

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
École Nationale Polytechnique



Département de Génie Industriel

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Industriel

Contribution à l'optimisation de la gestion des pièces de
rechanges (NCPs) pour les opérations de maintenance des
turbines à gaz

- Application: Projet Mega Deal General Electric-

Présenté par:

Serine ALI TOUDERT (Management Industriel)

Souad BOUKLI HACENE (Management de l'Innovation)

Sous la direction de:

M^{me} Sabiha NAIT KACI (ENP)

M^{me} Wafaa KHAMMAR (General Electric)

M. Hossam GAMAL (General Electric)

Présenté et soutenu publiquement le 19 juin 2017

Jury:

Président	M ^{me} Nacera ABOUNE	MAA	ENP
Co-Promoteur	M ^{me} Sabiha NAIT KACI	MAA	ENP
Co-Promoteur	M ^{me} Wafaa KHAMMAR	Senior Manager	GE
Examineur	M ^{me} Nadjwa BOUKADOUM	MCB	ENP

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
École Nationale Polytechnique



Département de Génie Industriel

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Industriel

Contribution à l'optimisation de la gestion des pièces de
rechanges (NCPs) pour les opérations de maintenance des
turbines à gaz

- Application: Projet Mega Deal General Eletric-

Présenté par:

Serine ALI TOUDERT (Management Industriel)

Souad BOUKLI HACENE (Management de l'Innovation)

Sous la direction de:

M^{me} Sabiha NAIT KACI (ENP)

M^{me} Wafaa KHAMMAR (General Electric)

M. Hossam GAMAL (General Electric)

Présenté et soutenu publiquement le 19 juin 2017

Jury:

Président	M ^{me} Nacera ABOUNE	MAA	ENP
Co-Promoteur	M ^{me} Sabiha NAIT KACI	MAA	ENP
Co-Promoteur	M ^{me} Wafaa KHAMMAR	Senior Manager	GE
Examineur	M ^{me} Nadjwa BOUKADOUM	MCB	ENP

Dédicaces

À ma mère et mes deux sœurs aînées, Lyna et Yasmin, sans qui cette épopée qu'est la vie n'aurait été qu'un insipide enchainement.

*À tout ce que peut nous apporter le partage, qu'il soit culturel ou humain.
Que le fait d'être lues puisse être et rester notre plus belle rétribution.*

Serine

Dédicaces

Je dédie ce travail à

*Mes parents à qui je dois tout et qui ont tant sacrifié pour la réussite
et le bonheur de leurs enfants*

Mes soeurs Fadia et Linda, sans qui je ne serai rien aujourd'hui

*Ma chère tante qui, de par sa gentillesse et sa dévotion a toujours su
me reconforter et m'épauler*

Mon fiancé Amine, l'amour de ma vie

*Mes sœurs de cœur Anissa (ma colocataire, ma meilleure amie et celle
sur qui je peux toujours compter pour couvrir mes bêtises), Leila (ma
préférée, le regard de braise) et Racha (la plus gentille, la plus douce,
notre petit Koala), Nadjema (celle qui a toujours été là pour moi et
sans qui polytech n'aurait pas été la même). Amies qui m'ont toujours
soutenu et accompagné dans ce long voyage qu'est la vie*

*Mes collègues du 204, et particulièrement Selma, mon mahmouda
grâce à qui j'ai rigolé comme jamais et Katia ainsi que Affaf mes
conductrices préférées*

*À toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à
l'aboutissement de ce projet*

Souad

Remerciements

Ce mémoire est le résultat d'un travail de près de six mois. En préambule, nous tenons à adresser tous nos remerciements aux personnes avec lesquelles nous avons eu l'occasion d'échanger et qui nous ont aidés pour la rédaction de ce mémoire.

En commençant par remercier notre encadrante Mme NAIT KACI Sabiha, pour sa gentillesse, sa patience, et pour toute l'aide qu'elle nous a apportée. Son sens de l'analyse et son expérience ont grandement contribué à l'aboutissement de notre travail.

Aussi, Notre gratitude s'adresse à Mr MIRABI Midhat pour nous avoir accueillies au sein de GE Power, ainsi que pour son incontestable gentillesse.

Nous adressons également nos vifs remerciements à notre promotrice au sein de General Electric, Mme KHAMMAR Wafaa pour nous avoir proposé ce projet et pour avoir mis à notre entière disposition l'ensemble des informations nécessaires à la bonne réalisation de ce travail. Nous la remercions pour sa confiance, sa bonne humeur et ses conseils de vie.

De plus, nous souhaitons remercier toutes les personnes qui nous ont aidés au sein de l'entreprise et plus précisément Monsieur GAMAL Hossam pour sa grande disponibilité, son enthousiasme communicatif et ses précieuses orientations, Mr BAHET Abdeslam, Mme GHANEM Djazia, Mme HADDAD Fatima, Mr CISTA Abdel raouf, Mr KECHIR Younes, Mr TIBOURTINE Rayan, Mr ZOGHMAR Houssam, Mr GUERGOUR Amine, pour leurs conseils, leur accueil et leur aide précieuse.

Un grand merci à Mr BENBEY Nazim pour son accueil, son incontestable gentillesse, sa grande disponibilité ainsi que ses précieuses orientations.

Par ailleurs, nous remercions l'ensemble des enseignants du département Génie Industriel pour la formation prodiguée et les valeurs qu'ils nous ont inculquées.

Enfin, nous souhaitons vivement remercier les membres du jury d'avoir pris le temps d'examiner notre travail. C'est un réel honneur.

Serine & Souad

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale

I. Chapitre I : Étude de l'existant et problématique	14
I.1. Présentation de l'entreprise General Electric	15
I.1.1. Historique.....	15
I.1.2. Le Conglomérat General Electric	16
I.2. GE Power	17
I.2.1. Activité.....	18
I.2.2. Les produits de GE Power	19
I.2.3. Les types d'inspection de maintenance de GE Power	22
I.2.4. Les types de contrats de maintenance de GE Power	24
I.3. Etat des lieux	25
I.4. Contexte du projet	26
I.4.1. Cadre du projet et problématique.....	26
I.4.2. Plan d'actions.....	28
II. Chapitre II : État de l'art	32
II.1. Généralités sur la maintenance.....	33
II.1.1. Définitions de la maintenance.....	33
II.1.2. Les types de maintenance	33
II.1.3. Classification des tâches de la maintenance	34
II.1.4. Principaux facteurs influençant la maintenance et la durée de vie des équipements	35
II.1.5. Centralisation ou décentralisation de la maintenance ?	35
II.2. Gestion des stocks de la pièce de rechange pour la maintenance	36
II.2.1. Définition d'un stock	36
II.2.2. Définition de la gestion de stock.....	36
II.2.3. Définition de la pièce de rechange.....	36
II.2.4. Classification des PdR en stock	37
II.2.5. Techniques d'inventaire des PdR	38

II.2.6.	Critères de sélection d'une politique d'approvisionnement	39
II.2.7.	Politiques d'approvisionnement	40
II.3.	Les problèmes de localisation-allocation d'entrepôts	42
II.3.1.	La méthode du Barycentre.....	43
II.3.2.	Les problèmes de localisation-allocation.....	44
II.4.	Dimensionnement et agencement des conteneurs	52
II.4.1.	La conteneurisation.....	52
II.4.2.	Classification des types de conteneurs.....	52
II.4.3.	Dimensions et poids de chargement des conteneurs.....	54
II.4.4.	Organisation des conteneurs.....	55
II.4.5.	Modèles mathématiques de dimensionnement (chargement et découpe).....	59
III.	Chapitre III : Contribution et proposition de solutions.....	63
III.1.	Scénarios proposés pour la localisation des conteneurs de stockage.....	64
III.1.1.	Scénario 1 : Localisation des conteneurs au niveau de plusieurs entrepôts (répartis sur le territoire national).....	66
III.1.2.	Détermination du nombre optimal de conteneurs.....	73
III.1.3.	Détermination des disponibilités des conteneurs pour les maintenances non programmées.....	74
III.1.4.	Analyse de sensibilité.....	77
III.1.5.	Scénario 2 : Centralisation des conteneurs au niveau d'un seul entrepôt qui desservira toutes les centrales.....	82
III.1.6.	Scénario 3 : Centralisation des conteneurs au niveau du Tooling Center.....	84
III.1.7.	Scénario 4 : Rotation des conteneurs entre les sites.....	86
III.1.8.	Solution retenue.....	87
III.2.	Dimensionnement du conteneur de stockage des NCPs.....	88
III.2.1.	Aménagement du conteneur.....	89
III.2.2.	Utilisation d'un modèle mathématique pour optimiser l'espace alloué au stockage des NCPs.....	90
III.3.	Mise en place de la politique de gestion de stocks de la pièce de rechange.....	92
III.3.1.	Etablissement et ajustement de la politique d'approvisionnement.....	93
	Conclusion générale.....	99
	Bibliographie.....	102
	Annexes.....	104

Liste des tableaux

Tableau II. 1: Politiques de réapprovisionnement	34
Tableau II. 2: Tableau comparatif des politiques d'approvisionnement	35
Tableau II. 3: : Classification des types de conteneurs	47
Tableau II. 4: Dimensions et poids de chargement des conteneurs	49
Tableau III. 1: Planning prévisionnel de maintenance du Méga-Deal:	59
Tableau III. 2: Localisation de la zone ouest	61
Tableau III. 3: Localisation de la zone est	61
Tableau III. 4: Localisation de la zone sud	62
Tableau III. 5: Localisation de la zone centre	62
Tableau III. 6: Distances entre les quatre installations et les sites	64
Tableau III. 7: Demande des sites	64
Tableau III. 8: Solution obtenue par la résolution P-médian	65
Tableau III. 9: Capacités et coûts d'ouverture des installations	66
Tableau III. 10: Solution obtenue par la résolution du FCLP	66
Tableau III. 11: Modes de fonctionnement des turbines de type 9F	73
Tableau III. 12: Modes de démarrage des turbines	75
Tableau III. 13: Résultat du barycentre des tous les sites	77
Tableau III. 14: Distances entre l'installation centralisée et les sites	77
Tableau III. 15: Coûts relatifs à l'ouverture d'une seule installation	78
Tableau III. 16: Distances entre les sites et le Tooling Center	79
Tableau III. 17: Coûts relatifs à l'exploitation du Tooling center	79
Tableau III. 18: Coûts relatifs a la rotation des conteneurs entre les sites	80
Tableau III. 19: Tableau récapitulatif des scénarios	81
Tableau III. 20: Résolution du modèle sur Excel	85
Tableau III. 21: Cas possibles de réapprovisionnement	89

Liste des figures

Figure I. 1: Implantation de GE dans le monde	17
Figure I. 2: Organigramme de GE Power	12
Figure I. 3: Activités de GE (en % du CA).....	13
Figure I. 4: Parties principales de la turbine à gaz	14
Figure I. 5: Turbine à gaz de type 9FA	15
Figure I. 6: Turbine à vapeur	15
Figure I. 7: Turbine Aéro-dérivée.....	16
Figure I. 8: Parties de la turbine à gaz concernées par les inspections de démontage.....	17
Figure I. 9: intervalles inter-maintenances avant l'AGP	21
Figure I. 10: intervalles inter-maintenances après l'AGP	21
Figure I. 11: Plan d'actions	24
Figure II. 1: Types de maintenance.....	28
Figure II. 2: Etapes de résolution de la méthode du Barycentre	38
Figure II. 3: P-Center Problem PCP	40
Figure II. 4: Figure représentant la classification des types de conteneurs	48
Figure III. 1 : Localisations des sites	58
Figure III. 2 : Interface du convertisseur d'adresses en coordonnées GPS	60
Figure III. 3 : Démarche suivie pour la détermination du nombre de conteneurs	67
Figure III.4: Périodes de disponibilités des conteneurs (pour les maintenances non programmées)	70
Figure III. 5 : Localisation centralisée	76
Figure III. 6 : Centralisation des conteneurs au niveau du Tooling Center	78
Figure III.7 : Rotation des conteneurs entre les sites	80
Figure III. 8 : Paramètres du solveur	86
Figure III. 9 : Planning de réapprovisionnement du premier conteneur	89
Figure III. 10 : Procédure de réapprovisionnement	90

Liste des abréviations

AFNOR : Association Française de Normalisation
AGP : Advanced Gas Path
CA : Chiffre d'affaire
CF : Coûts Fixes
Chargt : Chargement
CI : Combustion Inspection
CPM : ContractPerformance Manager
CSA : Contractual Service Agreement
CV : Coûts Variables
DL : Délai de livraison
DLN :Dry Low Nox
DZD :Dinar Algérien
EVP :Equivalent Vingtpieds
GdS :Gestion de Stock
GE :General Electric
GEAT :GE Algeria Turbines
HGP : Hot Gas Path
HGPI : Hot Gas Path Inspection
IGV :Inlet Gide Vanes
Km :Kilomètres
MENAT :Meaddle East, North Africa and Turkey
MF :Maintenance Factor
MI :Major Inspection
MMP :Multi-year Performance Plan
NCP : Non-Capital Part
O&M :Operation& Maintenance
PA : Politique d'Approvisionnement
PdR : Pièce de Rechange
PS : Power Services
SKS :SharikatKahrabaSkikda
TA :Technical Advisor
TEU :Twenty-foot Equivalent Unit
USD :United State Dollars

ملخص

جنرال الكتريك الجزائر خدمات الطاقة هي فرع من فروع مجمع جنرال اليكتريك الذي يزود خاصة بخدمات الصيانة لتوربينات الغاز المقتناة من طرف سونلغاز. نتيجة للأعطاب المسجلة أثناء عمليات الصيانة وأخذا بعين الاعتبار أن هذا ينبع أساسا من صعوبات عملية، قام قسم خدمات الطاقة بأخذ مبادرة إعادة تكوين نظام تسيير مخزون قطع الغيار المخصصة لصيانة توربينات الغاز. في هذا الإطار يندرج مشروعنا أي أنه يتم تليفيزي قطع الغيار من نوع المواد المستهلكة في حاويات متنقلة، يمكن استعمالها في عدة مواقع أثناء عمليات الصيانة. لتحقيق ذلك، قمنا بإنشاء برنامج معلوماتية محدد للعدد الأقصى للحاويات. بعد ذلك التجأنا، من بين عدة أمور إلى منهاج النقطة الوسطى من أجل وضع السيناريوهات المحتملة ثم قمنا بتقييم هذه الأخيرة حتى نتوصل إلى تحديد الموقع المثالي لوضع الحاويات. كذلك، اهتمامنا بإبعاد الحاوية. هذه الخطوة تمثل تأساسا في تهيئة هذه الأخيرة عن طريق تصميم لمعدات التخزين وتحديد الرفوف. هكذا لجأنا إلى نموذج رياضي لتقسيم حتى نفحص الفضاء المستغل. أيضا قمنا بتحديد سياسة تسيير المخزون إضافة إلى إجراء شكلي لإعادة تزويد الحاويات بقطع الغيار. **الكلمات الرئيسية:** الصيانة، إدارة المخزون، التصميم، الحاويات، قطع الغيار، تحسين، النقطة الوسطى.

Abstract

GE Algeria- Power Services is part of GE's conglomerate which provides especially maintenance services for the gas turbines purchased by Sonelgaz. Due to the maintenance's dysfunctions operations and taking in consideration that these emanate mainly from operational difficulties, Power Services department took the initiative to reconfigure the stock management system spare part for the Gas Turbine's maintenance.

In this context, our project is about storing expandable spare part for Gas Turbine's maintenance in mobile container able to be used by many sites throughout maintenance operations. To that end, we have established informatics program to determinate the optimal number of containers. Subsequently we have recourse, among others, to barycenter method to establish the different possible scenarios then we have proceeded to the evaluation of the latter in order to reach a definition of the optimal location to store the containers.

Furthermore, we have dedicated our work to the container. This step consists mainly in arranging the different storage equipments and the determination of the shelving.

Thereby, we used a mathematical model of division in order to examine the space exploited. Also we have defined a stock management politic and a formal procedure of containers resupply in spare part.

Key words: Barycentre, Container, Dimensioning, Stock management, Maintenance, Optimization, Spare parts.

RESUME

GE Algérie – Power Services est une branche du conglomerat General Electric qui fournit notamment des services de maintenance des turbines acquises par Sonelgaz.

En raison des dysfonctionnements constatés lors des opérations de maintenance, et considérant le fait que ceux-ci émanent essentiellement de difficultés opérationnelles, Power Services s'est résolu à reconfigurer le système de gestion des stocks de la pièce de rechange pour la maintenance des turbines à gaz. C'est dans ce cadre-là que notre projet s'inscrit. Il s'agira ainsi de stocker les pièces de rechange de type consommable d'une turbine dans des conteneurs mobiles, pouvant être utilisés par plusieurs sites lors des opérations de maintenance. Pour ce faire, nous avons procédé à la détermination du nombre optimal de conteneurs (grâce à un programme informatique que nous avons conçu). Par la suite nous avons eu recours, entre autres, à la méthode du barycentre pour l'établissement des différents scénarios envisageables, puis, nous avons procédé à l'évaluation de ces derniers pour aboutir à la définition de la localisation optimale pour entreposer les conteneurs. De plus, nous nous sommes consacrées au dimensionnement du conteneur. Cette étape a consisté principalement en l'aménagement de ce dernier à travers l'agencement des différents équipements de stockages et la détermination des rayonnages. Aussi, nous aurons recours à un modèle mathématique de découpage afin de maximiser l'espace exploité. Enfin, nous avons défini une politique de gestion des stocks, ainsi qu'une procédure formalisant le réapprovisionnement des conteneurs en pièce de rechange.

Mots clés : Barycentre, Conteneur, Dimensionnement, Gestion de stock, Maintenance, Optimisation, Pièce de rechange.

Introduction Générale

“ Customers determine our success

Stay lean to go fast

Learn and adapt to win

Empower and inspire each other

Deliver results in an uncertain world “

GE BELIEFS.

« Customers determine our success ... »

Consciente que le monde industriel actuel a pour maîtres mots efficacité et efficience, l'entreprise General Electric fonde son activité et ses décisions sur ces cinq (05) principes. En effet, chaque projet qui y est mené est guidé par l'intime conviction que la réussite de ce dernier est étroitement liée au respect des concepts qui incarnent la philosophie de GE.

Ainsi, dans sa perpétuelle quête de satisfaction du client, GE développe sans cesse de nouvelles technologies lui permettant non seulement de répondre à l'évolution des exigences de ses clients mais surtout d'asseoir sa position de leader. Consécration de l'investissement consenti par l'entreprise GE dans la région MENAT, et plus particulièrement en Algérie, le Méga-Deal, contrat valant plus de trois (03) milliards de dollars signé entre GE et Sonelgaz, introduit la technologie AGP (Advanced Gas Path) permettant d'améliorer les performances de la turbine à gaz de type 9FA.

« Learn and adapt to win... »

Loin de s'encombrer de faux-semblants, l'entreprise General Electric voit en chaque faille, une opportunité d'amélioration. Le volet Supply Chain a ainsi fait l'objet d'une remise en question, motivée par les nombreuses difficultés opérationnelles auxquelles les opérations de maintenance ont été confrontées. A cet effet, une reconfiguration de la gestion de stock de la pièce de rechange s'illustre comme étant le meilleur moyen de pallier aux problèmes de disponibilité des Non-Capital-Parts (NCPs) nécessaires à l'exécution des maintenances.

« Stay lean to go fast... »

La reconfiguration du système de gestion des NCPs de GE que nous avons proposé a été inspirée par le projet « outage express », préalablement mis en place par l'entreprise aux Etats-Unis ainsi qu'en Thaïlande. Ce dernier repose sur la conception de conteneurs mobiles servant au stockage des NCPs pour les opérations de maintenance des turbines à gaz. Ceci afin de mettre à disposition des centrales électriques l'ensemble des NCPs nécessaires à la couverture des différentes inspections, avec pour principal objectif, la réduction des délais d'attente, souvent responsables de la prolongation des temps d'arrêts de la machine qui, dans un contexte comme celui-ci, engendre des coûts avoisinant les quatre mille (4 000) USD/ heure.

«Deliver results in an uncertain world...»

En dépit du contexte économique Algérien peu favorable à l'investissement extérieur, General Electric a su s'imposer comme l'un des acteurs précurseurs du développement du tissu industriel local. Elle a ainsi confirmé sa présence dans notre pays à travers l'implantation de la Joint-Venture GEAT à Batna. Première et unique usine d'assemblage et de production d'équipements GE en Afrique et deuxième au monde après la Joint-Venture établie en Russie.

«Empower and inspire each other...»

GE s'attèle à développer les compétences locales en privilégiant la détermination, la créativité et l'esprit d'initiative et ce, quel que soit l'âge ou le niveau d'expérience. C'est dans ce cadre-là que nous avons eu l'opportunité d'effectuer notre stage de fin d'étude au sein de GE Algérie - Power Services, stage au cours duquel nous avons pu prendre en charge des projets réels, de dimensions considérables et dont les enjeux sont souvent décisifs.

Ainsi, notre projet de fin d'étude se fixe comme objectif de reconfigurer le système de la gestion de stock de la pièce de rechange de type NCPs pour les opérations de maintenance des turbines à gaz GE. Dans le présent travail, il s'agit en premier lieu de localiser les conteneurs de stockage des NCPs, d'établir par la suite les lignes directrices du dimensionnement desdits conteneurs, pour enfin proposer une politique de gestion de stock appropriée.

Dans une perspective de facilitation de la compréhension de notre travail, nous avons structuré notre document de la manière suivante :

Le premier chapitre est dédié à la présentation de l'entreprise General Electric à travers ses différents business. Par la suite, nous exposons le contexte du projet effectué dans le cadre du contrat récemment signé entre GE et Sonelgaz, suivi par la présentation de la problématique et du plan d'actions mis en place pour répondre à cette dernière.

Le second chapitre est, quant à lui, réservé à la définition du contexte conceptuel où nous avons abordé plusieurs notions théoriques tirées de la revue de littérature, à savoir : la maintenance des équipements, les modèles mathématiques de localisation-allocation, le dimensionnement, ainsi que la gestion de stocks des pièces de rechange, ces notions étant étroitement liées à la résolution de la problématique précédemment établie.

Le troisième et dernier chapitre met en exergue plusieurs scénarios dans le but de reconfigurer le système de gestion de stocks des pièces de rechange NCPs. Nous avons proposé différentes méthodes de résolution, et avons calculé les coûts relatifs à la localisation des conteneurs pour l'ensemble des cas de figure envisagés. Ainsi, la définition du scénario optimal sera tributaire de ces mêmes paramètres.

Par ailleurs, cette décision a été consolidée par une analyse de sensibilité de l'évolution du nombre de conteneurs, en vue d'étudier le comportement de la solution proposée lorsque le système est soumis à la variation de certains paramètres, notamment les dates prévues de maintenance.

Nous avons également procédé au dimensionnement des conteneurs et proposé une politique de gestion de stocks adéquate.

En définitive, l'ensemble des résultats de nos travaux seront repris synthétiquement en guise de conclusion. Cette partie comprendra également des perspectives à venir, en vue d'éventuelles contributions supplémentaires.

CHAPITRE I

ETUDE DE L'EXISTANT

ET PROBLEMATIQUE

Introduction

La gestion d'une entreprise suppose que l'on ait un but et une volonté de dévouement qui impliquent une perpétuelle remise en question.

En effet, toute entreprise, lors de son parcours, fait face à des difficultés. Quelle que soit la nature de ces dernières, la pérennité de cette entité économique est tributaire de sa capacité à tirer des enseignements de ses échecs, mais surtout, de son pouvoir d'anticipation à travers la mise en œuvre de stratégies résultant de ces enseignements.

Le présent travail a été effectué au sein de GE Power Algérie. A cet effet, ce chapitre sera consacré dans sa première partie à la présentation de l'entreprise General Electric. Son évolution à travers les siècles lui a permis d'élargir et de diversifier son champ de compétences grâce au déploiement de ses technologies dans plusieurs secteurs, ainsi parmi les leaders, le business GE Power, est considéré comme l'un des plus importants en matière de chiffre d'affaires mais aussi, de niveau implantation à l'échelle mondiale. Par la suite, sera exposé le contexte du projet effectué dans le cadre du contrat récemment signé entre GE et Sonelgaz, suivi par la présentation de la problématique et du plan d'actions mis en place pour répondre à cette dernière.

I.1. Présentation de l'entreprise General Electric (web h)

I.1.1. Historique

Général Electric Company, leader dans le secteur de l'énergie, est une multinationale fondée par le savant « Thomas Alva Edison » en 1890 à l'issue de la fusion de ses différents business d'antan. Parmi ces derniers figurent notamment l'Edison Light Electric Company, spécialisée dans la fabrication des lampes à incandescence et autres appareils électriques, ainsi que l'Edison Electric Illuminating Company dont l'activité principale consistait en la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique, grâce à la construction de la première centrale de production d'électricité.

Durant cette période, Thomson-Houston Company représentait un sérieux concurrent dans le domaine de l'innovation électrique. Néanmoins, l'évolution des deux compétiteurs était telle que l'expansion de leurs business respectifs devenait de plus en plus compliquée. Ceci étant dû à la complémentarité de leurs technologies et à l'incapacité de produire des installations électriques complètes individuellement. La collaboration s'est ainsi imposée, et l'année 1892 fut marquée par la fusion des deux entités donnant naissance à « General Electric Company ».

Depuis sa création, General Electric n'a cessé de se développer pour devenir l'un des acteurs les plus importants dans plusieurs domaines d'activités. Son histoire a été marquée par plusieurs événements, parmi lesquels nous pouvons citer :

- 1895 : Première mise en marche de trains électriques en remplacement des trains à vapeur.
- 1896 : General Electric et 11 autres compagnies forment le DOW Jones Industrial Average. Le DOW Jones est le plus vieil indice des bourses de New York, et le plus vieil indice boursier au monde. General Electric est la seule des 12 compagnies à y être encore aujourd'hui.
- 1903 : Installation de la plus grande turbine à vapeur 5000 KWH mono-arbre.
- 1929 : Mise en place de la plus importante unité de production d'électricité à Hammond.
- 1942 : Fabrication du premier moteur à réaction pour l'armée américaine.
- 1943 : Fondation de GE Capital.
- 1949 : La première turbine à gaz pour la production d'électricité est expédiée à OklaHoma Gas & Electric.
- 1957 : GE développe le J93, le premier moteur à fonctionner à trois fois la vitesse du son, alimentant le bombardier expérimental de l'USAF XB-70.
- Entre 1956 et 1970 : General Electric Company devient un modèle d'organisation managériale.
- 1999 : General Electric rachète à ALSTOM son département Turbines à Gaz qui travaillait jusque-là sous licence GE.
- 2013 : Rachat de Lufkin Industries, entreprise spécialisée dans les transmissions et le pompage pour l'industrie pétrolière et gazière.

- 2015 : Intégration totale de l'entreprise ALSTOM.
- 2016 : Acquisition de GE par SUEZ.

I.1.2. Le Conglomérat General Electric

Une entreprise conglomérale possède des activités dans des domaines différents et non liés. General Electric en est un exemple concret avec ses trente-six (36) divers business, présents dans plus de cent quarante-deux (142) pays répartis en cinq (5) régions, à savoir : Etats Unis, Europe, Amériques, Moyen Orient – Afrique – Turquie, Pacifiques.

Le conglomérat réalisant un chiffre d'affaires de l'ordre de mille cinquante (1 050) milliards d'euros, est un réseau de plus de Trois-cent-cinquante-mille (350 000) employés qui opèrent dans huit (08) domaines d'activités majeurs :

- GE Power : fournit des produits et des services liés à la production d'énergie aux industries, gouvernements et autres consommateurs dans le monde entier.
- GE Renewable Energy : propose des solutions d'exploitation des énergies renouvelables éoliennes et hydroélectriques.
- GE Oil & Gas : Dessert tous les secteurs de l'industrie du pétrole et du gaz, depuis le forage, l'achèvement et la production du pétrole, jusqu'aux pipelines.
- GE Aviation : Conçoit et produit des moteurs d'avions civils et militaires, des composants numériques intégrés, etc.
- GE Health Care : fournit des technologies de soin de santé (essentiellement : l'imagerie médicale, les solutions numériques de suivis et diagnostics des patients) pour les établissements hospitaliers, le marché de la recherche, ainsi que les compagnies pharmaceutiques et biotechnologiques.
- GE Transportation : considéré comme chef de file mondial en matière de fourniture de technologies pour l'industrie minière, ferroviaire, marine et pétrolière.
- GE Energy Connections and Lighting : Assure la conversion, l'automatisation et l'optimisation de l'énergie en vue d'une alimentation électrique grand public.
- GE Capital : Fournit des produits et des services financiers pour les clients et les marchés alignés avec les entreprises industrielles de GE.

Le conglomérat américain s'est installé comme un acteur de premier plan, présent dans l'énergie, les transports ou l'imagerie médicale.

Les activités de GE sont d'autant plus diversifiées que ses concurrents sont présents dans plusieurs secteurs d'activité, on cite parmi ces derniers :

- Hitachi, Ltd ;
- Siemens AG ;
- Honeywell International Inc ;
- Mitsubishi Corporation ;
- Textron Inc ;
- United Technologies Corporation ;
- 3M.

La firme est présente dans plus de cent quarante-deux (142) pays, notre travail a été effectué en Algérie, faisant partie du GE Middle East North Africa and Turkey (MENAT), comme le montre la figure I.1 :

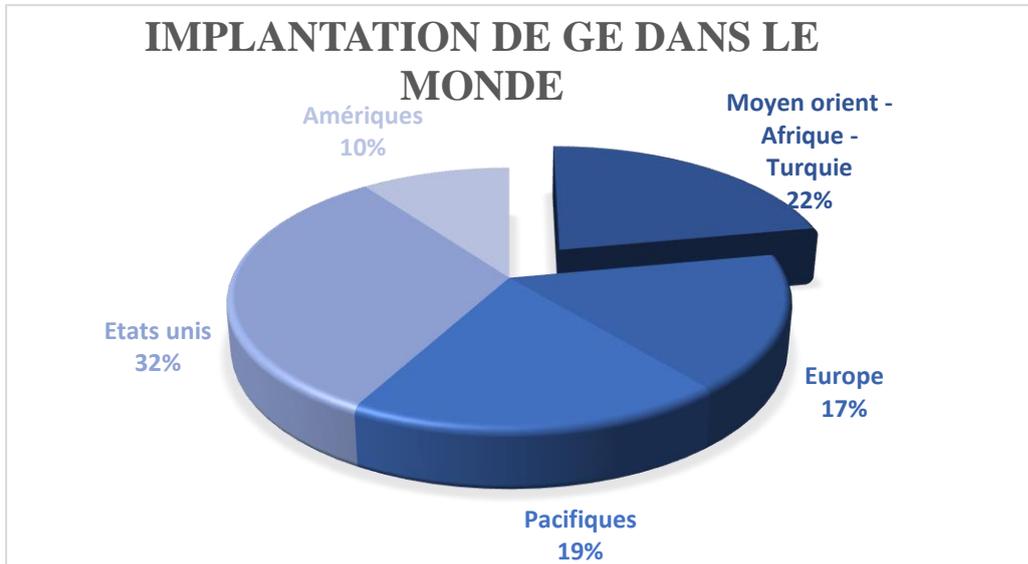


Figure I. 1: Implantation de GE dans le monde

General Electric est présente en Algérie à travers cinq (05) business, en l'occurrence : GE Health Care, GE Aviation, GE Oil & Gas, GE Transportation et GE Power. Ce dernier se divise en deux sous business : Power Gas Systems chargé de l'installation des centrales électriques, et Power Services dont la mission principale est la prise en charge des contrats de maintenance des équipements installés. Le présent travail a été effectué au sein de GE power services.

I.2. GE Power (GE_AR16)

GE Power active dans la production d'électricité au profit des gouvernements, des industriels ainsi que d'autres clients à travers le monde, en proposant des produits et des services liés à la production d'énergie et à la réutilisation de l'eau. Ces technologies exploitent des ressources telles que le pétrole, le gaz, le diesel et l'eau pour produire de l'énergie électrique et comprennent les turbines à gaz et à vapeur.

