



**HAL**  
open science

# Optimisation de la gestion du service de maintenance biomédicale

Zeineb Ben Houria

► **To cite this version:**

Zeineb Ben Houria. Optimisation de la gestion du service de maintenance biomédicale. Ingénierie biomédicale. Université de Lyon; Université de Sfax (Tunisie), 2016. Français. NNT : 2016LYSES057 . tel-01971622

**HAL Id: tel-01971622**

**<https://theses.hal.science/tel-01971622>**

Submitted on 7 Jan 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

République Tunisienne  
Ministère de l'Enseignement  
Supérieur, de la Recherche  
Scientifique

Université de Sfax  
École Nationale d'Ingénieurs de Sfax

Université De Lyon  
Université Jean Monnet De Saint-  
Etienne



*Ecole Doctorale  
Sciences et Technologies*

Thèse de *DOCTORAT*  
En *Génie Mécanique*

*Ecole Doctorale  
De Saint-Etienne*

Thèse de *DOCTORAT*  
En *Génie Industriel*  
N° d'ordre : 203– 2016

---

# THESE en COTUTELLE

*En vue de l'obtention du*

**DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE SFAX**

Discipline : *Génie Mécanique*

*et*

**DOCTORAT DE L'UNIVERSITE JEAN MONNET DE**

**SAINT-ETIENNE**

Discipline : *Génie Industriel*

*Présentée à*

**L'École Nationale d'Ingénieurs de Sfax**

*Par*

**Zeineb BEN HOURIA**

Ingénieur en Génie Industriel

---

## **Optimisation de la gestion du service de maintenance biomédicale**

---

*Soutenu le 21 Novembre 2016, devant le jury composé de :*

<b>M.</b>	<b>Mohamed HADDAR</b> (Professeur, ENIS, Université de Sfax, Tunisie)	Président
<b>M.</b>	<b>Anis CHELBI</b> (Professeur, ENSIT, Université Tunis El Manar, Tunisie)	Rapporteur
<b>M.</b>	<b>Farouk YALAOUI</b> (Professeur, Université de Technologies de Troyes, France)	Rapporteur
<b>Mme.</b>	<b>Diala DHOUIB</b> (Maitre de conférences, ISGI, Université de Sfax, Tunisie)	Examineur
<b>M.</b>	<b>Ahmad AL HANBALI</b> (Maitre de conférences, Université de Twente, Pays Bas)	Examineur
<b>M.</b>	<b>Faouzi MASMOUDI</b> (Professeur, ENIS, Université de Sfax, Tunisie)	Directeur de Thèse
<b>M.</b>	<b>Malek MASMOUDI</b> (Maitre de Conférences, Université Jean Monnet, France)	Co-Directeur de Thèse
<b>M.</b>	<b>François Guillet</b> (Professeur, Université Jean Monnet, France)	Invité

# *Dédicaces*

*Certes ma prière, mon sacrifice, ma vie et ma mort sont pour Allah*

*Le Seigneur des mondes, Il n'a aucun associé*

*Le Coran Al-Karim*

*Je dédie ce manuscrit à mes parents pour leur soutien indéfectible. Ils ont été mes plus grands conseillers. Leurs prières et leurs bénédictions m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Je leur dois tout mon succès.*

*Une pensée particulière à mon mari Zied qui m'a toujours soutenu. Je le remercie pour sa patience, sa compréhension, sa confiance et l'énergie qu'il m'a donnée pour poursuivre mes études. Que dieu réunisse nos chemins pour un long commun serein et que ce travail soit témoignage de ma reconnaissance et de mon amour sincère et fidèle.*

*Un grand merci à mes frères, ma sœur et mes amis pour leur soutien moral.*

*Je remercie mes beaux-parents ainsi que toute la famille pour l'amour qu'ils m'ont témoigné pendant cette période.*

*Enfin, je dédie ce manuscrit à la mémoire de mes défunts grands-parents et ma tante. Que Dieu, le miséricordieux, les accueille dans son éternel paradis.*

*Un grand Merci pour tout et cette thèse leur est dédiée !*

# REMERCIEMENTS

Tous mes remerciements à Dieu d'abord, puis à mon Directeur de Thèse, Monsieur **Faouzi MASMOUDI**, Professeur au Département Génie Mécanique de l'ENIS (Sfax, Tunisie), pour la confiance qu'il m'a accordé en acceptant d'encadrer mes travaux, pour m'avoir conseillé, encouragé et soutenu avec patience tout au long de cette thèse.

J'adresse mes vifs remerciements à mon co-directeur de thèse, Monsieur **Malek MASMOUDI**, Maître de Conférences à l'Université Jean Monnet (Saint Etienne, France), pour m'avoir encadré et bien orienté pour la réussite de cette thèse. Je suis reconnaissante pour sa disponibilité, son aide précieuse et la qualité de sa supervision, je lui adresse toute ma gratitude.

Je remercie infiniment Monsieur **Ahmad AL HANBALI**, Maître de Conférences à l'Université de Twente (Enschede, Pays Bas), pour m'avoir accueilli au sein de son département. Je salue ses qualités scientifiques et ses conseils judicieux.

J'exprime ma sincère reconnaissance à Monsieur **Farouk YALAOUI**, Professeur des universités et directeur du laboratoire LOSI à l'université de Technologies de Troyes (UTT) ainsi qu'à Monsieur **Anis CHELBI**, Professeur de l'enseignement supérieur à l'université de Tunis, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Tunis (ENSIT), pour avoir accepté de juger ce travail en qualité de rapporteur.

Je remercie très vivement Madame **Diala DHOUIB**, Maître de conférences à l'ISGI de Sfax et directrice du laboratoire LOGIQ, pour le crédit qu'elle a bien voulu accorder à mon travail en participant au jury de cette thèse.

Je remercie Monsieur **Mohamed HADDAR**, Professeur et directeur du Laboratoire « La2MP », pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire et accordé l'atmosphère convenable à la recherche.

Je tiens à remercier Monsieur **François GUILLET**, Directeur adjoint au Laboratoire « LASPI », pour m'avoir accueilli au sein de laboratoire LASPI et accepté de faire partie du Jury. Je remercie aussi Monsieur **Mohamed EL BADAoui**, Professeur des universités à l'UJM (Saint-Étienne, France) et Directeur du Laboratoire LASPI.

Je voudrais remercier Monsieur **Omor LOUHICHI**, Directeur du service maintenance de l'hôpital Habib Bourguiba de Sfax et tous le personnels de ce service pour leurs soutien technique.

Au cours de mes travaux de recherche, j'ai eu la chance de travailler toujours dans une atmosphère agréable. Un très grand merci à Madame **Michelle BILLET** qui s'est occupée de nous. Je voudrais remercier tous mes amis et mes collègues de « La2MP » et de « LASPI », pour l'ambiance sympathique et les bons moments passés en leur compagnie. En particulier, je tiens à remercier Thameur Kidar, Donald Rotimbo, Mourad Lamraoui et Fatima Ezzahra Hamdani.

Enfin, veuillez trouver ici l'expression de mes estimations et mon profond respect.

*Zeineb BEN HOURIA*

*21 Novembre 2016*

## RESUME

Le milieu hospitalier est un monde à la fois sensible et complexe, sensible parce que la vie humaine est en jeu et complexe parce que les équipements médicaux augmentent en nombre et en complexité technique. Ainsi, afin de préserver le bon état de fonctionnement de ces équipements et à un niveau élevé de disponibilité, leur entretien est devenu l'une des préoccupations majeures des responsables de l'hôpital.

L'objectif de cette thèse est de proposer, aux responsables de maintenance biomédicale dans les établissements de soins, des outils d'aide à la décision qui permettent une meilleure maîtrise des coûts. Ceci en assurant la sécurité des patients et des utilisateurs et en maintenant des performances optimales de l'ensemble des équipements médicaux.

Tout d'abord, une heuristique a été proposée pour le choix de l'internalisation ou de l'externalisation de la maintenance et pour la sélection du contrat adéquat. La sélection du contrat est basée sur un ensemble de critères tout en considérant la contrainte du budget disponible. Ensuite, afin d'améliorer la procédure proposée, nous avons proposé des outils d'aide à la décision multicritère pour le choix adéquat d'une stratégie de maintenance. Pour l'étude de la criticité des équipements médicaux et le choix de la maintenance, sept critères ont été étudiés en proposant un couplage de l'approche AHP « Analytical Hierarchy Process » à la technique TOPSIS « Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution ». Comme les experts du service de maintenance présentaient une certaine incertitude dans leurs jugements, nous avons intégré l'évaluation linguistique floue dans l'étude de la criticité des équipements et dans la sélection de la stratégie de maintenance (Fuzzy AHP couplée avec Fuzzy TOPSIS).

Un modèle mathématique MILP a été développé pour la définition des limites de la criticité afin de caractériser les trois stratégies de maintenance. Le bon choix de ces limites permet d'optimiser le coût de la maintenance en respectant le budget disponible. Enfin, un deuxième modèle mathématique MILP a été développé en se basant sur l'heuristique proposée. Ce modèle permet de sélectionner pour chaque équipement, la stratégie de maintenance, internaliser ou externaliser la maintenance et le type du contrat tout en considérant le budget disponible et la charge/capacité du service maintenance.

Mots clés : Equipements médicaux, stratégies de maintenance, multicritère, priorisation, AHP, TOPSIS, ensemble flous, internalisation/ externalisation, modélisation mathématique, MILP.

# ABSTRACT

The hospital is a world that is both sensitive and complex, sensitive because the human life is involved and complex because medical facilities are growing in number and in technical complexity. Then, the problem of the medical equipment maintenance in order to keep them in safe, reliable and with high level of availability has become a major preoccupation of the hospital.

The objective of this thesis is to provide tools to help the biomedical maintenance service of the hospital to make decisions that allow a better control of costs, while ensuring patient and user safety and maintaining optimal performance of medical equipment.

First, a heuristic has been proposed for the choice of internalization or outsourcing maintenance and for the selection of the appropriate contract. The selection of the contract is based on a set of criteria while considering the available budget constraint. Then, to improve the proposed procedure, we proposed multi-criteria decision-making tools to select the appropriate maintenance strategies. Seven criteria have been designed to study the criticality of medical equipment and the choice of maintenance by providing a coupling of the AHP approach "Analytical Hierarchy Process" with TOPSIS technique "Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution." As the expert judgments of the maintenance department presented some uncertainty, we integrated the fuzzy language assessment of the criticality of the equipment and the selection of the maintenance strategy (Fuzzy AHP coupled with Fuzzy TOPSIS).

A mixed integer linear programming model (MILP) was developed to define thresholds of criticality to characterize the three maintenance strategies. According to these thresholds, maintenance cost can be optimized within the available budget. Finally, a second mixed integer linear programming model (MILP) was developed based on the proposed heuristic. This model allows selecting for each equipment, the maintenance strategy, the internalization or the outsourcing of the maintenance and the type of contract while considering the available budget and the workload / capacity of the maintenance department.

*Keywords:* Medical equipment, maintenance strategies, multi-criteria, prioritization, AHP, TOPSIS, Fuzzy set, internalization/outsourcing, mathematical model, MILP.

