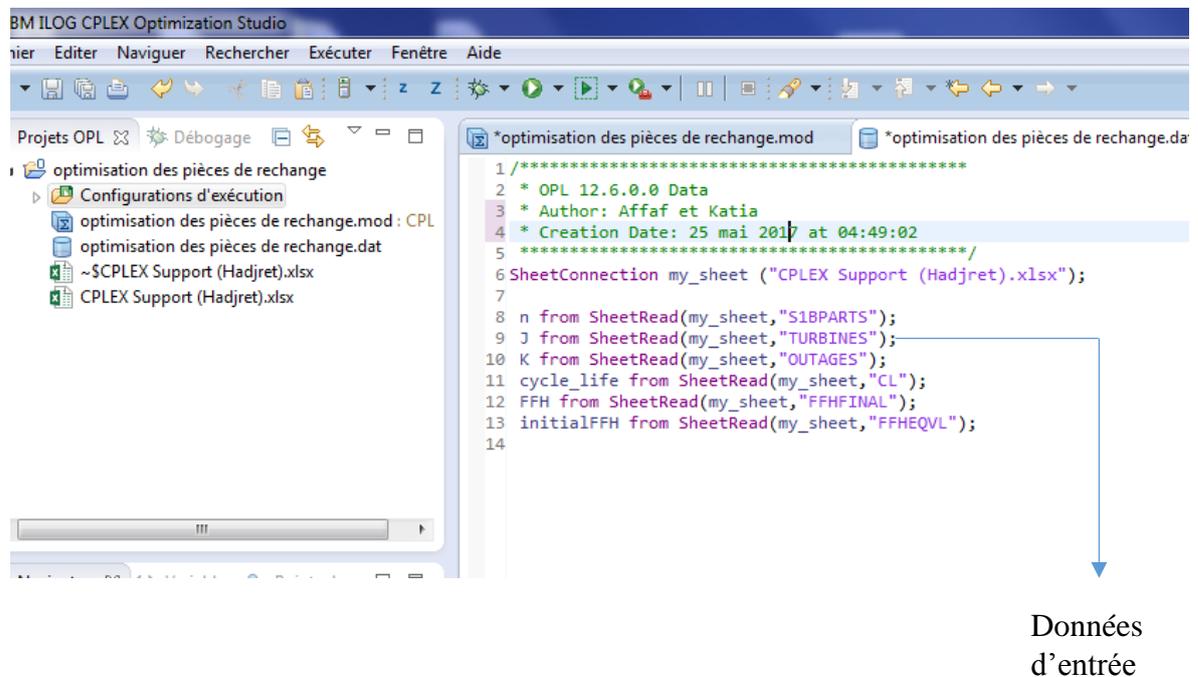
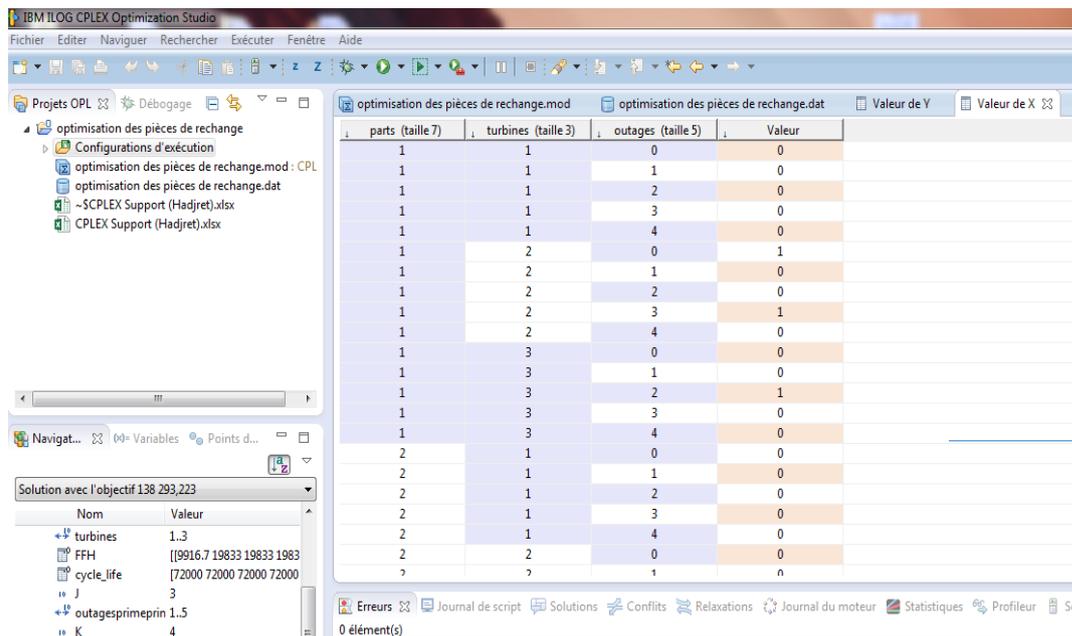