GE Power opère à travers les segments suivants :

- Gas Power Systems - offre un large éventail de turbines à gaz robustes et aérothermiques pour les services publics.
- Steam Power Systems - offre une technologie de l'énergie à vapeur pour le charbon et les applications nucléaires, y compris les chaudières et les générateurs.
- Power Services - complète la maintenance, le service et les solutions de mise à niveau.
- Distributed Power - fournit des produits et des services pour générer de l'énergie utile. Le portefeuille de produits comprend des carburants flexibles et hautement efficaces, ainsi que des engins industriels.
- Water & Process Technologies - fournit des solutions chimiques et d'équipements complets pour le traitement des eaux usées.

- GE Hitachi Nuclear- un des principaux fournisseurs mondiaux de solutions d'efficacité énergétique.

L'organigramme ci-dessous présente les deux activités principales de GE Power :

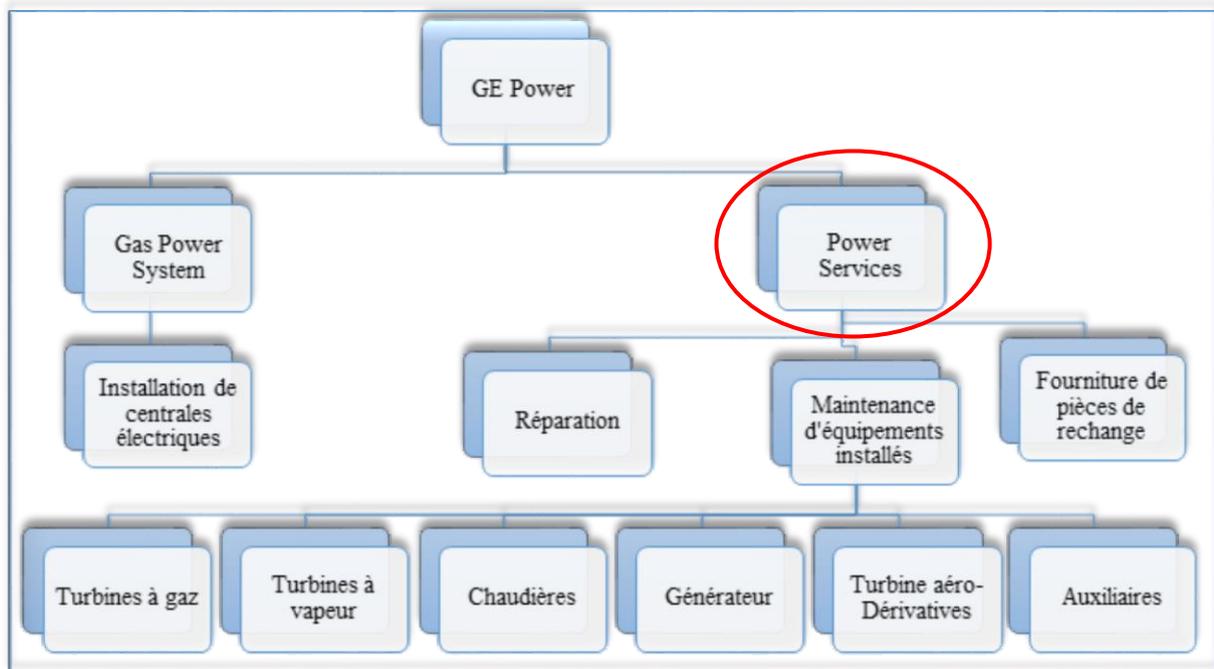


Figure I. 2: Organigramme de GE Power

I.2.1. Activité

GE Power est un leader mondial dans les technologies de la production d'électricité, présent dans 5 grandes régions, ce service emploie plus de cinquante-sept-mille (57 000) employés. Son chiffre d'affaires dans le monde pour l'exercice 2016 est de vingt-six virgule huit (26.8) milliards de dollars.

PS fournit à ses clients un large éventail de solutions dans le domaine de production et d'approvisionnement d'énergie en intervenant dans tous les secteurs de production énergétique : énergies renouvelables (éolienne et solaire), biogaz et carburants alternatifs, pétrole, gaz naturel et énergie nucléaire.

L'offre de PS s'étend de la conception, aux systèmes clés en mains, en passant par l'installation et la mise en service. C'est le business le plus important de GE en matière de CA, comme le montre la figure I.3 :

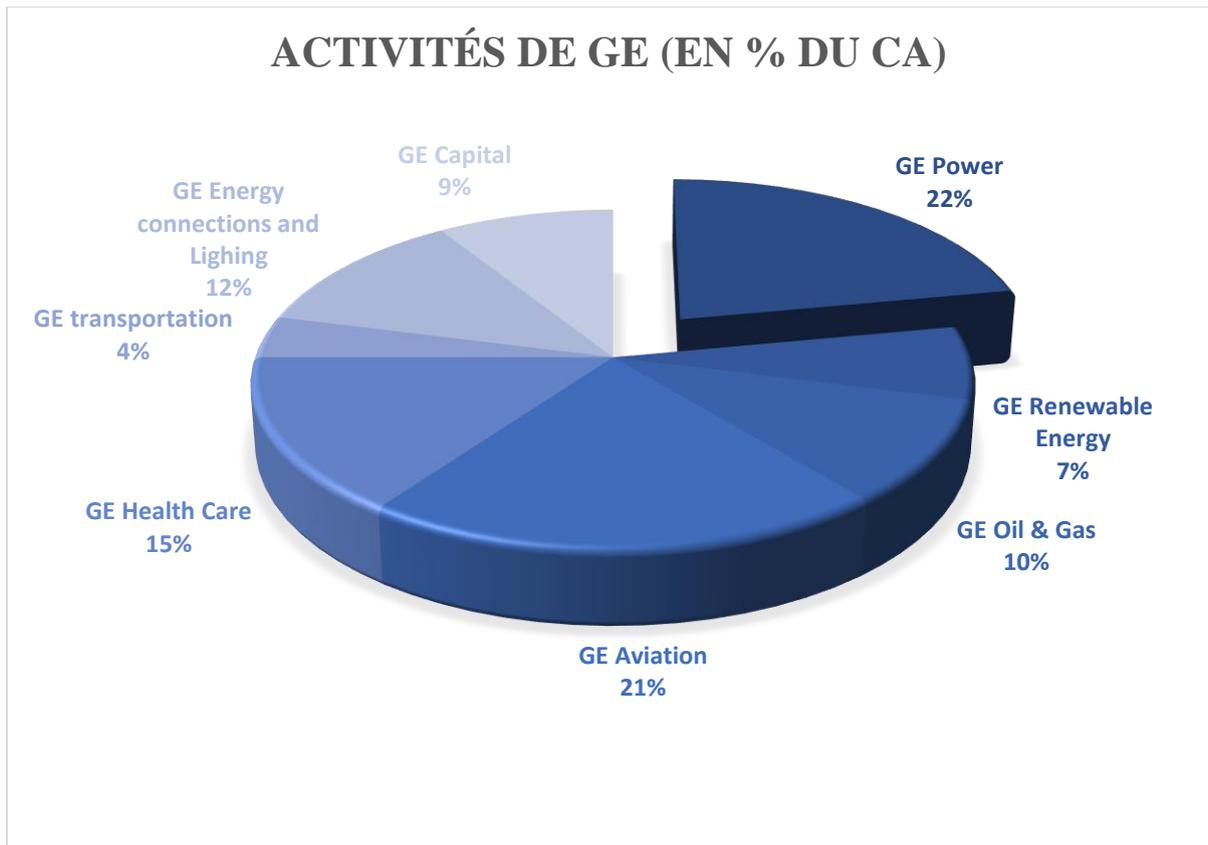


Figure I. 3: Activités de GE (en % du CA)

I.2.2. Les produits de GE Power

GE power fournit des turbines de différents types, à savoir :

Les Turbines à Gaz : Machine tournante thermodynamique qui appartient à la famille des moteurs à combustion interne, son rôle est de convertir l'énergie contenue dans un hydrocarbure en énergie mécanique. Elle fonctionne selon le cycle de Joule, qui comprend une phase de compression, une phase de chauffage (combustion) et une phase de détente. On distingue cinq (5) parties principales dans une turbine à gaz :

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

Ceci est illustré sur la figure I.4 :

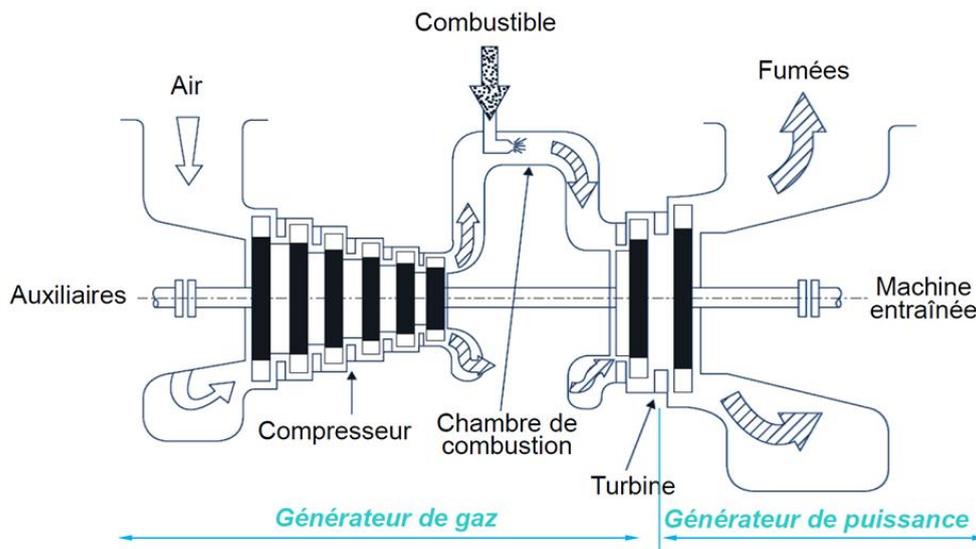


Figure I. 4: Parties principales de la turbine à gaz

GE offre une gamme de turbines à gaz dont la capacité varie de quarante (40) à trois cent-quatre-vingt-dix (390) Mégawatts.

Le présent travail, dans son intégralité portera sur la maintenance des turbines de type 9FA. Avec plus de deux cents (200) unités installées dans le monde, cumulant plus de douze (12) millions d'heures de fonctionnement, les turbines à gaz 9FA.03 et 9FA.04 offrent une multitude d'avantages, parmi lesquels ceux cités ci-dessous :

- La chambre de combustion DLN 2.6 + permet d'utiliser deux types de carburants (Gazeux et liquide), ainsi que de diminuer la consommation de carburant de plus de 30% en mode « baseload » en cycle simple.
- La Technologie Advanced Gas Path (AGP) fournit à la turbine 9FA.04 un meilleur rendement, en plus d'améliorer ses performances.
- La partie HGP (Hot Gas Path) à trois étages offre un refroidissement et une étanchéité corrigés qui améliorent l'efficacité de la turbine et fournissent le coût le plus bas du cycle de vie dans sa classe.
- Une capacité d'adaptation au réseau électrique améliorée offrant une réduction des temps de démarrage (jusqu'à 20 minutes en cycle simple et 30 minutes en cycle combiné) procurant ainsi aux turbines une meilleure disponibilité et une flexibilité énergétique élevée.
- Une moyenne de plus de 97% de fiabilité de démarrage.
- Un compresseur à 18 étages avec des ailettes de guidage d'entrée variables pour réduire la mise sous pression des composants.
- Un compresseur amélioré qui augmente la fiabilité et la disponibilité de la turbine, tout en réduisant les inspections périodiques et ainsi les coûts de maintenance.

La turbine à gaz de type 9FA est illustrée dans la figure I.5 :

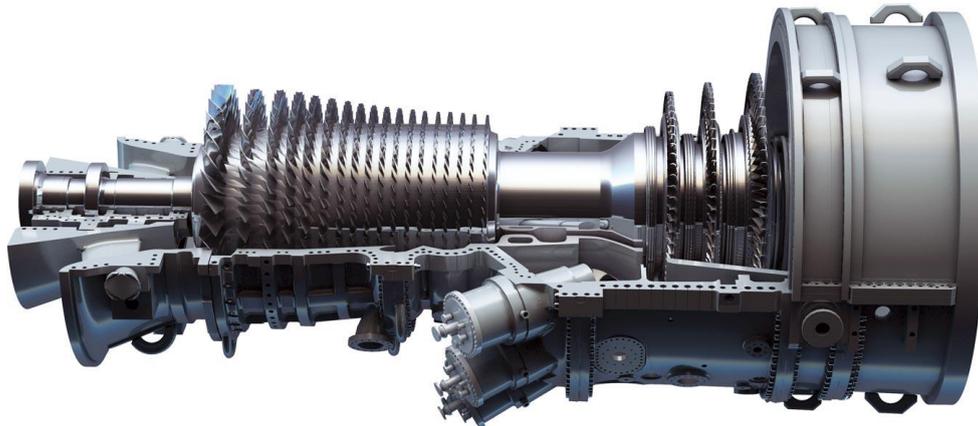


Figure I. 5 : Turbine à gaz de type 9FA

Les Turbines à Vapeur : Dispositifs rotatifs destinés à utiliser l'énergie cinétique d'un fluide liquide (eau) ou gazeux (vapeur, air, gaz de combustion) pour faire tourner un arbre solidaire des pales de la turbine. Une turbine à vapeur comprend deux (2) étages assurant chacun une ou deux fonctions :

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

La turbine à vapeur est représentée dans la figure I.6 :



Figure I. 6 : Turbine à vapeur

Les Turbines Aéro-dérivatives : Moteur d'avion dont la fiabilité a diminué, recyclé en générateur d'électricité et ce, en étant couplé à un alternateur. La turbine aéro-dérivée 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. Cette dernière est illustrée ci-dessous :

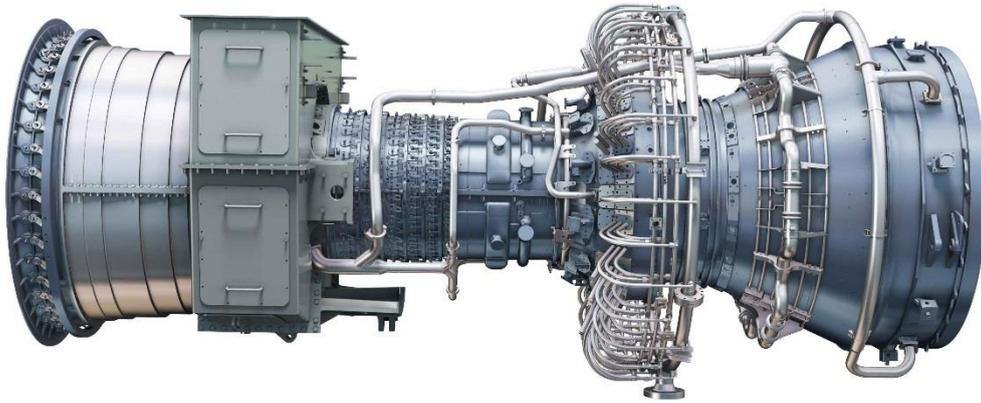


Figure I.7 : Turbine Aéro-dérivée

I.2.3. Les types d'inspection de maintenance de GE Power

La disponibilité des équipements et les coûts de la maintenance représentent deux des préoccupations les plus importantes pour la gestion d'une turbine à gaz industrielle. Afin de répondre à ces dernières, il faudrait concevoir un programme de maintenance efficace, prenant en compte la relation entre les plans d'exploitation, les priorités de l'installation et le niveau de compétence du personnel d'exploitation et d'entretien.

Aussi, il est nécessaire de prendre en considération toutes les recommandations du fabricant de l'équipement concernant le nombre et les types d'inspections, la planification de l'approvisionnement des pièces de rechange et d'autres facteurs importants affectant la vie des composants et le bon fonctionnement de la centrale.

Les inspections d'entretien peuvent se subdiviser en trois (03) grandes catégories :

1. Inspection d'exploitation

Les inspections d'exploitation se font en observant des paramètres d'exploitation importants pendant le fonctionnement de la turbine. Elles commencent par l'établissement des données d'exploitation de base pendant le démarrage initial d'une nouvelle unité et s'effectuent après toute intervention majeure de démontage. Cette base sert ensuite de référence qui permet de mesurer la détérioration ultérieure de l'unité.

2. Inspection de démontage

L'inspection de démontage implique l'ouverture de la turbine pour inspecter des composants internes, exécutée sur des degrés différents, à savoir :

- Inspection de combustion (CI : Combustion Inspection)

L'inspection de combustion est une inspection à l'arrêt relativement courte qui consiste à remplacer les tubes de flamme, les pièces de transition, les injecteurs de combustible et les couvercles d'extrémité. L'inspection, l'entretien et les réparations appropriées de ces éléments contribueront à prolonger la durée de vie des parties en aval, telles que les directrices et les aubes.

- Inspection de la veine gazeuse (HGPI : Hot Gas Path Inspection)

Le but d'une inspection de la veine gazeuse est d'examiner les pièces exposées aux températures élevées des gaz chauds dégagés par le processus de combustion. Elle comporte l'ensemble de l'inspection de combustion ainsi qu'une inspection détaillée des directrices¹ de la turbine, des protections du stator² et des aubes³ de la turbine.

- Inspection majeure (MI: Major Inspection)

Une inspection majeure consiste à examiner tous les composants internes rotatifs et fixes de l'admission de la machine jusqu'à l'échappement. Cette inspection inclut les éléments précédents issus des inspections de combustion et de la veine gazeuse, en plus de l'ouverture complète du compresseur.

La figure I.8 montre de manière globale les parties de la turbine à gaz concernées par chaque inspection de démontage :

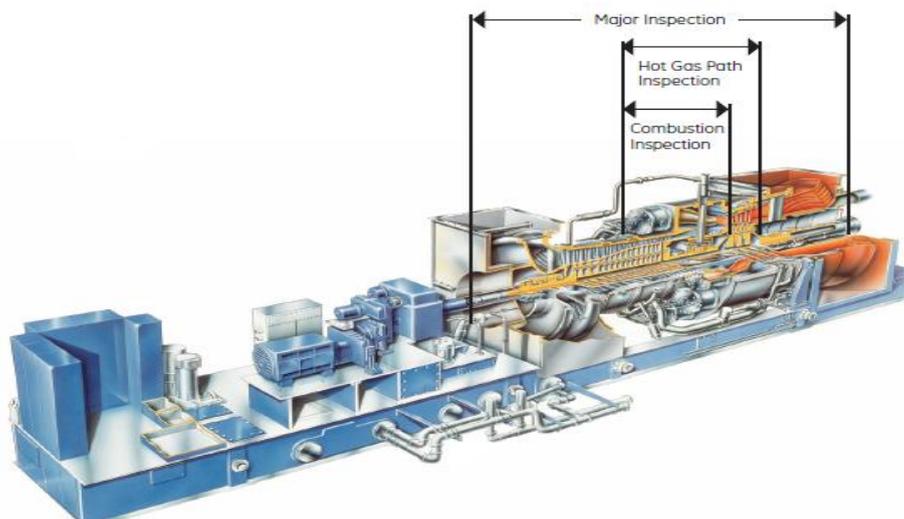


Figure I. 8 : Parties de la turbine à gaz concernées par les inspections de démontage

¹Directrices : vannes statoriques se trouvant sur le premier étage de la turbine (premières aubes après la pièce de transition).

² Stator : partie fixe de la machine entourant le rotor (élément principal de la turbine servant à entraîner l'alternateur).

³ Aubes : appelées aussi ailettes, éléments statoriques ou rotoriques montés sur le rotor ou le stator.

3. Inspection de veille

Les inspections de veille sont effectuées au cours des périodes hors pointe où l'unité n'est pas en fonctionnement et elle inclut l'entretien courant des systèmes accessoires ainsi que l'étalonnage des dispositifs (installation de batterie, changement des filtres, etc.)

- Inspection boroscopique

L'objectif de l'inspection boroscopique est de surveiller l'état des parties internes de la machine sans enlever le couvercle de cette dernière. Les conceptions de la turbine à gaz incorporent des dispositions dans le boîtier du compresseur et de la turbine pour permettre l'inspection des premiers étages de ces deux parties. Ces dispositions représentent des ouvertures de petites dimensions alignées radialement le long de la caisse du compresseur ainsi que sur la coque de la turbine, permettant ainsi l'introduction d'un borescope au sein de la machine.

I.2.4. Les types de contrats de maintenance de GE Power

GE propose quatre (04) types de contrat de maintenance, à savoir :

1. **Contrat de maintenance transactionnel** : Répond à une demande ponctuelle d'un client, comprenant une étendue de fourniture répondant à un besoin précis du client. Prenons à titre d'exemple la réalisation d'une Inspection de Combustion de la Turbine à Gaz. Dans ce cas, la responsabilité du constructeur se limitera à fournir au client les prestations en accord avec l'étendue de fourniture spécifiée dans le contrat. Une fois les travaux terminés, outre la responsabilité légale de garantie, le constructeur aura complété toutes ses obligations vis-à-vis du client.
2. **Multi-Year Maintenance Plan** : Engagement à long terme signé entre les parties (3 ans et plus). A travers un contrat type MMP, le constructeur s'engage vis-à-vis du client sur les prix des pièces et des services ainsi que les délais d'exécution. En contrepartie, le client s'engage sur un volume minimum de commande durant le terme du contrat. Ce type de contrat permet au client de gérer sereinement la maintenance de sa centrale en maîtrisant ses coûts et sa planification de maintenance.
3. **Contractual Service Agreement** : Engagement à long terme signé entre les parties (6 ans et plus). Il fournit un support de maintenance complet de la part du constructeur. A travers un contrat de type CSA, le constructeur est responsable de la maintenance de la Turbine à Gaz ainsi que de ses équipements directs (Alternateur et/ou Turbine à Vapeur) et s'engage vis-à-vis du client à garantir les performances suivantes : disponibilité, dégradation de la consommation, dégradation de la puissance.
4. **Operation & Maintenance** : Tout comme un contrat type CSA, un contrat de type O&M est un engagement à long terme (6 ans et plus) 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 du constructeur. Il fournit au client le plus haut niveau de participation et d'engagement de la part du constructeur. Il est important de préciser qu'à travers ce type de contrat, la centrale reste la propriété du client bien que le personnel responsable de la gestion et du bon fonctionnement de la centrale soit le personnel du constructeur.

I.3. Etat des lieux

La compagnie GE fournit des turbines à Sonelgaz depuis quarante (40) ans. Les divers contrats signés entre les deux parties comportent notamment la maintenance des turbines. Cette dernière inclut le changement d'un certain nombre de pièces, pouvant être classées comme suit :

➤ Selon le genre :

- Capital Parts (CPs) :

Pièce de transition, Injecteur de carburant, Sabots, etc.

- Non-Capital Parts (NCPs) :

- Consommables (Joints, Boulons, Vis, etc.)
- Produits chimiques (Huiles, Graisses, Produits d'entretien, etc.)
- Consommables électriques/électroniques (capteurs, prises de branchement, câbles, etc.)

➤ Selon la famille :

- Pièces d'usure : Joints, Boulons, Vis, etc.
- Pièces de sécurité : Filtre, Thermostat, Valve, etc.
- Partie chaude : Pièce de transition, Injecteur de carburant, Sabots, etc.

Lorsque l'opération de maintenance est entamée, le TA (Technical Advisor) doit arbitrer sur le changement du consommable. Il est d'usage que l'intégralité des NCPs appartenant à la partie chaude (Combustion) soit renouvelée. Pour ce faire, chaque pièce est codifiée.

Environ 90 % des pièces GE sont soumises à la codification suivante :

0 0 0 X 0 0 0 0 Suivie de G 0 0 0 lorsqu'il s'agit d'une pièce qui est composée de sous pièces, elles-mêmes portant un code se terminant par G 0 0 0, et ainsi de suite jusqu'à ce que le composant du dernier sous-groupe soit indivisible, ce dernier portera le code P 0 0 0.

La codification GE a deux utilités principales :

- Effectuer une commande.
- Accéder au schéma appelé dans le jargon GE « Bill of Matériel », précisant les spécificités de la pièce (matériau, cotations, couleur, etc.). La première partie du code correspond à un numéro de dessin, unique, et propre à chaque pièce.

Nonobstant, le changement du consommable des autres parties de la turbine est tributaire de leur état de dégradation et/ou de leur criticité par rapport au fonctionnement de cette dernière. Tout cela ne pouvant évidemment être déterminé que lors du déroulement de la maintenance car le remplacement du consommable présente un caractère fortement erratique, ce qui ne manque pas de compliquer la tâche du CPM (Contract Performance Manager).

En effet, la prévision du besoin en consommable n'est pas chose aisée, et la difficulté à laquelle les CPMs font face, les mène à effectuer des sur-commandes afin d'anticiper les rallongements des durées de maintenances, causant ainsi des dépassements de coûts, susceptibles d'affecter les finances de l'exploitation.

Le consommable non utilisé est par la suite stocké sur site dans le magasin du client jusqu'à la prochaine maintenance qui nécessitera le changement de l'une des pièces disponibles (augmentant ainsi le risque d'obsolescence de ces dernières).

En raison des dysfonctionnements constatés lors des opérations de maintenance, et considérant le fait que ceux-ci émanent essentiellement de difficultés opérationnelles, Power Services à pris l'initiative de reconfigurer le système de gestion des stocks de la pièce de rechange pour la maintenance des turbines à gaz

I.4. Contexte du projet

I.4.1. Cadre du projet et problématique

Notre projet s'inscrit dans le cadre de l'accord à long terme signé par GE, GEAT et Sonelgaz, et qui constitue un renforcement des capacités industrielles locales. Cet accord est non seulement considéré comme le plus important de l'histoire pour GE Power Services à l'échelle internationale, mais également comme l'un des plus importants conclus par GE.

L'usine GE Algeria Turbines (GEAT) créée en 2014 par GE et Sonelgaz fabriquera en Algérie, des turbines à gaz ainsi que des auxiliaires (tuyauterie reliant les différents composants d'une centrale électrique). Le site de Ain Yagout à Batna, d'une superficie de vingt (20) hectares, a été choisi par les deux partenaires pour accueillir ce complexe industriel d'une capacité atteignant un virgule cinq (1.5) GW de puissance annuelle.

Le contrat dénommé « Mega-Deal », signé entre GE et Sonelgaz, comprend des opérations et services de maintenance (O&M) à long terme pour 10 centrales électriques à travers le pays et qui généreront onze (11) gigawatts d'électricité, la mise en place d'un système de renforcement de l'efficacité énergétique (Advanced Gas Path) qui délivrera quatre cent vingt (420) mégawatts de puissance supplémentaire, avec une réduction de la consommation du gaz naturel utilisé, ainsi que l'introduction des solutions numériques de GE. Ensemble, ces capacités renforceront l'efficacité opérationnelle et la productivité des centrales. Cela aidera également à économiser jusqu'à deux (2) milliards de dollars (USD) de gaz qui pourraient être mis à disposition sur les marchés internationaux. **(Revue de presse FCE, 25 Avril 2017)**

Le système AGP offre plusieurs avantages, parmi lesquels :

- Le recours à la Boroscope Inspection en vue d'évaluer l'état de la turbine, sans pour autant devoir l'arrêter pour une CI.
- Le prolongement des intervalles inter-maintenances permettant d'espacer une HGPI d'une MI de 32 000 heures de marche au lieu de 24 000 heures de marche.
- La réduction de la consommation de gaz, permettant de bénéficier d'une économie estimée à 2 milliards de dollars.
- L'amélioration du rendement de la turbine avec un gain de puissance d'environ 420 Mégawatts, ce qui représente l'équivalent d'un turbo alternateur supplémentaire.

Avant que cette technologie ne soit mise en place, il y avait une MI toutes les 48 000 heures, comme présenté ci-dessous :

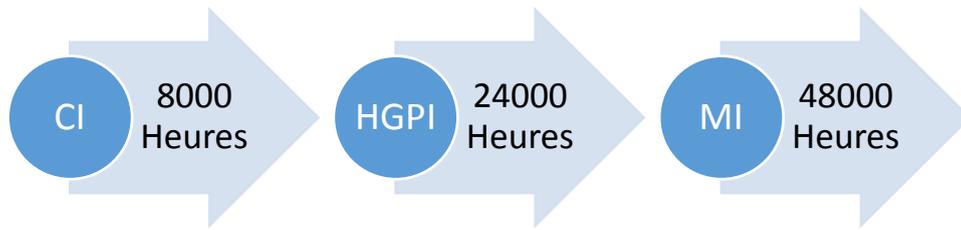


Figure I. 9 : intervalles inter-maintenances avant l'AGP

Aujourd'hui grâce à l'AGP, une MI est réalisée toutes les 64 000 Heures, et seulement deux maintenances sont effectuées de sorte à ce que les temps d'arrêt de la machine soient largement réduits, voir figure I.10 ci-après.

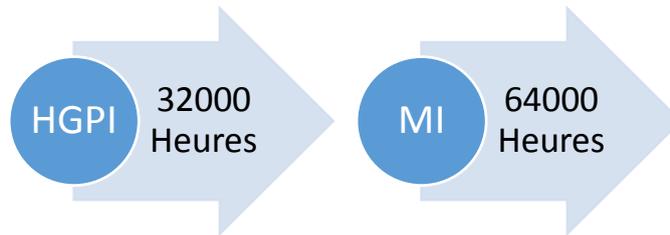


Figure I. 10 : intervalles inter-maintenances après l'AGP

Notre problématique s'inscrit dans le cadre de l'initiative engagée par GE, pour pallier les difficultés opérationnelles relatives à l'approvisionnement des pièces de rechange pour les opérations de maintenance. En effet, l'indisponibilité de toute pièce composant la turbine conduit inévitablement à une prolongation des temps d'arrêts de la machine qui, dans un contexte comme celui-ci, engendrent des coûts avoisinant les quatre-vingts dix-mille (90 000) USD par jour. Le fait est que le client de GE n'est autre que Sonelgaz, entreprise étatique, détenant le quasi-monopole en termes de distribution d'électricité, il est question alors d'alimenter tout un pays en énergie, ce qui donne à la variable temps une toute autre dimension.

Aussi, le Méga-Deal impliquera incontestablement l'augmentation du nombre de turbines à prendre en charge, confrontant davantage les deux entités économiques à ce problème, avec le risque que les conséquences résultant de ce dernier accroissent, prenant ainsi des proportions considérables.

Dans ce contexte, GE aspire à prévenir l'occurrence de ce type de complications et propose alors une nouvelle manière de gérer ces opérations de maintenance, de sorte à assurer la disponibilité de toutes les pièces et ce, en temps voulu.

Plusieurs axes d'amélioration visant d'une part à permettre la disponibilité des pièces de rechange, et d'autre part, à optimiser les stocks de ces dernières ont été alors identifiés. Cette démarche a pour but de trouver le bon compromis entre dimensionnement des stocks, et niveau de service attendu des pièces de rechange, en fonction de leur impact sur le respect des durées des opérations de maintenance.

L'expérience a démontré que si la gestion des pièces dites principales, fait souvent l'objet d'une attention particulière, ce n'est pas le cas du consommable (NCPs). En effet, la gestion de la Pièce de rechange (PdR) de type NCP, ne bénéficie pas de la même rigueur que celle des pièces

principales. Les failles d'une telle gestion ont été prouvées plus d'une fois, lors des opérations de maintenance, dont la durée a dû être rallongée (temps d'arrêts plus importants que prévu) à cause d'un NCP non-disponible, bien que l'opération ait été planifiée.

Notre contribution s'inspire du projet « outage express », préalablement mis en place par l'entreprise aux Etats-Unis ainsi qu'en Thaïlande. Elle consistera à repenser la gestion du consommable GE, en proposant une solution qui permettra à chaque site d'être approvisionné en NCPs grâce à des conteneurs mobiles. Ainsi, dans le cadre du présent travail, nous traiterons trente-six (36) turbines de type 9FA.03 correspondant aux trente-quatre (34) turbines distribuées à travers les dix (10) sites du Méga-Deal en plus des deux (02) turbines de Sharikat Kahraba Skikda (SKS) qui doivent être approvisionnées en NCPs lors des maintenances planifiées et/ou non planifiées.