# TABLE DES MATIERES

<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 : Contexte et problématique .....</b>	<b>3</b>
1.1. Le contexte hospitalier .....	3
1.2. La maintenance des équipements médicaux .....	4
1.3. Présentation du service de maintenance biomédicale de l'hôpital Habib Bourguiba de Sfax .....	5
1.3.1. <i>Présentation du CHU Habib Bourguiba de Sfax.....</i>	<i>5</i>
1.3.2. <i>Service de maintenance biomédicale CHU Habib Bourguiba de Sfax .....</i>	<i>6</i>
1.3.3. <i>Analyse de pratiques existantes du service maintenance .....</i>	<i>6</i>
a. <i>Évolution des dépenses en fonction du temps.....</i>	<i>7</i>
b. <i>Les interventions du service maintenance biomédicale pour tous les équipements</i>	<i>7</i>
c. <i>Étude de la criticité des services par causes de pannes .....</i>	<i>9</i>
d. <i>Etude de la criticité des équipements médicaux.....</i>	<i>10</i>
1.3.4. <i>Analyse des données pour le respirateur d'anesthésie de type « DRAGER JULIAN » .....</i>	<i>10</i>
a. <i>Analyse de disponibilité en fonction de la période de maintenance préventive ....</i>	<i>11</i>
b. <i>Analyse de coût de maintenance corrective par période de la maintenance préventive : .....</i>	<i>17</i>
1.4. Conclusion .....	19
<b>Chapitre 2 : Etat de l'art.....</b>	<b>20</b>
2.1. La maintenance des équipements médicaux .....	20
2.1.1 <i>Présentation de la maintenance .....</i>	<i>20</i>
2.1.2 <i>Les différentes stratégies de maintenance .....</i>	<i>21</i>
2.1.3 <i>Les différents modes de maintenance .....</i>	<i>23</i>
a. <i>La maintenance en interne.....</i>	<i>23</i>
b. <i>La maintenance en externe intégrale .....</i>	<i>23</i>
c. <i>La maintenance externe partagée .....</i>	<i>24</i>
2.2. Optimisation de la maintenance biomédicale .....	24
2.3. Priorisation et classification des équipements médicaux.....	27



2.4.	Classification des méthodes d'aide à la décision multicritère .....	31
2.5.	Externalisation de la maintenance biomédicale .....	33
2.2.	Conclusion .....	37
<b>Chapitre 3 : Procédure du choix de la stratégie de maintenance.....</b>		<b>38</b>
3.1.	Nouvelle procédure de décision.....	39
3.1.1.	<i>Première étape</i> .....	41
a.	Degré de complexité de la maintenance (1 <sup>er</sup> critère : A).....	42
b.	La fonction (2 <sup>ème</sup> critère : B) .....	43
c.	Risque (3 <sup>ème</sup> critère : C).....	43
d.	Degré d'importance de la mission (4 <sup>ème</sup> critère : D) .....	44
e.	Age (5 <sup>ème</sup> critère : E) .....	45
f.	Criticité (G) .....	45
3.1.2	<i>Deuxième étape</i> .....	46
a.	Compétence par niveau de maintenance (H).....	46
b.	Estimation de la charge annuelle par niveau par stratégie de maintenance par équipement (I).....	46
c.	Estimation de l'équipe nécessaire (technicien/ingénieur) par niveau (J).....	47
d.	Coût par heure (K).....	47
e.	Coût de la main d'œuvre (L).....	47
3.1.2.	<i>Troisième étape</i> .....	49
3.1.3.	<i>Quatrième étape</i> .....	51
a.	Valeur monétaire des pièces de rechange (F).....	52
b.	Fréquence des défaillances complexes (O) .....	52
3.2.	Conclusion .....	54
<b>Chapitre 4 : Etude de la criticité des équipements médicaux en utilisant des approches multicritère.....</b>		<b>55</b>
4.1.	Modèle de priorisation des équipements médicaux .....	55
4.1.1.	<i>Etablissement de la structure hiérarchique de problème</i> .....	55
4.1.2.	<i>Calcul des poids des critères et sous critères</i> .....	59
4.1.3.	<i>Application de la méthode AHP</i> .....	60
4.2.	Classification des stratégies de maintenance .....	63

4.3.	Intégration de la logique floue dans l'application de l'AHP et TOPSIS .....	69
4.3.1.	<i>Exploitation de l'AHP Floue</i> .....	69
a.	Définition d'un nombre flou .....	69
b.	Calcul des poids des critères et sous critères.....	71
4.3.2.	<i>Exploitation de TOPSIS Floue</i> .....	74
4.4.	Conclusion .....	77
<b>Chapitre 5 : Choix des stratégies de maintenance, internalisation/externalisation .....</b>		<b>79</b>
5.1.	Sélection de la stratégie de maintenance en utilisant le modèle mathématique MILP .....	80
5.1.1.	<i>Modélisation du problème</i> .....	80
5.1.2.	<i>Les résultats expérimentaux du modèle mathématique</i> .....	83
5.1.3.	<i>Etude de sensibilité du modèle mathématique</i> .....	85
5.2.	Modélisation mathématique globale de problème de maintenance biomédicale .....	86
5.2.1.	<i>Les hypothèses du modèle</i> .....	86
5.2.2.	<i>Les Indices</i> .....	87
5.2.3.	<i>Les paramètres</i> .....	87
5.2.4.	<i>Les variables de décision</i> .....	89
5.2.5.	<i>Les variables auxiliaires</i> .....	89
5.2.6.	<i>Modélisation mathématiques</i> .....	90
5.2.7.	<i>Linéarisation du modèle mathématique</i> .....	92
5.2.8.	<i>Les résultats numériques</i> .....	94
5.3.	Conclusion .....	96
<b>Conclusions et perspectives .....</b>		<b>97</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>		<b>99</b>
<b>Annexes.....</b>		<b>108</b>

# LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Évolution des dépenses au cours du temps en DT .....	7
Figure 1.2 La fréquence d'interventions selon la stratégie de maintenance.....	8
Figure 1.3 Le pourcentage de la maintenance corrective par causes de pannes.....	8
Figure 1.4 Le nombre d'interventions par service critique par causes de pannes .....	9
Figure 1.5 Le pourcentage du taux d'intervention sur les équipements médicaux .....	10
Figure 1.6 Evolution du nombre moyen de MC par période de MP .....	16
Figure 1.7 Evolution du nombre moyen des jours d'immobilisation en fonction de la période de MP.....	16
Figure 1.8 Répartition du coût de maintenance total en fonction de jours d'immobilisation du respirateur d'anesthésie DRAGER.....	18
Figure 1.9 Evolution du coût moyen de maintenance corrective en fonction de la période de maintenance préventive .....	19
Figure 2.1 Les différentes stratégies de maintenance.....	22
Figure 2.2 Classification des recherches de l'organisation de la maintenance des équipements médicaux de 1989 à 2014 .....	22
Figure 2.3 Les méthodes d'aide à la décision multicritère .....	31
Figure 3.1 Schéma de la procédure d'aide à la décision proposée (les valeurs G, O, L et F sont expliquées dans les parties suivantes) .....	40
Figure 4.1 La structure hiérarchique pour la sélection de stratégie de maintenance.....	58
Figure 4.2 Le classement des stratégies de maintenance en fonction de leur proximité relative .....	67
Figure 4.3 Classement des stratégies de maintenance en intégrant le coût .....	68
Figure 4.4 Définition d'un nombre flou triangulaire, Hsieh et al. (2004) .....	70
Figure 4.5 L'échelle de Saaty exprimé en un ensemble flou.....	71
Figure 4.6 Classement des stratégies de maintenance en fonction de leurs coefficients de proximité.....	77
Figure 4.7 Classement des stratégies de maintenance en fonction de leurs coefficients de proximité (avec le sous-critère coût) .....	77
Figure 5.1 Les stratégies de maintenance correspondantes en fonction des seuils .....	80

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1. Les données collectées de l'historique de maintenance pour le respirateur d'anesthésie « DRAGER JULIAN» .....	11
Tableau 1. 2 Calcul du taux de disponibilité et du temps d'arrêt .....	12
Tableau 1. 3 Calcul du taux de disponibilité et du temps d'arrêt pour un respirateur d'anesthésie «DRAGER JULIAN » mis en réforme.....	13
Tableau 1. 4 Les données de Nombre de MC et les jours d'immobilisation total d'un ensemble des respirateurs d'anesthésie de marque DRAGER .....	15
Tableau 1. 5 Répartition du nombre moyen de maintenance corrective et les jours d'immobilisation en fonction de la période de maintenance préventive .....	15
Tableau 1. 6 Répartition du coût total de maintenance en fonction de jours d'immobilisation .....	17
Tableau 1. 7 Répartition du coût moyen de maintenance en fonction du nombre moyen de maintenance corrective et période de maintenance préventive .....	18
Tableau 2.1 Comparaison entre les classes du risque pour quelques équipements médicaux Fennigkoh et Smith (1989), Emergency Care Research Institute (ECRI) et modèle de logique floue, Tawfik et al. (2013).....	29
Tableau 2. 2 Classification des catégories selon le taux de disponibilité.....	30
Tableau 2. 3 Répartition de stratégie de maintenance selon la classe de criticité .....	30
Tableau 2. 4 Comparaison des méthodes d'aide à la décision multicritère (MADM) .....	32
Tableau 3.1 Les critères et sous critères pour le calcul de la criticité .....	42
Tableau 3.2 Degré de complexité de la maintenance .....	43
Tableau 3.3 Les fonctions des équipements médicaux.....	43
Tableau 3.4 Les sous-critères pour le calcul de degré d'importance.....	44
Tableau 3.5 Degré d'importance de la mission .....	45
Tableau 3.6 Etude de la criticité du respirateur d'anesthésie DRAGER JULIEN .....	45
Tableau 3.7 Présence ou non de compétences par niveau de maintenance (1 si oui, 0 si non)	46
Tableau 3.8 Estimation de la charge annuelle par niveau pour le respirateur d'anesthésie DRAGER JULIEN .....	46
Tableau 3.9 Composition de l'équipe nécessaire ( {techniciens, ingénieurs} ) par niveau pour le même respirateur d'anesthésie.....	47
Tableau 3.10 Coût/heure (DT : Dinar Tunisien) par qualification et par sous-traitant .....	47

Tableau 3.11 Procédure de choix d'Internalisation/ externalisation par niveau par équipement .....	48
Tableau 3. 12 Coût par an (DT : Dinar Tunisien) pour le respirateur d'anesthésie par stratégie de maintenance .....	49
Tableau 3.13 Les différents niveaux de criticité et stratégies.....	50
Tableau 3.14 Définition des limites par ressources requises, coût, main d'œuvre et outils pour les stratégies de maintenance.....	50
Tableau 3.15 Matrice triangulaire supérieure pour le coût total de la maintenance selon les limites ( $T_1$ , $T_2$ ).....	51
Tableau 3.16 Les classes selon la valeur monétaire des pièces de rechange.....	52
Tableau 3.17 Niveaux pour le critère O (fréquence de pannes complexes).....	52
Tableau 3.18 Choix de contrat selon les critères G, F, L et O.....	53
Tableau 4.1 Echelle des niveaux d'importance pour la comparaison (Saaty AHP's scale).....	59
Tableau 4.2 Calcul des poids des critères.....	61
Tableau 4.3 Calcul des poids des sous critères (du critère risque).....	61
Tableau 4.4 Calcul des poids des sous critères (du critère Degré d'importance de la mission) .....	61
Tableau 4.5 Les valeurs des poids des critères et sous critères .....	62
Tableau 4.6 Le ratio de cohérence pour la matrice de comparaison des paires de critères .....	62
Tableau 4.7 Les degrés d'importances globales des stratégies de maintenance .....	66
Tableau 4.8 Les solutions idéales positives et négatives correspondantes pour les critères et sous-critères .....	66
Tableau 4.9 Calcul des distances négatives et positives de chaque alternative.....	67
Tableau 4.10 Les nouvelles valeurs des poids avec intégration de sous critère coût de la maintenance .....	67
Tableau 4.11 Les variables linguistiques décrivant les poids des critères.....	71
Tableau 4.12 Matrice de comparaison par paires des critères .....	71
Tableau 4.13 Les résultats numériques de calcul .....	72
Tableau 4.14 Les valeurs BNP et les valeurs de pondération (poids) des critères et des sous critères .....	73
Tableau 4.15 Ratio de cohérence de la matrice de jugements.....	73
Tableau 4.16 Les Variables linguistiques pour le classement de chaque politique de maintenance .....	74
Tableau 4.17 La matrice de performance floue.....	75

Tableau 4.18 La matrice de performance des poids flous .....	75
Tableau 4.19 Mesure des distances .....	76
Tableau 5.1 Temps de calcul pour huit instances différentes.....	83
Tableau 5.2 MILP Résultats pour 2000 équipements médicaux en utilisant le solveur CPLEX .....	84
Tableau 5.3 Résultats de la variation du budget de maintenance disponible .....	85
Tableau 5.4 Les résultats du temps de calcul .....	94
Tableau 5.5 Les résultats numériques du modèle MILP pour 100 équipements (sélection des stratégies de maintenance .....	95
Tableau 5.6 Résultats comparatives du MILP pour 100 équipements médicaux (sélection du mode de maintenance) : internalisation/externalisation et type du contrat .....	96

## Introduction générale

Immergés dans un contexte concurrentiel extrêmement rude, les hôpitaux doivent relever le défi d'une bonne qualité des services, tout en prenant en compte le coût, les délais et la réactivité dans un environnement où la réponse optimale au patient devient le mot d'ordre. En effet, le patient n'est plus captif puisqu'il a désormais le choix entre les différents établissements dans lesquelles il peut se faire soigner. Dans le cadre de cette concurrence, la qualité apparaît comme une variable clé, d'autant plus que l'offre dépasse la demande. Les patients veulent être bien informés sur des éléments "concrets" de la prise en charge et de son organisation pour faire leur propre choix. On assiste alors à une compétition ayant pour enjeu la qualité : l'évaluation est nécessaire pour faire progresser les établissements dans ce domaine

En parallèle, avec l'augmentation de l'utilisation d'équipements médicaux de plus en plus perfectionnés, l'une des préoccupations majeures de l'hôpital est devenue l'entretien de ces équipements et leur maintenance à un bon niveau de fonctionnement, de disponibilité et de performance. Pour cela, ces équipements nécessitent un entretien et un suivi périodique tout au long de leur utilisation. Ainsi, tout établissement de soins doit mettre en place des méthodes de gestion de maintenance.