Figure 19: Aperçu de l'interface IBM CPLEX pour configurer les données d'entrée



Résultats

Figure 20: Aperçu sur l'interface IBM CPLEX pour l'affichage des résultats

n=	13								
J=	3								
K=	5								
R_max	18								
	K=0	K=1	K=2	K=3	K=4	K=5	Equivalent FFH		
Unit 1	01/12/2016	15/04/2018	09/01/2021	06/10/2023	02/07/2026	28/06/2029	595		
Unit 2	04/11/2015	03/11/2018	30/07/2021	25/04/2024	20/01/2027	29/06/2029	626,14		
Unit 3	13/01/2017	28/05/2018	21/02/2021	08/11/2023	14/08/2026	30/06/2029	572,76		
	FFH=0	FFH=1	FFH=2	FFH=3	FFH=4	FFH=5			
j=1	0	9916,66667	19833,3333	19833,3333	19833,3333	21658			
j=2	0	22854,11	20871,3333	20871,3333	20871,3333	18596,358			
j=3	0	9546	19092	18901,08	19282,92	20065,692			
cycle_life	48000	48000	48000	48000	48000	48000	48000	48000	48000
Init_ffh	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figure 21: Aperçu sur le fichier excel utilisé pour extraire les données sur CPLEX

/

Dans ce qui suit le contenu du code utilisé sur CPLEX pour dérouler un des scénarii de la simulation

```

*****

* OPL 12.6.0.0 Model

* Author: 212613983

* Creation Date: May 23, 2017 at 9:24:54 AM

*****/

// parameters

int n=...;

int J=...;

int K=...;

range parts=1..n;

range turbines=1..J;

range outages=0..K;

range outagesprime=0..K-1;

range outagesprimeprime=1..K+1;

float cycle_life[parts]=...;

float FFH[turbines][outagesprimeprime]=...;

float initialFFH[parts]=...;

//variables

dvar boolean X[parts][turbines][outages];

dvar boolean Y[parts];

minimize sum(i in parts) (cycle_life[i]*(1-Y[i])- sum(j in turbines, k in outagesprime)
X[i][j][k]*FFH[j][k+1]- initialFFH[i]);

subject to {

forall(i in parts, j in turbines, k in outagesprime)

        X[i][j][k]+X[i][j][k+1] <= 1;

forall (i in parts) {

        initialFFH[i]+sum (j in turbines, k in outages) X[i][j][k]*FFH[j][k+1]<=
cycle_life[i];

```

```

sum (j in turbines, k in outages) X[i][j][k]<=10*(1-Y[i]);
Y[i]-sum (j in turbines, k in outages) X[i][j][k]!= 0;
Y[i]*initialFFH[i]==0;

X[i][1][0]+X[i][3][0] <= 1 ;
X[i][1][0]+X[i][3][1] <= 1 ;
X[i][1][1]+X[i][2][1] <= 1 ;
X[i][1][1]+X[i][3][1] <= 1 ;
X[i][1][1]+X[i][3][2] <= 1 ;
X[i][1][2]+X[i][2][2] <= 1 ;
X[i][1][2]+X[i][3][2] <= 1 ;
X[i][1][2]+X[i][3][3] <= 1 ;
X[i][1][3]+X[i][2][3] <= 1 ;
X[i][1][3]+X[i][3][3] <= 1 ;
X[i][1][3]+X[i][3][4] <= 1 ;
X[i][2][0]+X[i][1][0] <= 1 ;
X[i][2][0]+X[i][1][1] <= 1 ;
X[i][2][0]+X[i][3][0] <= 1 ;
X[i][2][0]+X[i][3][1] <= 1 ;
X[i][2][1]+X[i][1][2] <= 1 ;
X[i][2][1]+X[i][3][2] <= 1 ;
X[i][2][2]+X[i][1][3] <= 1 ;
X[i][2][2]+X[i][3][3] <= 1 ;
X[i][2][3]+X[i][1][4] <= 1 ;
X[i][2][3]+X[i][3][4] <= 1 ;;
X[i][3][2]+X[i][2][2] <= 1 ;
X[i][3][3]+X[i][1][4] <= 1 ;
}

forall (j in turbines, k in outages)
sum (i in parts) X[i][j][k]== 1;}

```

Les contraintes obtenues par l'exécution du code JAVA (elles correspondent à la contrainte biconcive du modèle mathématique)