L'objectif est de mettre à disposition de chacun des onze (11) sites, au besoin, un conteneur qui fournisse tout le consommable en quantité nécessaire et en temps voulu. Pour ce faire, deux (02) mesures ont été retenues :

- Rationalisation des stocks de NCPs dédiés aux opérations de maintenance en vue de prévenir les sur-stockages et de manière à optimiser les quantités commandées.
- Réduction du taux d'indisponibilité des turbines dû à la prolongation de la durée allouée à la maintenance provoquée par l'absence de pièces sur site.

Ainsi, une remise à niveau de la politique de gestion des NCPs semble nécessaire et ce, à travers la localisation, le dimensionnement et l'établissement d'une politique d'approvisionnement des conteneurs sus cités.

I.4.2. Plan d'actions

Notre travail consistera dans un premier temps à conduire une étude comparative des différents scénarios de localisation envisagés, notamment sur la base de modèles mathématiques et de la méthode du barycentre.

Ainsi, nous avons proposé quatre (04) scénarios que nous jugerons par rapport à deux paramètres, à savoir : les coûts logistiques et les distances.

- Scénario 1 :

Partant du fait que les onze (11) centrales du Méga-Deal et de SKS sont réparties sur l'ensemble du territoire national, nous allons dans un premier temps scinder la carte géographique en quatre zones : Est, Ouest, Sud et Centre. Ensuite, nous allons procéder à l'affectation de chaque centrale électrique à la zone dans laquelle elle se situe, pour ensuite déterminer le barycentre de chacune de ces zones. Les résultats obtenus seront alors soumis à deux modèles mathématiques, l'un prenant en compte les distances parcourues ainsi que les coûts logistiques, alors que l'autre se basera uniquement sur le paramètre distance. L'implémentation sera effectuée grâce au logiciel IBM ILOG CPLEX 12.6.

- Scénario 2 :

Localisation d'un unique entrepôt de stockage situé au barycentre de l'ensemble des centrales

électriques concernées. Pour aboutir à un résultat, nous commencerons par réduire le nombre de conteneurs nécessaires et ce, en mettant en place un programme informatique permettant de dynamiser la détermination du nombre optimal de conteneurs de telle sorte à couvrir les maintenances des 36 turbines. Dans le souci de couvrir tous les types de maintenances, à savoir les maintenances planifiées ainsi que les maintenances non programmées, nous déterminerons les périodes durant lesquelles les conteneurs sont disponibles pour couvrir ces dernières.

Aussi, dans le but d'asseoir notre étude, nous aurons recours à une analyse de sensibilité pour nous assurer de la stabilité des résultats obtenus.

- Scénario 3 :

Exploitation du « Tooling Center » en guise d'entrepôt de stockage, ce dernier étant actuellement mis en place par GE pour fournir l'outillage nécessaire aux inspections à chaque opération de maintenance.

- Scénario 4 :

Rotation des conteneurs entre les sites. Ce scénario n'implique l'ouverture d'aucun entrepôt de stockage et repose sur l'hypothèse que les conteneurs se déplacent d'un site à un autre afin de satisfaire le besoin en consommable et ce, à chaque maintenance

S'ensuit l'étape du dimensionnement du conteneur, au cours de laquelle nous procéderons en premier lieu à l'optimisation de la liste des NCPs. Nous penserons ensuite l'aménagement du conteneur à travers l'agencement des différents équipements de stockage et la détermination des rayonnages, en prenant en considération d'une part, le critère d'accessibilité, et d'autre part la notion d'ergonomie.

Aussi, dans l'optique de maximiser l'espace exploité dans les casiers, l'affectation des emplacements pour chaque référence se basera sur un modèle mathématique de découpage.

Enfin, nous établirons une politique de GdS des NCPs ainsi qu'un planning de réapprovisionnement dédié à chaque conteneur. Nous procéderons également à la formalisation de la procédure de réapprovisionnement.

La figure I.11 synthétise le plan d'actions que nous nous sommes fixées pour la résolution de la problématique.

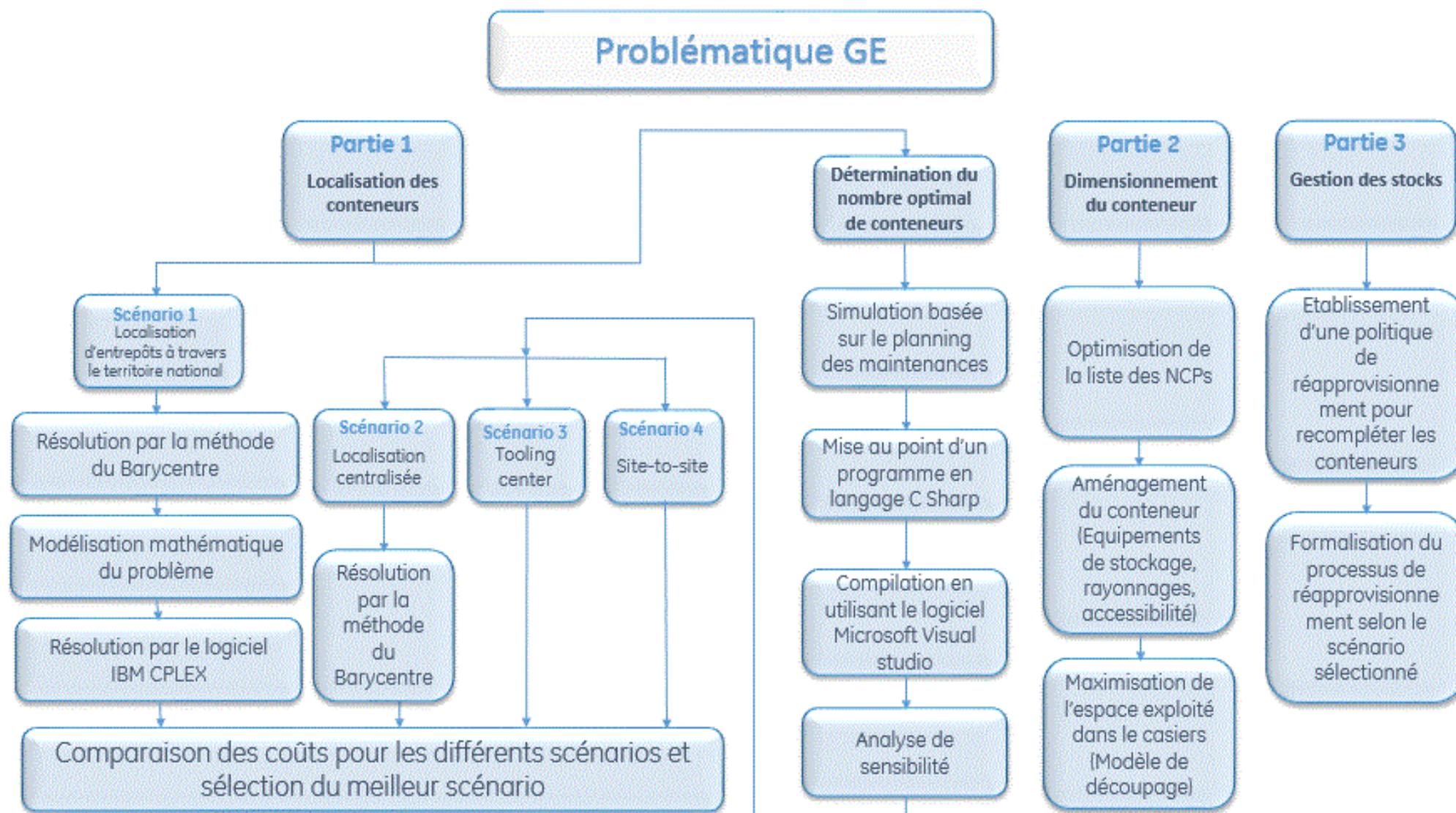


Figure I. 11 : Plan d'actions

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la multinationale General Electric, ses activités, ainsi que les différents secteurs dans lesquels elle opère. Par la suite, nous nous sommes intéressées à GE Power, branche dans laquelle notre stage a été effectué, à travers la présentation des différents produits proposés par cette entité, des divers services de maintenance offerts ainsi que les types de contrats qui peuvent être établis. De là, un état des lieux relatif à la GdS de la PdR pour les opérations de maintenance a été dressé.

En définitive, nous avons introduit le cadre dans lequel le projet a été effectué, à savoir, le Mega-Deal : contrat signé entre GE et Sonelgaz. L'étude du contexte nous a alors permis de poser la problématique qui sera traitée tout au long de ce projet suivant le plan d'actions que nous avons mis en place.

Afin de résoudre notre problématique, une revue de littérature traitant des divers aspects du sujet fera l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE II

ETAT DE L'ART

Introduction

La gestion des opérations de maintenance doit être pensée par l'entreprise de manière à optimiser au mieux les ressources utilisées et à respecter les délais impartis.

La complexité de cette problématique a suscité l'intérêt des dirigeants, les menant à rechercher activement une alternative aux difficultés résultantes d'une mauvaise GdS de la PdR.

Par conséquent, le présent chapitre recensera les concepts théoriques relatifs aux différents aspects de la résolution de la problématique. Ce faisant, il comprendra des généralités sur la maintenance, axe moteur du travail effectué au sein de l'entreprise General Electric.

Aussi, les différentes méthodologies de GdS de la PdR pour la maintenance seront abordées. Par la suite, nous exposerons les modèles mathématiques de localisation-allocation susceptibles d'être appliqués pour la résolution de la problématique posée. Et enfin, nous compléterons notre revue de littérature en introduisant le concept de conteneurisation, nécessaire au dimensionnement de conteneurs assurant la disponibilité des NCPs lors des opérations de maintenance.

II.1. Généralités sur la maintenance

Longtemps vue comme un mal nécessaire, la maintenance est devenue une réelle préoccupation dans les entreprises. Elle s'est révélée être un véritable enjeu compétitif, tant sur l'assurance des performances de disponibilité des matériels existants, qu'en termes de sécurité, de qualité et de coûts. Aujourd'hui, elle est perçue comme un processus industriel à part entière lorsqu'elle n'est pas identifiée comme l'une des activités principales de l'exploitation industrielle.

L'objectif de cette partie est de mettre en relief la notion de maintenance, son importance, les différentes pratiques existantes ainsi que les divers aspects de la gestion de la pièce de rechange qui y sont associés.

Les stratégies de maintenance sont aussi variées que peuvent l'être les systèmes sur lesquels elles s'appliquent. Cependant, toutes visent le maintien du système dans un état de bon fonctionnement le plus longtemps possible, ou la restauration la plus brève lors d'une défaillance.

II.1.1. Définition de la maintenance

La fonction de la maintenance est définie par l'AFNOR 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 ».

II.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. Ainsi, les types de maintenances sont scindés en trois classes :

- **La maintenance corrective :**

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

La maintenance corrective est assurée sous deux formes : 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.

- **La maintenance Préventive :**

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

- **Maintenance Conditionnelle :** Elle se traduit par une surveillance des points sensibles de l'équipement, exercés au cours des visites préventives. Ces visites permettent d'enregistrer un degré d'usure, un jeu mécanique, une température, une pollution ou tout autre paramètre qui puisse mettre en évidence l'imminence d'une défaillance.

- **Maintenance Prévisionnelle** : repose sur la surveillance et l'analyse de l'évolution d'un état de dégradation pour un équipement donné, par exemple : le contrôle des vibrations, l'inspection visuelle, le contrôle des paramètres de processus (pressions, intensité électrique, vitesses...).
- **Maintenance Systématique** : c'est le type de maintenance auquel on s'intéresse le plus dans ce travail, il se traduit par l'exécution sur un équipement -à dates planifiées ou, à volume prédéfini d'unités d'usages atteints- 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 de 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.

- **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, modernisation, etc.

Le schéma suivant reprend la classification des types de maintenance expliqués précédemment :

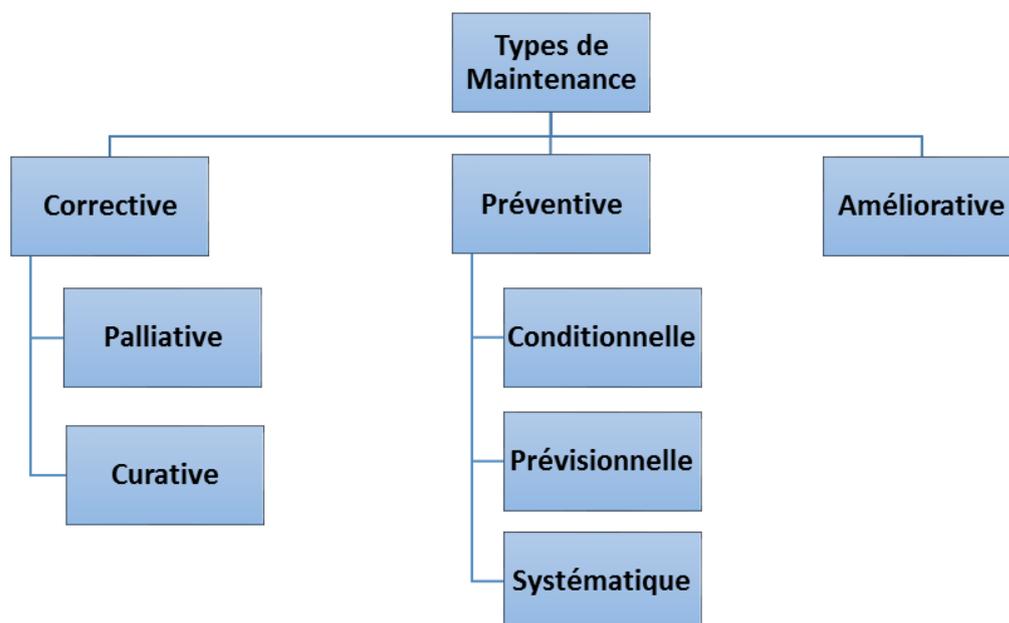


Figure II. 1 : Types de maintenance

II.1.3. Classification des tâches de la maintenance

Les tâches de maintenance sont classées en cinq (05) niveaux. Ceux-ci font référence à la complexité des tâches à effectuer et, entre autres, aux ressources matérielles nécessaires à la réalisation de chacune des tâches :

- Tâches de maintenance du premier niveau : Comportent des réglages simples prévus par le constructeur ne nécessitant ni outillage spécifique, ni opération de démontage.
- Tâches de maintenance de deuxième niveau : Comportent des opérations de dépannage par échange standard d'éléments prévus à cet effet, ou encore des opérations mineures de maintenance préventive qui peuvent nécessiter un outillage standard.
- Tâches de maintenance de troisième niveau : Nécessitent une identification et un diagnostic des pannes. La réparation s'effectue toujours par un échange de composants fonctionnels et les réparations mécaniques à réaliser sont mineures. L'outillage nécessaire est courant et prévu pour ce type d'intervention. De plus, des appareils de mesure (banc d'essai, contrôle, etc.) sont nécessaires pour la remise en route correcte de l'équipement qui a nécessité l'intervention.
- Tâches de maintenance du quatrième niveau : Nécessitent des travaux importants de maintenance corrective ou préventive. Un outillage plus spécialisé est généralement requis.
- Tâches de maintenance du cinquième niveau : Comportent les travaux de rénovation, de reconstruction ou de réparations importantes confiés à un atelier central. Les moyens nécessaires pour effectuer ce type d'intervention sont proches de ceux qui ont été utilisés lors de la fabrication de l'équipement par le constructeur.

Dans le cadre du présent projet, le travail effectué concerne les opérations de maintenance de niveau quatre. (Anthony. Kelly, 2006) (F. Marmier, 2007)

II.1.4. Principaux facteurs influençant la maintenance et la durée de vie des équipements (GER-3620)

La maintenance ainsi que la durée de vie des différents composants d'une turbine peuvent être directement impactés par des paramètres tels que :

- Les cycles de démarrage
- Les réglages de puissance
- Le type de combustible
- Le pourcentage d'injection d'eau/vapeur référencé sur le débit d'entrée d'air du compresseur

De ce fait, la prise en considération de ces paramètres permet d'ajuster au mieux les dates de maintenance selon les conditions de fonctionnement de la turbine.

II.1.5. Centralisation ou décentralisation de la maintenance ?

Il existe deux tendances quant au positionnement de la maintenance dans l'entreprise :

➤ La centralisation :

Toute la maintenance est assurée par un seul service, d'où les avantages suivants :

- Standardisation des méthodes, des procédures et des moyens de communication.
- Possibilité d'investir dans du matériel onéreux grâce au regroupement.
- Vision globale de l'état du parc du matériel à gérer.
- Gestion plus aisée et plus souple des moyens en personnels.

- Rationalisation des moyens matériels et optimisation de leur usage (amortissement plus rapide).
- Diminution des quantités de pièces de rechange disponibles.
- Communication simplifiée avec les autres services grâce à sa situation centralisée.

➤ La décentralisation :

La maintenance est confiée à plusieurs services, de dimensions proportionnellement plus modestes, et liés à chacun des services de l'entreprise. Ceci les avantages suivants :

- Meilleures communications et relations avec le service responsable et l'utilisateur du parc à maintenir.
- Effectifs moins importants dans les différentes antennes.
- Réactivité accrue face à un problème.
- Meilleure connaissance du matériel.
- Gestion administrative allégée.

II.2. Gestion des stocks de la pièce de rechange pour la maintenance

Les opérations de maintenance requièrent la disponibilité des pièces de rechange. Ces dernières nécessitent une gestion appropriée afin de satisfaire les besoins exprimés par la fonction de maintenance en quantités voulues et dans les temps impartis.

II.2.1. Définition d'un stock

Un stock d'un produit est une quantité de ce produit mise en réserve en vue d'une utilisation (ou commercialisation) future afin de faire face à une demande certaine ou probable.

La gestion des stocks a pour objectif de satisfaire cette demande tout en limitant le coût de stockage. Il est néanmoins impératif de veiller à ne pas se retrouver en situation de rupture de stock ou en surstock (**Lasnier, 2015**)

II.2.2. Définition de la gestion de stocks

La gestion des stocks consiste à planifier, organiser, diriger et contrôler les activités relatives à tous les stocks de marchandises gardées dans l'entreprise. Toutefois, la gestion de stocks est un processus allant de l'achat des marchandises, à leur comptabilisation après la sortie du stock, en passant par leur entrée en stock. (**Web a**)

Le projet consistant à rendre disponible le consommable nécessaire à la maintenance des turbines à gaz, il s'agira donc dans ce qui suit de la gestion des stocks de la pièce de rechange.

II.2.3. Définition de la pièce de rechange

La définition la plus simple et qui correspond le mieux à l'idée que l'on se fait en général d'une PdR est la suivante : « une **pièce de rechange** est une pièce destinée à remplacer une pièce défectueuse ou dégradée d'un bien en exploitation ». (**Arnoux, 2004**)

Cette définition implique clairement que la PdR est la matière d'œuvre de la maintenance.

En effet, la mission de la PdR en maintenance est liée de façon intrinsèque aux objectifs même de la maintenance. Ainsi, le stock de PdR est conçu pour le soutien de la fonction maintenance, d'une part sur le plan technique (accroissement de la durée de vie des équipements et amélioration de leur disponibilité et de leurs performances), et d'autre part, sur le plan économique en réduisant les différents coûts liés aux défaillances.

Afin d'assurer une bonne gestion des stocks, il faut faire :

- Un bon référencement des articles (codification de la PdR) ;
- Une bonne organisation des familles et sous-familles des articles (Classification de la PdR) ;
- Un adressage juste dans les zones de stockage (mise en stock de la PdR) ;
- Un planning et une procédure d'inventaire (Sélection d'une technique d'inventaire). Le code (ou référence) d'un article est un outil de gestion. Il peut être :
 - **Numérique** : les caractères sont uniquement des chiffres (code en base 10) ;
 - **Alphabétique** : les caractères ne sont que des lettres (code en base 26) ;
 - **Alphanumérique** : les caractères sont pris parmi les 10 chiffres et les 22 lettres (code en base 32), c'est la structure de code la plus fréquemment utilisée.

Les systèmes de codification les plus courants vont de 6 à 13 caractères. Un code peut se présenter sous les structures suivantes :

- **Code aveugle** : succession de chiffres n'ayant aucune signification particulière ;
- **Code totalement significatif** : caractère significatif selon sa place dans le code ;
- **Code partiellement significatif** : une partie des caractères a une signification.

La référence du casier de stockage dans le magasin (référence comportant en général 3 caractères) ne doit, en aucun cas, être associée au code de l'article stocké.

- Un composant peut avoir plusieurs références : celle du fabricant, du constructeur, du fournisseur et de l'utilisateur. (Drivet, 2002)

II.2.4. Classification des PdR en stock (Desfour, 1998)

La classification des PdR en stock en plusieurs catégories permet de gérer des classes de PdR homogènes et non plus des PdR. Ceci permet non seulement de faciliter la GdS, mais aussi de les gérer selon différentes façons selon la classe de la pièce.

La méthode la plus utilisée est la méthode ABC (Annexe II.1). Celle-ci permet de classer les PdR selon leur importance, par rapport à un critère donné, en trois catégories homogènes (A, B et C). En entreprise, du fait des contraintes et des objectifs multiples, on est souvent amené à opter pour une classification à critères multiples.

Ainsi, la classification ABC multicritère est une application de la classification ABC pour chaque critère considéré où chaque article aura plusieurs classements (exemple : A selon

le premier critère, B selon le second, A selon le troisième, etc.). Par la suite, il y a lieu de reprendre le tableau issu des critères multiples combinés (il y aura par exemple une cellule AAAA, une autre AAAB, une autre AAAC, et ainsi de suite jusqu'à passer en revue toutes les combinaisons possibles en fonction du nombre de critères). Enfin, il s'agit de considérer le poids de chaque critère en reclassant les différentes combinaisons selon les catégories ABC.

Cette méthode de classification n'est jamais définitive, de ce fait, elle doit faire l'objet de révisions périodiques.

II.2.5. Techniques d'inventaire des PdR (Zermati, 2001)

L'inventaire peut être effectué sur la totalité des articles stockés, ou sur des catégories ou des classes d'articles sélectionnées sur la base de critères propres à chaque gestionnaire.

Selon la fréquence de décompte, on distingue quatre types d'inventaires : l'inventaire permanent, l'inventaire intermittent et l'inventaire tournant.

- **Permanent** : consiste à tenir à jour en permanence les quantités d'articles grâce à la connaissance des mouvements de stocks.
- **Intermittent** : effectué en général une fois par an en fin d'exercice comptable. Il est effectué pour tous les articles de l'entreprise.
- **Tournant** : consiste à compter le stock par groupe d'articles, à des fréquences différentes et planifiées. Dans la pratique, il se révèle comme une meilleure alternative aux inventaires permanent et annuel. Avec un inventaire tournant, des listes d'articles classés sont fournies à des périodes bien définies et le décompte des quantités disponibles pour chacune des listes se fait plusieurs fois durant l'année.

Ceci sous-entend bien sûr que le décompte concerne en priorité les articles ayant subi soit un mouvement d'entrée marchandise, soit un mouvement de sortie marchandise durant la période.

En règle générale, les articles faisant l'objet d'un inventaire tournant ne sont pas sélectionnés de façon aléatoire. Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour générer ces listes, parmi lesquelles celles décrites ci-dessous.

- Le découpage des zones de stockage. L'ensemble des articles du magasin est compté au moins deux fois en une année. L'inventaire se fait d'une zone de stockage à une autre suivant un calendrier.
- La classification des familles d'articles. Là aussi, l'ensemble des articles du magasin est compté au moins deux fois durant l'année. L'inventaire se fait d'une famille d'article à une autre suivant un calendrier.

Cette liste n'est évidemment pas exhaustive et les méthodes employées ne sont pas exclusives, il est même fréquent que l'on les combine pour un résultat plus significatif. (Web b)

Coûts de GdS des PdR (Zermati, 2005)

Après le transport, le stockage est l'activité la plus génératrice des charges sur la chaîne logistique. On retrouve dans ce maillon les opérations de manutention, de conditionnement, de traitement physique des supports et contenants (palettes, paniers, conteneurs, bacs en plastiques et caisses), de vérification des conditions de stockage (poids, température ...) et enfin, des inventaires des stocks (inventaire ponctuel, ou tournant)

Les stocks de PdR comme tout autre stock supportent principalement trois (03) sortes de coûts :

- **Coût d'acquisition ou de passation de commande** : Achat, Salaires des agents, Coûts de transport, de réception et de contrôle qualité.
- **Coût de stockage** : comprend deux catégories :
 - Charges financières : coût d'immobilisation (taux d'intérêt), coût d'assurance.
 - Coûts de magasinage : coût d'entrepôt (location, amortissement), coût d'obsolescence et de détérioration, etc.
- **Coûts de rupture de stock** : Coûts engendrés par l'épuisement ou l'insuffisance du stock de PdR qui aura pour conséquence, un manque à gagner, des retards dans les délais. Il est très difficile d'évaluer de tels coûts bien qu'ils soient généralement très élevés.

La somme des coûts sus cités correspond au coût total de GdS, celui-ci est communément calculé pour une période correspondant à l'exercice comptable. (**Web c**)

II.2.6. Critères de sélection d'une politique d'approvisionnement

En amont de toute opération de maintenance, il est sans nul doute que l'approvisionnement et le stockage de la PdR constituent une action d'importance capitale. Aussi capitale en ce sens qu'elle se justifie par le souci légitime de pérenniser le cycle d'exploitation.

Ceci étant, la sélection d'une politique d'approvisionnement est tributaire de la bonne appréciation de paramètres tels que la nature de la demande ou encore la nature des délais de livraison, impactant la détermination d'une politique d'approvisionnement.

- Nature de la demande (**Giard, 2005**)

La nature de la demande est à la base du système de GdS, elle joue un rôle important dans le choix des PA. Il existe trois types de demandes pour les PdR selon qu'elles soient :

- **Aléatoires** : les consommations en PdR suivent une loi de distribution.
- **Certaines** : les consommations en PdR sont connues à l'avance avec certitude (ou avec une marge d'erreur relative considérée comme négligeable).
- **En univers incertain** : les consommations ne suivent aucune loi de probabilité. La demande est alors déterminée à partir des modèles de prévisions.

Pour ce dernier type de demande, les méthodes de prévisions traditionnelles sont inappropriées dans le contexte des consommations de PdR caractérisées par des demandes intermittentes (périodes à consommations nulles, entrecoupées par des périodes à consommations irrégulières non nulles).

- Nature des DL (**Brutman et Marcotti, 2007**)

Le DL est la durée qui sépare la demande d'achat de la réception de la pièce. L'évaluation de ce délai va permettre de connaître le temps nécessaire pour disposer de la PdR.

De même que pour la demande, le DL peut être aléatoire, certain, ou en univers incertain.

Les politiques d'approvisionnement peuvent être fortement impactées par les différents DL. De ce fait, toute tentative d'amélioration du processus d'approvisionnement passe obligatoirement par l'optimisation du processus, et donc par la réduction des DL.

II.2.7. Politiques d'approvisionnement (Courtois et al, 2003)

Définir une politique d'approvisionnement consiste à établir un calendrier de passation des commandes des matières à réapprovisionner ainsi que les quantités à commander. Ces deux derniers éléments (dates et quantité) sont ceux sur lesquels repose le choix de la politique d'approvisionnement. Ainsi, l'objectif de la gestion des approvisionnements, est de procurer à l'entreprise un avantage concurrentiel : en agissant à la fois sur la qualité des prestations mais également sur les coûts. Le tout, en maintenant évidemment une optique d'efficacité économique.

Suivant les combinaisons des dates et quantités de commande, il est en théorie possible de définir quatre politiques de base pour le réapprovisionnement du stock, comme représenté dans le tableau II.1 ci-dessous :

Tableau II. 1: Politiques de réapprovisionnement

	Quantité Fixe	Quantité Variable
Période Fixe	Réapprovisionnement périodique et systématique	Recomplètement périodique
	Réapprovisionner systématique du stock en quantités fixes et à des périodes fixes (Les paramètres de cette méthode ; périodes et quantités sont calculés à l'aide de la formule de Wilson en	A période fixe, une commande est émise en quantité permettant de le ramener au niveau de stock maximum autorisé.
Période Variable	Point de commande	Période variable-Quantité variable
	Lancement d'une commande dès que le niveau de stock atteint une quantité déterminée (suffisante pour couvrir les besoins durant le délai d'approvisionnement).	Le lancement de commande se fera une fois le seuil de commande atteint, ou la période écoulée

Le tableau II.2 résume les avantages et les inconvénients de chaque méthode (Web d) :

Tableau II. 2: Tableau comparatif des politiques d'approvisionnement

	Avantages	Inconvénients
Réapprovisionnement périodique et systématique	- Economies d'échelle - Simplicité de mise en œuvre	Risque de cumul des stocks en cas de mauvaise évaluation de la quantité de réapprovisionnement.
Recomplètement périodique	- Elimination du risque de sur stockage.	Risque de cumul ou de rupture de stock en cas d'irrégularité de la consommation (Aléas).
Point de commande	- Optimisation des approvisionnements	Nécessité de mise en place d'un stock de sécurité en cas de rupture de stock suite à une consommation subite et irrégulière.
Période variable – Quantité variable	- Réactivité par rapport aux fluctuations du marché.	Très sensible aux aléas.

Etant donnée la sensibilité avérée des politiques d'approvisionnement aux différents changements qui surviennent dans son environnement (direct ou indirect) pouvant affecter leur pertinence, il est d'usage de reconsidérer les politiques précédemment citées et ce, de manière régulière, afin d'évaluer leur adéquation à la stratégie de l'entreprise.

Pour ce faire, les entreprises déterminent des indicateurs de performance qui permettent de sonder le fonctionnement de l'organisation pour pouvoir se situer par rapport aux objectifs fixés.

- **Indicateurs de performance :**

L'utilisation d'indicateurs de processus et d'indicateurs de résultat associée à la conduite d'une organisation intégrée est fortement préconisée. **(Héran, 1990)**

« L'indicateur de processus (ou de pilotage) est perçu comme une information qui permet à chaque acteur de conduire le cours d'une action. Quant à l'indicateur de résultat (ou de reporting) permet d'évaluer le résultat de l'action » **(Lorino, 1999)**

Le contrôle de la gestion des stocks se réalise à partir de divers indicateurs permettant d'effectuer un diagnostic d'entreprise et de compétitivité. Ces derniers sont traditionnellement scindés en trois (03) catégories :

Les indicateurs d'alerte qui signalent la présence d'un dysfonctionnement, d'un état anormal impliquant une action corrective.

Dans une gestion quotidienne, il peut s'agir d'une liste des articles ayant atteint le point de commande ; les articles en rupture de stock ; les commandes urgentes encore non livrées ; le nombre de retours ; ou encore des commandes en retard de livraison, dont le calcul est effectué grâce à la formule suivante :

$$\text{Retard de livraison} = \frac{\text{Nombre de livraisons en retard}}{\text{Nombre total de livraisons}}$$

Les indicateurs d'efficience et d'équilibrage qui permettent de mesurer la situation actuelle par rapport aux objectifs fixés. Ils peuvent induire suivant les cas, des ajustements sur les objectifs, ou sur les stratégies.

Dans le suivi des articles et des stocks, il peut s'agir par exemple de la liste des articles ayant dépassé le stock maximum autorisé (afin de connaître les raisons du sur stockage et d'y remédier), dont le calcul est effectué grâce à la formule suivante :

$$\text{Taux moyen de couverture du stock} = \frac{\text{Stock moyen}}{\text{Consommation moyenne}}$$

Les indicateurs d'anticipation qui fournissent des informations sur le système dans son environnement et permettent de reconsidérer la stratégie choisie, il peut s'agir par exemple de l'évaluation par les commerciaux de la part de marché des produits concurrents. Les renseignements fournis par ce type d'indicateurs permettront au gestionnaire des stocks et des articles d'anticiper sur la situation en faisant varier ses stocks à la hausse ou à la baisse ; mais aussi d'activer la livraison rapide d'éventuelles commandes en cours. **(Frenandez, 2000)**

II.3. Les problèmes de localisation-allocation d'entrepôts

La raison d'être de toute entreprise est de maximiser son profit, pour ce faire elle se doit de penser sa stratégie de manière à réduire ses coûts sans compromettre la qualité de son service. Dans ce contexte, les décisions de localisation des installations ne doivent pas être prises à la légère mais plutôt être basées sur un bon nombre d'indicateurs essentiels pour l'arbitrage et le choix du meilleur cas de figure, assurant ainsi efficience et optimalité.