Des décisions de maintenance efficaces et rentables pourraient être apportées après la compréhension et la mise en œuvre d'un plan de maintenance optimal dans les organisations de santé. Ce plan doit être nécessairement basé sur un équilibre entre la performance, le risque, les apports de ressources et le coût nécessaires à une solution optimale.

Bien que les stratégies et les techniques de maintenance aient été considérablement améliorées au cours des deux dernières décennies, la plupart des hôpitaux et des organismes de santé ne bénéficient pas encore d'une stratégie de maintenance adaptée en comparaison aux autres industries. De plus, on remarque qu'il existe au niveau de ces organismes une maintenance préventive excessive qui s'avère inutile et même aussi nuisible qu'un niveau d'entretien insuffisant. En effet, le temps passé à faire cette maintenance préventive prive l'organisation d'une partie de ses ressources les plus vitales, (Keil, 2008).

La recherche présentée dans cette thèse vise à proposer des méthodes pour aider à choisir la stratégie de maintenance adaptée pour chaque équipement médical, de choisir le mode externalisation ou internalisation des activités de maintenance et de sélectionner le type de

contrat approprié par équipement dans l'objectif est d'améliorer la qualité des soins dispensés et de satisfaire les patients.

Cette thèse est organisée comme suit :

- Dans le chapitre 1, nous présenterons le cadre de notre étude, la problématique, ainsi que l'originalité de notre contribution.
- Dans le chapitre 2, nous présenterons l'étude bibliographique liée à notre problématique.
- Dans le chapitre 3, nous proposerons une heuristique pour le choix de stratégies de maintenance, d'internalisation ou externalisation de la maintenance et de la sélection du contrat adéquat.
- Dans le chapitre 4, nous développerons un modèle permettant la priorisation des équipements médicaux pour les décisions de maintenance. Ce modèle utilise des méthodes multicritère, en premier lieu, pour donner un ordre bien défini de ces équipements selon les scores de criticité et en second lieu, pour proposer une classification des stratégies de maintenance.
- Dans le chapitre 5, deux modèles mathématiques seront développés pour le choix et la sélection de stratégies de maintenance adaptées à chaque équipement et du mode d'internalisation ou d'externalisation de la maintenance.

Enfin nous terminerons par une conclusion générale et les perspectives de la thèse.



## **Chapitre 1 : Contexte et problématique**

Les équipements médicaux sont utilisés pour le diagnostic, le traitement et le suivi des patients, ce sont des éléments indispensables aux hôpitaux. Ils se sont progressivement développés afin d'augmenter les capacités des services de production de soins. Face à la croissance continue de leur nombre et de leur fréquence d'utilisations, il est devenu nécessaire de disposer de méthodes pratiques et des stratégies de management efficaces. Cependant, dans la plupart des pays en voie de développement, la capacité de gérer et de maintenir ces équipements reste assez limitée, (WHO, 1998). Ainsi, l'objectif de ce travail est, tout d'abord, de caractériser les équipements médicaux et les politiques de maintenance déployés dans la littérature, ensuite, de présenter un cas applicatif issu de l'hôpital Habib Bourguiba de Sfax où nous avons analysé les données collectées au service maintenance.

### **1.1. Le contexte hospitalier**

Le milieu hospitalier est un monde à la fois sensible et complexe : sensible, parce que ses activités concernent la santé et la vie humaine qu'on tente de préserver. La sécurité et la qualité des soins sont donc des exigences fondamentales. Complexe, parce que son organisation et son fonctionnement confrontent plusieurs pouvoirs : le pouvoir politique avec le conseil d'administration, le pouvoir administratif avec la direction de l'hôpital, le pouvoir médical avec le comité médical d'établissement et le pouvoir paramédical avec la direction du service des soins infirmiers, (Coulibaly et al. 2001).

Durant ces dernières années, les établissements de soins ont connu une évolution importante. Elles doivent satisfaire aux besoins de santé des patients qui évoluent sans cesse. Une montée de la concurrence entre les hôpitaux est alors apparue. En effet, le patient a le choix entre les différents établissements de soins pour se faire soigner. Il exige d'être informé sur le coût, les délais, l'efficacité ou l'efficience et le niveau de la qualité atteints par les différents établissements. D'après Jlassi (2011), le système de santé est entré dans un contexte de compétition nationale et même internationale. Chaque établissement est un des agents du ce système quel que soit son activité qu'il assure. Alors, la concurrence s'exprime par des établissements voisins, de statuts identiques ou différents, de tailles identiques ou différentes, par les alternatives à l'hospitalisation (médecine de ville, hospitalisation à domicile).

Les missions de l'hôpital ont évolué suivant l'évolution rapide et la diversité des technologies des équipements médicaux. Ces derniers sont indispensables pour la prévention, le diagnostic

et le traitement des maladies des patients. Les équipements médicaux contribuent aux progrès de la médecine et à l'amélioration de la prise en charge des patients, jouant un rôle dans l'augmentation de l'espérance de vie et la diminution du taux de mortalité. Les soucis pour la sécurité et la qualité des soins produits par les hôpitaux ont conduit à l'élaboration d'un ensemble des textes législatifs relatifs aux équipements médicaux, à leur exploitation et à leur maintenance, (Coulibaly et al. 2001). La pratique de la maintenance préventive fait le sujet de certains de ces textes.

Les équipements médicaux sont des ressources qui affectent directement la vie humaine. Ils sont conçus pour être implantés en totalité ou en partie dans le corps humain ou dans un orifice naturel et qui nécessitent une source d'énergie électrique ou autre pour le bon fonctionnement. Des efforts d'investissements en ces équipements sont aujourd'hui considérables, mais les ressources financiers et humaines sont limitées. Désormais, pour survivre dans un environnement de plus en plus concurrentiel et un contexte de limitation des ressources, les coûts d'exploitation et de maintenance doivent être contrôlés. Un programme de maintenance planifié et géré avec soin s'est avéré nécessaire pour garantir la fiabilité, la sécurité et la disponibilité de l'équipement médical lorsque celui-ci doit être utilisé dans les méthodes de diagnostic, une thérapie, les traitements ou surveillance des patients. Ces différents éléments sont le signe que la mise en place de la maintenance préventive dans un tel contexte peut être une tâche délicate et difficile.

## **1.2. La maintenance des équipements médicaux**

Pour une grande variété d'équipements, la maintenance biomédicale est caractérisée par une multitude de tâches différentes par leur nature et par leur temps d'exécution. Ces tâches sont regroupées en familles et classées en cinq niveaux, (Walraeve et Vigneau, 2005). Selon l'endroit où elles peuvent être réalisées (en interne ou en externe), le type d'interventions ainsi que la complexité de la maintenance et des outils nécessaires à leur réalisation :

- Le niveau 1 : Actions simples nécessaires à l'exploitation et réalisées sur des éléments facilement accessibles en toute sécurité à l'aide d'équipements de soutien intégrés au bien. Ce type d'opérations (remplacement des ampoules de l'éclairage opératoire, modifications de paramètres sur des moniteurs, etc.) peut être effectué par l'utilisateur du bien avec, le cas échéant, les équipements de soutien intégrés au bien et à l'aide des instructions d'utilisation.

- Le niveau 2 : Actions qui nécessitent des procédures simples et/ou des équipements de soutien (intégrés ou extérieurs). Ce type d'actions de maintenance (remplacement des composants, lecture des logigrammes, etc.) est effectué par un personnel qualifié avec les procédures détaillées et les équipements de soutien définis dans les instructions de maintenance. Un personnel est qualifié lorsqu'il reçoit une formation lui permettant de travailler en sécurité sur un bien présentant certains risques potentiels. Dans ce cas le personnel est reconnu apte pour l'exécution des travaux qui lui sont confiés, compte tenu de ses connaissances et de ses aptitudes.
- Le niveau 3 : Opérations qui nécessitent des procédures complexes et/ou des équipements de soutien portatifs, d'utilisation ou de mise en œuvre complexes. Ce type d'opération de maintenance (diagnostic des pannes en utilisant des équipements de contrôle de mesure et d'essai « ECME », remplacement des composants avec usages des équipements, etc.) peut être effectué par un technicien qualifié, à l'aide de procédures détaillées et des équipements de soutien prévus dans les instructions de maintenance. Les interventions se font sur place ou chez le sous-traitant.
- Le niveau 4 : Opérations dont les procédures impliquent la maîtrise d'une technique ou technologie particulière et/ou la mise en œuvre d'équipements de soutien spécialisés. Ce type d'opération de maintenance (réparation des équipements complexes avec analyse des pannes, révision partielle ou générale, relevé de paramètres techniques, etc.) effectué par un technicien ou une équipe spécialisée à l'aide de toutes les instructions de maintenance générales ou particulières, se fait chez le sous-traitant (la société de service ou le constructeur même).
- Le niveau 5 : Opérations dont les procédures impliquent un savoir-faire, faisant appel à des techniques ou technologies particulières, des processus et/ou des équipements de soutien industriels. Par définition, ce type d'opérations de maintenance (rénovation, reconstruction, etc.) est effectué par le constructeur ou par un service ou une société spécialisée avec des équipements de soutien définis par le constructeur.

### **1.3. Présentation du service de maintenance biomédicale de l'hôpital Habib Bourguiba de Sfax**

#### ***1.3.1. Présentation du CHU Habib Bourguiba de Sfax***

L'hôpital Habib Bourguiba de Sfax, présenté comme étant un centre hospitalier universitaire à caractère chirurgical, a été fondé en 1985 avec une capacité de 540 lits d'environ et a été

implanté sur 9870 mètre carré. C'est devenu un établissement public de santé de 'catégorie B' en 9 juin 1992 d'après la loi numéro 56-92 et il a été érigé en un établissement public de santé sous tutelle du Ministère de la Santé Publique de 'catégorie A' en 29 mars 2001.

Le CHU Habib Bourguiba est considéré comme faisant partie des structures sanitaires les plus importantes de la Tunisie. Ce centre hospitalo-universitaire se présente comme une institution sociale qui a pour objectif, en se basant sur des moyens préventifs et correctifs, d'améliorer le niveau de la santé publique.

En outre, le CHU Habib Bourguiba constitue un milieu pratique de formation. En effet, en plus des étudiants de la faculté de médecine de Sfax, il accueille des stagiaires de différentes écoles telles que l'école professionnelle de la santé, l'école supérieure de sciences et techniques de santé et même des étudiants en gestion, en formation biomédicale ou encore issus de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax.

### ***1.3.2. Service de maintenance biomédicale CHU Habib Bourguiba de Sfax***

Face à la forte croissance du nombre et de la complexité des équipements biomédicaux, le centre CHU Habib Bourguiba de Sfax a créé un atelier biomédical en 1992 avec des techniciens spécialisés dans l'entretien du parc d'équipement biomédicaux. L'objectif de ce service était d'augmenter la disponibilité des équipements médicaux, de réduire les dépenses liées aux contrats de maintenance et d'améliorer le service de production des soins.

Le service maintenance est composé de trois ingénieurs, trois techniciens et deux ouvriers qui possèdent une formation technique leur permettant d'intervenir sur certains dispositifs médicaux des différents services de l'hôpital. Il est remarqué que les compétences de cette équipe ne couvrent pas toutes les spécialités liées aux équipements utilisés dans les services de soins ainsi que les différents niveaux de maintenance.

### ***1.3.3. Analyse de pratiques existantes du service maintenance***

La collecte des données est une étape primordiale afin d'effectuer une analyse adéquate de l'état actuel du service de maintenance et de construire une base de données pour notre travail. Le service de maintenance biomédicale dispose d'un outil GMAO « BIOMED » depuis 1990 qui recense les équipements et les interventions au CHU Habib Bourguiba Sfax. Cet outil permet d'avoir :

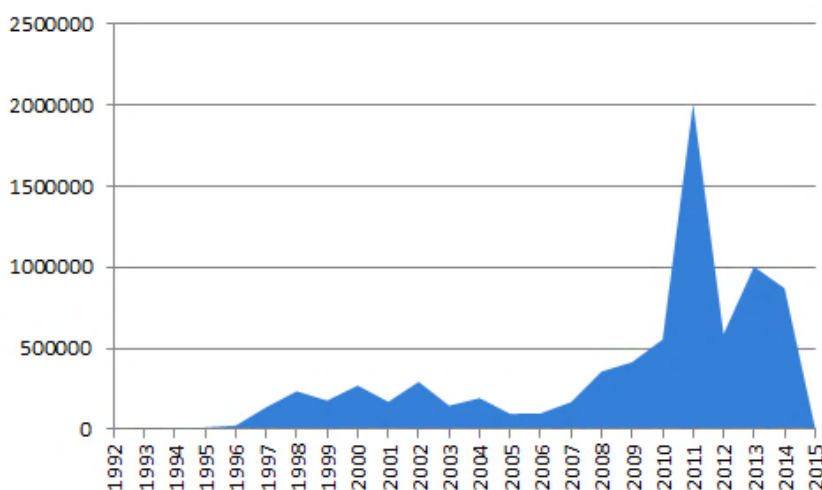
- la liste des équipements par service (Annexe 1),

- le nombre d'équipements en exploitation et même ceux réformés pour tout le parc médical,
- les activités des interventions pour une période donnée ou bien pour un équipement bien déterminé (Annexe 2),
- le nombre d'intervention par service
- le coût de tout type d'intervention pour les différentes stratégies de maintenance (Annexe 3).

Le CHU Habib Bourguiba se compose de 21 services qui contiennent environ 2000 équipements médicaux. Une bonne gestion de ces équipements médicaux commence dès la prévision des achats et se termine après leur réforme. Pour y arriver, le service de maintenance biomédical doit mettre l'accent sur des différents points tout au long de la vie de chaque équipement.

*a. Évolution des dépenses en fonction du temps*

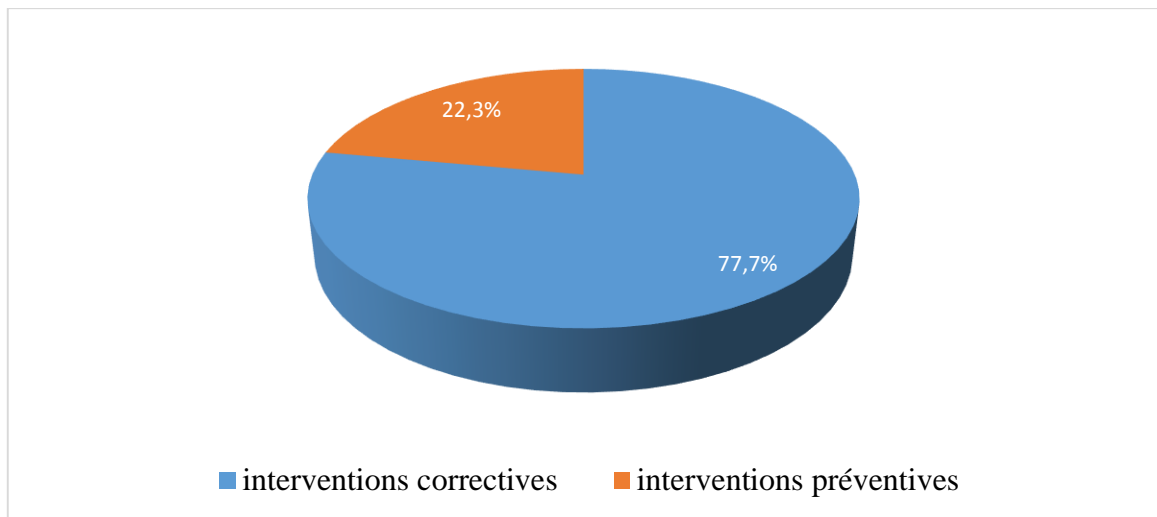
D'après l'étude liée aux interventions de maintenance, nous présentons ci-dessous (figure 1.1) l'évolution des dépenses en Dinar Tunisien (DT) depuis l'année 1992 jusqu'à l'année 2015. On constate qu'il y'a un pic de dépenses durant l'année 2011. Ceci est dû à l'augmentation du parc de dispositifs médicaux et à l'augmentation du nombre d'interventions liées aux évènements sociaux durant cette période.



**Figure 1. 1** *Évolution des dépenses au cours du temps en DT*

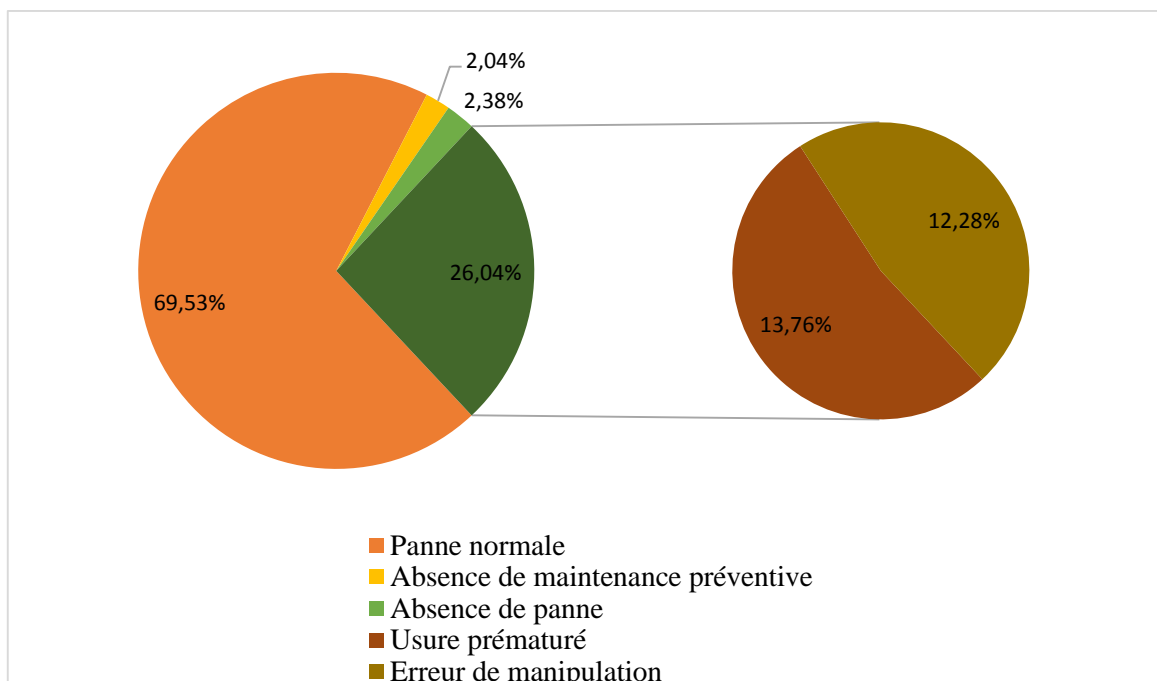
**b. Les interventions du service maintenance biomédicale pour tous les équipements**

En nous basant sur les données enregistrées dans le l'outil (BIOMED), nous constatons que le nombre d'interventions sur 5 ans est de 3018 interventions, celles-ci sont réparties en 2353 interventions correctives et 665 interventions préventives (figure 1.2).



**Figure 1.2** La fréquence d'interventions selon la stratégie de maintenance

69.53% des interventions de maintenance corrective ont été causées par des pannes normales, 2.04% par absence de maintenance préventive, 2.38% pour absence de panne, dû principalement au manque de vérification des connexions aux sources d'énergie (électricité, eau et fluides médicaux) par l'utilisateur, et 26.04% résultent de la mauvaise utilisation des équipements (figure 1.3).



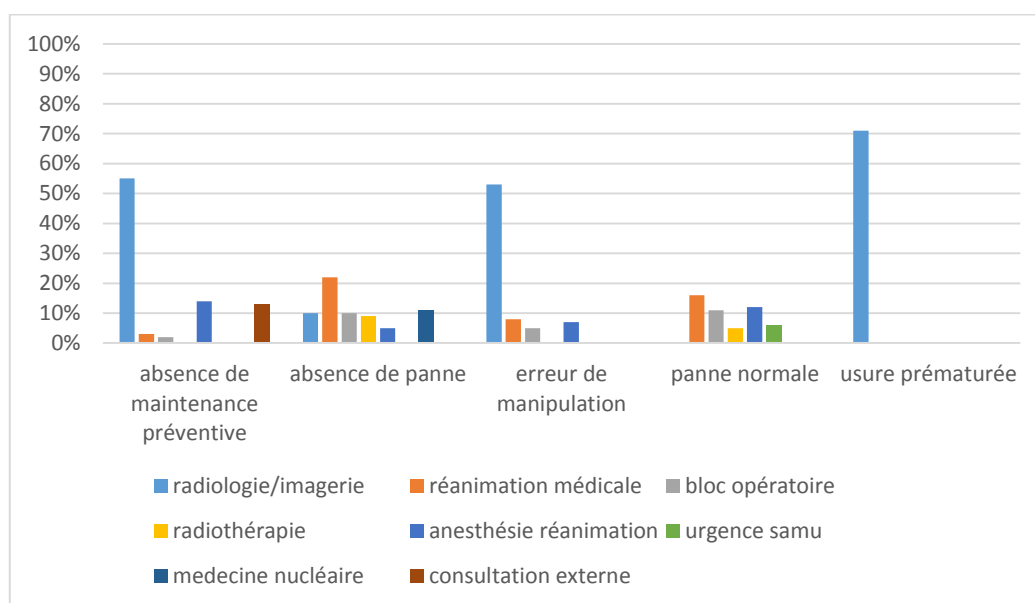
**Figure 1.3** Le pourcentage de la maintenance corrective par causes de pannes

La mauvaise utilisation des dispositifs médicaux (26,04% des cas) peut être due soit à des erreurs de manipulation (12.28%) soit à des usures prématurées (13.76%) comme nous montre la figure 1.3.

### c. Étude de la criticité des services par causes de pannes

Dans cette partie, nous allons étudier la criticité des services par causes de pannes en nous basant sur le nombre d'interventions.

En nous référant aux données existantes dans le GMAO sur 5 ans d'activité du service de la maintenance biomédicale et en utilisant la méthode Pareto (ABC) (voir les annexes 4, 5, 6, 7, et 8), nous avons classé les services selon le nombre d'interventions correctives pour les différentes causes de pannes (voir figure 1.4).



**Figure 1.4** Le nombre d'interventions par service critique par causes de pannes

La figure 1.4 montre les services les plus critiques qui présentent le taux d'intervention corrective le plus important pour les différentes causes de pannes. Nous observons que les services critiques sont toujours les mêmes quelle que soit la cause de panne.