Un emplacement d'usine ou d'entrepôt non adéquat peut engendrer des coûts excessifs et une dégradation du niveau de la prestation en dépit de la qualité des politiques de stockage ou encore de transport. Dans ce qui suit, différents modèles mathématiques traitant de la localisation seront présentés.

II.3.1. La méthode du Barycentre

Le barycentre est une notion de physique qui peut être utilisée dans le domaine de la logistique et du transport, en vue de déterminer l'emplacement géographique d'une usine ou d'un nouvel entrepôt par exemple.

Il est calculé en établissant une moyenne des coordonnées des différents points pondérés par leur poids respectif (par exemple, en termes de chiffre d'affaires, de nombre de consommateurs, de la demande, etc.), on obtient un centre de gravité qui représente une solution économique optimisée, il convient cependant de tempérer l'utilisation brute de cet indicateur par d'autres éléments. Par exemple dans le cas de l'implantation d'un nouvel entrepôt :

- La situation politique et sociale dans les points considérés
- Les infrastructures
- L'évolution potentielle du site

Une étude de barycentre ne donne donc pas une réponse précise mais représente plutôt un indicateur d'aide à la décision.

Déterminer un Barycentre revient à calculer le centre de gravité d'un certain nombre de coordonnées, ces dernières s'obtiennent en sommant les coordonnées pondérées de chaque site et en les divisant par la somme des pondérations.

Autrement dit :

$$\text{L'abscisse du barycentre : } \bar{X} = \frac{\sum_i X_i Q_i}{\sum_i Q_i} \quad (1)$$

$$\text{L'ordonnée du barycentre : } \bar{Y} = \frac{\sum_i Y_i Q_i}{\sum_i Q_i} \quad (2)$$

Où : x_i et y_i représentent les coordonnées du site i et Q_i représente la pondération du site i .

(Mattiuzzo, 2008)

La résolution de cette méthode se fait en 5 étapes, comme explicité dans la figure II.2 :

II.3.2. Les problèmes de localisation-allocation

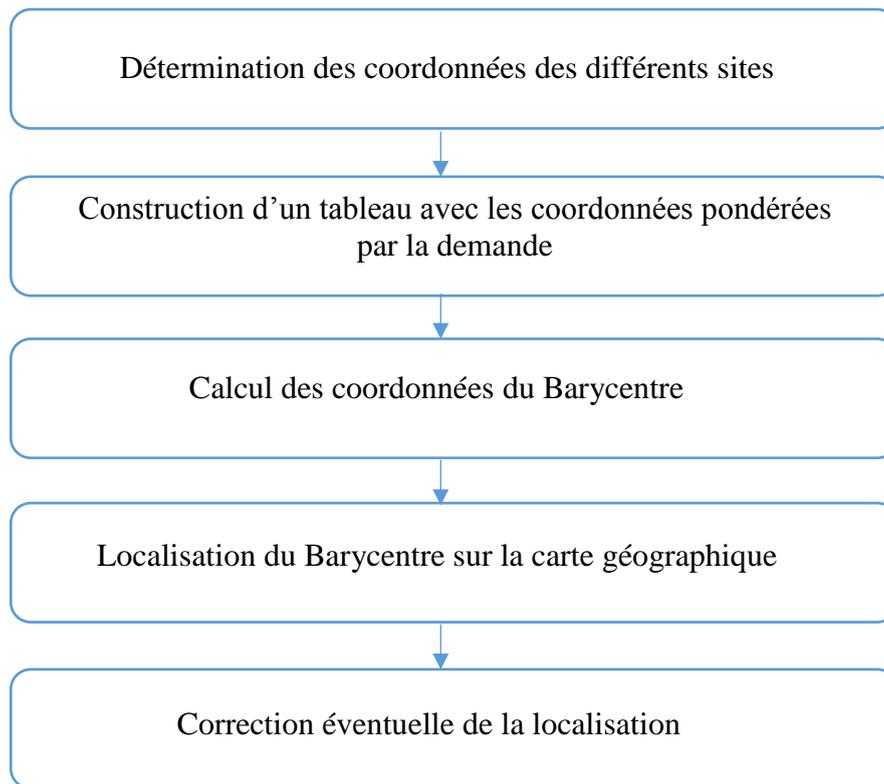


Figure II. 2 : Etapes de résolution de la méthode du Barycentre

Résoudre un problème de localisation revient à déterminer les lieux d'implantation de nouvelles installations afin de répondre aux besoins exprimés par des zones de consommation. Il y a ainsi plusieurs types de modèles mathématiques variant selon un certain nombre de variables pour résoudre ces problèmes, comme il est possible d'utiliser des méthodes qualitatives afin d'effectuer un choix.

- **Les méthodes qualitatives**

Il arrive parfois que les problèmes de localisation dépendent de critères jugés non quantifiables, situations où il devient alors nécessaire de se référer aux modèles qualitatifs que l'on peut également utiliser lorsque le nombre de sites potentiels est discret ou assez réduit. La méthode du score pondéré est un exemple de modèle qualitatif qui utilise l'analyse multicritère, elle se déroule en trois étapes :

- L'identification des facteurs de localisation qualitatifs et quantitatifs.
- La pondération de chaque facteur par un poids qui reflète l'importance de ce dernier dans la décision de localisation.
- L'assignation d'un score à chaque solution potentielle selon chaque facteur.
- L'établissement du score total relatif à chaque solution potentielle.
- L'arbitrage entre les scores pour le choix de la solution (la solution choisie est celle avec le meilleur score).

Cette méthode exige que chaque poids et score soit expliqué et justifié afin qu'aucune décision ne soit remise en question. Pour cela, il est conseillé de faire appel à des experts (**Ghiani & al, 2013**).

- **Les méthodes quantitatives**

Les modèles mathématiques permettent de décrire un système par un ensemble d'équations régissant son fonctionnement. Dans ce contexte, les modèles de localisation-allocation ont été mis au point dans le but de faciliter la recherche d'implantation, avec pour ultime vocation de répondre à une question fondamentale qui est de savoir comment approvisionner ou servir au mieux une aire géographique vaste à partir d'un nombre limité d'installations. Par limite, il est sous-entendu optimal, dans le sens où les distances ainsi que les coûts sont minimisés.

Les modèles de localisation-allocation regroupent d'une manière générale cinq composantes de base dont :

- **La fonction-objectif** qui intègre la notion de distance séparant les clients des emplacements potentiels d'installations.
- **Le niveau de demande** de chaque client ou d'un ensemble de clients.
- **Les emplacements potentiels** en termes de disponibilité foncière, coût, accessibilité.
- **La matrice d'éloignement** ou de coût.
- **La règle d'allocation** qui, généralement, concerne la proximité géographique.

Ainsi, toute décision de localisation, en vue d'être optimale, doit prendre en considération ces cinq facteurs. Toutefois, il y a différentes manières de procéder selon la situation et le nombre d'installations à localiser.

Dans le cas où il n'existe qu'un seul point d'offre à localiser, le problème revient à le placer virtuellement tour à tour à l'un ou à l'autre des emplacements potentiels puis à choisir celui pour lequel la fonction-objectif donne le meilleur résultat. Tout se complique alors si l'on doit localiser un nombre d'installation assez élevé, de telle sorte à ce qu'il devienne considérablement ardu ou même pratiquement impossible de résoudre le modèle et ce, peu importe l'outil utilisé, pour chacune des combinaisons d'emplacements envisageables. Des modèles mathématiques répondant à ce genre de problématique et permettant de localiser au mieux diverses installations ont été développés pour cela, que ce soit pour y apporter une solution optimale ou du moins approchée.

Plusieurs modèles de localisation-allocation vont être présentés dans ce qui suit afin de mieux expliciter tout ce qui a été introduit jusque-là.

Pour ce faire, nous avons pu distinguer plusieurs modèles qui prennent en compte plusieurs paramètres, à savoir :

- La nature de l'information. On distingue alors :
 - Les problèmes déterministes
 - Les problèmes stochastiques
- La capacité des installations. On distingue alors :
 - Les problèmes de localisation d'installations à capacités finies
 - Les problèmes de localisation d'installations à capacités infinies
- L'horizon de planification. On distingue alors :

- Les problèmes statiques
- Les problèmes dynamiques
- La structure des coûts. On distingue alors :
 - Les coûts linéaires
 - Les coûts non linéaires
- Le nombre d'objectifs à optimiser. On distingue alors :
 - Les problèmes de localisation mono-objectif
 - Les problèmes de localisation multi-objectifs
- Le nombre d'échelons. On distingue alors :
 - Les problèmes de localisation mono-échelon
 - Les problèmes de localisation multi-échelons

Notre problématique est de type déterministe, statique, linéaire, avec variables binaires et installations à capacités finies. Aussi, il s'agira de minimiser les distances de sorte à avoir des installations à proximité des points demande. Par conséquent, dans ce qui va suivre, seuls les modèles faisant partie du même rang votre être énoncés.

- **Center Problems : P-Center problem PCP (Hakimi, 1964)**

Dans ce genre de problèmes, la satisfaction de toutes les demandes est exigée et la distance maximale de couverture entre les points de demande et les installations les plus proches est minimisée (Voir Figure II.3). Donc, contrairement à quelques problèmes, la distance de couverture n'est pas une donnée du problème mais plutôt une sortie (le résultat).

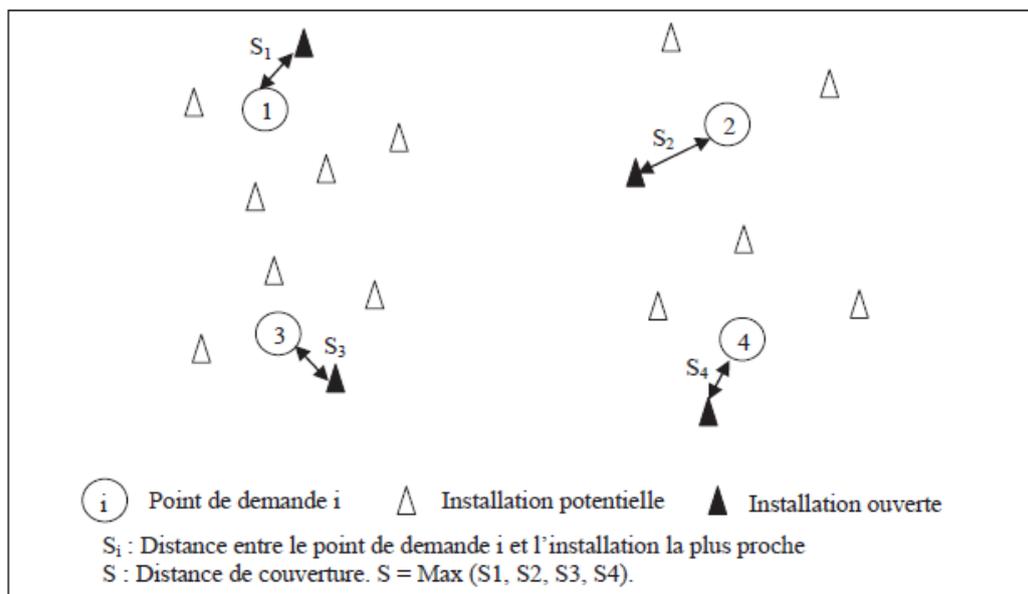


Figure II. 3 : P-Center Problem PCP

La formulation mathématique du modèle se présente comme suit :

Données :

d_{jk} : distance entre l'installation j et le client k

P : nombre maximal d'installations pouvant être retenues

J : ensemble de toutes les installations

K : ensemble de tous les points de demande (clients)

Variables de décision :

$$y_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{Si la demande du client } k \text{ est satisfaite par l'installation } j \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{Si l'installation } j \text{ est retenue} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

S : distance de couverture (distance maximale séparant un point de demande de l'installation à laquelle il est affecté)

Modèle mathématique :

Minimiser S

Sous contraintes :

$$\sum_{j \in J} x_j = P \quad (1)$$

$$\sum_{j \in J} y_{jk} = 1, \forall k \in K \quad (2)$$

$$y_{jk} \leq x_j, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (3)$$

$$S \geq \sum_{j \in J} d_{jk} y_{jk}, \forall k \in K \quad (4)$$

$$x_j \in \{0,1\}, \forall j \in J \quad (5)$$

$$y_{jk} \in \{0,1\}, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (6)$$

La fonction-objectif et la contrainte (4) assurent que la distance maximale S entre les installations et les points de demande soit minimisée. La contrainte (1) assure l'ouverture de P installations seulement. La contrainte (2) garantit que la livraison de chaque point de demande se fait à partir d'une et d'une seule installation. La contrainte (3) assure que la livraison d'un point de demande ne se fait qu'à partir d'une installation ouverte.

Toutefois, dans ce contexte le modèle n'est pas pondéré, de sorte à ce que les points de demande ne soient pas traités en fonction de la demande de chaque client k . Le PCP, aussi connu sous le nom de MMP (MiniMax Problem) donne donc la fonction objectif suivante :

$$\text{Minimiser } [\text{Maximum}_{k \in K} (\sum_{j \in J} d_{jk} y_{jk})]$$

Afin de résoudre un problème où la demande h_k serait différente d'un client à un autre, il est nécessaire d'introduire une nouvelle variable à la fonction objectif, donnant ainsi le modèle « PCP pondéré » ou « MMP pondéré » relatif à la formule suivante :

Minimiser [$Maximum_{k \in K} (\sum_{j \in J} h_k d_{jk} y_{jk})$]

- **Median Problems : P-Median problem : PMP (Hakimi 1964)**

Il s'agit de déterminer la localisation de P installations de façon à minimiser la distance totale parcourue entre les points de demande et les installations auxquelles ils sont affectés. La distance totale est souvent pondérée par des poids traduisant l'importance de la demande. La formulation mathématique de ce problème est la suivante :

Données :

k : indice des clients

j : indice des installations

h_k : Demande du client k

d_{jk} : Distance entre l'installation j et le client k

P : nombre d'installations à localiser

J : ensemble de toutes les installations

K : ensemble de tous les points de demande

Variables de décision :

$y_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{Si la demande du client } k \text{ est satisfaite par l'installation } j \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$

$x_j = \begin{cases} 1 & \text{Si l'installation } j \text{ est retenue} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$

Modèle mathématique :

Minimiser $\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} h_k d_{jk} y_{jk}$

Sous contraintes :

$$\sum_{j \in J} x_j = P \quad (1)$$

$$\sum_{j \in J} y_{jk} = 1, \forall k \in K \quad (2)$$

$$y_{jk} \leq x_j, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (3)$$

$$x_j \in \{0,1\}, \forall j \in J \quad (4)$$

$$y_{jk} \in \{0,1\}, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (5)$$

La fonction-objectif minimise la distance totale entre les installations et les clients. La contrainte (1) assure qu'il y ait exactement P installations engagées. La contrainte (2) assure qu'un client est livré par une seule installation. La contrainte (3) assure qu'une installation ne livre un client que si elle est ouverte.

- **Maximal Covering Location Problem : MCLP [(J.A. White et K.E. Case, 1974), (R.L. Church et C.S. ReVelle, 1974)]**

Le MCLP est un modèle mathématique de localisation qui suppose que le nombre d'installations à localiser est défini à l'avance (exemple : pour des raisons budgétaires, il n'est pas possible d'engager plus de trois (3) installations).

L'objectif du MCLP est alors de maximiser les demandes couvertes.

La formulation mathématique de ce problème est la suivante :

Données :

h_k : Demande du client k

d_{jk} : Distance entre l'installation j et le client k

S : Distance maximale acceptable (distance de couverture)

N_k : Ensemble des installations j appartenant au périmètre de la distance de couverture du client k ($N_k = \{j/d_{jk} \leq S\}$)

P : nombre maximal d'installations pouvant être retenues

J : ensemble de toutes les installations

K : ensemble de tous les points de demande (clients)

Variables de décision :

$$y_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{Si la demande du client } k \text{ est satisfaite par l'installation } j \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{Si l'installation } j \text{ est retenue} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

$$z_k = \begin{cases} 1 & \text{Si le client } k \text{ est couvert} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

Modèle mathématique :

$$\text{Maximiser } \sum_{k \in K} h_k z_k$$

Sous contraintes :

$$\sum_{j \in N_k} x_j \geq z_k, \forall k \in K \quad (1)$$

$$\sum_{j \in J} x_j \leq P \quad (2)$$

$$x_j \in \{0,1\}, \forall j \in J \quad (3)$$

$$z_k \in \{0,1\}, \forall k \in K \quad (4)$$

La fonction-objectif maximise la satisfaction de la demande. La contrainte (1) assure que si la demande d'un client est satisfaite, alors il y a au moins une installation appartenant à la zone de couverture de ce client qui sera ouverte. La contrainte (2) garantit que le nombre d'installations ouvertes ne dépasse pas la limite permise P.

- **Fixed Charge Location Problem : FCLP (M.L. Balinski 1965)**

Le FCLP est un modèle mathématique de localisation qui suppose que les installations disposent de coûts d'ouverture différents. Il se base également sur le fait que le nombre d'installations à ouvrir est inconnu a priori. La formulation mathématique du modèle FCLP se présente comme suit :

Données :

f_j : Coût fixe d'ouverture de l'installation j

V_j : Capacité de l'installation j

h_k : Demande du client k

d_{jk} : Distance entre l'installation j et le client k

α : coût de transport d'une unité de demande sur une unité de distance

J : ensemble de toutes les installations

K : ensemble de tous les points de demande

Variables de décision :

$y_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{Si la demande du client } k \text{ est satisfaite par l'installation } j \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$

$x_j = \begin{cases} 1 & \text{Si l'installation } j \text{ est retenue} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$

Modèle mathématique :

Minimiser $\sum_{j \in J} f_j x_j + \alpha \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} h_k d_{jk} y_{jk}$

Sous contraintes :

$$\sum_{j \in J} y_{jk} = 1, \forall k \in K \quad (1)$$

$$y_{jk} \leq x_j, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} h_k y_{jk} \leq V_j x_j, \forall k \in K \quad (3)$$

$$x_j \in \{0,1\}, \forall j \in J \quad (4)$$

$$y_{jk} \in \{0,1\}, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (5)$$

La fonction-objectif minimise le coût total d'ouverture des installations et d'acheminement des produits vers les points de demande. La contrainte (1) assure la satisfaction de la demande

du client k par une seule installation j . La contrainte (2) garantit que l'approvisionnement d'un point de demande ne s'effectue qu'à partir d'une installation ouverte. Enfin, la contrainte (3) permet le respect des capacités de chaque installation.

Il est à noter que la contrainte relative à la capacité pourrait tout aussi bien également être intégrée aux modèles énoncés précédemment

II.4. Dimensionnement et agencement des conteneurs

II.4.1. La conteneurisation

La conteneurisation est un concept apparu au cours du XX^{ème} siècle, devenu depuis un élément indispensable dans le domaine du transport, notamment grâce à son caractère multimodal qui permet de le transporter par le biais de différents moyens, il représente le fait d'utiliser des conteneurs comme solution de transfert de biens et de marchandises. Devenant ainsi un outil international, le conteneur est par la suite standardisé grâce à des accords entre les compagnies de transport.

Des améliorations et des spécifications ont été par la suite réalisées afin de rendre les conteneurs plus compatibles à certains types de cargaison.

Un conteneur est une caisse métallique rectangulaire conçue dans le but d'emmagasiner des éléments qui doivent être transportés d'un endroit à un autre.

Grâce à la standardisation, les dimensions des conteneurs sont réglementées par la norme ISO 668 : 1995. L'unité de mesure de conteneur est l'équivalent 20 pieds (EVP), mais il existe également des conteneurs de 40 pieds (2 EVP), etc. **(Ndeye Ndiaye, 2015).**

En fonction des besoins, il est apparu une gamme de types de conteneurs adaptés aux diverses marchandises transportées.

II.4.2. Classification des types de conteneurs

L'Organisation Internationale de Normalisation (I.S.O.) a codifié sous les normes ISO 668 et ISO 1496 la construction des conteneurs comme présenté dans le tableau II.3 qui suit :

Tableau II. 3: : Classification des types de conteneurs

Code	Désignation	Type de conteneur
BLK	Bulk	Conteneur pour vrac sec
DV	Dry van ou DC (Dry cargo)	Conteneur pour cargaison sèche
FLT	Flat	Conteneurs plates-formes sans parois d'extrémité.
FR	Flat rack ou FB ou PF (plate-forme)	Plate-forme avec 2 parois d'extrémité rabattables
GP	General purpose	Conteneur à usage general
HC	High cube	Conteneur High Cube
HH	Half height	Conteneur demi-hauteur (4 pieds de haut)
HT	Hard Top Container	Conteneur à toit ouvert High Cube
OS	Open side	Conteneur à côtés ouverts
OT	Open top	Conteneur à toit ouvert
RF	Ou RE ou RC (Reefer container)	Conteneur réfrigéré
RH	Reefer high cube	Conteneur réfrigéré High Cube
TK	Ou TC (Tank container)	Conteneur citerne
VH	Ou VT ou VC (Ventilated container)	Conteneur ventilé mécaniquement et protégé contre l'humidité, la moisissure, ou encore la rouille.

Tous les conteneurs cités ci-dessus peuvent exister sous différentes dimensions et ce, en fonction de leurs utilités.

Il est à noter quelques conteneurs du type plate-forme et du type Open Top sont utilisés pour des colis hors-gabarit. Ces conteneurs en général ne sont pas prévus pour accomplir de transport routier. La Figure II.4 illustre ce qui précède :

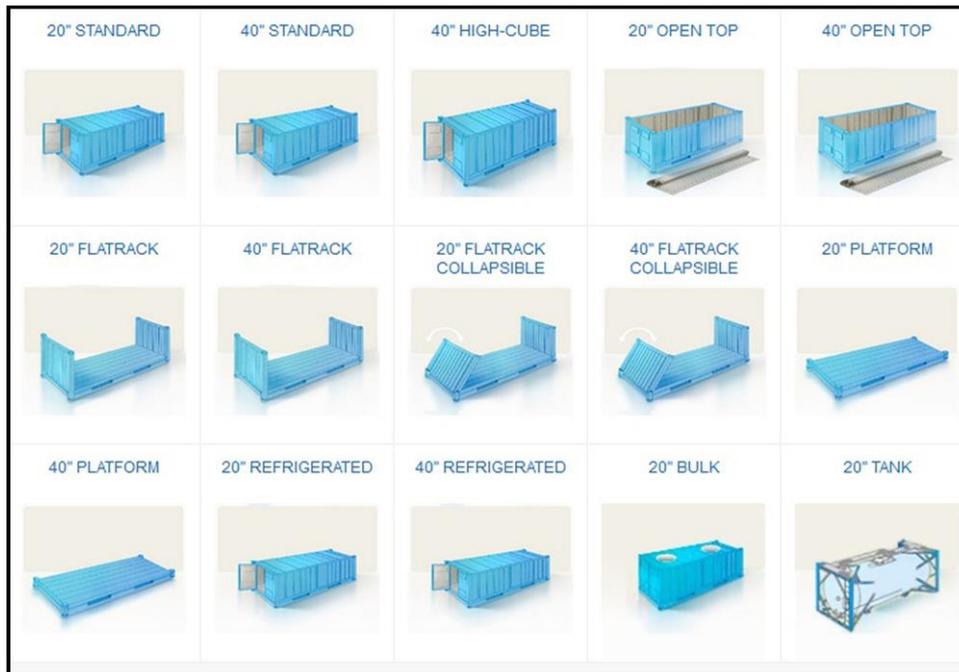


Figure II. 4 : Figure représentant la classification des types de conteneurs

Cependant, la sélection d'un type de conteneur ne dépend pas seulement de l'usage auquel il est destiné mais aussi des dimensions et du poids de ce qu'il devra transporter.

II.4.3. Dimensions et poids de chargement des conteneurs

Les dimensions extérieures des conteneurs, leurs largeur, longueur et masse maximum sont définies pour rendre le conteneur le plus multimodal possible en offrant le volume maximum. En effet, le conteneur ISO doit être transporté indifféremment par route, par train ou par bateau. Il doit donc respecter les limites de gabarit des transports routiers et ferroviaires, Unité de Transport Intermodale (UTI : terme générique pour désigner un conteneur, une caisse mobile ou un semi-remorque convenant au transport intermodal). La norme ISO 668 : 1995 a défini :

- Deux longueurs : **20 pieds** (exactement 19 pieds et 10.5 pouces (6.06 m)) et **40 pieds** (12.19 m)
- Une largeur : **8 pieds** (2.44 m)
- Deux hauteurs : **8 pieds 6 pouces** (2.59 m) et **9 pieds 6 pouces** (2.89 m)
- Une masse maximum : **30.480 tonnes**.

A l'exclusion des conteneurs aériens, les conteneurs les plus utilisés sont les conteneurs 20' DRY, les conteneurs 40' DRY et les conteneurs 40' HC. Le tableau II.4 suivant détaille les mesures relatives à ces derniers :

Tableau II. 4: Dimensions et poids de chargement des conteneurs

<i>CONTENEUR 20' DRY</i>	<i>CONTENEUR 40' DRY</i>	<i>CONTENEUR 40' HC</i>
Dimensions Intérieures Longueur : 5.919 m Largeur : 2.340 m Hauteur : 2.380 m	Dimensions Intérieures Longueur 12.051 m Largeur 2.340 m Hauteur 2.380 m	Dimensions Intérieures Longueur 12.056 m Largeur 2.347 m Hauteur 2.684 m
Ouverture de Portes Largeur : 2.286 m Hauteur : 2.278 m	Ouverture de Portes Largeur 2.286 m Hauteur 2.278 m	Ouverture de Portes Largeur 2.340 m Hauteur 2.585 m
Autres mesures Poids de la Tare : 1 900 kg Capacité en Volume : 33.0 m ³ Capacité de Chargt : 22100 kg Équivalent EVP : 1 TEU (Twenty-foot equivalent unit) Poids à vide : 2.2 tonnes	Autres mesures Poids de la Tare : 3 084 kg Capacité en Volume : 67.3 m ³ Capacité de Chargt: 27 397 kg Équivalent EVP : 2 TEU (Twenty-foot equivalent unit) Poids à vide : 3.7 tonnes	Autres mesures Poids de la Tare : 2 900 kg Capacité en Volume : 76.0 m ³ Capacité de Chargt : 29 600 kg Équivalent EVP : 2 TEU (Twenty-foot equivalent unit) Poids à vide : 4 tonnes

Les Conteneurs DRY sont à usage général pour transporter des marchandises diverses conditionnées en cartons, fûts ou palettes ou encore en vrac. Ils se caractérisent par un toit fermé, des parois latérales et des extrémités rigides et sont équipés de porte à une extrémité.

Aussi, les conteneurs HC sont de mêmes dimensions de base que les conteneurs DRY standards, sauf que les HC présentent l'avantage d'offrir un (01) pied supplémentaire d'espace de chargement. Ils sont utilisés pour accueillir de grands colis, volumineux mais peu denses. (**Web e**)

II.4.4. Organisation des conteneurs

Tout comme l'agencement d'un entrepôt, l'aménagement d'un conteneur nécessite de se conformer à un certain nombre de mesures. Sont explicitées dans ce qui suit quelques-unes des plus pertinentes :

- **L'adressage des marchandises**

Après le contrôle et la réception, les marchandises sont rangées suivant deux méthodes d'affectation :

- Emplacement fixe et invariable (Dimensionnement Statique)

Celui-ci concerne toutes les données « métriques » de l'espace de stockage, à savoir la longueur, la hauteur et la largeur. Pour fixer ces critères de la façon la plus précise, il est recommandé de segmenter les différentes familles de produits. Par la suite, il est nécessaire de segmenter les produits à stocker selon leurs poids mais également selon leurs formes (certains formats atypiques peuvent s'avérer être difficiles à stocker). Ces données permettront de choisir les structures de stockage qui accueilleront au mieux chaque famille.

Cette méthode de rangement présente l'avantage d'être claire, les articles affectés à un emplacement régulier sont plus faciles à trouver physiquement, il y a peu de chance de les oublier. Cependant, cette forme de rangement utilise un système de stockage lourd et un espace plus grand.

- Emplacement variable en fonction des espaces disponibles (Dimensionnement dynamique) :

La seconde manière de faire se focalise sur les données « volumétriques » de l'espace de stockage. Cette étape permet de préciser l'implantation grâce à l'étude des rotations de stocks afin d'en optimiser la réception ou la sortie, tout en intégrant une logique d'accessibilité et d'ergonomie.

Ainsi, un produit qui « tourne » souvent a plutôt intérêt à être placé à portée de mains des manutentionnaires, qu'au fond du conteneur. De même, il faudra éviter de le placer en hauteur pour faciliter les manipulations.

Concrètement, après chaque réception, l'article est rangé à n'importe quel emplacement libre. Il y a risque de trouver la même pièce à différents endroits, ce qui peut entraîner des oublis. Bien que cette forme de rangement présente l'avantage d'une meilleure exploitation de l'espace de stockage, elle est mieux indiquée pour des stocks unitaires en transit ou de projets. Elle demande beaucoup d'écritures car à chaque fois, il faut mettre à jour le nouvel emplacement sur les documents et le logiciel de gestion des stocks.

Dans la pratique, l'utilisation des emplacements ou des aires de stockage fixes est prédominante. L'emploi d'emplacements variable est admis seulement lorsqu'il y a insuffisance d'espace (capacité de stockage limitée) ou pour certains produits en vrac.

(A.K. Rao et M.R. Rao, 1998)

- **Les critères de choix des emplacements**

Le choix de l'emplacement dans un magasin est fonction des caractéristiques de l'article. Dans un premier temps, cette opération est influencée par :

- La nature de l'article (pièce solide, vrac solide, vrac liquide, vrac gaz) ou encore des unités logistiques (fût, caisse, bidon, marchandise palettisée...);
- Les formes et dimensions de l'article (poids, volume, possibilité d'empilage ou de gerbage...);
- L'influence de l'environnement sur l'article (humidité, chaleur, poussières, lumière du soleil, confinement ou dégagement des odeurs...).

Il est bien entendu que la capacité d'accueil du magasin est une contrainte supplémentaire au rangement. Les quantités d'un article ne seront affectées qu'à un emplacement qui peut les contenir en totalité.

Ceci étant, le nombre de références des produits impacte la stratégie de stockage. En effet, on ne gère pas un entrepôt avec une seule référence comme on gère celui qui en compte cinq cents (500) ou encore trente mille (30 000). Les types de conditionnements, les dimensions ainsi que les particularités de certaines pièces rendent la tâche plus délicate. A titre d'exemple, un entrepôt multi-référence peut compliquer considérablement la préparation des commandes. N'oublions pas que 20% des références d'un entrepôt réalisent 80% de son chiffre d'affaires. L'intégration des équipements de stockage donne lieu à une analyse fonctionnelle précise qui s'articule sur un recueil d'information telles que le pré dimensionnement statique, le mode de prélèvement, et enfin, le type d'installation des rayonnages.

Pour bien organiser le stockage, les professionnels proposent plusieurs méthodes d'analyse. La méthode ABC constitue la base de cette réflexion. Il s'agit d'évaluer le taux de rotation des charges afin d'organiser les espaces de stockage.

- A correspond à un taux de rotation de 80% pour 20% des références
- B à 15% de rotation pour 30% des références
- C à 5% de rotation pour 50% des références.

Selon cette méthode, les marchandises A seront stockées dans les emplacements les plus accessibles, tandis les marchandises C qui sont moins souvent demandées, seront placées dans le fond de l'espace de stockage. Les déplacements et les temps de manutention seront ainsi limités.