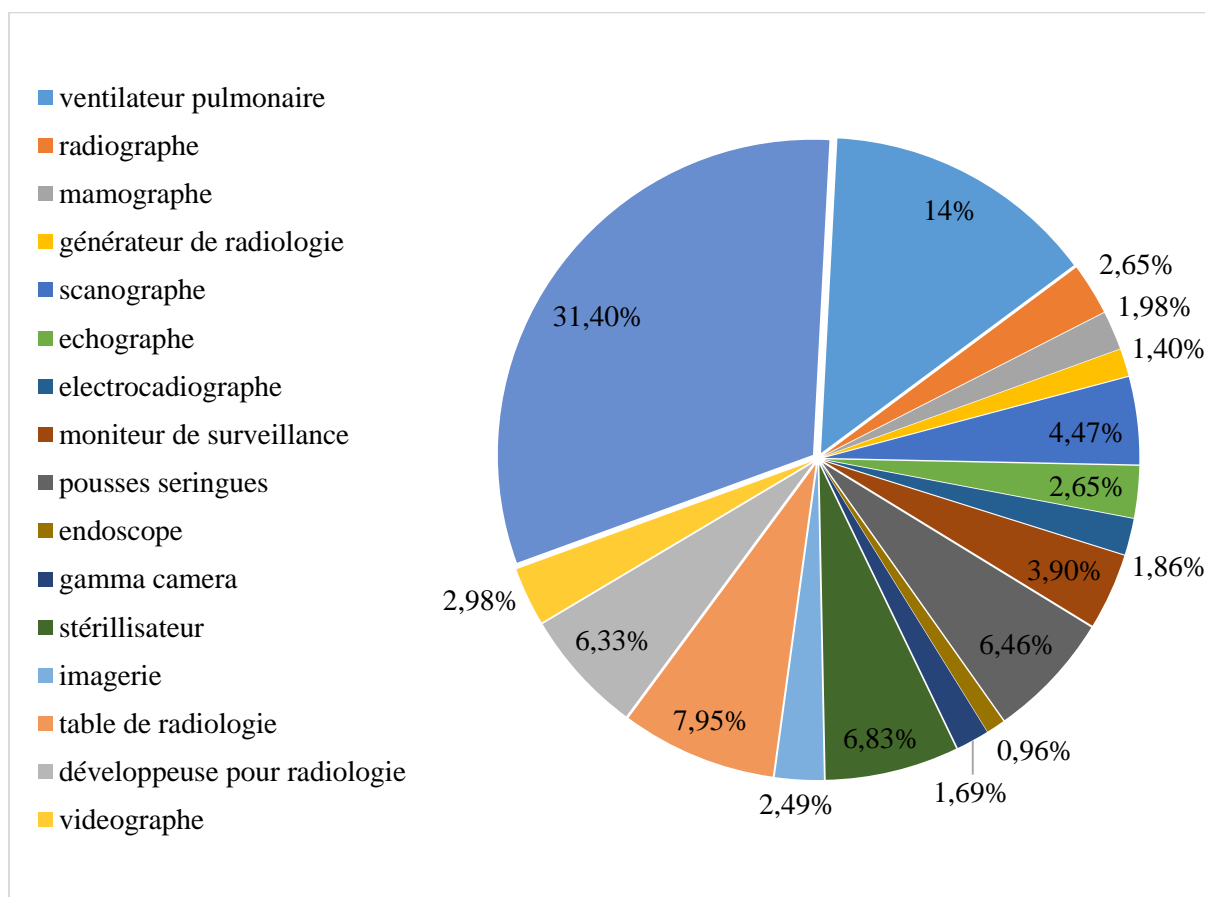
En effet, pour l'absence de maintenance préventive, les services de radiologie et d'anesthésie/réanimation qui ne représentent que 10 % du nombre total des services nécessitent un taux d'intervention de 69 %. Ensuite, pour la deuxième cause de panne, le service de radiologie, de réanimation médicale, d'anesthésie/réanimation, de radiothérapie ainsi que le bloc opératoire qui ne représente que 24,242% du nombre total des services, présentent 75 % du nombre total d'interventions correctives. De même, les services critiques pour des

défaillances dues à une erreur d'utilisation présentent 73 % du taux d'intervention et pour les causes de pannes normales les services critiques occupent 76 % de la totalité des interventions. Alors que pour les pannes dues à une usure prématurée, le service le plus critique est celui de radiologie/imagerie qui présente 71 % du taux d'intervention total.

**d. Etude de la criticité des équipements médicaux**

En nous référant à la liste des interventions pour tous les équipements du CHU Habib Bourguiba nous avons identifié les équipements les plus critiques.

Sur la figure 1.5, nous présentons la classification des équipements en fonction du taux d'intervention sur une durée de 5 ans. Le ventilateur pulmonaire présente l'équipement le plus critique avec 31.40% du total des interventions.



**Figure 1.5** Le pourcentage du taux d'intervention sur les équipements médicaux

**1.3.4. Analyse des données pour le respirateur d'anesthésie de type « DRAGER JULIAN »**

Dans cette partie, nous prenons l'exemple du respirateur d'anesthésie pour une analyse détaillée de l'historique de maintenance de l'hôpital Habib Bourguiba de Sfax. Ce dispositif médical est conçu pour l'anesthésie par inhalation d'un patient lors d'une opération chirurgicale. Sa défaillance poserait un niveau élevé de risque pour la vie des patients.



Le tableau 1.1 présente les données des maintenances correctives et préventives collectées pour le respirateur de type DRAGER JULIAN installé à l'hôpital depuis le 15 décembre 2005.

**Tableau 1.1.** Les données collectées de l'historique de maintenance pour le respirateur d'anesthésie « DRAGER JULIAN»

Date d'intervention	Les jours jusqu'à la maintenance	Type d'intervention	Immobilisation en jours	Défaillance après la maintenance	Défaillance après MP	Défaillance après MC	Coût de maintenance préventive(DT)	Coût de maintenance corrective(DT)
13/04/2006	119,00	MC	27					0
09/05/2006	145,00	MC	60	26,00		26,00		0
06/07/2006	203,00	MC	4	58,00		58,00		0
19/04/2007	490,00	MP	-				6	
08/05/2007	509,00	MC	10	19,00	19,00			12
24/03/2008	830,00	MC	3	321,00		321,00		12
02/05/2008	869,00	MC	30	39,00		39,00		100,4
17/07/2008	945,00	MC	12	76,00		76,00		271
15/09/2008	1005,00	MC	3	60,00		60,00		6
16/09/2008	1006,00	MC	1	1,00		1,00		6
03/12/2008	1084,00	MC	140	78,00		78,00		6270,08
11/02/2009	1154,00	MC	35	70,00		70,00		727,639
10/04/2009	1212,00	MP	-				874,375	
13/04/2009	1215,00	MC	1	3,00	3,00			6
07/05/2009	1239,00	MC	16	24,00		24,00		242
18/11/2009	1434,00	MC	1	195,00		195,00		6
21/11/2009	1437,00	MC	1	3,00		3,00		6,944
03/05/2010	1600,00	MC	-	163,00		163,00		6
16/10/2010	1766,00	MC	2	166,00		166,00		5838,15
20/06/2011	2013,00	MC	11	247,00		247,00		6
28/06/2011	2021,00	MC	-	8,00		8,00		6
08/05/2013	2701,00	MC	1	680,00		680,00		6
24/06/2013	2748,00	MC	-	47,00		47,00		167,272
28/08/2013	2813,00	MC	12	65,00		65,00		6
22/11/2013	2899,00	MC	3	86,00		86,00		961,046
05/03/2014	3002,00	MP	-				6	

**a. Analyse de disponibilité en fonction de la période de maintenance préventive**

Pour le calcul du taux de disponibilité ( $D$ ) et du taux d'arrêt ( $TA$ ), nous utilisons les formules ci-dessous :

$$D (\%) = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} * 100\% \tag{1.1}$$

$$TA = 100\% - D(\%) \tag{1.2}$$

$$MTTR = \frac{\sum \text{des temps de réparation}}{\text{nombre de défaillance pour ue période définie}} \quad (1.3)$$

$$MTBF = \frac{\text{Durée requise}}{\text{nombre de défaillance pour ue période définie}} \quad (1.4)$$

- *MTTR* « Mean Time To Repairation » ou moyenne des temps de réparation. C'est le rapport du temps total des réparations sur le nombre des défaillances.
- *MTBF* « Mean Time Between Failure » ou moyenne des temps entre deux défaillances. On l'assimile à la moyenne des temps du bon fonctionnement.

Nous proposons de calculer ces taux entre deux interventions de maintenance préventive afin de visualiser l'effet de la période de MP sur la disponibilité de l'équipement (Tableau 1.2). A ce propos, nous utilisons les données de l'historique du respirateur d'anesthésie ci-dessus (Tableau 1.1). Plusieurs facteurs peuvent influencer le taux de disponibilité du ventilateur dont principalement la disponibilité des pièces de rechange due aux contraintes de logistique et de coût.

**Tableau 1. 2** *Calcul du taux de disponibilité et du temps d'arrêt maintenance pour le respirateur d'anesthésie « DRAGER JULIAN»*

Date d'intervention	Type d'intervention	Temps pris pour la remise en service de l'équipement	<i>MTTR</i>	<i>MTBF</i>	<i>D</i> (%)	<i>TA</i> (%)
15/12/2005						
13/04/2006	MC	27				
09/05/2006	MC	60				
06/07/2006	MC	4				
19/04/2007			30,333	163,333	84,34	15,66
Sans considérer les jours >30			15,5	163,333	91,33	8,67
08/05/2007	MC	10				
24/03/2008	MC	3				
02/05/2008	MC	30				
17/07/2008	MC	12				
15/09/2008	MC	3				
16/09/2008	MC	1				
03/12/2008	MC	140				
11/02/2009	MC	35				
10/04/2009			29,25	91,25	75,73	24,27

Sans considérer les jours >30			9,833	91,25	90,27	9,73
<b>13/04/2009</b>	MC	1				
<b>07/05/2009</b>	MC	16				
<b>18/11/2009</b>	MC	1				
<b>21/11/2009</b>	MC	1				
<b>03/05/2010</b>	MC					
<b>16/10/2010</b>	MC	2				
<b>20/06/2011</b>	MC	11				
<b>28/06/2011</b>	MC					
<b>08/05/2013</b>	MC	1				
<b>24/06/2013</b>	MC					
<b>28/08/2013</b>	MC	12				
<b>22/11/2013</b>	MC	3				
<b>05/03/2014</b>			4	152,083	97,43	2,57
Sans considérer les jours < 1 (Panne partiel)			5.333	152,083	96,61	3,39

D'après la classification des équipements médicaux par Tarawneh et El-Sharo (2009), le respirateur d'anesthésie étudié est en très bon état. Alors, on le maintient en fonctionnement.

Nous prenons un autre exemple du respirateur d'anesthésie de type « DRAGER JULIAN » mis en service le 09/07/1999 et qui est déjà mis en réforme (voir le tableau 1.3). Nous constatons que la disponibilité de l'équipement est moyenne (77.77%). D'après la classification de Tarawneh et El-Sharo (2009), cet équipement nécessite d'être remplacé.