Toujours selon la méthode ABC, le rangement dans les espaces prévus pour le stock est également déterminé par le mode de manutention. Pour faciliter la manutention manuelle, les éléments A seront situés à hauteur de préhension, les éléments B en bas et les éléments C en hauteur, toujours de façon à gagner du temps et à limiter la manutention. En suivant ces règles, l'aménagement de l'espace de stockage sera amélioré. (V. Petinis et al, 2005)

- **La détermination d'un équipement spécifique et adapté au besoin de stockage**

Les équipements de stockage en entrepôt constituent une large gamme de produits qui offrent des solutions intégrées et personnalisées. Nous citons ci-dessous quelques-uns des types de stockage logistique les plus utilisés : **(Web f)**

- Rayonnages à palettes classiques
- Rayonnages à palettes par accumulation
- Rayonnages dynamiques palettes, cartons, bacs, ...
- Rayonnages à satellite (navette)
- Rayonnages mobiles lourd et léger
- Rack Cantilevers
- Rayonnages mi-lourds plateaux bois ou acier
- Rayonnages à tablettes
- Magasins autoportants

- **Les systèmes d'entreposage des marchandises (Web g)**

Le système d'entreposage est lui aussi fonction de la nature des marchandises stockées. La description faite ci-dessous est loin d'être exhaustive. Elle correspond aux systèmes les moins complexes et dans lesquels les opérations de stockage et de prélèvement ne sont presque pas du tout automatisées.

- **Rangement de petites pièces**

L'emploi des systèmes de rayonnage à casiers ouverts ou à tiroirs est bien adapté pour cette catégorie d'articles. Grâce à leur petite taille et un encombrement peu contraignant, les investissements requis pour les structures destinées à leur rangement est moindre.

Par défaut, chaque tiroir ou alvéole d'un rayonnage (casier) a une adresse fixe, unique et invariable.

- **Rangement de matières unitaires**

Les matériaux unitaires auxquels il est fait allusion ici sont des unités logistiques, déjà conditionnées dans un emballage ou tout autre dispositif visant à faciliter la manutention et le transport. Se retrouvent donc dans cette rubrique :

- Les marchandises palettisées ;
- Les marchandises conditionnées en bidon ;
- Les marchandises conditionnées en rouleaux ;
- La tuyauterie ;
- Les caisses, casiers de boissons ;
- Etc.

Ce sont des catégories de marchandises qui, selon les cas, peuvent faire l'objet d'un stockage de masse (casiers, caisses, ou toutes autres unités superposables). Les unités non superposables requièrent quant à elles l'utilisation de rayonnages pour une exploitation optimale des aires de stockage.

II.4.5. Modèles mathématiques de dimensionnement (chargement et découpe)

Les problèmes de chargement (loading problems) ou de conditionnement (packing) consistent à placer des objets de tailles données dans des contenants de capacité connue. Les objets et contenants varient selon le contexte de sorte à ce qu'il existe des modèles adaptés au dimensionnement de fichiers sur un disque, ou encore, comme c'est le cas pour ce projet, de caisses à ranger dans des conteneurs ou des étagères.

Le terme packing s'applique aux objets non fragmentables qui peuvent être mis dans le même endroit, tandis que le loading concerne les produits fluides, fragmentables mais non miscibles. Les problèmes de découpe (cutting sotck problems) s'avoisinent à ceux cités précédemment, le but étant de découper un ensemble d'objet dans des contenants.

Ainsi, l'objectif final de ces différentes méthodes est de remplir au maximum un contenant, de manière optimale, de sorte à minimiser l'espace perdu.

Dans ce contexte, plusieurs modèles mathématiques existent, nous citons ci-après les deux (02) modèles de base des problèmes de découpe.

- **Bin-packing (ROADEF, 2011)**

En recherche opérationnelle et en optimisation combinatoire, le Bin-packing est un problème algorithmique, dont le but est de ranger des objets en utilisant le moins de boîtes possibles.

Il existe de nombreuses extensions pour le problème de Bin-packing basique. En effet, il est possible de considérer des articles possédant deux ou trois dimensions, interdire à certains articles d'être rangés dans la même boîte, ou autoriser l'usage de boîtes de tailles différentes. Les objets peuvent prendre des formes différentes : rectangles (pavés), cercles (sphères).

Le problème de Bin-packing peut être appliqué à un grand nombre de secteurs industriels ou informatiques, pour répondre à plusieurs formes de besoins, tels que :

- Rangement de fichiers sur un support informatique
- Découpe de câbles
- Remplissage de camions ou de conteneurs avec comme seule contrainte le poids ou le volume des articles
- Découpe de matière première
- Placement de boîtes sur une palette (sans superposition de boîtes)
- Placement dans un entrepôt (sans superposition de boîtes)
- Rangement d'objets physiques dans des boîtes, un entrepôt, des camions, etc. (avec superposition de boîtes, de palette, etc.)

La formulation mathématique de ce problème se présente comme suit :

Données :

C : taille des contenants

C_i : tailles des articles à mettre dans les contenants

$i \in \{1, n\} = \text{articles à mettre dans les contenants}$

$j \in \{1, m\} = \text{contenants}$

Variables de décision :

$$y_j = \begin{cases} 1 & \text{Si le contenant } j \text{ est utilisé} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{Si l'article } i \text{ est rangé dans le contenant } j \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

Modèle mathématique :

$$\text{Minimiser } \sum_{j=1}^m y_j$$

Sous contraintes :

$$\sum_{i=1}^n C_i x_{ij} \leq C y_j, j = 1, \dots, m \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, i = 1, \dots, n \quad (2)$$

La contrainte (1) stipule qu'on ne peut dépasser la taille d'un contenant pour un rangement.

La contrainte (2) signifie qu'un objet doit être rangé dans une boîte et une seule.

- **Problème du sac à dos (A. Freville, 2004)**

Le problème du sac à dos, ou également appelé « *Knapsack problem* » est un problème servant à la modélisation de situation analogue au remplissage d'un sac à dos, ne pouvant supporter plus d'un certain poids. Ainsi, un certain nombre d'objets est mis dans le sac à dos de sorte à maximiser la valeur totale, sans dépasser le poids maximum.

Ce modèle est également utilisé dans plusieurs situations :

- Dans des systèmes d'aide à la gestion de portefeuille : pour équilibrer sélectivité et diversification dans le but de trouver le meilleur rapport entre rendement et risque pour un capital placé sur plusieurs actifs financiers (actions...).
- Dans le chargement de bateau ou d'avion : tous les bagages à destination doivent être amenés, sans être en surcharge.
- Dans la découpe de matériaux : pour minimiser les chutes lors de la découpe de sections de longueurs diverses dans des barres en fer, de rouleaux de papier ou de textile, etc.

La modélisation mathématique du problème peut être traduite comme suit :

Données :

w_i : poids de l'objet i

p_i : valeur de l'objet i

W : capacité du sac à dos

$X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ = vecteur contenu

$i \in \{1, n\}$: objets à mettre dans le sac à dos

Variables de décision :

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{Si l'élément } i \text{ est mis dans le sac} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

Modèle mathématique :

Maximiser $z(X) = \sum_{i=1}^n x_i p_i$ (Maximiser la valeur totale contenue dans le sac à dos pour X donné)

Sous contraintes :

$$w(X) = \sum_{i=1}^n x_i w_i \leq W \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i > W \quad (2)$$

$$w_i \leq W \forall i \in \{1, n\} \quad (3)$$

$$p_i > 0 \forall i \in \{1, n\} \quad (4)$$

$$w_i > 0 \forall i \in \{1, n\} \quad (5)$$

La première (1) inégalité assure que la somme des poids des objets choisis ne dépasse pas la capacité du sac à dos.

La contrainte (2) veut dire qu'il est impossible de mettre tous les objets dans le sac à dos.

La contrainte (3) assure qu'aucun objet n'est plus lourd que ce que le sac peut porter.

Les contraintes (4) et (5) traduisent respectivement le fait que tout objet ait une valeur et apporte un gain, et que tout objet ait un certain poids et consomme de l'espace.

Ces deux problèmes sont les représentants les plus connus de la catégorie des problèmes de découpe et de conditionnement (cutting and packing). Sujet sur lequel portera une partie de ce projet.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé plusieurs notions théoriques tirées de la revue de littérature, à savoir : la maintenance des équipements, la GdS des PdR, les modèles mathématiques de localisation-allocation, ainsi que le dimensionnement, concepts étroitement liés à la résolution de la problématique précédemment établie.

Dans ce qui va suivre, nous exposerons la partie pratique de notre travail, qui consistera en premier lieu à proposer différents scénarios de localisation des conteneurs de stockage des PdR pour la maintenance des turbines à gaz GE pour le compte de Sonelgaz.

Par la suite, nous introduirons la base de données qui fournit un certain nombre d'informations sur les NCPs mise en place pour les besoins du projet. Nous procéderons alors à la classification des éléments de cette dernière afin d'appliquer un modèle mathématique adéquat à chaque catégorie définie dans l'optique d'optimiser l'espace exploité pour le stockage des PdR.

L'aboutissement de notre travail se traduira par la proposition d'une solution couvrant tous les aspects de la gestion des PdR pour les opérations de maintenance.

CHAPITRE III

CONTRIBUTION ET PROPOSITION DE SOLUTIONS

Introduction

Après avoir posé la problématique, et passé en revue la partie bibliographique, nous allons aborder dans ce chapitre les différentes étapes qui nous ont conduites à l'élaboration de la solution. Cette dernière consistera à proposer différents scénarios pour la localisation des conteneurs de stockage des NCPs en vue de reconfigurer le système de GdS de la PdR pour la maintenance. Solution qui comportera en outre la détermination du nombre optimal de conteneurs à concevoir, leurs localisations, la démarche à adopter pour le dimensionnement et l'aménagement de ces structures, et enfin l'établissement d'une politique de GdS adéquate.

La définition du scénario optimal sera tributaire de paramètres clés tels que les différents coûts, les distances parcourues, et enfin mais surtout la stratégie de l'entreprise.

III.1 Scénarios proposés pour la localisation des conteneurs de stockage

General Electric – Power Services a signé un contrat de maintenance de turbines à gaz de type 9FA avec Sonelgaz d'une durée de 20 ans. Ce contrat prend en charge trente-quatre (34) turbines distribuées sur dix (10) sites :

- Hassi R'Mel 1 : deux (02) turbines
- Hassi R'Mel 2 : trois (03) turbines
- Boufarik : trois (03) turbines
- Djelfa : quatre (04) turbines
- Boutelilis : deux (02) turbines
- Naama : quatre (04) turbines
- Mostaganem : quatre (04) turbines
- Kais : quatre (04) turbines
- Bellara : quatre (04) turbines
- Oumache : quatre (04) turbines

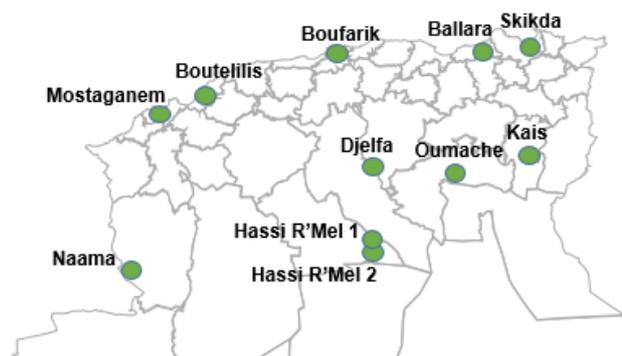


Figure III. 1 : Localisations des sites

Durant le stage effectué au sein de GE, il nous a été demandé de prendre également en considération le site de Skikda, étant donné que ce site est couvert par le même type de contrat (CSA) et qu'il dispose du même type de turbine dans le but de couvrir les maintenances de toutes les machines de type 9FA.03, ce qui fait en tout trente-six (36) turbines.

Ainsi, dans le but d'aboutir à une solution qui sied au mieux à la problématique proposée par GE, plusieurs scénarios vont être présentés dans ce qui suit, traitant de la localisation des conteneurs de stockage, après détermination du nombre de conteneurs devant être créés selon le scénario en question, et en se basant sur le planning de maintenance prévisionnel fourni comme donnée d'entrée par l'entreprise.

Pour des raisons de confidentialité, il ne sera exposé sur le planning ci-dessous (voir Tableau III.1) que les noms des sites ainsi que les périodes entre les maintenances des générateurs électriques « Magic Inspection » et celles relatives aux turbines à gaz « HGPI » et « MI », de telle sorte à ce qu'il y ait :

- 32 000 heures entre la HGPI et la MI de chaque turbine
- 8 000 heures entre les Magic Inspections de chaque générateur électrique

Les dates de démarrages ainsi que de maintenances des turbines, quant à elles seront masquées.

Tableau III. 1: Planning prévisionnel de maintenance du Méga-Deal

Sites	Type	Expected COD	First fire date	Cycle HGPI / MI	Cycle MAGIC	MAGIC inspection (Generator)	1st HGP /Minor date COD+32K	1st MI / Major date HGP+32K
KAIS	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
KAIS	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
KAIS	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
KAIS	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
OUMACHE	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
OUMACHE	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
OUMACHE	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
OUMACHE	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
NAAMA	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
NAAMA	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
NAAMA	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
NAAMA	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
MOSTAGANEM	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
MOSTAGANEM	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
MOSTAGANEM	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
MOSTAGANEM	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
DJELFA	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
DJELFA	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
DJELFA	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
DJELFA	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
BELLARA	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
BELLARA	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
BELLARA	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
BELLARA	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
BOUTELILIS	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
BOUTELILIS	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
HRM1	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
HRM1	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
HRM2	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
HRM2	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
HRM2	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
BOUFARIK	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
BOUFARIK	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
BOUFARIK	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
SKIKDA	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
SKIKDA	9FA.03 / 324H	####	####	32,000	8,000	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!

III.1.1 Scénario 1 : Localisation des conteneurs au niveau de plusieurs entrepôts (répartis sur le territoire national)

Dans ce scénario, il est supposé que pour couvrir toutes les demandes (maintenances dans ce cas), il est nécessaire de minimiser les distances ainsi que les coûts de transport entre les installations et les sites, et/ou les coûts d'ouverture des installations en question. Pour ce faire, et étant donné que les sites sont distribués à travers les quatre coins de l'Algérie, nous avons eu recours à des modèles mathématiques de localisation, qui auront comme donnée initiale : quatre localisations, une à l'Est, une à l'Ouest, une au Sud et une au Centre. La détermination de ces dernières a été effectuée comme suit :

- **Méthode du Barycentre**

La méthode du Barycentre permet de déterminer les localisations qui minimiseraient les distances entre les entrepôts et les centrales. Pour ce faire, il est nécessaire d'établir les localisations des onze (11) sites puis de les pondérer par la demande en conteneurs de chacune des différentes centrales.

Déterminer les localisations revient alors à utiliser un convertisseur d'adresse en coordonnées GPS, donnant ainsi la longitude et la latitude de chaque localisation, données initiales nécessaires au calcul du barycentre des zones.

La figure III.2 présentée ci-dessous montre un exemple de conversion.

Conversion adresse / coordonnées GPS

Adresse :

Coordonnées DD : x

Coordonnées DMS : N ° S ° E °

E ° W ° °

Figure III. 2 : Interface du convertisseur d'adresses en coordonnées GPS

En se basant sur le planning prévisionnel des maintenances programmées, on obtient une demande totale de trente-cinq (35) conteneurs, de sorte à ce que la demande relative à chaque site soit égale au nombre de turbines qui y figurent (i.e. une demande correspond à la maintenance HGPI ou MI d'une seule turbine), sauf pour Hassi R'Mel 2 où le nombre de turbines est de trois (03) alors que la demande est de deux (02), puisque les dates correspondantes aux maintenances des machines de ce site sont assez éloignées pour permettre l'utilisation de deux conteneurs seulement.

La formule mathématique utilisée pour déterminer les Barycentres des différentes zones se présente sous cette forme :

$$\text{L'abscisse du barycentre : } \bar{X} = \frac{\sum_i X_i Q_i}{\sum_i Q_i} \quad (1)$$

$$\text{L'ordonnée du barycentre : } \bar{Y} = \frac{\sum_i Y_i Q_i}{\sum_i Q_i} \quad (2)$$

Où : x_i et y_i représentent les coordonnées du site i et Q_i représente la pondération du site i .

Ainsi, le Barycentre de chaque zone géographique donne les résultats présentés dans les tableaux III.2, III.3, III.4, III.5 suivants :

➤ Localisation de la zone Ouest

Tableau III. 2 : Localisation de la zone ouest

Sites	Demande	x_i	y_i	x_i pondéré	y_i pondéré
Mostaganem	2	35.58442	-0.88658	144.09179	5.852088
Boutelilis	4	36.02295	1.463022	71.168846	-1.773166
Naama	4	32.12139	-0.39917	128.48556	-1.596668
Resultat		34.374619	0.248225	Mosbah – Saida	

➤ Localisation de la zone Est

Tableau III. 3 : Localisation de la zone est

Sites	Demande	x_i	y_i	x_i pondéré	y_i pondéré
Kais	4	35.57216	6.898108	142.28863	27.592432
Bellara	4	36.77182	5.872318	147.08728	23.489272
Oumache	4	34.75667	5.10522	139.0267	20.42088
skikda	2	36.8744	6.976233	73.748806	73.748806
Resultat		35.867958	6.103932	Ouled khelouf – Mila	

➤ Localisation de la zone Sud

Tableau III. 4 : Localisation de la zone sud

Sites	Demande	x_i	y_i	x_i pondéré	y_i pondéré
Hassi R'mel 1 & 2	4	33.12486	3.356212	165.62428	16.78106
Resultat		34.766326	3.094527	Hassi R'mel - Laghouat	

➤ Localisation de la zone Centre

Tableau III. 5 : Localisation de la zone centre

Sites	Demande	x_i	y_i	x_i pondéré	y_i pondéré
Boufarik	3	36.58486	2.907609	109.75458	8.722827
Djelfa	4	35.45427	2.907609	141.81706	11.630436
Resultat		35.93888	2.907609	Meftaha - Medea	

Après avoir déterminé ces quatre (04) localisations, il est nécessaire d'arbitrer entre elles et de décider de la ou des localisations qu'il est possible de garder et ce, selon différents paramètres. Il y a ainsi deux grandes variables à prendre en considération :

- La variable distance
- La variable coût

Dans ce scénario, nous avons étudié deux (02) cas de figures :

- Détermination du nombre d'installations à ouvrir, en tenant compte uniquement des distances parcourues.
- Détermination du nombre optimal d'installations à ouvrir, basée sur la minimisation des distances et des coûts de transport entre les installations ainsi que des coûts d'ouverture de ces dernières

Ceci nous a conduit à la résolution de deux modèles mathématiques par le logiciel IBM ILOG CPLEX 12.6.0. Pour ce faire, nous avons exécuté le programme présenté en annexe (Annexe III.1 et Annexe III.2).

- **Utilisation du P-médian**

Dans cette partie nous allons déterminer le nombre d'installations à ouvrir, en fonction des distances parcourues. L'étude de ce cas de figure suggère l'utilisation d'un modèle mathématique. Le plus adéquat étant le P-médian.

Ainsi, avant de présenter le résultat donné par la résolution du modèle, rappelons que le P-médian est un modèle mathématique visant à minimiser les distances entre les installations et les sites, avec la formulation mathématique suivante :

$$\text{Minimiser } \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} h_k d_{jk} y_{jk}$$

Sous contraintes :

$$\sum_{j \in J} x_j = P$$

$$\sum_{j \in J} y_{jk} = 1, \forall k \in K$$

$$y_{jk} \leq x_j, \forall j \in J, \forall k \in K$$

$$x_j \in \{0,1\}, \forall j \in J$$

$$y_{jk} \in \{0,1\}, \forall j \in J, \forall k \in K$$

Où dans notre cas :

k : indice des centrales électriques

j : indice des installations

h_k : Demande de la centrale électrique k

d_{jk} : Distance entre l'installation j et la centrale électrique k

P : nombre d'installations à localiser

J : ensemble de toutes les installations

K : ensemble de tous les points de demande

x_j, y_{jk} : variables de décision

Pour déterminer les localisations à retenir, il est nécessaire de répertorier les distances entre tous les sites et les installations proposées au départ. Les distances présentées dans le tableau III.6 ci-dessous sont en Kilomètre.

Tableau III. 6 : Distances entre les quatre installations et les sites

	Hassi R'Mel 1	Hassi R'Mel2	Bellara	Djelfa	Kais	Oumache	Boufarik	Skikda	Boutelilis	Naama	Mostaganem
Mosbah-Saida	513	513	926	433	933	718	478	962	240	154	217
Ouled Khelouf-Mila	626	626	114	393	131	235	367	158	782	1043	678
Hassi R'Mel- Laghouat	0	0	708	234	626	534	481	744	667	531	581
Meftaha- Medea	399	399	468	166	435	365	114	504	448	575	345

Aussi, la résolution du modèle nécessite l'introduction de la demande comme donnée d'entrée, donnée exprimée comme suit :

Tableau III. 7 : Demande des sites

Site	Hassi R'Mel 1	Hassi R'Mel 2	Bellara	Djelfa	Kais	Oumache	Boufarik	Skikda	Boutelilis	Naama	Mostaganem
Demande (en conteneur)	2	2	4	4	4	4	3	2	2	4	4

Subséquentement, en se référant aux distances entre les sites et les installations ainsi qu'aux demandes de chaque site, nous avons retenu dans le cas présent, trois localisations sur quatre, à savoir : Mosbah (Saida), Ouled Khelouf (Mila), Hassi R'Mel (Laghouat), de sorte à ce que tous les sites soient couverts, comme le montre le tableau III.8 :

Tableau III. 8 : Solution obtenue par la résolution P-médian

	Hassi R'Mel1	Hassi R'Mel2	Bellara	Djelfa	Kais	Oumache	Boufarik	Skikda	Boutelilil	Naama	Mostaganem
Mosbah-Saida									X	X	X
Ouled Khelouf-Mila			X		X	X	X	X			
Hassi R'Mel-Laghouat	X	X		X							

• **Utilisation du FCLP (Fixed Charge Location Problem)**

La détermination du nombre optimal d'installations à ouvrir dans le cas présent, repose sur la résolution d'un modèle mathématique qui tend à minimiser les distances et les coûts de transport entre les installations ainsi que les coûts d'ouverture de ces dernières. Pour ce faire, nous avons choisi d'utiliser le FCLP.

La formulation de ce dernier se présente comme suit :

$$\text{Minimiser } \sum_{j \in J} f_j x_j + \alpha \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} h_k d_{jk} y_{jk}$$

Sous contraintes :

$$\sum_{j \in J} y_{jk} = 1, \forall k \in K$$

$$y_{jk} \leq x_j, \forall j \in J, \forall k \in K$$

$$\sum_{j \in J} h_k y_{jk} \leq V_j x_j, \forall k \in K$$

$$x_j \in \{0,1\}, \forall j \in J$$

$$y_{jk} \in \{0,1\}, \forall j \in J, \forall k \in K$$

Où :

f_j : Coût fixe d'ouverture de l'installation j

V_j : Capacité de l'installation j

h_k : Demande de la centrale électrique k

d_{jk} : Distance entre l'installation j et la centrale électrique k

α : coût de transport d'une unité de demande sur une unité de distance

J : ensemble de toutes les installations

K : ensemble de tous les points de demande

Le tableau III.9 exprime les capacités en conteneurs (basées sur la donnée fournie par GE, précisant qu'un entrepôt de 1 000 m² puisse abriter en moyenne 14 conteneurs) ainsi que les coûts d'ouverture en DA de chaque installation :

Tableau III.9 : Capacités et coûts d'ouverture des installations

Installations	Capacité	Coût d'ouverture (DZD)
Mosbah-Saida	12	120 000
Ouled Khelouf-Mila	24	290 000
Hassi R'Mel-Laghouat	25	300 000
Meftaha-Medea	15	233 654

La résolution du modèle a permis de retenir deux (02) localisations sur quatre (04), à savoir : Mosbah (Saida), Ouled Khelouf (Mila), tout en satisfaisant l'intégralité des demandes, le résultat est présenté dans le tableau III.10 :

Tableau III. 10 : Solution obtenue par la résolution du FCLP

	Hassi R'Mel1	Hassi R'Mel2	Bellara	Djelfa	Kais	Oumache	Boufarik	Skikda	Boutelilis	Naama	Mostaganem
Mosbah-Saida	X	X							X	X	X
Ouled Khelouf-Mila			X	X	X	X	X	X			

Cela va sans dire que le FCLP donne un résultat plus intéressant que le P-médian. Toutefois, que ce soit dans le premier ou deuxième cas, chacun des deux modèles repose sur le fait que le nombre de conteneurs soit de trente-cinq (35) pour couvrir la maintenance des trente-six (36) turbines. En théorie, ceci ne pose pas de problème, mais dans un contexte tel que celui-ci, la résolution de la problématique doit répondre aux besoins de l'entreprise tout en restant en adéquation avec sa stratégie. De ce fait, le budget alloué à l'achat de 35 conteneurs serait bien trop important, en sachant que la conception et le dimensionnement d'un conteneur est estimé

à un million deux cent mille (1 200 000) DZD , ce qui fait intervenir la nécessité d'optimiser ce nombre afin de satisfaire au mieux les exigences de l'entreprise sans manquer de réalisme au niveau budgétaire.

Pour ce faire, nous avons conçu un programme informatique qui permet de définir le nombre optimal de conteneurs. Ceci nous a conduit à envisager d'autres scénarios que nous présenterons un peu plus tard.

III.1.2 Détermination du nombre optimal de conteneurs

Afin de déterminer le nombre optimal de conteneurs visant à fournir le consommable lors des maintenances de turbines à Gaz, nous avons établi la méthodologie développée dans ce qui suit.

Les données d'entrée nécessaires à l'établissement de la quantité optimale en termes de conteneurs sont :

- Le planning prévisionnel des maintenances programmés
- Le temps nécessaire à l'utilisation d'un conteneur pour une maintenance, 20 jours pour une HGPI et 30 jours pour une MI, le maximum additionné à la durée relative au réapprovisionnement du conteneur ainsi qu'à son transport, qui est de 75 jours. Le tout donnant un total de 105 jours.

L'organigramme présenté ci-dessous explique la démarche suivie pour déterminer le nombre de conteneurs :

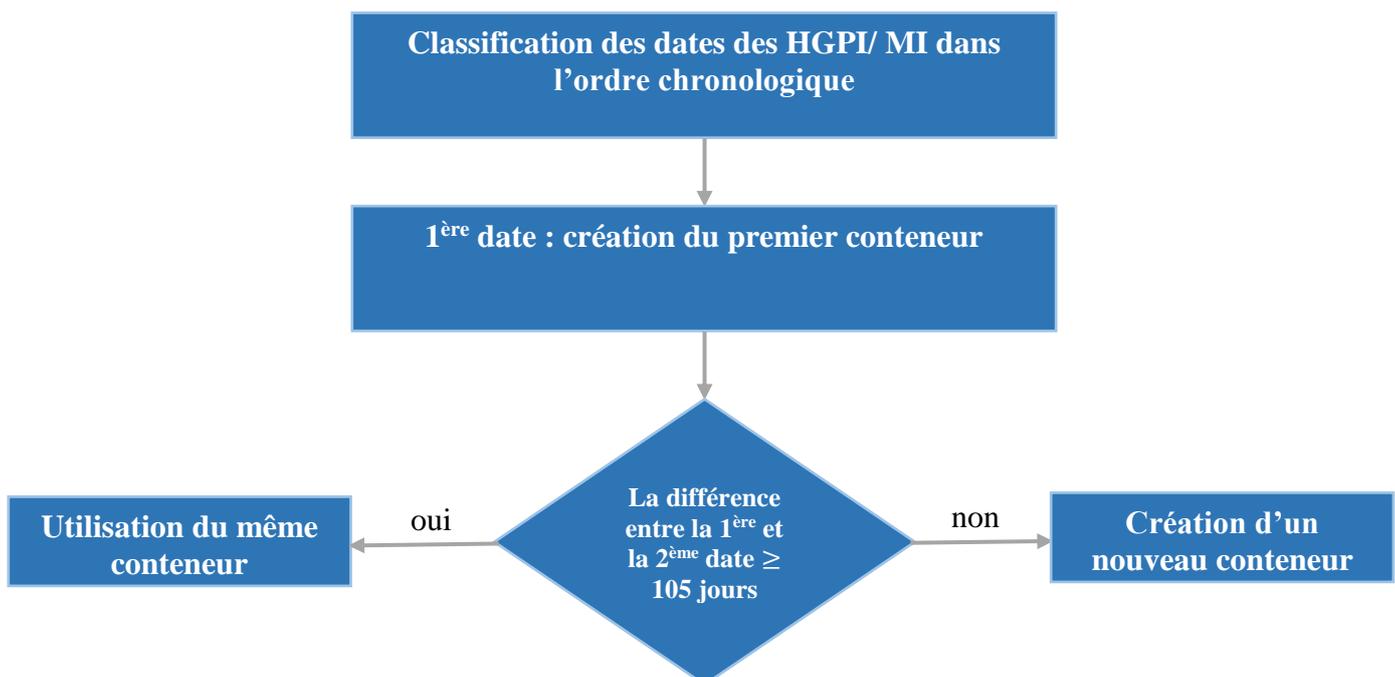
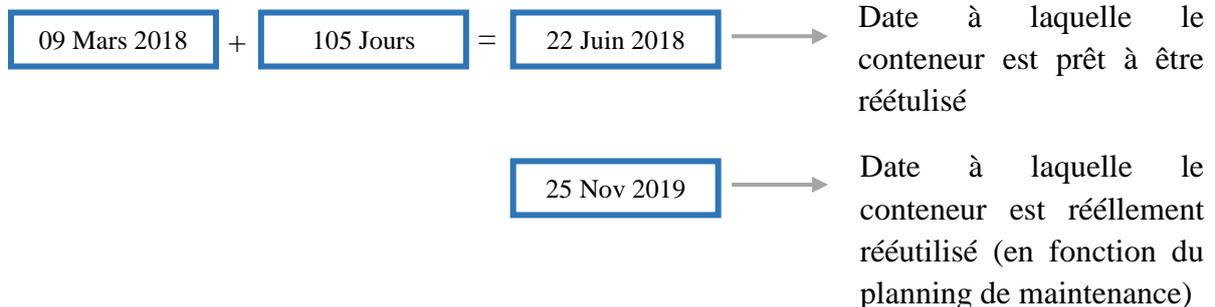


Figure III. 3 : Démarche suivie pour la détermination du nombre de conteneurs

Afin d'illustrer ce mécanisme, nous allons dérouler une simulation manuelle en prenant comme exemple la première date du planning :



Pour des raisons de confidentialité, nous ne pouvons présenter le tableau résultant, comportant l'affectation des conteneurs.

En prenant en considération ce résultat, où chaque conteneur peut être utilisé pour la maintenance de n'importe quelle turbine en termes de localisation géographique, le nombre de conteneurs est réduit de plus de la moitié et passe donc de trente-cinq (35) à quinze (15) conteneurs.

Aussi, étant conscientes que ce résultat se base sur un planning dit prévisionnel, il nous a paru tout à fait nécessaire de dynamiser ce calcul, pour ainsi permettre à l'entreprise de déterminer le nombre de conteneurs dont elle a besoin et ce, à chaque fois que les dates auraient à subir un changement. Pour ce faire, nous avons mis en place un programme informatique (code source en annexe III.3) qui prend en considération les changements relatifs au planning et à la durée de réception des pièces pour les maintenances. Ce dernier se base sur la même logique que celle utilisée lors de la simulation manuelle présentée ci-dessus.

Le programme prend en données d'entrée :

- Le nombre de jours nécessaires pour qu'un conteneur puisse de nouveau être utilisé
- Le numéro de la feuille Excel sur laquelle se trouve le planning de maintenance
- Le numéro de la colonne dans laquelle se trouve les dates des maintenances

Et retourne :

- Les dates des maintenances pour permettre à l'utilisateur de s'assurer qu'il n'y a pas d'erreur
- Le nombre de conteneurs nécessaires pour couvrir toutes les maintenances.

III.1.3 Détermination des disponibilités des conteneurs pour les maintenances non programmées

GE opère sur deux types de maintenance :

- Les maintenances programmées
- Les maintenances non programmées

Le travail présenté jusque-là portait uniquement sur les maintenances programmées. Toutefois, une machine telle qu'une turbine à gaz est souvent amenée à tomber en panne, de sorte à ce qu'il soit nécessaire de remplacer un certain nombre de pièces, cas de figure où intervient alors la maintenance non programmée.

Les conteneurs mis en place par GE serviront alors à couvrir les maintenances programmées en premier lieu, mais il serait également intéressant de garantir la disponibilité des pièces en cas de panne pour permettre à GE d'assurer au client un gain en temps, sachant qu'une heure d'arrêt de la machine représente un déficit de trois mille sept cent douze virgule cinquante **(3712.50) USD**. Pour ce faire, après avoir défini les périodes où les conteneurs seront utilisés, nous avons déterminé celles où les maintenances non programmées pouvaient être couvertes. Le schéma ci-dessous présente la disponibilité des conteneurs ainsi que les périodes appelées critique, situation où il faudrait attendre de commander puis de réceptionner les pièces pour effectuer la maintenance. Ainsi, Chaque couleur correspond à un conteneur.

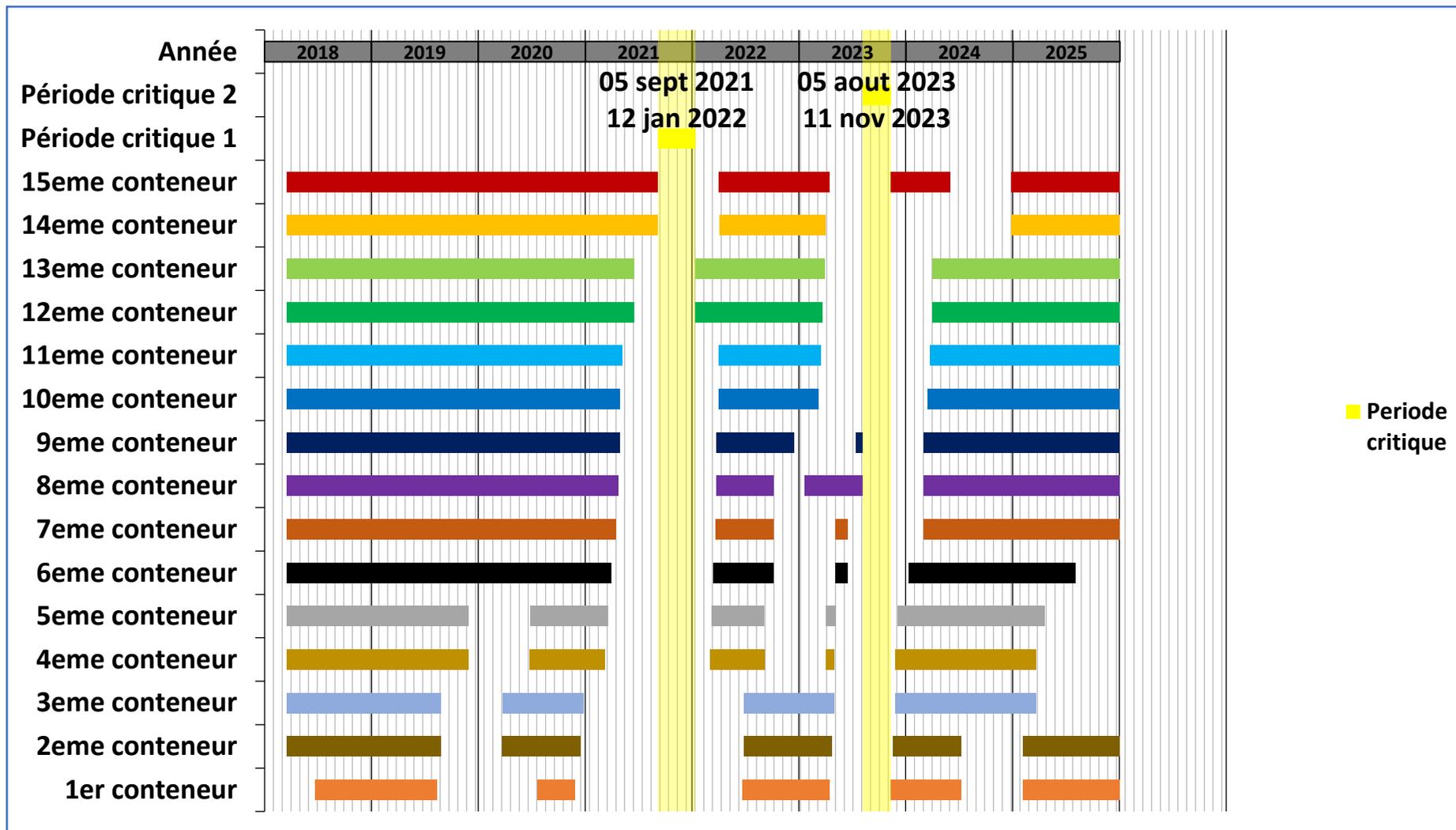


Figure III.4 : Périodes de disponibilités des conteneurs (pour les maintenances non programmées)

Lorsqu'on procède à la prise d'une décision d'ordre stratégique impliquant un investissement conséquent, il est important de déterminer, d'une part, les paramètres qui ont le plus d'influence sur le résultat, et d'autre part, d'évaluer la stabilité des résultats obtenus. Pour ce faire, nous avons eu recours à une analyse de sensibilité, qui sera exposé dans ce qui suit.

III.1.4 Analyse de sensibilité

La mise en place de la politique d'approvisionnement du conteneur comprend notamment une mesure de précaution qui consiste à faire en sorte qu'il y ait constamment deux conteneurs disponibles et prêts à couvrir les interventions non-planifiées nécessitant des NCPs (dont la moyenne calculée s'élève à deux (02) incidents/an).

En dépit de l'adoption d'une telle mesure de précaution, il est judicieux de procéder à une analyse de sensibilité afin de déterminer les paramètres qui conditionnent le plus étroitement le résultat délivré par le programme optimisant le nombre de conteneurs à concevoir. Dans le cas présent, ce sont principalement les dates planifiées de la maintenance ainsi que l'écart qui les sépare, qui déterminent le nombre de conteneurs à mettre à disposition du client.

En effet, lors de l'établissement du planning prévisionnel des maintenances où l'intervalle était de 32 000 heures pour une HGPI, les turbines sont considérées comme opérant dans les conditions « normales » décrites par GE comme un fonctionnement en mode « baseload », au gaz naturel, sans injection d'eau ou de vapeur.

Dans ce qui va suivre, nous allons procéder à l'estimation de la date de programmation de la maintenance HGPI en prenant en considération les données d'exploitation accumulées depuis la dernière inspection. Celles-ci permettent de prendre connaissance des conditions réelles de fonctionnement, et comprennent notamment des facteurs ayant un impact direct sur la « durée de vie » de l'unité qui sont donc fortement susceptibles d'affecter la date prévisionnelle de maintenance.

Ainsi, les quatre (04) modes de fonctionnement dans lesquels l'unité a opéré sont les suivants :

1. premier mode de fonctionnement : L'unité fonctionne à 4 260 heures / an, au gaz naturel, en mode « partload » (charge partielle) et ce, sans injection vapeur / eau.
2. deuxième mode de fonctionnement : L'unité fonctionne 470 heures / an, au carburant distillé, en mode « partload » (charge partielle) ou « baseload » (charge de base) et ce, sans injection vapeur / eau.
3. troisième mode de fonctionnement : L'unité fonctionne à 160 heures / an, au gaz naturel en surpuissance (+ 100 ° F) et ce, sans injection vapeur / eau.
4. quatrième mode de fonctionnement : L'unité fonctionne à 30 heures / an, au gaz naturel, en mode « baseload » (charge de base) et ce, avec une injection de vapeur de 2,4%.

Selon un document interne de GE appelé **GER-3620** (version M), le calcul des intervalles de maintenance s'effectue comme suit :

$$\text{Intervalle de maintenance ajusté (heures de flamme)} = \frac{\text{Intervalle d'inspection de base}}{\text{Facteur de maintenance}}$$

Les intervalles d'inspection de base représentent les spécifications du fabricant quant au fonctionnement de la turbine. Ces intervalles sont ainsi initialement recommandés en l'absence de données d'exploitations antérieures. Pour une turbine de type 9F, les intervalles de base sont de 32 000 heures et 1 200 démarrages.

Le facteur de maintenance est obtenu grâce à la formule suivante :

$$MF = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i A_{fi} A_{pi} t_i)}{\sum_{i=1}^n t_i}$$

Où :

$\sum_{i=1}^n (S_i A_{fi} A_{pi} t_i)$: Equivalent en heures d'usure

$\sum_{i=1}^n t_i$: Heures de fonctionnement

i : varie de 1 à n et représente le mode de fonctionnement

t_i : nombre d'heures de fonctionnement en mode i

A_{pi} : Facteur de sévérité de charge de fonctionnement dans le mode i

Avec :

$$A_{pi} = \begin{cases} 1 & \text{Pour un fonctionnement "baseload"} \\ e^{(0.0023 \cdot \Delta T_f)} & \text{Sinon} \end{cases}$$

Où :

ΔT_f Correspond à l'augmentation de la température pour le pic de puissance (°F)

A_{fi} : Facteur de sévérité du combustible utilisé pour le fonctionnement en mode i

Avec :

$$A_f = \begin{cases} 1 & \text{Pour le gaz naturel} \\ 1.5 & \text{Pour le carburant distillé} \end{cases}$$

$A_f = 1$ pour le gaz naturel

$A_f = 1.5$ pour le carburant distillé

S_i : Facteur de sévérité de l'injection d'eau/vapeur

$S = K + (M \cdot I)$

Où :

I est le pourcentage d'injection d'eau/vapeur référencé sur le débit d'entrée d'air du compresseur.

Et M, K sont des constantes obtenues à partir du tableau des coefficients d'injection d'eau/vapeur présenté dans l'annexe (Annexe III.4)

L'exploitation du document interne de GE (**GER-3569** Advanced Gas turbine materials coating) nous a permis de déterminer le type du second et du troisième étage d'ailettes statoriques de la turbine 9F (nozzles) comme étant GTD-222.

De ce fait, les trois (03) informations suivantes permettent de lire les valeurs des constantes eau/vapeur (M et K) dans le tableau présenté en annexe (Annexe III.4) :

- 2^{ème} et 3^{ème} étage d'ailettes statoriques de la turbine (nozzles) de type GTD-222
- Taux d'injection d'eau/vapeur de 2.4%
- Système « Wet control curve »

Ainsi, les valeurs de M et K sont respectivement 0.18 et 1.

Subséquentement, le tableau III.11 recense les données relatives aux différents modes de fonctionnement de la turbine 9F :

Tableau III. 11 : Modes de fonctionnement des turbines de type 9F

		Modes de fonctionnement			
		1	2	3	4
Heures de fonctionnement	T	4260	470	160	30
Sévérité du facteur de combustible	A_f	1	1.5	1	1
Sévérité du facteur de charge	A_p	1	1	$e^{(0.023*100)}=10$	1
Taux d'injection eau/vapeur (%)	I	0	0	0	2.4

On a alors, $M_4 = 0.18$ et $K_4 = 1$

D'où : $S_4 = K_4 + (M_4 \cdot I_4)$

$S_4 = 1.432$

En ce qui concerne les trois premiers modes de fonctionnement, on obtient $S_1 = S_2 = S_3 = 1$ (pour un taux d'injection eau/vapeur nul i.e. I=0)

Ainsi :

$$MF = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i A_{fi} A_{pi} t_i)}{\sum_{i=1}^n t_i}$$

$$MF = \frac{(1.1.1.4260) + (1.1.5.1.470) + (1.1.10.160) + (1,432.1.1.30)}{(4260 + 470 + 160 + 30)}$$

$$MF = 1,2$$

D'où :

$$\text{Intervalle de maintenance ajusté} = \frac{32000}{1.2}$$

De la sorte, on obtient :

$$\text{Intervalle de maintenance ajusté} = 26\,667 \text{ Heures}$$

Etant donné que le nombre total d'heures de fonctionnement de la turbine durant l'année s'élève à 4 920 heures, le temps estimé nécessaire pour atteindre 26 667 heures est de $\frac{26\,667}{4\,920} = 5.42 \text{ ans}$

Les manuels de référence de GE, à savoir GE O&M (Operation and Maintenance Manuel) fixent les normes et seuils de fonctionnement (d'une turbine 9F) entre une HGPI et une MI à 32 000 heures, ou à 1 200 démarrages (la maintenance étant effectuée lorsque le premier des deux seuils est atteint).

Dans ce qui suit, sera calculé l'intervalle ajusté rapporté au nombre de démarrages.

2. Intervalle de HGPI basé sur le nombre de démarrages pondérés :

Les données d'exploitation de l'année écoulée comprennent également des informations relatives aux démarrages de la turbine dans des conditions spécifiques.

La formule pour calculer le facteur de maintenance (basé sur le critère du nombre de démarrages) est la suivante :

$$\text{L'intervalle de maintenance ajusté (nombre de démarrages)} = \frac{S}{\text{Facteur de maintenance}}$$

$$\text{Avec : Facteur de maintenance} = \frac{\text{Nombre de démarrages pondérés}}{\text{Nombre de démarrages actuel}}$$

Où :

$$\text{Nombre de démarrages pondérés} = 0,5 N_A + N_B + 1,3 N_P + P_S F + \sum_{i=1}^n (a_T - 1) \cdot T_i$$

Sachant que :

i : Mode de fonctionnement

S : Nombre de démarrages initialement recommandés par GE

N_A : Nombre de démarrages à charge partielle (<60%)

N_B : Nombre de démarrages/ Arrêt en base

N_P : Nombre de démarrages/ Arrêt en surpuissance

P_S : Facteur de démarrage rapide

F : Nombre de démarrages rapides

T_i : Nombre de déclenchements relatifs au mode i

a_T : Facteur de sévérité de déclenchement = f (Charge) (se référer à la courbe en Annexe III.5)

n : Nombre de déclenchements selon catégorie (i.e Base, Charge partielle)

Le tableau III.12 résume les données récoltées relatives aux démarrages de la turbine :

Tableau III. 12 : Modes de démarrage des turbines

			Cycle normal	Démarrages rapides (°F)	Cycle interrompu par un arrêt	Total
Mode 1	Cycles à charge partielle	N_A	40	0	0	40
Mode 2	Cycles à charge de base	N_B	100	5	20	125
Mode 3	Cycles en surpuissance	N_P	5	0	0	5

D'où,

$$\text{Intervalle de maintenance ajusté} = \frac{1\ 200}{1.8}$$

De la sorte, on obtient :

$$\text{Intervalle de maintenance ajusté} = 667 \text{ Démarrages}$$

Sachant que le nombre total de démarrages cumulés durant l'année s'élève à 170. Le temps estimé nécessaire pour atteindre 667 démarrages est de $\frac{667}{170} = 3.9 \text{ ans}$

Dans le cas actuel, la turbine aura atteint le seuil du nombre d'allumage avant d'atteindre le seuil des heures de fonctionnement.

Ainsi, la planification de HGPI se fera selon l'intervalle ajusté établi relativement au critère du nombre de démarrages pondérés.

L'intervalle en vigueur sera alors de 3.9 ans, ce qui est équivalent à trois ans et 10 mois et 24 jours ou encore à 1 424 jours

➤ Réajustement du planning prévisionnel des maintenances :

Les turbines concernées par la modification de dates de maintenance sont les turbines des sites appelés dans le jargon de GE les sites « Fast Track ». En effet, ces sites sont les premiers et les seuls à avoir été mis en activité au jour d'aujourd'hui. Ce sont donc les seuls sites qui disposent de données d'exploitation antérieure des turbines qui y sont installées.

Le nouvel intervalle ainsi obtenu, nous avons procédé aux arrangements en conséquence dans le planning prévisionnel dans l'optique d'évaluer l'impact que de telles modifications peuvent

avoir sur le nombre optimal de conteneurs obtenu initialement. Il est néanmoins nécessaire de souligner que par souci de confidentialité, le planning des dates des maintenances ne peut être joint au présent travail.

Ceci étant, après avoir compilé le programme informatique minimisant le nombre de conteneurs à mettre à disposition du client (avec le nouveau planning incluant l'ajustement des dates de maintenances), il s'est avéré que le nombre de conteneurs à dimensionner est finalement passé de quinze (15) conteneurs à treize (13) conteneurs (ceci étant dû au réaménagement du planning initial, permettant ainsi d'éliminer certains chevauchements de dates de maintenances).

Ce résultat témoigne de la stabilité du modèle utilisé, et ceci permet en outre, de rassurer les décideurs par rapport à l'investissement initial.

III.1.5 Scénario 2 : Centralisation des conteneurs au niveau d'un seul entrepôt qui desservira toutes les centrales

Après avoir déterminé le nombre optimal de conteneurs à mobiliser pour couvrir les maintenances des onze (11) sites, plusieurs scénarios peuvent être envisagés en vue de minimiser les coûts relatifs au transport ainsi qu'à la location et à la main d'œuvre, mais aussi dans l'optique de réduire les distances entre les installations et les sites. De ce fait, ce scénario suggère l'ouverture d'une seule installation pouvant stocker tous les conteneurs et se positionnant au niveau du barycentre de tous les sites, minimisant ainsi au mieux les distances parcourues, comme illustré dans la figure III.5.

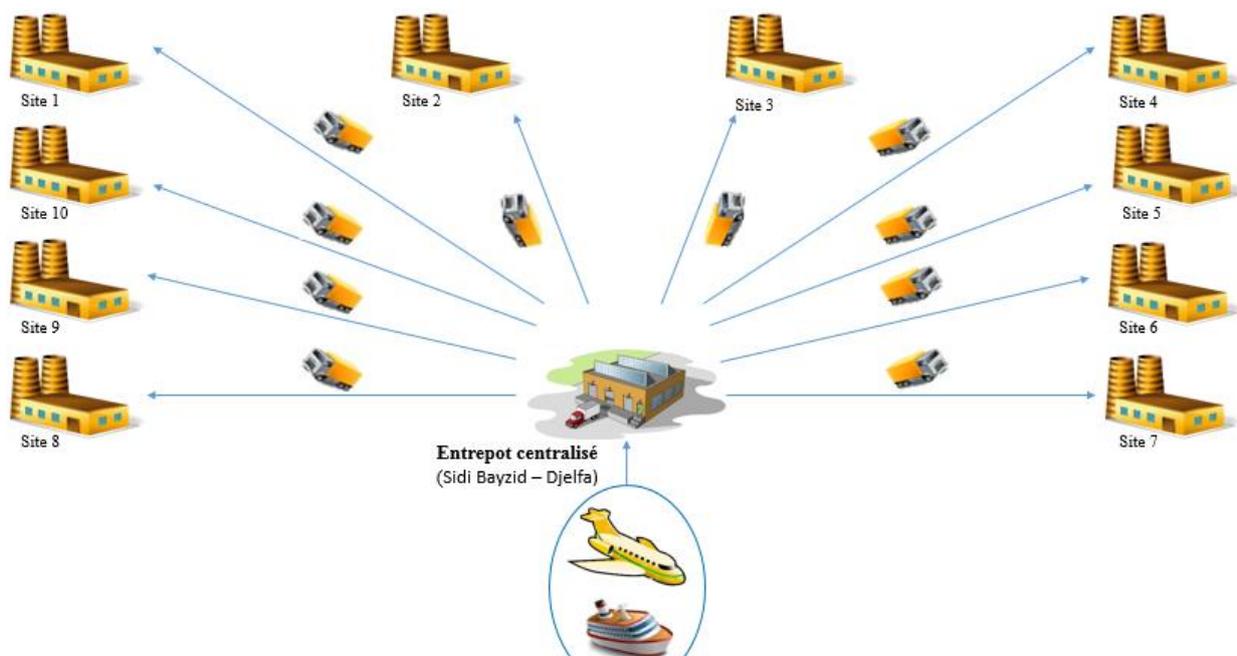


Figure III. 5 : Localisation centralisée

La méthode du Barycentre étant déjà présentée auparavant, par conséquent, nous présentons le résultat dans le tableau III.13 :

Tableau III. 13 : Résultat du barycentre des tous les sites

Centrales	Nombre de turbines	x_i	y_i	x_i Pondéré	y_i Pondéré
Mostaganem	2	35.58442	-0.88658	144.09179	5.852088
Boutelilis	4	36.02295	1.463022	71.168846	-1.773166
Naama	4	32.12139	-0.39917	128.48556	-1.596668
Boufarik	3	36.58486	2.907609	109.75458	8.722827
Djelfa	4	35.45427	2.907609	141.81706	11.630436
Hassi R'mel 1 & 2	5	33.12486	3.356212	165.62428	16.78106
Kais	4	35.57216	6.898108	142.28863	27.592432
Bellara	4	36.77182	5.872318	147.08728	23.489272
Oumache	4	34.75667	5.10522	139.0267	20.42088
Skikda	2	36.8744	6.976233	73.748806	13.952466
Résultat		35.08593	3.474212	Sidi Bayzid - Djelfa	

Afin de pouvoir trancher entre les différents scénarios relatifs à la localisation des conteneurs, et aboutir à une solution, chaque cas de figure va être jugé selon deux (02) critères, à savoir :

- La distance (entre les sites et les installations)
- Les coûts (location, main d'œuvre, transport, manutention)

Partant de ce principe, chacun des deux paramètres va être traité dans ce qui suit.

- **Paramètre 1** : Distance entre chaque site et le Barycentre (Sidi Bayzid – Djelfa)

Les distances (en km) sont présentées dans le tableau III.14 ci-dessous :

Tableau III. 14 : Distances entre l'installation centralisée et les sites

	Mostaganem	Boutelilis	Naama	Boufarik	Djelfa	Hassi R'Mel 1	Hassi R'Mel 2	Kais	Bellara	Oumache	Skikda
Sidi Bayzid (Djelfa)	441	528	525	329	68,5	360	360	363	445	310	481

- **Paramètre 2** : Coûts relatifs à la création ainsi qu'à la gestion d'un entrepôt

Dans ce qui suit, seront pris en compte les coûts fixes (CF)

- Location
- Main d'œuvre : 1 gardien + 2 employés pour s'occuper de la gestion des stocks des conteneurs

Ainsi que les coûts variables (CV) relatifs au transport.

Tableau III. 15 : Coûts relatifs à l'ouverture d'une seule installation

Type de Coût	Coût (DZD)
CF : Location	400 000
CF : Main d'œuvre	$(100\ 000 * 2) + 30\ 000 = 230\ 000$
CV : Transport	108.284 / Km

Où : 100 000 Da correspond au salaire d'un employé et 30 000 Da à celui d'un gardien

III.1.6 Scénario 3 : Centralisation des conteneurs au niveau du Tooling Center

Chaque opération de maintenance effectuée par GE pour le compte de Sonelgaz passe par l'utilisation d'outillage servant au démontage ainsi qu'à l'assemblage de la turbine. Cet équipement est stocké dans des conteneurs, le tout placé au sein d'un entrepôt situé à Boufarik, portant le nom de « Tooling Center ». A cet effet, le présent scénario a été pensé de manière à transformer l'enceinte en entrepôt servant au stockage des deux types de conteneurs, à savoir les conteneurs d'outillage ainsi que ceux utilisés pour le consommable, comme illustré dans la figure III.6.

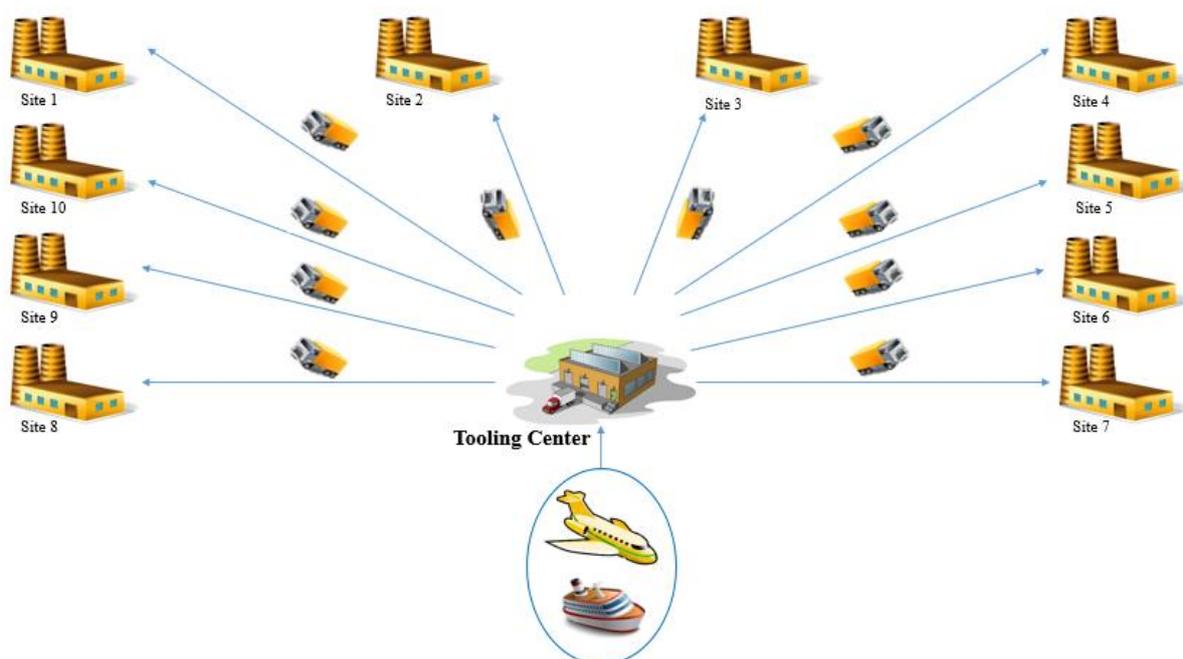


Figure III. 6 : Centralisation des conteneurs au niveau du Tooling Center

En termes de logistique, ce scénario pourrait s'avérer être intéressant dans le sens où les lieux existent déjà et sont loués par GE. Aussi, il dispose de trois (03) employés responsables de la gestion des stocks, et quoi qu'il en soit un conteneur d'outillage est envoyé à chaque maintenance au même titre qu'il y a un besoin en consommable à satisfaire à chaque fois.

Dans ce qui suit, ce scénario sera évalué en fonction des deux paramètres, coûts et distance, comme ce fut le cas pour le précédent.

- **Paramètre 1** : Distance entre chaque site et le Tooling Center

Les distances (en km) sont présentées dans le tableau III.17 ci-dessous :

Tableau III. 16 : Distances entre les sites et le Tooling Center

Tooling Center	Mostaganem	Boutelilis	Naama	Boufarik	Djelfa	Hassi R'Mel 1	Hassi R'Mel 2	Kais	Bellara	Oumache	Skikda
Distances (Km)	314	428	596	32	280	514	514	467	432	417	504

- **Paramètre 2** : Coûts relatifs à la gestion du Tooling Center

Dans ce qui suit, seront pris en compte les coûts fixes (CF)

- Location
- Main d'œuvre : 1 gardien + 3 employés pour s'occuper de la gestion des stocks des conteneurs

Ainsi que les coûts variables (CV) relatifs au transport.

Tableau III. 17 : Coûts relatifs à l'exploitation du Tooling center

Type de Coût	Coût (DZD)
CF : Location	750 000
CF : Main d'œuvre	$(100\ 000 * 3) + 30\ 000 = 330\ 000$
CV : Transport	108.284 / km

Où : 100 000 Da correspond au salaire d'un employé et 30 000 Da à celui d'un gardien.

III.1.7 Scénario 4 : Rotation des conteneurs entre les sites

Dans ce scénario, nous supposons que les conteneurs se déplacent d'un site à un autre afin de satisfaire le besoin en consommable et ce, à chaque maintenance. Ainsi, une fois sa mission accomplie, l'équipe responsable de la logistique se charge de faire l'inventaire et de commander les pièces pour réapprovisionner le conteneur, qui sera affecté au site suivant et ainsi de suite, comme illustré dans la figure III.7.

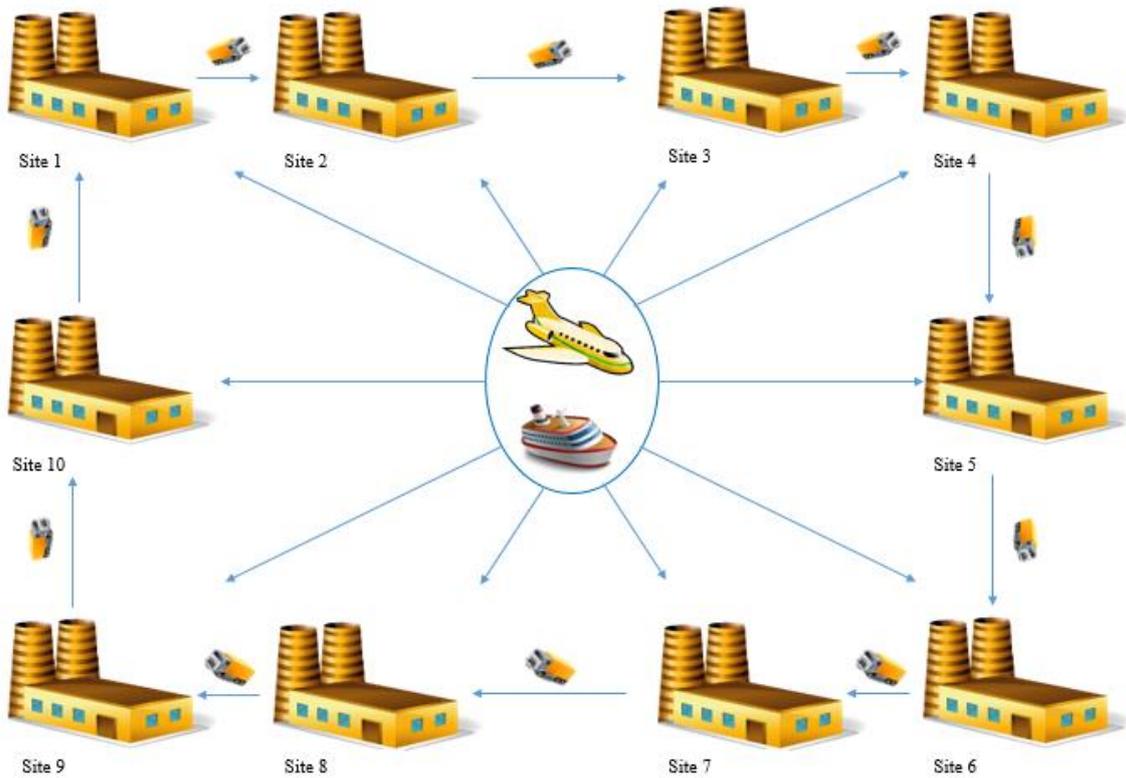


Figure III. 7 : Rotation des conteneurs entre les sites

L'étude de ce scénario sera quelque peu différente des autres puisqu'il n'y a pas lieu de calculer des distances et que les coûts de gardiennage ne sont pas à prendre en considération, et enfin, ceux relatifs à la location sont inexistantes.

- **Paramètre 1** : Distance parcourue

Dans le cas présent, les distances parcourues par les conteneurs sont les moins importantes puisqu'il n'y a plus lieu de passer par un entrepôt intermédiaire pour circuler d'un site à un autre. Ce scénario est donc le plus intéressant en termes de minimisation des distances.

- **Paramètre 2** : Coûts relatifs à la gestion des conteneurs pour chaque site

Dans ce qui suit, seront pris en compte les coûts fixes (CF), à savoir, la main d'œuvre : 1 travailleur par site responsable de la gestion des stocks des conteneurs ainsi que les coûts variables (CV) relatifs au transport.

Tableau III. 18 : Coûts relatifs a la rotation des conteneurs entre les sites

Type de Coût	Coût (DZD)
CF : Main d'œuvre	$(100\ 000 * 11) = 1\ 100\ 000$
CV : Transport	108.284 / km

Où : 100 000 Da correspond au salaire d'un employé.

III.1.8 Solution retenue

Nous avons proposé dans ce qui a précédé quatre (04) scénarios de localisation que nous avons jugés selon différents paramètres.

Le scénario 1 étant déraisonnable du fait qu'il repose sur l'emploi nombre de trente-cinq (35) conteneurs, pour couvrir la maintenance des trente-six (36) turbines. Ce dernier a été éliminé d'office.

Le tableau III.20 récapitulatif suivant permettra alors de faire ressortir la solution préconisée en jugeant les 3 scénarios restants.