**Tableau 1. 3** *Calcul du taux de disponibilité et du temps d'arrêt pour un respirateur d'anesthésie «DRAGER JULIAN » mis en réforme*

Date d'intervention	Type de maintenance	Temps pris pour la remise en service de l'équipement	MTTR	MTBF	D(%)	TA(%)
<b>09/07/1999</b>						
<b>24/09/1999</b>	MC	4				
<b>20/10/1999</b>	MC					
<b>08/04/2000</b>			4	135	97,12	2,88

29/04/2000	MC	10				
12/03/2001	MC	10				
22/03/2001			10	182,5	94,8	5,2
07/06/2001	MC	1				
08/11/2001	MC	20				
08/11/2001	MC	20				
20/02/2003	MC	15				
12/01/2004	MC	3				
30/12/2004	MC	20				
29/06/2005	MC	10				
19/10/2006	MC	20				
11/11/2006	MC	5				
19/04/2007	MC	15				
21/04/2008	MC	4				
28/10/2008	MC	15				
06/01/2009	MC	25				
16/03/2009	MC	30				
08/04/2009			14,5	208,57	93,5	6,5
09/05/2009	MC	29				
10/09/2009	MC	110				
25/12/2009	MC	65				
30/03/2010	MC	70				
14/04/2010	MC					
07/05/2010	MC	7				
05/07/2010	MC	7				
05/07/2010	MC	7				
24/08/2010	MC	2				
02/09/2010	MC	13				
08/06/2011	MC					
22/06/2011	MC	3				
			26,083	91,25	77,77	22,33

Par la suite, dans le calcul du nombre de jours de l'immobilisation de l'équipement entre deux maintenances préventives, nous considérons les pannes qui entraînent l'arrêt total de l'équipement. Ainsi, nous évitons les durées qui dépassent les deux semaines. En effet, plusieurs contraintes influent sur les longues durées comme les contraintes de logistique,

l'indisponibilité des pièces de rechanges, compétences limitées des techniciens, coûts de maintenance (main d'œuvre et pièces de rechanges), etc.

**Tableau 1. 4** *Les données de Nombre de MC et les jours d'immobilisation total d'un ensemble des respirateurs d'anesthésie de marque DRAGER*

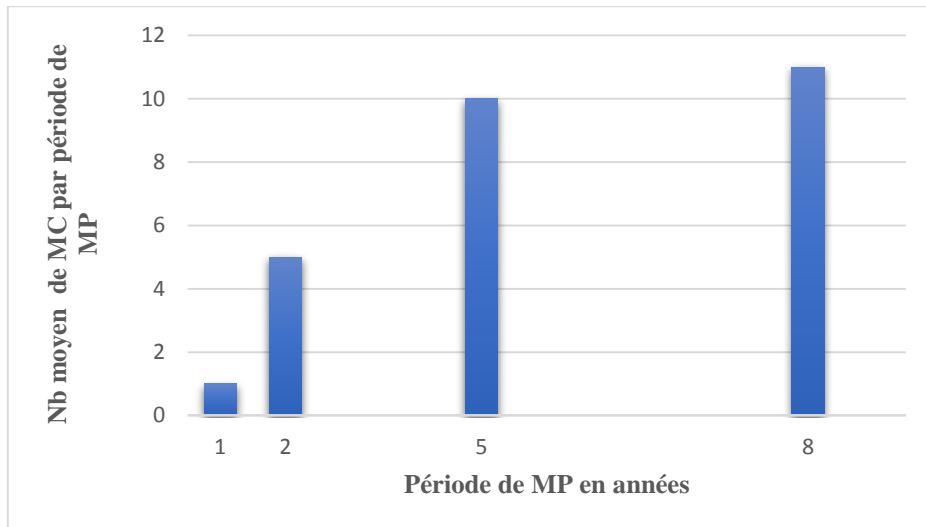
Date de mise en service	Période de maintenance préventive	Période en années	Nb de MC	Total de l'immobilisation en jours
<b>15/12/2005</b>	19/04/2007- 10/04/2009	2,00	8	29
	10/04/2009- 05/03/2014	5,00	12	48
<b>15/12/2005</b>	19/04/2007- 10/04/2009	2,00	4	26
	10/04/2009- 05/03/2014	5,00	8	22
<b>15/12/2005</b>	19/04/2007- 10/04/2009	2,00	3	4
	10/04/2009- 05/03/2014	5,00	7	2
<b>09/07/1999</b>	08/04/2000 - 23/03/2001	1,00	1	0
	23/03/2001 - 08/04/2009	8,00	4	20
	08/04/2009- 06/03/2014	5,00	13	40
<b>28/04/2000</b>	23/03/2001 - 08/04/2009	8,00	18	35
	08/04/2009- 06/03/2014	5,00	10	13

Le tableau 1.4 ci-dessus montre l'absence d'une planification de maintenance préventive pour l'ensemble des respirateurs d'anesthésie étudié. Cette absence a entraîné une augmentation du nombre des interventions de maintenance corrective ainsi que l'indisponibilité de l'équipement (Tableau 1.5).

**Tableau 1. 5** *Répartition du nombre moyen de maintenance corrective et les jours d'immobilisation en fonction de la période de maintenance préventive*

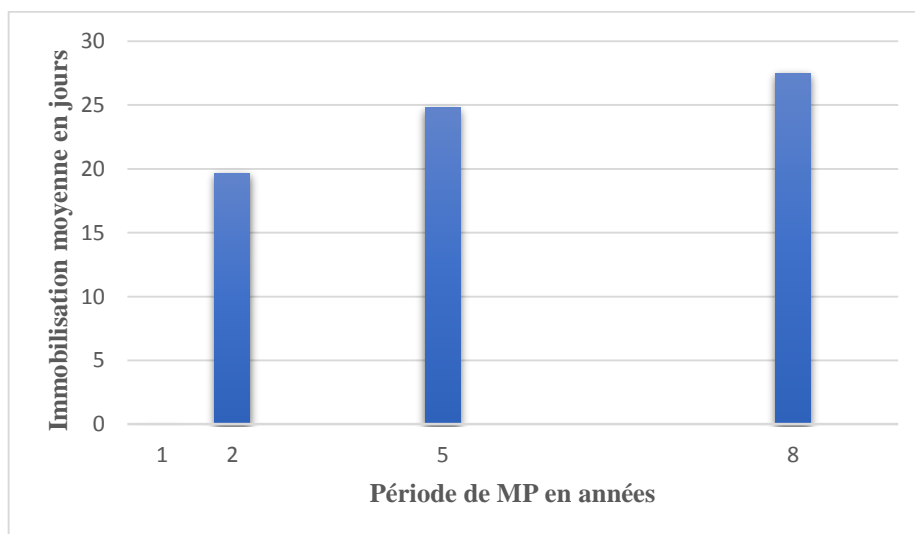
Période de MP en années	Nombre de MC	Total de l'immobilisation en jours	Nombre moyen de MC	Nombre moyen d'immobilisation en jours
<b>1,00</b>	1	0	1	0
<b>2,00</b>	8	29	5	19,67
<b>2,00</b>	4	26		
<b>2,00</b>	3	4		
<b>5,00</b>	12	48	10	24,8
<b>5,00</b>	8	21		
<b>5,00</b>	7	2		

5,00	13	40		
5,00	10	13		
8,00	4	20	11	27,5
8,00	18	35		



**Figure 1.6** Evolution du nombre moyen de MC par période de MP

D'après le la figure 1.6, le nombre moyen de la maintenance corrective du respirateur d'anesthésie augmente avec des longues périodes de maintenance préventive. De même, le nombre moyen des jours de l'immobilisation total est proportionnel à la période de MP (Figure 1.7).



**Figure 1.7** Evolution du nombre moyen des jours d'immobilisation en fonction de la période de MP

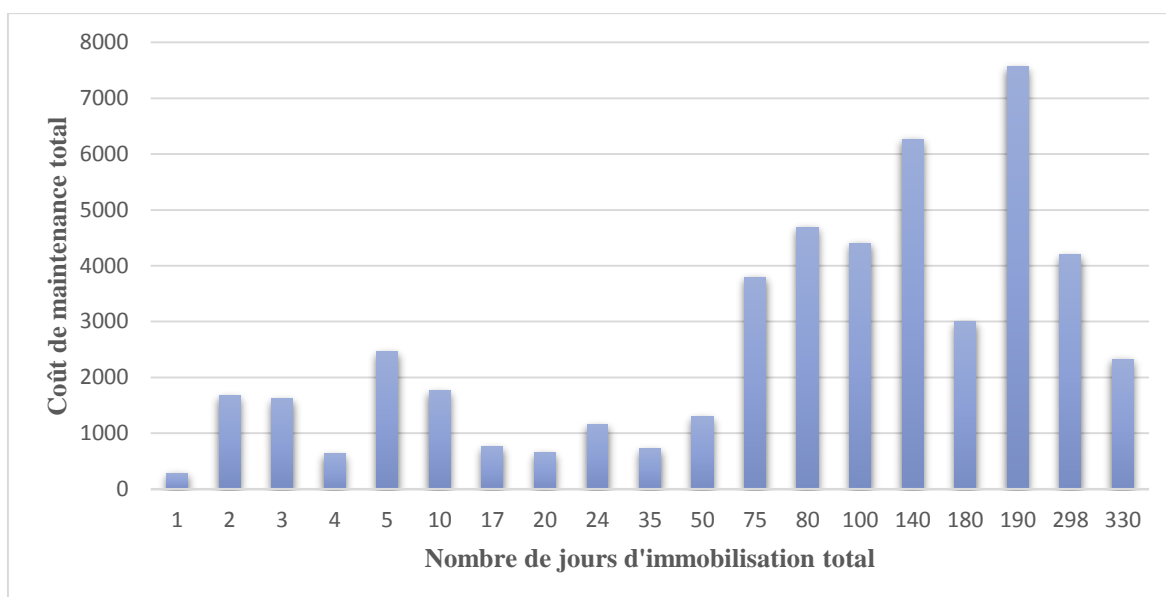
**b. Analyse de coût de maintenance corrective par période de la maintenance préventive :**

Comme les hôpitaux tunisiens possédant des capacités financières limitées et les activités de maintenance sont coûteuses, il est nécessaire alors de gérer les dépenses d'une façon économique. D'après l'historique des données de maintenance collectées de l'hôpital Habib Bourguiba de SFAX, nous pouvons bien constater la relation entre le coût de maintenance total élevé (principalement pièces de rechange et main d'œuvre externes) et les jours d'immobilisation totale du respirateur d'anesthésie.

Dans le tableau (1.6) ci-dessous, nous considérons la maintenance corrective totale qui exige l'arrêt du fonctionnement total de l'équipement afin de comparer les jours d'immobilisations par rapport au coût total moyen de maintenance.

**Tableau 1. 6 Répartition du coût total de maintenance en fonction de jours d'immobilisation**

Nombre de jours d'immobilisation	Coût total de la maintenance
1	283,583
2	1679,075
3	1618,382
4	631,35
5	2463,17
10	1760,062
17	760,457
20	652,3
24	1156,56
35	727,639
50	1299
75	3794,47
80	4694,99
100	4409,545
140	6270,08
180	2995,6175
190	7571
298	4200,57
330	2326,92



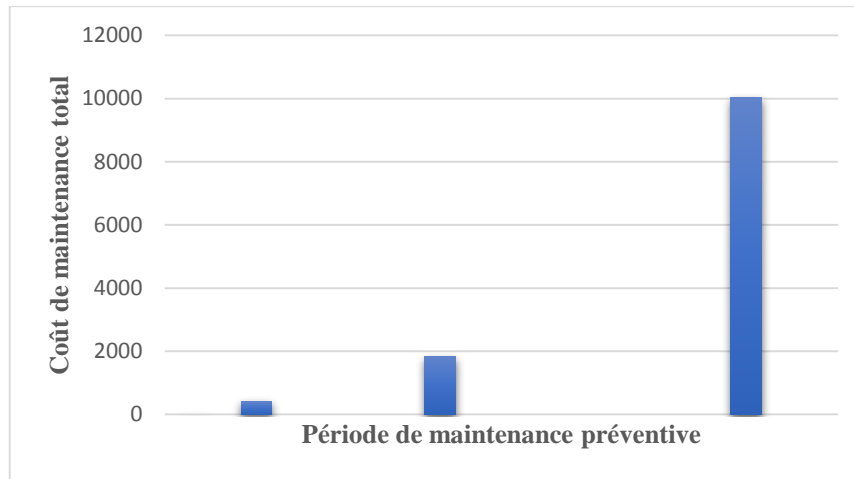
**Figure 1.8** Répartition du coût de maintenance total en fonction de jours d'immobilisation du respirateur d'anesthésie DRAGER

Par la suite, nous étudions l'effet du manque de maintenance préventive et de fréquence de maintenance corrective sur le coût de maintenance (Tableau 1.7).