La distance étant une variable difficile à quantifier dans ce contexte, nous avons pris l'initiative de recourir au scoring pour pouvoir arbitrer entre les différents scénarios. Ainsi, nous avons attribué des notes de un (01) à quatre (04).

où :

(01) correspond au scénario le moins avantageux par rapport au paramètre « distance »

(04) correspond au scénario le plus intéressant par rapport au paramètre « distance »

Aussi, notons que le paramètre « coût » ne prend pas les coûts de transport en considération, étant donné que ces derniers sont en km et dépendent donc du paramètre « distance ».

Tableau III. 19 : Tableau récapitulatif des scénarios

	Nombre de conteneurs	Distances parcourues (km)	Coûts (DZD)
Scénario 2	15	(02)	630 000
Scénario 3	15	(01)	1 080 000
Scénario 4	15	(04)	1 100 000

Après avoir présenté les résultats trouvés grâce à l'étude de chaque scénario, il ressort clairement que le scénario 2 est le plus intéressant en termes de coûts et que le scénario 4, quant à lui, est le plus avantageux du point de vue des distances parcourues par les conteneurs.

Après avoir exposé cette étude à l'entreprise, qui a confirmé que les coûts relatifs au transport ne sont pas très importants, le choix s'est porté sur le scénario 2, qui permet d'une part de simplifier toute la logistique existante derrière la gestion desdits conteneurs, notamment en créant une seule installation centralisée, et d'autre part, d'assurer un avantage certain en termes de coûts par rapport aux autres cas de figures proposés.

La solution que nous proposons consiste donc à créer un seul entrepôt de stockage localisé au niveau du barycentre des onze (11) sites, se trouvant à Sidi-Bayzid wilaya de Djelfa. Dans ce

contexte, il est alors préconisé d'embaucher deux personnes responsables de la gestion de stock des quinze (15) conteneurs de NCPs. La tâche n'étant pas chose simple étant donné le nombre de pièces assez important, ces derniers devront suivre une procédure spécifique que nous présenterons dans la partie gestion de stocks de ce chapitre.

III.2 Dimensionnement du conteneur de stockage des NCPs

Le projet « outage express » repose sur la mise en place d'un conteneur mobile servant au stockage des NCPs pour les opérations de maintenance des turbines à gaz. A cet effet, après avoir déterminé le nombre optimal de conteneur à concevoir pour couvrir les maintenances des trente-six (36) turbines, et localisé ces derniers en fonction de différents paramètres, nous allons à présent passer à la partie dimensionnement du conteneur.

Ainsi, pour dimensionner un conteneur de stockage il est nécessaire de disposer en premier lieu de la liste complète des NCPs. Cette dernière s'intitule dans le jargon GE « A-E list », où chaque lettre de A à E correspond aux pièces à fournir spécifiques à chaque inspection.

Catégorie A : NCPs spécifiques à l'inspection de combustion.

Catégorie B : NCPs spécifiques à l'inspection de la veine gazeuse.

Catégorie C : NCPs spécifiques à l'inspection majeure.

Catégorie D : Pièces principales.

Catégorie E : Pièces détachées opérationnelles.

Remarques :

- Les pièces de la catégorie D doivent être disponibles pour l'inspection de combustion, de veine gazeuse et l'inspection majeure
- Les pièces de la catégorie E ne sont pas systématiquement utilisées lors des inspections, cependant il est recommandé de les avoir à disposition
- L'inspection de combustion nécessite les pièces des catégories A et D
- L'inspection de la veine gazeuse nécessite les pièces des catégories A, B et D
- L'inspection majeure nécessite les pièces des catégories A, B, C et D

L'expérience a démontré que fournir l'intégralité des pièces préconisées par la « A-E list » pour une maintenance donnée revenait à fournir lors des maintenances un nombre considérable de pièces qui ne nécessitent pas forcément d'être changées (là aussi, c'est au TA qu'incombe la responsabilité de la décision du remplacement de chaque NCP). Ces pièces se retrouvent ainsi entreposées inutilement durant de longues périodes.

C'est partant de ce constat que nous avons établi une base de données qui comporte uniquement les références requises lors des opérations de maintenance (HGPI et MI).

Pour ce faire, nous avons procédé comme suit :

- Maintenir la quantité suggérée par la « A-E list » de toutes les références de NCPs relatives à la partie chaude ; à savoir : Injecteurs de combustible, injecteurs de flamme, pièces de transition, couvercle de la turbine, sabots, aubes, directrices, etc. En effet, la

criticité des pièces précédemment citées exige que celles-ci soient inconditionnellement remplacées à chaque opération de maintenance.

- Maintenir la quantité suggérée par la « A-E list » de tous les NCPs de type Gasket (joints), ces derniers n'étant pas réutilisables.

Les éléments susmentionnés mis à part, toutes les autres références feront l'objet d'une classification dont les paramètres seront la criticité et la fréquence de changement (en se basant encore une fois sur l'expérience d'un TA).

Cette démarche permettra à terme de parvenir à une liste réduite des références couvrant les besoins des opérations de maintenance des turbines à gaz en NCPs.

Ceci étant, la base de données obtenue ne pourra être exposée dans le présent travail dans la mesure où les informations y figurant sont confidentielles.

III.2.1 Aménagement du conteneur

Dans le souci de se conformer aux équipements de logistique déjà mis en place sur sites, notre choix s'est dirigé vers un conteneur de type standard, 20 pieds. Le conteneur doit être pensé de sorte à assurer la disponibilité de toutes les NCPs lors des maintenances tout en optimisant la liste de ces dernières. Pour ce faire, nous allons procéder de la manière suivante :

- Etablissement d'une base de données contenant les noms des pièces, leurs références, la quantité maximale, la quantité minimale et enfin la quantité suggérée.
- Détermination des dimensions des NCPs.
- Classement des NCPs en fonction de quatre (04) paramètres (de sorte à ce que chaque pièce puisse dépendre d'un ou de plusieurs paramètres la caractérisant) :
 - La taille
 - Le poids (charge maximale, ergonomie)
 - La fragilité
 - L'emplacement dans la turbine.

De ce fait, nous proposons un conteneur composé de casiers, où chaque casier (ou ensemble de casiers) remplit une fonction spécifique de manière à optimiser au mieux l'espace alloué au stockage des pièces ainsi que l'accessibilité de ces dernières. On retrouve alors :

- Un ensemble de casiers dédiés à la partie combustion.
- Un ensemble de casiers dédiés à la partie turbine.
- Un ensemble de casiers dédiés à la boulonnerie (boulons, vices, écrous).
- Un ensemble de casiers dédiés à l'instrumentation ainsi qu'aux thermocouples.
- Un ensemble de casiers dédiés aux NCPs relatives aux ailettes rotoriques, ailettes statoriques et sabots (Buckets, Nozzles, Shrouds).
- Un ensemble de casiers dédiés aux NCPs relatives aux injecteurs (Fuel Nozzles)
- Un ensemble de casiers dédiés aux bouchons d'un certain nombre de pièces (Plugs).
- Un ensemble de casiers dédiés aux NCPs relatives aux vannes directrices (Inlet Guide Valve).

- Un ensemble de casiers dédiés aux NCPs relatives à la tuyauterie (Piping).

L'emplacement des références restantes sera déterminé en fonction des dimensions ainsi que des poids de ces dernières. Ainsi, les pièces jugées « lourdes » seront disposées sur des plateformes au sol, tandis qu'on privilégiera les emplacements en hauteur pour les pièces « légères » et/ou « volumineuses ».

Il est à noter que pour des raisons de confidentialité, la base de données mise en place ne pourra être présentée dans ce rapport.

III.2.2 Utilisation d'un modèle mathématique pour optimiser l'espace alloué au stockage des NCPs (Prins et Sevaux, 2011)

Optimiser l'espace alloué au stockage des NCPs revient à minimiser l'espace perdu dans chaque casier. La tâche n'étant pas chose aisée, nous avons jugé nécessaire de résoudre cette problématique en utilisant un modèle mathématique. Après investigation, nous sommes arrivés à la conclusion que nous étions en mesure d'adapter les modèles de découpage à notre problématique.

A partir de ce constat, nous proposons le modèle suivant :

Données :

m : Nombre de pièces de tailles différentes pouvant être contenues dans le même casier

n : Nombre de tous les agencements envisagés

d_i : Nombre de pièces de type i

j : Type d'agencement d'un casier

C_j : Coût d'un agencement j

a_{ij} : Élément de la matrice A ($n * m$)

Variable de décision :

x_j : Nombre d'agencements différents intégrant une pièce j

Modèle mathématique :

$$\text{Minimiser } \sum_{j=1}^n C_j x_j$$

Sous contraintes :

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq d_i \forall i = 1 \dots m \quad (1)$$

$$x_j \in \mathbb{N} \forall j = 1 \dots n \quad (2)$$

La fonction-objectif minimise le nombre de casiers à utiliser. La contrainte (1) indique que le nombre de pièces de chaque type, intégrées dans les différents agencements correspondent au nombre de pièces totales de ce même type à ranger.

La résolution de ce modèle mathématique nécessite la connaissance de toutes les dimensions des pièces à placer dans les casiers. Etant donné qu'à ce stade de notre étude, nous ne disposons pas de toutes ces données, nous sommes dans l'impossibilité de fournir un résultat concluant découlant de la résolution du modèle. Néanmoins, nous présentons dans ce qui suit les différentes étapes à suivre pour le solutionner :

- Enumération des différents agencements envisageables à travers la détermination des contenus des dispositions en nombre de pièces des différents types. Celles-ci peuvent être décrites par une matrice A de dimension (n*m).
- Traduction du programme linéaire sur Excel de sorte à calculer le nombre de casiers à exploiter pour le rangement de chaque référence de manière à trouver un emplacement à chacune des références, tout en minimisant le nombre total de casiers à utiliser.

TRADUCTION EXCEL :

Le modèle se traduit sur Excel (voir Tableau III.21 et Figure III.8) avec les formules suivantes :

- Somme des contraintes (1). La formule :
 '' =SOMMEPROD(B6 :Q6 ;\$B\$11 :\$Q\$11) '' est placée en cellule S6 et recopiée dans les cellules S7 :S9.
- Fonction-objectif. La formule ''=SOMMEPROD(B3 :Q3 ;B11 :Q11) '' est saisie dans la cellule T3 à minimiser, pour compter le nombre de casiers exploités.

Tableau III. 20 : Résolution du modèle sur Excel

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1																				
2																				
3	Côut/ agencement de casier																		Côut total	
4																				
5	Types d'agencements	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		Nombre de pièces à stocker	Nombre de pièces stockées
6	Dimension pièce n°1																			
7	Dimension pièce n°2																			
8	Dimension pièce n°3																			
9	Dimension pièce n°4																			
10																				
11	Nombre de casiers																			
12																				

Le programme linéaire en nombre entiers s'écrit dans la boîte de dialogue du solveur de la manière suivante. On précise que la cellule à minimiser est T3. Les variables des cellules B11 : Q11 sont entières, et toutes les pièces à stocker doivent bénéficier d'un emplacement. Il faudra aussi prendre le soin de sélectionner l'option : *Modèle linéaire et supposé non négatif*.

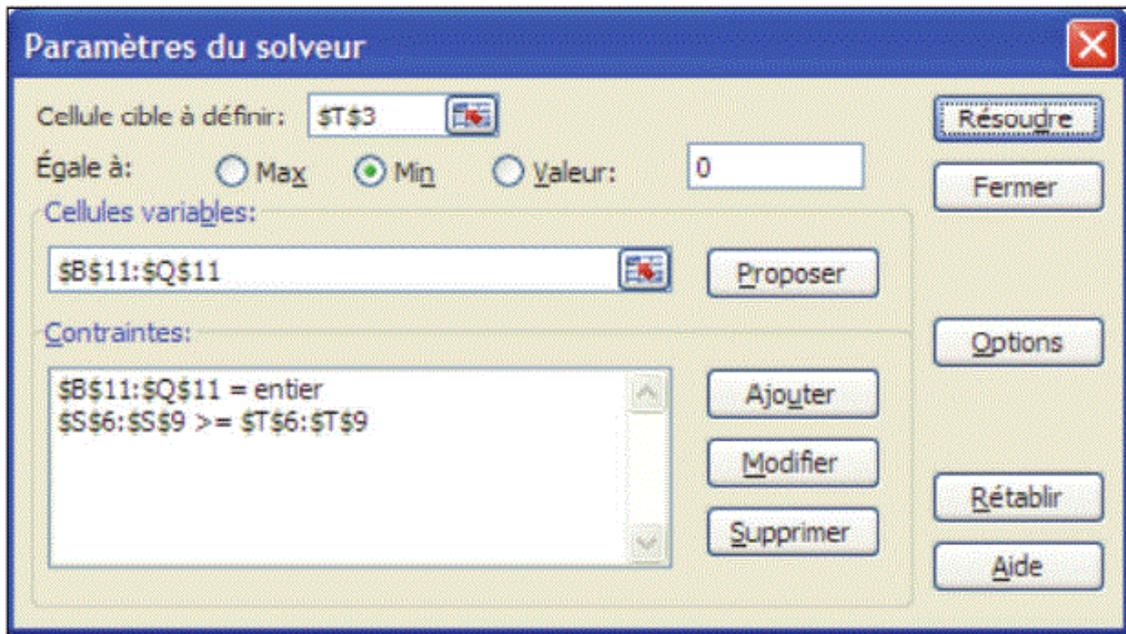


Figure III. 8 : Paramètres du solveur

III.3 Mise en place de la politique de gestion de stock de la pièce de rechange

Un système de GdS de la PdR permet de prendre des décisions en accord avec les objectifs de l'entreprise. Fondamentalement, l'exercice consiste à apporter des réponses aux questions suivantes :

A quel moment faut-il réapprovisionner ? Quelle quantité faut-il commander ?

La réflexion menant à répondre à ces interrogations nécessite d'être convenablement conduite. Ce faisant, une politique à suivre doit être formellement établie. La politique en question sera présentée dans ce qui suit.

- **Critères de choix de la PA**

Le choix de la PA est conditionné par les contraintes et complexités que présente le projet, ces dernières se manifestent principalement à travers les critères expliqués ci-dessous :

- Les délais à prendre en considération :

La nature des différents délais (lead time du processus approvisionnement, délai d'attente toléré entre deux opérations de maintenance, etc.) est étroitement liée à la décision menant à la détermination de la politique d'approvisionnement.

- L'objectif du projet :

Garantir la disponibilité de tout le consommable nécessaire aux différentes opérations de maintenance (HGPI, MI) et ce, quelles que soient leurs natures (Planifiée, non-planifiée).

C'est d'ailleurs pourquoi, après la détermination de la PA à adopter, l'étude de cet aspect de la gestion de la PdR et de la gestion des conteneurs de manière plus générale, donnera lieu à quelques ajustements de la méthode d'approvisionnement telle qu'elle est énoncée afin de parvenir à une nouvelle PA garantissant une accommodation optimale aux besoins du projet.

La théorie préconise l'établissement d'une classification des pièces, afin de déterminer une PA différente et adéquate à chaque catégorie de pièces, à savoir :

- Critique
- Importante
- Non-critique

En effet, procéder à une classification des pièces permet de distinguer des classes des pièces en fonction des critères choisis. Une PA sera affectée à chaque classe de pièces pour faire concorder les objectifs de l'entreprise (exprimés à travers les critères de classification sélectionnés) avec les actions engagées.

Cependant, pour les deux raisons qui suivent, une telle démarche ne peut être entreprise :

- **Premièrement :**

Nous avons effectué une classification similaire au préalable (pour le dimensionnement du conteneur). En effet, les listes de consommable à changer lors de chaque maintenance ont été optimisées en se basant sur le fait que certaines pièces sensées être changées sont encore en très bon état, et ne nécessitent donc pas d'être remplacées.

Les listes de NCPs doivent être réduites à ce qui est nécessaire et suffisant à la Major Inspection (Celle-ci, couvrant pleinement les besoins en NCPs d'une HGPI).

- **Secondement :**

L'objectif premier du projet OUTAGE EXPRESS est de concevoir des conteneurs destinés à être utilisés lors des opérations de maintenance réalisées sur les différents sites du Méga-Deal.

La propriété de mobilité qui caractérise ces conteneurs, les contraintes de disponibilité des pièces au début de chaque opération de maintenance, et les délais impartis au complètement après usage, imposent une manière particulière de procéder. En effet, étant donné que chacune des pièces présente dans le conteneur est considérée comme critique, ces dernières sont toutes soumises à la même politique d'approvisionnement.

III.3.1 Etablissement et ajustement de la politique d'approvisionnement

Dans le cas présent, nous avons défini le stock max pour chaque pièce comme étant la quantité nécessaire de cette dernière, déterminée dans les listes nouvellement établies et optimisées.

Le nombre de pièces à commander pour chaque référence est ainsi calculé comme étant l'écart entre le stock max, et l'identification du niveau des stocks restants dans le conteneur. Le niveau des stocks restants est déterminé par l'inventaire succédant à l'opération de maintenance pour laquelle le conteneur a été utilisé.

Quant à la période d'approvisionnement, étant donné le fait que les opérations de maintenance de l'ensemble des turbines ne s'effectuent pas à intervalle constant (en effet, les opérations de maintenance pour chaque turbine, à savoir HGPI et MI sont espacées de trente-deux mille heures (32 000 h) chacune, les dates de démarrage des turbines quant à elles, ne suivent pas d'ordre particulier. Ainsi, comme l'utilisation des conteneurs dépend de ces mêmes dates, la sollicitation de ces derniers n'est régie par aucun ordre non plus.

En prenant ce qui a été cité précédemment en considération, il apparaît clairement que la politique d'approvisionnement la plus appropriée est une PA à période et à quantité variables.

En procédant ainsi, les conteneurs seront complétés de sorte à couvrir intégralement les besoins en NCPs d'une MI et ce, après chaque opération de maintenance. Ceci pose notamment deux problèmes :

- Problème N°1 : Les conteneurs équipés pour couvrir une MI mais utilisés pour une HGPI.
- Problème N°2 : Le nombre élevé de conteneurs pleins pendant les périodes creuses (au-delà de deux (02) mois).

Les situations décrites dans les problèmes sus cités engendrent des coûts que l'entreprise, dans sa perpétuelle quête d'efficacité cherche à réduire. Les investigations que nous avons menées ont conduit aux solutions suivantes :

➤ **Solution au problème N°1**

Réapprovisionner le conteneur en fonction de l'opération de maintenance planifiée suivante (voir planning des affectations des conteneurs, Annexe III.6). La manœuvre consiste à considérer pour le complètement du conteneur, le seuil de stock max adéquat à l'opération de maintenance suivante.

Cette démarche a pour but de réduire les immobilisations financières. En effet, compléter un conteneur devant servir à une HGPI avec uniquement les pièces nécessaires à une HGPI, au lieu de toute la panoplie des pièces couvrant une MI, reviendrait à réduire les immobilisations.

Pour estimer cette réduction, nous avons procédé en calculant l'écart entre les deux types de maintenance sur la base des prix suivants :

Prix d'une « A-E list » pour couvrir une MI : 305 951.55 USD (équivalent à 33 127 332.4 DZD) selon le taux bancaire à la date du 09/06/2017.

Prix d'une « A-E list » pour couvrir une HGPI : 19 196.64 USD (équivalent à 2 078 543.07 DZD) selon le taux bancaire à la date du 09/06/2017.

Comme en témoigne l'écart de prix entre les listes de pièces nécessaires et suffisantes pour couvrir une MI et une HGPI qui est de l'ordre de : 94%

Le complètement d'un conteneur en fonction de la prochaine maintenance pour laquelle il est affecté est ainsi une démarche qui contribue incontestablement et considérablement à la réduction des immobilisations.

➤ **Solution au problème N°2 :**

Malgré l'échantillon de données relativement restreint concernant les précédentes maintenances non planifiées effectuées auquel nous avons pu avoir accès à travers l'historique des maintenances correctives qui ont eu lieu sur les deux turbines au niveau de SKS (Voir annexe III.7), l'analyse de la fréquence d'occurrence des interventions non-planifiées sur les turbines à gaz, ainsi que de l'étude causale des incidents nous ont conjointement permis de déterminer une moyenne d'occurrence des incidents dont le solutionnement requiert l'usage de NCPs, et en d'autres termes, l'usage d'un conteneur.

La moyenne calculée s'élève à deux incidents par an. Afin de couvrir ces maintenances non planifiées, nous allons recourir à l'utilisation des conteneurs (initialement dédiés aux maintenances planifiées) durant leurs périodes creuses. Les conteneurs prévus à cet effet seront équipés de telle sorte à couvrir une MI et ce, dans l'optique de satisfaire au mieux la demande du client en NCPs et de réduire les temps d'arrêts dus à l'attente d'une pièce manquante.

D'une part pour assurer la disponibilité des deux conteneurs faisant office de conteneurs de secours tout au long de l'année, et d'autre part pour pallier les importantes immobilisations financières engendrées par les conteneurs non-utilisés durant de longues périodes et dont le stock a été re-complété prématurément ; un planning des dates de l'amorçage de la procédure de réapprovisionnement de chaque conteneur a été établi (voir Annexe III.8).

Plusieurs cas de figure peuvent être envisagés lors du réapprovisionnement, le tableau III.22 résume les combinaisons possibles :

Tableau III. 21 : Cas possibles de réapprovisionnement

	Recomplètement pour couvrir une MI	Recomplètement pour couvrir une HGPI
Recomplètement immédiatement après utilisation	✓	✓
Recomplètement différé	✓	✓
Recomplètement pour couvrir les éventuelles maintenances non-programmées	✓	X

Nous présentons dans la figure ci-dessous un exemple de calcul des dates de réapprovisionnement du premier conteneur englobant chacun des cas de figure précédents (en précisant les différents sites auxquels le conteneur a été affecté) :



Figure III. 9 : Planning de réapprovisionnement du premier conteneur

Le calcul a été effectué comme suit :

Date à laquelle le conteneur est prêt à être réutilisé = Date de maintenance + 105 jours

105 jours = 30 Jours pour l'opération de maintenance + 75 jours (Logistique)

Date de recomplètement différé = Date de la prochaine utilisation – 75 jours

Dans un souci d'optimisation du processus de réapprovisionnement, trois (03) cas de figure vont être énoncés dans ce qui suit :

•1^{er} Cas

- **Si** (la date de la prochaine maintenance) moins (75 jours) est supérieure à la date à laquelle le conteneur est prêt à être réutilisé : Le réapprovisionnement du conteneur sera remis à plus tard (i.e. : 75 jours avant la date de la prochaine utilisation planifiée).

Prenons pour exemple la 1^{ère} utilisation du conteneur :

Le 9-Mar-18, le conteneur n°1 est utilisé lors d'une MI (couleur vert pistache), si l'on enclenchait le processus de réapprovisionnement immédiatement après la MI, le conteneur serait prêt à l'emploi le 22-Jun-18. Or, ce n'est qu'à la date du 25-Nov-19 que ce conteneur sera de nouveau sollicité et ce, pour une HGPI (couleur bleu ciel).

Afin de prévenir toute configuration engendrant un stock dormant et par conséquent des immobilisations financières, il serait judicieux de n'entamer le re-complètement du conteneur que le 11-Sep-19 (couleur vert bouteille).

Il est à noter que dans le cas présent, le conteneur ne sera que partiellement complété (i.e. : re-complètement de stock nécessaire et suffisant pour une HGPI).

•2^{ème} Cas

- **Si** (la date de la prochaine maintenance) moins (75 jours) est inférieure à la date à laquelle le conteneur est prêt à être réutilisé : Le conteneur est réapprovisionné immédiatement après l'opération de maintenance.

Prenons pour exemple la 6^{ème} utilisation du premier conteneur (Voir Figure III.8) :

Le 18-Nov-21, le conteneur n°1 est utilisé lors d'une HGPI (couleur bleu ciel), le processus de re-complètement sera enclenché immédiatement après que l'inventaire à l'issue de l'HGPI ait été effectué. Ce faisant, le conteneur sera prêt à l'emploi le 3-Mar-22 (couleur rose).

Notons par ailleurs, que le conteneur sera re-complété de manière à couvrir une MI, étant donné que l'opération suivante, à savoir le 9-Mar-22 est une MI (couleur vert pistache).

•3^{ème} Cas

Le dernier type de re-complètement du conteneur qui peut être envisagé est celui d'un re-complètement de telle sorte à couvrir une MI, pour faire office de conteneur de secours, le re-complètement (couleur violet) peut s'opérer à tout moment, en fonction du planning des disponibilités et de l'affectation de la fonction de conteneur secours aux différents conteneurs de manière à constamment avoir deux (02) conteneurs prêts à l'emploi pour tout incident ou opération de maintenance non planifiée qui requièrent des NCPs.

Après que les NCPs se trouvant dans le conteneur aient été utilisées durant la maintenance des turbines, le conteneur est acheminé vers l'entrepôt de stockage situé à Djelfa. L'opérateur en poste conduira alors un inventaire complet du conteneur afin d'identifier les quantités manquantes des références utilisées lors de la maintenance. Il se chargera également de scinder en deux listes distinctes (A & B), l'ensemble des pièces manquantes. Les listes A et B sont définies comme suit :

- Liste A : Références utilisées seulement lorsqu'il s'agit d'une MI.
- Liste B : Références utilisées pour une MI et une HGPI.

Pour le réapprovisionnement du conteneur, plusieurs cas de figure peuvent être envisagés :

Si le conteneur est destiné à être utilisé immédiatement après re-complètement, le lancement de la commande s'effectue tout de suite après l'inventaire. Lorsque la prochaine maintenance à laquelle le conteneur est affecté dans le planning prévisionnel est une MI (respectivement, HGPI), ce sont les pièces de la liste A (respectivement, B) qui seront commandées.

Sinon, le conteneur sera re-complété ultérieurement (à la date indiquée dans le planning d'affectation et de réapprovisionnement des conteneurs). Le moment venu, deux cas de figure peuvent être envisagés :

Si le conteneur a été désigné dans le planning comme conteneur de secours, ce sera alors la liste A qui sera commandée (suffisante pour couvrir une MI en cas de maintenance non-programmée).

Sinon la commande effectuée dépendra du type de la prochaine maintenance à laquelle le conteneur a été affecté.

Les étapes suivantes consistent à réceptionner la commande, à re-compléter le conteneur et enfin, à l'expédier à la centrale électrique à laquelle il a été affecté. Pour résumer, le diagramme logique présenté en figure III.10 récapitule la procédure de réapprovisionnement du conteneur :

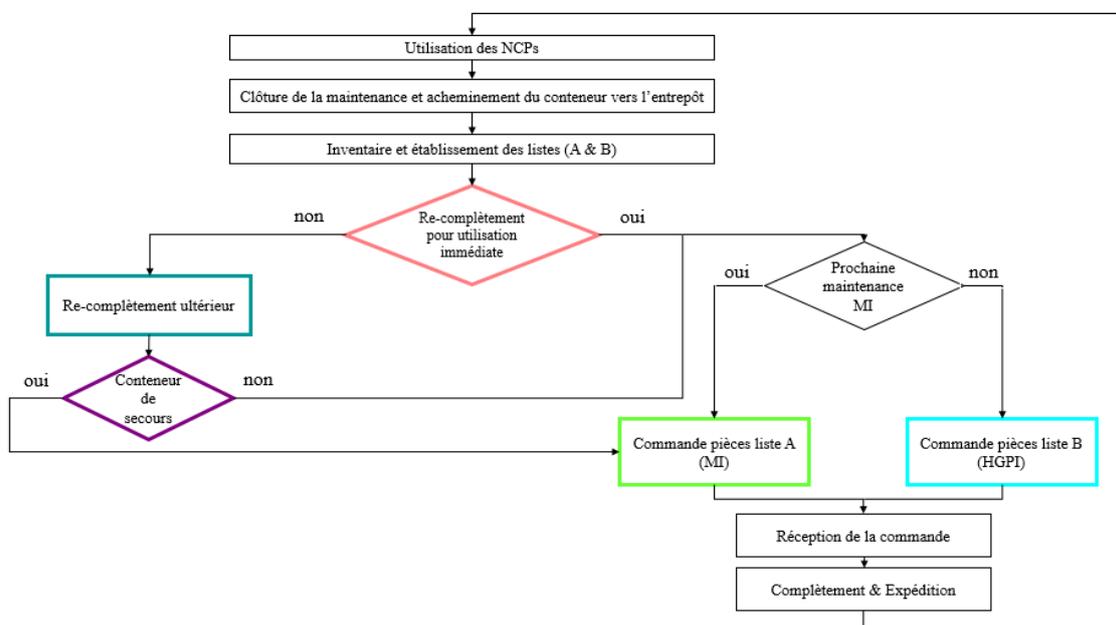


Figure III. 10 : Procédure de réapprovisionnement

Conclusion

Dans ce chapitre, plusieurs scénarios ont été mis en exergue dans le but de reconfigurer le système de GdS des NCPs. Nous avons proposé différentes méthodes de résolution, et avons calculé les coûts relatifs à la localisation des conteneurs pour l'ensemble des cas de figure envisagés, donnée d'entrée nécessaire à la prise de décision. De ce fait, le meilleur scénario a été défini comme étant scénario 2, qui permet d'une part de simplifier toute la logistique existante derrière la gestion desdits conteneurs, notamment en créant une seule installation centralisée, et d'autre part, d'assurer un avantage certain en termes de coûts par rapport aux autres cas de figures proposés.

Notre contribution a également consisté à déterminer le nombre optimal de conteneurs à concevoir pour couvrir la totalité des maintenances et ce, en se référant au planning prévisionnel des maintenances préalablement établi par l'entreprise. Le résultat obtenu a alors été consolidé par une analyse de sensibilité de l'évolution de ce nombre, en vue d'étudier le comportement de la solution proposée lorsque le système est soumis à la variation de certains paramètres.

Par la suite, nous avons proposé un modèle mathématique permettant le dimensionnement et l'aménagement dudit conteneur. Aussi, en vue de compléter notre travail, nous avons mis en place une politique d'approvisionnement des NCPs adaptée au scénario sélectionné.

Conclusion Générale

Pierre angulaire des opérations de maintenance, la pièce de rechange constitue l'une des préoccupations majeures de GE Algérie - Power Services, la disponibilité de l'ensemble des pièces de rechange nécessaires à la maintenance étant une condition sine qua none à l'exécution du service dans les délais impartis.

Suite à des dysfonctionnements observés lors des opérations de maintenance, nous avons été affectées au projet « outage express », afin d'apporter une solution au problème de prolongation des délais d'intervention, engendrant des surcoûts que GE aspire à éliminer. C'est dans ce cadre que s'est inscrit notre projet. L'objectif principal étant d'assurer la disponibilité des moyens nécessaires à la maintenance, à moindre coût, sans pour autant porter atteinte à la qualité du service qui se doit d'être irréprochable.

Partant de cette situation et afin de traiter le problème dans sa globalité, nous avons établi un plan d'actions dont les lignes directrices ont été définies comme étant la localisation, le dimensionnement du conteneur et enfin la gestion de stock des NCPs.

Dans un premier temps, nous nous sommes attelées à l'établissement des différents scénarios de localisation susceptibles d'être en adéquation avec la stratégie de l'entreprise. Ce faisant, nous avons proposé les scénarios suivants :

- Scénario 1 :

Localisation de deux entrepôts de stockage, l'un situé dans la région Ouest (Mosbah-Saida) et l'autre dans la région Est (Ouled Khelouf – Mila). Pour ce faire, et partant du fait que les centrales concernées par le projet « outage express » sont réparties sur l'ensemble du territoire national, nous avons dans un premier temps scindé la carte géographique en quatre zones : Est, Ouest, Sud et Centre. Nous avons par la suite affecté chaque centrale électrique à la zone dans laquelle elle se situe, puis nous avons déterminé le barycentre de chacune de ces zones. Les résultats obtenus ont été soumis à deux modèles mathématiques, l'un prenant en compte les distances parcourues ainsi que les coûts logistiques (FCLP), alors que l'autre se base uniquement sur le paramètre distance (P-médian). Le P-médian a retenu trois (03) installations sur quatre (04), tandis que le FCLP en a retenu seulement deux (02) sur quatre (04). Ce scénario part du principe qu'il est nécessaire d'allouer trente-cinq (35) conteneurs aux maintenances de trente-six (36) turbines, postulat de base qui nous a amené à l'écarter d'office. L'implémentation a été effectuée grâce au logiciel IBM ILOG CPLEX 12

- Scénario 2 :

Localisation d'un unique entrepôt de stockage situé au barycentre (Sidi Bayzid-Djelfa) de l'ensemble des centrales électriques concernées par le projet « outage express ». Pour aboutir à ce résultat, nous avons commencé par réduire le nombre de conteneurs nécessaire et ce, en mettant en place un programme informatique permettant de dynamiser la détermination du nombre optimal de conteneurs. Dans le souci de couvrir tous les types de maintenances, à savoir les maintenances planifiées ainsi que les maintenances non programmées, nous avons

déterminé les périodes durant lesquelles les conteneurs sont disponibles pour couvrir ces dernières.

- Scénario 3 :

Exploitation du « Tooling Center » en guise d'entrepôt de stockage, ce dernier étant conçu pour fournir l'outillage nécessaire aux inspections (un conteneur d'outillage est en effet envoyé sur site à chaque opération de maintenance).

- Scénario 4 :

Rotation des conteneurs entre les sites. Ce scénario n'implique l'ouverture d'aucun entrepôt de stockage et repose sur l'hypothèse que les conteneurs se déplacent d'un site à un autre afin de satisfaire le besoin en consommable et ce, à chaque maintenance.

D'après le calcul détaillé des différents coûts logistiques relatifs à chaque scénario, le scénario 2 a été, à priori, celui à fournir les résultats les plus probants, celui-ci a donc été retenu. Afin d'asseoir l'étude effectuée et pour nous assurer de la stabilité des résultats obtenus, nous avons procédé à une analyse de sensibilité.

Par la suite, nous nous sommes consacrées au dimensionnement du conteneur de stockage des NCPs, qui a consisté principalement en l'aménagement de ce dernier à travers la détermination des rayonnages ainsi que l'agencement des différents équipements de stockages, en prenant en considération d'une part le critère d'accessibilité, et d'autre part la notion d'ergonomie. Aussi, dans l'optique de minimiser l'espace non exploité dans les casiers, l'affectation des emplacements dédiés à chaque pièce se basera sur le résultat délivré par un modèle mathématique de découpe.

En définitive, nous avons établi une politique de GdS des NCPs, base sur laquelle nous avons déterminé un planning de réapprovisionnement pour chaque conteneur. De surcroît, nous nous sommes appliquées à la formalisation de la procédure de réapprovisionnement relative à la gestion de stock dudit conteneur.

Le projet « outage express » a pour ultime objectif d'assurer la disponibilité des NCPs pour les opérations de maintenance. Ce faisant, la reconfiguration du système de gestion de stock des pièces nécessaires à la bonne exécution des maintenances de turbine à gaz, mènera à la réduction incontestable, voire à l'élimination des coûts engendrés par les prolongations des durées des inspections.

La reconfiguration du système logistique de gestion des NCPs de GE que nous proposons n'étant pas exhaustive, nous allons exposer dans ce qui suit les perspectives d'amélioration préconisées afin de parfaire le présent travail :

- Résolution du modèle mathématique de découpe pour le dimensionnement après obtention des données relatives aux dimensions des NCPs, et conception de la maquette représentative desdits conteneurs.

-
- Etude de faisabilité relative à l'intégration des NCPs de la turbine à vapeur, du générateur ainsi que des auxiliaires. Ceci étant dans l'optique de couvrir les besoins en NCPs des maintenances des turbine 9FA dans leur globalité.
 - Optimisation des délais logistiques correspondant à la passation de commande ainsi qu'à la réception des pièces.

Le temps nous ayant fait défaut, nous avons été dans l'impossibilité de concrétiser le projet « outage express » dans son intégralité. Toutefois, nous mettons un point d'honneur à enrichir l'étude effectuée en mettant en application les deux premières recommandations énoncées ci-dessus jusqu'à la fin de notre stage chez GE, prévue pour le début du mois de Septembre.

Pour conclure, nous dirons que ce projet a été pour nous la concrétisation de toutes ces années de dur labeur. Ainsi, c'est à travers son exécution que nous avons enfin eu l'occasion de mettre en pratique l'ensemble des connaissances acquises tout au long de notre cursus d'ingénieur.

Réel tremplin vers notre intégration dans le monde de l'entreprise, nous avons à dessein, choisi de clôturer ce travail par la citation de Victor Segalen qui reflète au mieux nos ambitions :

« Ce n'est point au hasard que doit se dessiner le voyage. À toute expérience humaine il faut un bon tremplin terrestre. Un logique itinéraire est exigé, afin de partir, non pas à l'aventure, mais vers de belles aventures. » [Victor Segalen]

Bibliographie

- ARNOUX, H. (2004). *Pièces de rechange en maintenance*. Technique de l'ingénieur.
- BALINSKI, M. (1965). *Integer Programming: Methods, Uses, Computation*.
- BRUTMAN, T., & MARCOTTI, G. (2007). « *La gestion dynamique des stocks* ». SUPPLY CHAIN Magazine.
- CHURCH, R., & REVELLE, C. (n.d.). *The Maximal Covering Location Problem*. Papers of the Regional Science Association. Vol 32.
- COURTOIS, A. e. (2003). *Gestion de production*. Editions d'organisation (ISBN : 2-7081-2986-4).
- DESFOUR, C. (1998). *Gestion commerciale*. Paris.
- DRIVET, P. (2004). *50 fiches pour communiquer et s'organiser dans l'entreprise*.
- FERNANDEZ, A. (2000). *les nouveaux tableaux de bord des décideurs*. Paris: Editions d'Organisation, 2ème édition.
- FREVILLE, A. (n.d.). *The multidimensional 0-1 knapsack problem : an overview*. European Journal of Operational Research, vol. 155.
- GIARD, V. (2005). *Gestion de la production et des flux*. Paris: Economica.
- HAKIMI, S. (1964). *Optimum Locations of Switching centers and the absolute centers and medians of a graph*. Operations Research 12.
- HERAN, F. (1990). *Gestion industrielle et mesure économique : approches et applications nouvelles*. Paris: Economica.
- JANAWITZ, J., MASSO, J., & CHILDS, C. (2014). *Heavy-duty gas turbine operationing and maintenance considerations*. Atlanta: GE Power and Water.
- KELLY, A. (2006). *Maintenance and the industrial organization*. . Plant Maintenance Management Set.
- LASNIER, G. (2015). *Gestion des approvisionnements et des stocks dans la chaîne logistique (2° Éd.)*.
- Le Groupe américain signe un gros contrat avec Sonelgaz. (2017). *Revue de Presse du Forum des Chefs d'Entreprise*.
- LORINO, P. (1999). *Oui, il faut définir la performance*. Revue Français de Comptabilité, n°269.
- MARMIER, F. (2007). *Contribution à l'ordonnancement des activités de maintenance sous contrainte de compétence: une approche dynamique, proactive et multicritère*. France : Thèse de Doctorat, Université Franche-Comté.
- MATTIUZZO, N. (2011). *Les nouvelles localisations industrielles*.
- NDIAYE, N. (2015). *Algorithmes d'optimisation pour la résolution du problème de stockage de conteneurs dans un terminal portuaire, Thèse de doctorat en mathématiques appliquées informatique, sous*

la direction d'Ibrahima DIARRASSOUBA. Paris: Laboratoire de mathématiques appliquées du Havre (LMAH).

PETINIS, V., TARANTILIS, D., & KIRANOUDIS, C. (2005). *Warehouse sizing and inventory scheduling for multiple stock-keeping products*. International journal of systems science, vol. 36, n°1.

RAO, A., & M.R.RAO. (1998). *Solution procedures for sizing of warehouses*. European journal of operational research, vol 108, n°1.

SCHILKE, P. (2004). *GER- 3569, Advanced gas turbine maintenance and coating*. New York: GE Energy.

Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la décision, ROADEF. (2011). *Le livre blanc de la recherche opérationnelle*. Œuvre collective réalisée sous l'égide de la ROADEF, Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision, par des rédacteurs indépendants issus du monde universitaire et du monde industriel.

WHITE, J., & CASE, K. (n.d.). *On Covering problems and the Central Facilities Location Problem*. Geographical Analysis 6.

Webographie

Web a : <http://www.memoireonline.com/11/13/7905/Gestion-de-stocks-dans-une-entreprise-commerciale.html>

Web b : http://bibliotheque.cesag.sn/gestion/documents_numeriques/M0061MBA-ACG16.pdf

Web c : http://bibliotheque.cesag.sn/gestion/documents_numeriques/M0023MBA-GP16.pdf

Web d : <http://www.logistiqueconseil.org/Articles/Entrepot-magasin/Reapprovisionnement-stock.htm>

Web e : <http://www.logistiqueconseil.org/Articles/Logistique/Conteneurs-dimensions.htm>

Web f : <http://www.limmobilierdunmondequichange.fr/avis-d-experts/differents-equipements-stockage-entrepot-magasin/>

Web g : <http://www.logistiqueconseil.org/Articles/Entrepot-magasin/Rangement-stockage.htm>

Web h : https://fr.wikipedia.org/wiki/General_Electric

Annexes

Annexe II.1. Méthode de classification ABC.....	04
Annexe II.2. Formule de Wilson.....	05
Annexe III.1. Programme P-médian.....	06
Annexe III.2. Programme FCLP.....	08
Annexe III.3. Programme en C# (C sharp) servant à la détermination du nombre optimal de conteneurs.....	09
Annexe III.4. Tableau des coefficients d'injection d'eau/vapeur (M&K).....	15
Annexe III.5. Courbe de facteur de sévérité de démarrage en fonction pourcentage de charge.....	16
Annexe III.6. Planning d'affectation et de réapprovisionnement des quinze (15) conteneurs..	16
Annexe III.7. Historique des maintenances correctives effectuées sur les deux turbines 9FA de la centrale électrique SKS.....	18

Annexes du Chapitre II

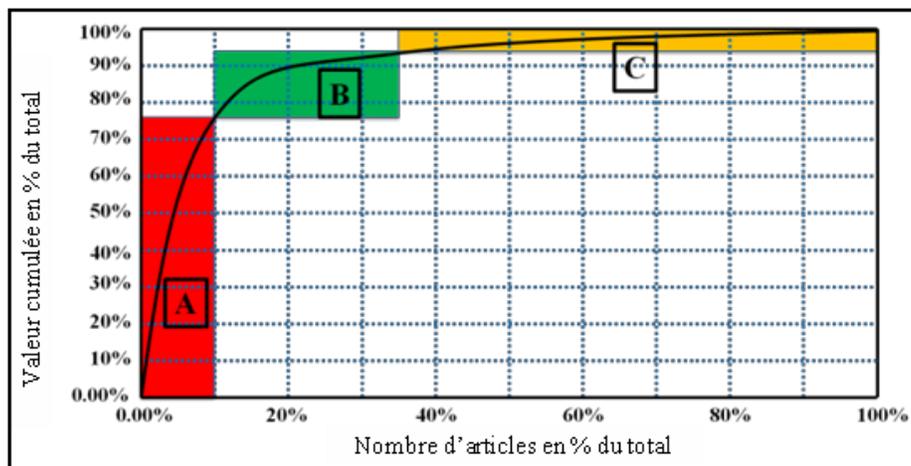
Annexe II.1. Méthode de classification ABC

La méthode ABC est une méthode d'analyse des stocks selon un critère déterminé. Le but de l'analyse est de classer les articles en trois classes homogènes d'importance décroissante nommées A, B et C.

Les étapes d'une classification ABC sont comme suit :

- Déterminer la valeur du critère pour chaque article (i) du stock (W_i).
- Etablir la liste par ordre décroissant des articles associés à la valeur du critère.
- Calculer la valeur cumulée du critère (W)
- Calculer le pourcentage cumulé de la valeur du critère et du nombre des articles.
- Déterminer la classe des articles (**A**, **B** ou **C**) selon la loi des 20/80 (Pareto):
 - Entre 10% et 20% d'articles font entre 60% et 80% de la valeur totale (tranche **A**).
 - Entre 20% et 30 % d'articles font entre 20% et 30% de la valeur total (tranche **B**).
 - Entre 60% et 80% des articles font entre 10% et 20% de la valeur totale du critère (tranche **C**).

La figure suivante permet de visualiser les tranches A, B et C :



La catégorie A est constituée des produits stratégiques, elle nécessite un suivi très fréquent, une évaluation fréquente de la politique de gestion et la mise en œuvre de systèmes d'alertes.

La catégorie B est constituée de produits moins importants que ceux de la catégorie A, nécessitant un suivi moins fréquent et la mise en place des systèmes d'alertes.

La catégorie C nécessite un contrôle peu fréquent, elle suit dans la majorité des cas un réapprovisionnement automatique.

Annexe II.2. Formule de Wilson

II.1.6. Hypothèses de travail :

- La demande (N) est connue et constante au cours du temps ;
- Aucune restriction sur les quantités à commander ;
- Pas de remise (valeur fixe du coût d'un article) et les coûts sont fixes ;
- Le délai de livraison (D) est nul et la quantité commandée est livrée d'un seul coup ;
- L'article est traité indépendamment des autres et il n'y a pas de rupture de stock.

Les coûts considérés sont le coût de commande (C_c) et le coût de possession (C_p). Les coûts de stock sont donnés comme suit :

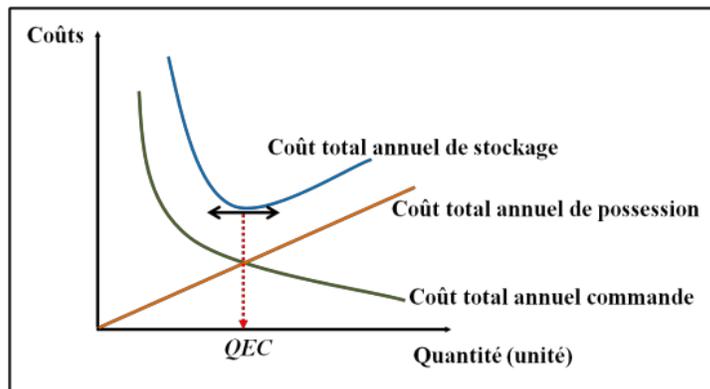
<i>Coûts</i>	<i>Coût d'Achat (Ca)</i>	<i>Coût de Commande (Cc)</i>	<i>Coût de Possession(Cp)</i>
<i>Formule</i>	$N \times a$	$(N/Q) \times C_c$	$(Q/2) \times t \times a$

Où :

- N : demande annuelle ;
- Q : quantité à commander ;
- C_c : coût de lancement d'une commande ;
- a : coût d'achat unitaire ;
- t : taux du coût de possession.

Le stock moyen est de $(Q/2)$. La valeur moyenne du stock est donc égale à $(Q/2) \times a$.

Le coût des stocks suit la courbe représentée dans la figure ci – dessous :



Le calcul de la QEC se fait en minimisant la fonction coût total (C_t); $C_t = C_a + C_c + C_p$

On obtient les résultats suivants :

➤ Quantité Economique à Commander : $QEC = \sqrt{\frac{2 N C_t}{a t}}$

➤ Période Economique entre deux commandes : $TEC = \sqrt{\frac{2 C_t}{N a t}}$

Annexes du Chapitre III

Annexe III.1. Programme P-médian

a. Fichier de données

```

/*****
* OPL 12.6.0.0 Data
* Author: 212610643
* Creation Date: May 18, 2017 at 10:04:41 AM
*****/

```

```

P=3;
SheetConnectionMs ("BookP.xlsx");

```

```

jfromSheetRead (Ms, "Insatallations");
kfromSheetRead (Ms, "setofdemand");
dfromSheetRead (Ms, "Distances");
hfromSheetRead (Ms, "demandes");
xtoSheetWrite (Ms, "Resultat1");
ytoSheetWrite (Ms, "Resultat2");

```

b. Programme

```

/*****
* OPL 12.6.0.0 Model
* Author: 212610643
* Creation Date: May 18, 2017 at 10:04:41 AM
*****/

// indices

{string} j =...;
{string} k =...;

//paramètres
int h[k]=...;
float d[j][k]=...;
float P=...;

//variables

dvar boolean x[j];
dvar boolean y[j][k];

minimize (sum(b in j) sum(c in k) h[c]*d[b][c]*y[b][c]);

subject to {
  constraint1:
  sum(b in j) x[b] <= P;

  forall (c in k)

  constraint2 :
  sum(b in j) y[b][c]==1;

  forall (b in j)
  forall(c in k)
  constraint3:
  y[b][c] <= x[b];
}
```

Annexe III.2. Programme FCLP

c. Fichier de données

```

/*****
* OPL 12.6.0.0 Data
* Author: 212610643
* Creation Date: May 17, 2017 at 4:24:03 PM
*****/
a= 108.284;
SheetConnectionMs ("BookS.xlsx");

jfromSheetRead (Ms,"Installations");
ffromSheetRead (Ms,"Couts");
kfromSheetRead (Ms,"setofdemand");
dfromSheetRead (Ms,"Distances");
hfromSheetRead (Ms,"Demandes");
vfromSheetRead (Ms,"Capacités");
xtoSheetWrite (Ms,"Resultat1");

ytoSheetWrite (Ms,"Resultat2");

```

a. Programme

```

/*****
* OPL 12.6.0.0 Model
* Author: 212610643
* Creation Date: May 17, 2017 at 4:24:03 PM
*****/
/*****
* OPL 12.6.0.0 Model
* Author: 212610643
* Creation Date: May 13, 2017 at 10:10:47 AM
*****/

// indices
{string} j =...;
{string} k =...;

//paramètres
float v[j]=...;
float f[j]=...;
int h[k]=...;
float d[j][k]=...;
float a=...;

//variables
dvar boolean x[j];
dvar boolean y[j][k];

```

```

minimize (sum(b in j) f[b]*x[b] + a*sum(b in j, c in k) h[c] * d[b][c] * y[b][c]);

subject to {

forall (c in k)
  constraint1:
  sum(b in j) y[b][c]==1;

forall (c in k)
  constraint2:
  sum (b in j) h[c]*y[b][c] <= sum (b in j) v[b]*x[b];

forall (b in j)
  forall(c in k)
  constraint3:
  y[b][c] <= x[b];

}

```

Annexe III.3. Programme en C# (C sharp) servant à la détermination du nombre optimal de conteneurs

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Runtime.InteropServices;
using Microsoft.Office.Interop.Excel;
namespace Souad
{
  class Program
  {
    /// <summary>
    /// Container with its DaysUse, Availability, and Availability Date
    /// </summary>
    public struct ContDaysUseAvailability
    {

```

```
public int daysUse;
public bool availability;
public DateTime? availabilityDate;

public ContDaysUseAvailability(int du, bool a, DateTime? ad)
{
    daysUse = du;
    availability = a;
    availabilityDate = ad;
}
}

/// <summary>
/// Collect the dates from an excel file
/// </summary>
/// <param name="filePath">Path of the Excel File</param>
/// <param name="sheet">Sheet with the wanted dates</param>
/// <param name="columns">Excel columns with the wanted dates</param>
public static List<DateTime> CollectDates(string filePath, int sheet, string[] columns)
{
    var dates = new List<DateTime>();
    Application xlApp = new Application();

    try
    {
        Workbook xlWorkBook = xlApp.Workbooks.Open(filePath, 0, true, 5, "", "", true,
        XlPlatform.xlWindows, "\t", false, false, 0, true, 1, 0);
        Worksheet xlWorkSheet = xlWorkBook.Sheets[sheet];
        Range range = xlWorkSheet.UsedRange;
```

```
foreach (var column in columns)
{
    for (int i = 1; i <= range.Rows.Count; i++)
    {
        if (!xlApp.Rows[i].Hidden)
        {
            var date = (range.Cells[i, column] as Range).Value;

            if (date != null && date.GetType() == typeof(DateTime))
            {
                dates.Add(date.Date);
            }
        }
    }
}

xlWorkbook.Close(false, filePath, null);
xlApp.Quit();

Marshal.ReleaseComObject(xlWorksheet);
Marshal.ReleaseComObject(xlWorkbook);
Marshal.ReleaseComObject(xlApp);

dates.Sort();
}
catch (Exception ex)
{
    Console.WriteLine(ex.Message);
Console.ReadLine();
}
```

```
    return dates;
}

/// <summary>
/// Get the number of the needed containers
/// </summary>
/// <param name="dates">The wanted dates</param>
/// <param name="contMaxDaysUse">Max DaysUse for each Cont</param>
/// <returns></returns>
public static int getCountConts(List<DateTime> dates, int contMaxDaysUse)
{
    // List of Conts wit their DaysUse and their Availability
    var contsDaysUseAvailability = new List<ContDaysUseAvailability>();

    DateTime? datePrec = null;

    foreach (var date in dates)
    {
        if (datePrec != null)
        {
            // Period in days from the previous date
            var periodInDays = (date - datePrec).Value.Days;

            // New Date : Update DaysUse and Availability for each Cont
            if (periodInDays != 0)
            {
                contsDaysUseAvailability = contsDaysUseAvailability.Select(c =>
                {
                    if (c.daysUse + periodInDays >= contMaxDaysUse && !c.availability)
                    {

```

```

        c.daysUse = 0;
        c.availability = true;
    }
    else if (!c.availability)
    {
        c.daysUse = periodInDays + c.daysUse;
    }
    return c;
}).ToList();
}

// If there is no available Cont
if (!contsDaysUseAvailability.Any(c => c.daysUse == 0 && c.availability))
{
    // Add one occupied Cont (used 0 days so far, and available in contMaxDaysUse)
    contsDaysUseAvailability.Add(new ContDaysUseAvailability(0, false,
date.AddDays(contMaxDaysUse)));
}
else
{
    // Update one of the free Conts's Availability
    contsDaysUseAvailability.Remove(contsDaysUseAvailability.Last(c =>
c.daysUse == 0 && c.availability));
    contsDaysUseAvailability.Add(new ContDaysUseAvailability(0, false,
date.AddDays(contMaxDaysUse)));
}
}
else
{
    // Add one occupied Cont (used 0 days so far, and available in contMaxDaysUse)

```

```

        contsDaysUseAvailability.Add(new ContDaysUseAvailability(0, false,
date.AddDays(contMaxDaysUse)));
    }

    datePrec = date;
}
return contsDaysUseAvailability.Count;
}
static void Main(string[] args)
{
    // Max DaysUse for each Cont
    int contMaxDaysUse = 0;
    Console.WriteLine("How many days does a Container need to be locked ?");
    while (!Int32.TryParse(Console.ReadLine(), out contMaxDaysUse))
    {
        Console.WriteLine("The number of days must be an Integer !");
    }

    // Retrieve the informations about the dates : The location of the Excel file, Sheet, and
Columns
    Console.WriteLine("\nEnter the Excel File Path :");
    var excelFile = Console.ReadLine();

    Console.WriteLine("\nIn which Sheet are the dates ? (It has to be an Integer)");
    var sheetTemp = Console.ReadLine();
    var sheet = Convert.ToInt32(sheetTemp.Trim());

    Console.WriteLine("\nIn which columns are the dates ? (If there is more than 1, separate
the columns by a comma \",\")");
    var columnsTemp = Console.ReadLine();
    var columns = columnsTemp.Split(',').Select(c => c.Trim()).ToArray();

```

```

Console.WriteLine("\n.....\n");

// Collect all the dates from the Excel File
var dates = CollectDates(excelFile, sheet, columns);

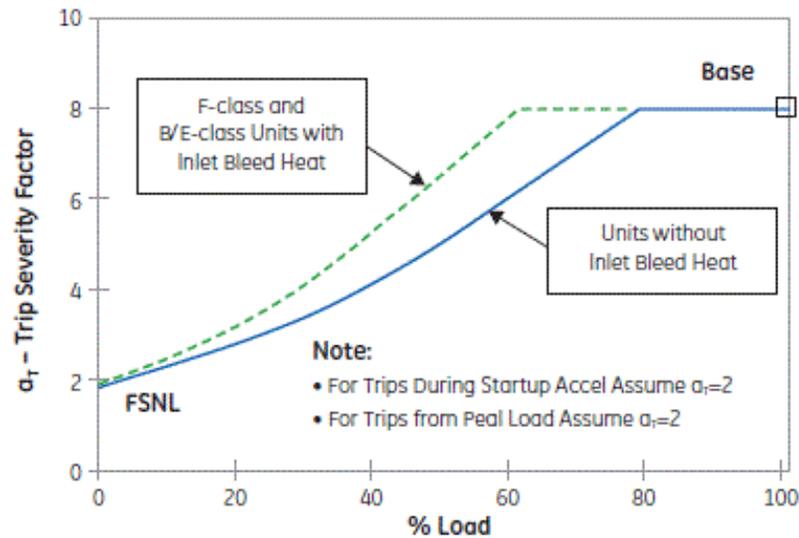
if (dates.Count > 0)
{
    // Return all the dates for a last check
    dates.ForEach(d => Console.WriteLine(d.Date.ToString("d")));

    // Return the number of the used Conts
    var countConts = getCountConts(dates, contMaxDaysUse);
    Console.WriteLine("\n=> We need " + countConts + " containers");
}

```

Annexe III.4. Tableau des coefficients d'injection d'eau/vapeur (M&K)

M	K	Control	Steam Injection	S2N/S3N Material
0	1	Dry	<2.2%	All
0	1	Dry	>2.2%	Non-FSX-414
0.18	0.6	Dry	>2.2%	FSX-414
0.18	1	Wet	>0%	Non-FSX-414
0.55	1	Wet	>0%	FSX-414

Annexe III.5. Courbe de facteur de sévérité de démarrage en fonction pourcentage de charge**Annexe III.6.** Planning d'affectation et de réapprovisionnement des quinze (15) conteneurs

Le tableau suivant représente le planning des réapprovisionnements des conteneurs.

N'ayant pas été autorisées à divulguer les dates prévisionnelles des maintenances, nous avons retiré les dates correspondant à ces dernières. Nous avons cependant maintenu le code couleurs des cases, pour distinguer une HGPI (bleu ciel), d'une MI (verre pistache).

Le calcul des dates de re-complètement s'effectue comme suit :

-Date à laquelle le conteneur est prêt lorsqu'il a été complété immédiatement après utilisation = Date de la maintenance effectuée + 105 jours (rose)

-Date de lancement du re-complètement différé = Date de la prochaine utilisation - 75 jours (verre bouteille)

-Date de re-complètement pour que le conteneur fasse office de conteneur de secours : Déterminée par le planning des disponibilités. (Violet)

Aussi, étant donné que les dates prévisionnelles sont la base du calcul du planning des réapprovisionnement, nous avons procédé à une modification des délais logistiques, de sorte à ce que les dates retirées ne puissent être déduites. Ainsi, nous avons biaisé le planning en procédant à la modification des délais logistiques :

$$D1 = 105 + x \text{ \& } D2 = 75 + x$$

Où : $D1$ et $D2$: Nouveaux délais logistiques

x : Facteur garantissant la confidentialité des dates

CONTENEURS	SITES	Column1	DATES	DATES2	DATES3	DATES4	DATES5	DATES6	DATES7	DATES8	DATES9	DATES10	DATES11
Premier	SITE A		24-Dec-17	9-Mar-18	22-Jun-18								
	SITE B			11-Sep-19	25-Nov-19	9-Mar-20							
	SITE C					9-Mar-20	22-Jun-20						
	SITE A					27-Dec-20	12-Mar-21	25-Jun-21					
	SITE D							5-Jul-21	18-Oct-21				
	SITE E								18-Nov-21	3-Mar-22			
	SITE C									9-Mar-22	22-Jun-22		
SITE F										15-Jan-23	29-Jul-23	11-Nov-23	
SITE G											11-Nov-23	21-Oct-24	3-Feb-25
Second	boufarik		20-Oct-19										
	boutlelis			9-Feb-21		19-Jun-21							
	kais							2-Oct-21					
	oumache									6-Feb-22			
	boufarik												
	djelfa									16-Jun-23			
naama										01-Sep-24			
Troisième	boufarik		21-Oct-19										
	skikda			18-Feb-21		28-Jun-21							
	bellara							17-Oct-21					
	naama									6-Feb-22			
	hrm2												
	kais									24-Jun-23			
mostaganem										26-Nov-23			
Quatrième	boufarik		22-Jan-20										
	djelfa			2-May-21		9-Sep-21							
	naama												
	mostaganem					30-Oct-22							
	kais							24-Jun-23					
mostaganem									14-May-25				
Cinquième	hrm2		23-Jan-20										
	boutlelis			12-May-21		19-Sep-21							
	hrm2												
	mostaganem					30-Oct-22							
	djelfa							3-Apr-23					
mostaganem									14-Jun-25				
Sixième	kais		18-Mar-18			2-Oct-21							
	hrm1												
	mostaganem					30-Nov-22							
	bellara							4-May-23					
	mostaganem									14-Jun-25			
Septième	bellara		18-Mar-18			17-Oct-21							
	boufarik												
	mostaganem					30-Nov-22							
Huitième	bellara									10-Aug-23			
	djelfa		16-Jun-21			24-Oct-21							
	boufarik												
Neuvième	oumache							22-Mar-23					
	kais		24-Jun-21			1-Nov-21							
	hrm1												
Dixième	boutlelis					9-Feb-23							
	oumache							14-Jul-23					
	kais		24-Jun-21			1-Nov-21							
	oumache												
Onzième	djelfa		2-Jul-21			9-Nov-21							
	oumache												
	boutlelis					12-May-23				19-Sep-23			
	hrm1												
Douzième	bellara		10-Aug-21										
	djelfa					12-Jan-22				23-Sep-23			
	oumache												
Treizième	bellara		10-Aug-21										
	kais					12-Jan-22				2-Oct-23			
	oumache												
Quatorzième	naama		31-Mar-21										
	kais					25-May-23							
	naama									25-Jul-24			
Quinzième	naama		15-Apr-21										
	bellara					9-Jun-23							
	naama									25-Jul-24			

Annexe III.7. Historique des maintenances correctives effectuées sur les deux turbines 9FA de la centrale électrique SKS

Date	Turbine à gaz n°1	Turbine à gaz n°2	Total	Commentaire
Feb-14	2	0	2	<i>Incident turbine n°1: Necessite des NCPs</i> <i>Incident turbine n°2: Ne necessite pas de NCPs</i>
Apr-14	1	1	2	<i>Incident turbine n°1: Ne necessite pas de NCPs</i> <i>Incident turbine n°2: Ne necessite pas de NCPs</i>
May-14	0	1	1	<i>Incident turbine n°2: Ne necessite pas de NCPs</i>
Jan-15	2	0	2	<i>Incidents turbine n°1: Ne necessitent pas de NCPs</i>
Feb-15	2	0	2	<i>Incidents turbine n°1: Ne necessitent pas de NCPs</i>
Mar-15	1	0	1	<i>Incident turbine n°1: Ne necessite pas de NCPs</i>
Apr-15	1	0	1	<i>Incident turbine n°1: Necessite des NCPs</i>
May-15	0	1	1	<i>Incident turbine n°2: Ne necessite pas de NCPs</i>
Oct-15	1	1	2	<i>Incident turbine n°1: Ne necessite pas de NCPs</i> <i>Incident turbine n°2: Ne necessite pas de NCPs</i>
Nov-15	2	1	3	<i>Incident turbine n°1: Ne necessite pas de NCPs</i> <i>Incident turbine n°2: Necessite des NCPs</i>
Feb-16	3	0	3	<i>Incident turbine n°1: Necessite des NCPs</i>
Mar-16	1	0	1	<i>Incident turbine n°1: Ne necessite pas de NCPs</i>
April 2016	3	5	8	<i>Incident turbine n°1: Ne necessite pas de NCPs</i> <i>Incident turbine n°2: Ne necessite pas de NCPs</i>
June 2016	0	2	2	<i>Incident turbine n°2: Ne necessite pas de NCPs</i>
Oct-16	1	0	1	<i>Incident turbine n°1: Ne necessite pas de NCPs</i>
Dec 2016	2	0	2	<i>Incident turbine n°1: Ne necessite pas de NCPs</i>
Jan-17	1	3	4	<i>Incident turbine n°1: Ne necessite pas de NCPs</i> <i>Incident turbine n°2: Ne necessite pas de NCPs</i>
March 2017	0	1	1	<i>Incident turbine n°1: Necessite des NCPs</i>