**Tableau 1.7** Répartition du coût moyen de maintenance en fonction du nombre moyen de maintenance corrective et période de maintenance préventive

Période de MP en années	Nb de MC	Nb moyen de MC	Coût total de maintenance en DT	Le coût moyen de MC en DT
1,00	1	1	0 (sous contrat)	
2,00	8	5	307	417,244
2,00	4		429,852	
2,00	3		514,88	
5,00	12	10	7078,14	1836, 2586
5,00	8		376,5	
5,00	7		235,272	
5,00	13		986	
5,00	10		505,381	
8,00	4	11	4873,39	10036,6355
8,00	18		15199,881	





**Figure 1.9** *Evolution du coût moyen de maintenance corrective en fonction de la période de maintenance préventive*

Il est bien clair que le coût moyen de la maintenance corrective est proportionnel à la période de la maintenance préventive (Figure 1.9).

La problématique principale posée consiste à améliorer la disponibilité de l'équipement médical en réduisant le nombre d'occurrence des pannes tout en respectant les ressources financières disponibles.

#### **1.4. Conclusion**

Tout au long de ce chapitre, nous avons analysé les données collectées au service de maintenance biomédicale du CHU Habib Bourguiba de Sfax afin de caractériser la politique de maintenance existante. Cette analyse nous a permis d'identifier les besoins du service de maintenance biomédicale. Celui-ci doit identifier les activités de maintenance pour maintenir, inspecter et tester tous les équipements. Il doit utiliser des stratégies appropriées, y compris l'étude de la criticité des équipements et des intervalles pour les activités de maintenance. Dans la recherche présentée dans cette thèse, nous allons étudier les stratégies de maintenance utilisées qui, tout en garantissant la sécurité des patients et des utilisateurs, permettent d'augmenter la disponibilité des équipements médicaux et d'améliorer la qualité de la production des soins. Nous proposerons des modèles d'aide à la décision pour la sélection des stratégies, d'externalisation/internalisation de la maintenance et du choix du contrat optimal sur la base du coût de maintenance et de la disponibilité des équipements.

## Chapitre 2 : Etat de l'art

A cause de l'efficacité et l'efficience des soins prodigués, l'hôpital se doit d'organiser à moindre coût l'ensemble des ressources afin de répondre aux besoins spécifiques des patients tout en assurant la qualité de la production des soins. Certains critères sont requis pour assurer cette amélioration, on peut citer :

- la gestion des ressources de la production des soins
- la planification de la production de soins
- la planification de la maintenance des équipements médicaux
- la gestion des ressources de la maintenance
- la gestion du parc des équipements

En effet, afin de satisfaire la demande du patient, la planification de la production des soins permet d'établir un plan afin d'exploiter efficacement les équipements médicaux avec un taux de disponibilité maximale. Quant à la planification de la maintenance, elle a le but de garder les équipements dans un bon état de fonctionnement.

### 2.1. La maintenance des équipements médicaux

#### 2.1.1 *Présentation de la maintenance*

Afin de mieux identifier les enjeux généraux de la maintenance, nous présentons ici la terminologie de base en reprenant les définitions de la norme européenne AFNOR NF EN 13306 :

Maintenance : C' est un « Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ». La maintenance définie comme un ensemble d'activités, regroupe deux sous-ensembles :

- Les activités à dominance technique « dépannage, réparation, prévention, diagnostic, études et méthodes ».
- Les activités à dominance de gestion « gestion des budgets, gestion des ressources humaines, gestion des équipements et des pièces de rechange ».

La réalisation des activités de maintenance nécessite un management dont l'objectif est d'en minimiser les coûts tout en assurant le bon fonctionnement du système de production. Cela peut se traduire par des objectifs sur des caractéristiques comme la disponibilité du système, la

qualité des produits, la protection de l'environnement ou la sécurité du personnel. Ce fonctionnement peut être perturbé par plusieurs facteurs. Une des causes majeures est la dégradation du système de production que nous définissons ici dont nous présentons les conséquences.

Dégradation : C'est « l'Evolution irréversible d'une ou de plusieurs caractéristiques d'un bien liée au temps, à la durée d'utilisation ou à une cause externe ». L'évolution de la dégradation d'un système a plusieurs conséquences telles que l'occurrence de défaillances, la perte de productivité, le dysfonctionnement, etc. Il est bien possible d'évaluer l'état de dégradation d'un système de production en utilisant certains outils, qui contrôlent l'évolution de paramètres comme les vibrations, la température, la pression, etc.

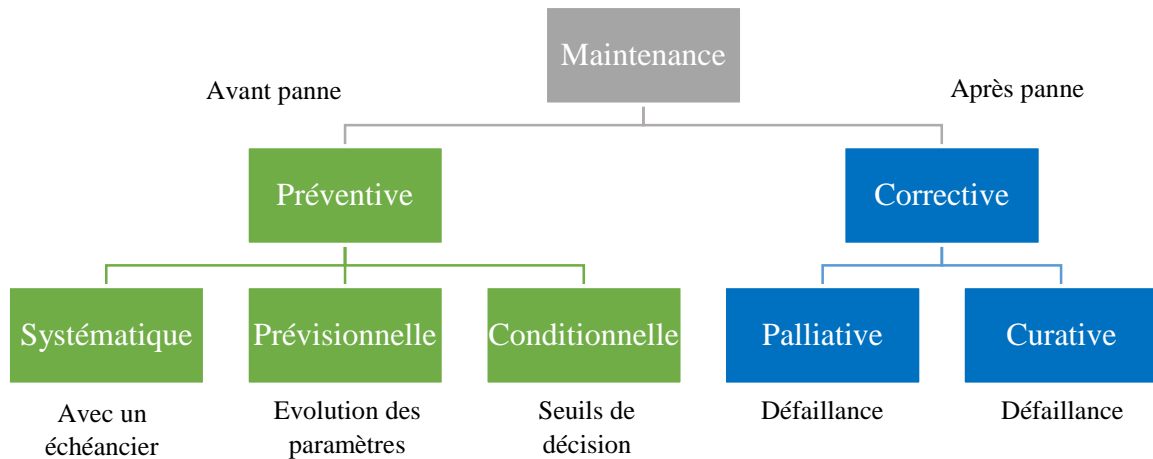
Les deux autres conséquences importantes de la dégradation sont la défaillance et la panne. Celles-ci sont mises en avant comme étant les principales causes de pertes de capacité pour le système de production (Baglin et al. 2005).

Défaillance : c'est la « Cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise. Après une défaillance, le bien est en panne, totale ou partielle ».

Panne : c'est l'« Etat d'un bien inapte à accomplir une fonction requise, excluant l'inaptitude due à la maintenance préventive ou à d'autres actions programmées ou à un manque de ressources extérieures ». Le système de production passe de l'état de disponibilité à l'état de panne lorsqu'une défaillance survient. Une maintenance corrective du système est alors nécessaire pour repasser de l'état de panne à l'état opérationnel.

### ***2.1. 2 Les différentes stratégies de maintenance***

Afin de maintenir le système dans un état dans lequel il est capable de remplir sa fonction première et de limiter l'évolution de la dégradation, il existe deux grandes catégories d'activités de maintenance principales : la maintenance corrective et la maintenance préventive. La figure 2.1 ci-dessous présente les différentes stratégies relatives à ces deux types d'activités :



**Figure 2.1** Les différentes stratégies de maintenance

Nous allons maintenant présenter et définir ces différentes stratégies de maintenances :

- Maintenance corrective : c'est une « Maintenance exécutée après la détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ». Deux types de maintenance corrective peuvent être mis en œuvre :
  - la maintenance curative qui constitue une réparation définitive du système, et vise à supprimer tout dysfonctionnement survenu.
  - la maintenance palliative qui constitue une réparation à caractère provisoire, celle-ci intervient lorsque la défaillance empêche de poursuivre l'exploitation du système de production, et a pour but de le remettre en état afin d'assurer une ou plusieurs de ses fonctions.
- Maintenance préventive : C'est une « Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien ». La maintenance préventive sert à entretenir le système, afin de le maintenir en bon état de fonctionnement. Trois stratégies de maintenances préventives peuvent être mises en œuvre :
  - la maintenance systématique : « maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien ». Cette politique de maintenance s'applique à des équipements :

- soumis à une réglementation sécuritaire (ponts roulants, matériels d'incendie, etc.),
  - présentant des coûts de défaillance très élevés (système avec processus de production continu, lignes de fabrication automatisés, etc.)
  - pour lesquels une défaillance peut entraîner des accidents graves (matériels de transport en commun des personnes, appareils médicaux, etc.).
- la maintenance prévisionnelle : « maintenance préventive exécutée selon un calendrier préétabli ou selon un nombre défini d'unités d'usage ». Ce type de maintenance se base sur l'estimation du temps de fonctionnement correct du système, qui peut être établie par l'analyse de différentes mesures sur le système. Cette politique peut s'appliquer à tous les équipements, mais elle est généralement coûteuse.
- la maintenance conditionnelle : « maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement exercé au cours des visites préventives ». Cette politique de maintenance se base sur l'évolution de paramètres qui décrivent l'état du système par exemple un jeu mécanique, une température ou tout autre paramètre qui puisse mettre en évidence l'imminence d'une défaillance. Tous les équipements sont concernés. Elle peut être appliquée à des équipements.

### ***2.1.3 Les différents modes de maintenance***

Différents modes de maintenance sont possibles : elle peut être faite exclusivement en interne ou bien partiellement ou complètement en externe. Privilégier un choix au détriment d'un autre dépend du savoir-faire ou de la capacité en temps à réaliser la maintenance.

#### **a. La maintenance en interne**

Dans ce cas, ce sont les techniciens de maintenance de l'établissement qui réalisent la maintenance préventive et curative.

#### **b. La maintenance en externe intégrale**

Dans ce cas, on fait appel à des sous-traitants afin de réaliser la maintenance préventive et curative. Ce mode est nécessaire lorsque le personnel de l'établissement ne dispose pas du niveau de compétence. Un contrat de la maintenance « tout risque » comprendra l'ensemble des interventions préventives et curatives de manière illimitée avec la fourniture de pièces détachées.

### **c. La maintenance externe partagée**

Il s'agit d'un contrat de partage des interventions entre les techniciens de l'établissement et le fournisseur. Ceci permet de réduire les délais d'interventions, de réduire le coût global du contrat tout en limitant l'impact sur le temps du personnel.

Nous avons présenté dans cette partie les principales définitions liées à la maintenance, et avons souligné l'intérêt de définir une stratégie de maintenance préventive. Cependant la mise en place de règle de décision pour la maintenance est souvent empirique et la gestion de la maintenance n'est pas toujours optimale, (Castanier, 2001). L'étude des modèles d'optimisation de la maintenance fait l'objet de la prochaine partie.

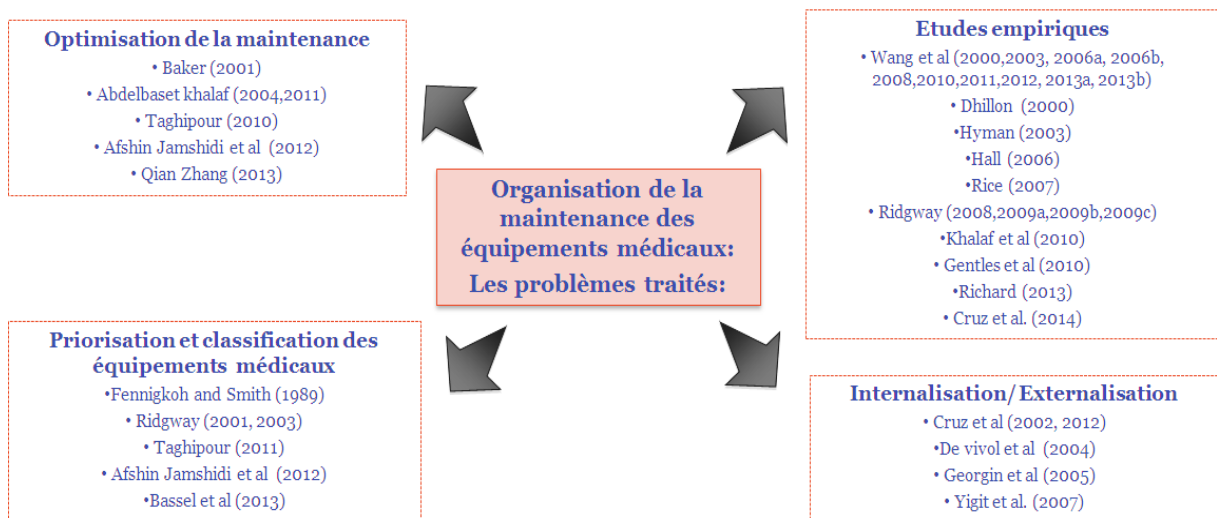
## **2.2. Optimisation de la maintenance biomédicale**

D'après notre littérature, nous avons remarqué que très peu de travaux ont traité le problème de disponibilité des équipements médicaux en relation avec la maintenance en utilisant la modélisation mathématique. L'approche empirique est largement utilisé dans d'autres secteurs de l'industrie et divers modèles mathématiques ont été développés pour mesurer la disponibilité et la fiabilité des équipements et systèmes. D'après Endrenyi et al. (2006), les politiques de maintenance basées sur des modèles mathématiques sont beaucoup plus flexibles que les politiques heuristiques. En effet, avec les modèles mathématiques, on peut intégrer une large variation d'hypothèses et de contraintes. L'avantage majeur de l'approche mathématique est que les résultats peuvent être optimisés. Cette optimisation à l'égard des changements dans certains paramètres du modèle de base peut être réalisée pour une fiabilité maximale ou encore pour minimiser les coûts. Ces modèles mathématiques de maintenance peuvent être déterministes ou probabilistes.

Le but général de ces modèles est la prévision des effets de la maintenance, ainsi, les méthodes probabilistes sont plus appropriées que les méthodes déterministes ; même si elles sont peu utilisées du fait que leur utilisation augmente la complexité et la perte de transparence. Néanmoins, ces méthodes probabilistes sont les meilleurs outils pour identifier les politiques de maintenance qui offrent des économies des coûts. En général, les modèles mathématiques simples se basent sur des intervalles de maintenance fixes, ainsi, l'optimisation s'effectue par la sensibilité de l'analyse tout en variant, par exemple, la fréquence de la maintenance. Il existe des modèles plus complexes qui intègrent l'idée de surveillance de l'état de l'équipement. Dans ces modèles, les décisions concernant le moment et le montant de la maintenance dépendent de

l'état actuel de l'équipement (maintenance prédictive). Ces politiques peuvent être optimisées par rapport à l'un des paramètres du modèle tels que la fréquence des inspections.

D'après Jamshidi et al. (2014), les recherches sur les problèmes de la maintenance biomédicale et particulièrement de l'optimisation sont très limitées depuis 1989 (34 études publiées). Ces travaux sont classifiés comme suit : 64% sont des recherches empiriques, 19% portent sur la classification et priorisation des équipements médicaux et 17% sur des modèles mathématiques pour optimisation de la maintenance. La figure 2.2 représente la classification des recherches traitant le problème de l'organisation de la maintenance des équipements médicaux de 1989 à 2014.



**Figure 2.2** Classification des recherches de l'organisation de la maintenance des équipements médicaux de 1989 à 2014

Par ailleurs, ces travaux sont très développés dans le domaine industriel au niveau de la mesure de la disponibilité et la fiabilité des machines et des systèmes.

Les études de la modélisation des coûts de maintenance préventive (maintenance planifiée) et des réparations sont récentes. Khalaf et al. (2014) ont développé un modèle mathématique pour le calcul du nombre des défaillances et le coût des stratégies de maintenance. Ils ont considéré deux modèles de défaillances. Le premier est la défaillance après la maintenance préventive et le deuxième est la défaillance après la maintenance corrective représentés par les deux fonctions de probabilité  $\lambda_c$  et  $\lambda_p$  respectivement. Le nombre des maintenances correctives est calculé pour une période  $T$  (période entre deux interventions préventives successives). L'expression développée pour le nombre des occurrences de maintenance corrective est la suivante :

$$N_{CM} = \lambda_c T + \left(1 - \frac{\lambda_c}{\lambda_p}\right) (1 - e^{-\lambda_p T}) \quad (2.1)$$

Cette expression est justifiée pour des longs intervalles  $T$  de maintenance préventive, la probabilité des défaillances est régie par la maintenance corrective et l'effet de la maintenance préventive est négligeable comme suit (Khalaf et al. 2014) :

$$N_{CM} \cong \lambda_c T + \left(1 - \frac{\lambda_c}{\lambda_p}\right) \cong \lambda_c T \quad (2.2)$$

De plus, pour des courts intervalles  $T$  de maintenance préventive, la probabilité des défaillances est régie seulement par la maintenance préventive (Khalaf et al. 2014) :

$$N_{CM} \cong \lambda_c T + \left(1 - \frac{\lambda_c}{\lambda_p}\right) [1 - (1 - \lambda_p T)] \cong \lambda_c T + \left(1 - \frac{\lambda_c}{\lambda_p}\right) \lambda_p T \cong \lambda_p T \quad (2.3)$$

Ainsi, le coût de maintenance total annuel (maintenance corrective et préventive) est calculé. D'abord, pour le coût annuel de la maintenance corrective, l'expression précédente (2.1) est multipliée par le coût moyen d'une maintenance unitaire ( $\overline{C_{CM}}$ ) et par le nombre d'intervalles de maintenance préventive par an ( $365/T$ ). Ensuite, le coût de la maintenance préventive annuel est la multiplication de coût moyen de la maintenance préventive unitaire ( $\overline{C_{PM}}$ ) par le nombre d'intervalles de la maintenance préventive par an ( $365/T$ ). L'expression du coût total annuel de maintenance ( $C_{Tot}^a$ ) est comme suit :

$$C_{Tot}^a = \frac{365}{T} \left[ \lambda_c T + \left(1 - \frac{\lambda_c}{\lambda_p}\right) (1 - e^{-\lambda_p T}) \right] \overline{C_{CM}} + \frac{365}{T} \overline{C_{PM}} \quad (2.4)$$

La problématique principale posée est la détermination de la période optimale pour la maintenance préventive permettant la minimisation du coût total de la maintenance tout en améliorant la disponibilité de l'équipement, en réduisant le nombre d'occurrence des pannes. L'optimisation est très simple en utilisant les modèles mathématiques. Mais la modélisation de la relation entre l'inspection (maintenance) et la fiabilité (taux de défaillance) pose toujours problème.

Généralement, les périodes de maintenance préventive des équipements médicaux sont fixées par les fournisseurs ou par des techniciens et ingénieurs biomédicaux ayant de longues années d'expérience. Hors, d'après Wang (2006), il est difficile de déterminer l'intervalle optimal pour la maintenance préventive, en effet, il requière la collecte de données empiriques statistiquement significatives.



### 2.3. Priorisation et classification des équipements médicaux

La croissance continue du nombre et de la complexité des équipements médicaux exige que les hôpitaux établissent un programme de management des équipements médicaux afin d'assurer la fiabilité et le fonctionnement performant des équipements critiques.

La criticité est fonction de l'impact opérationnel de la mission de l'organisation en raison de la perte, les dommages ou la destruction d'un actif, (Vellani,2006). Dekker et al. (1998) ont défini la criticité de l'équipement en fonction de l'utilisation des équipements, plutôt que de l'équipement lui-même et ont expliqué comment certains équipements peuvent être dans un cas critique et dans un autre auxiliaire. De nombreuses techniques sont développées pour l'évaluation de la criticité des équipements. La plupart d'entre elles utilisent la variation de la probabilité du nombre de risque « Probability Risk Number » (PRN), (Moubray, 1997). C'est un produit de la probabilité de défaillance, de la gravité de la conséquence d'une défaillance et de la détectabilité de la défaillance :

$$PRN = \text{Probabilité de défaillance} \times \text{Gravité} \times \text{Détectabilité} \quad (2.5)$$

Plusieurs critères qualitatifs et quantitatifs ont été identifiés afin de classer et de prioriser les équipements médicaux selon leur criticité ainsi que les stratégies de maintenance. Fennigkoh et Smith (1989) ont proposé une méthode pour inclure les équipements médicaux dans le programme de la maintenance préventive connue par « Risk-Based-Criteria » qui est basée sur la valeur de l'EM « Equipment Management » qui est la somme présentée ci-dessous :

$$EM = \text{Fonction} + \text{Risque physique sur le patient} + \text{maintenance requise} \quad (2.6)$$

Ainsi, l'équipement est inclus dans la planification de la maintenance et considéré comme critique si la valeur de l'EM est  $\geq 12$ . L'inconvénient principal de cette approche est sa nature additive. En effet, si le score de l'équipement dans l'un des trois facteurs est élevé, mais les scores des deux autres sont faibles, ou vice-versa, le score obtenu ne pourra pas être suffisamment élevé pour inclure l'équipement au programme de management des équipements médicaux et la classification ne sera plus conforme à la criticité des équipements, (Tawfik et al. 2013). Wang et Levenson (2000) ont proposé de réinterpréter le critère de la fonction de l'équipement de Fennigkoh et Smith (1989) comme la criticité de la mission afin d'élargir le champ du risque d'un seul patient à tous les patients sous traitement. Ainsi, l'équation (2.6) d'EM a été modifiée en remplaçant la fonction par la criticité de la mission pour donner un poids égal aux trois critères. Ainsi, un nouveau paramètre EMR « Equipment Management Rating » peut être calculé selon l'équation (2.7) suivante :

$$EMR = \text{la criticité de la mission} + 2 \times \text{Risque physique} + 2 \times \text{maintenance requise} \quad (2.7)$$

Les valeurs du risque ont été extraites de la classification des risques de l'Emergency Care Research Institute (ECRI, 1995) et celles de la maintenance sont identiques à celles utilisées par Fennigkoh et Smith (1989). De plus, ils ont proposé d'introduire un autre critère jugé important tel que le taux d'utilisation de l'équipement et le paramètre s'appelle maintenant AEMR pour « Adjusted EMR » avec l'équation suivante :

$$AEMR = (\text{la criticité de la mission} + 2 \times \text{maintenance requise}) \times \text{utilisation} + 2 \times \text{Risque physique} \quad (2.8)$$

Wang (2006) a choisi des critères qualitatifs pour développer sa méthode de classification des certains équipements médicaux. Le critère de « la criticité » de la mission présenté en trois niveaux (critique, important et nécessaire) décrit à quel point l'équipement est crucial pour le soin du patient. Le deuxième critère proposé est « le risque patient » aussi évalué en trois niveaux (élevé, moyenne et faible). D'autres critères qualitatifs et quantitatifs pour la classer les équipements critiques ont été présentés par Mkalaf et al. (2013) : le risque de la défaillance ou de la panne posée sur le patient, la durée moyenne d'utilisation par patient, le nombre moyen de patients qui sont servi par l'équipement par mois ou par an, la durée de vie moyenne de l'équipement et la disponibilité des équipements alternatifs en cas de la défaillance. Tawfik et al. (2013) ont développé un modèle basé sur la logique floue pour la classification des équipements médicaux en quatre classes de risque : très faible, faible, moyenne et élevé. Les quatre variables utilisés dans le modèle sont : la criticité de mission, la fonction de l'équipement, les exigences de la maintenance et le risque physique. La criticité de la mission dépend du taux d'utilisation, de l'importance de l'équipement et du ratio de la sécurité de sauvegarde (RSS). Cette dernière définie le nombre d'alternatives disponibles en cas d'indisponibilité d'un équipement.

$$RSS = \frac{S}{M} \quad (2.9)$$

S représente le nombre total d'équipements dont le score du taux d'utilisation et d'importance est inférieur à 10, M est le nombre total des équipements de même fonction et dans le même département.

La comparaison des trois approches pour les classes du risque des quelques équipements dans le tableau 2.1 ci-dessous montre que certains équipements, comme le stérilisateur à vapeur, passent de la classe faible d'après Fennigkoh et Smith (1989) à la classe moyenne par le modèle

de logique floue. De la même manière, le réfrigérateur pour la banque du sang est passé de la classe faible à la classe élevée à cause de son importance et de son taux d'utilisation puisque certains hôpitaux ne possèdent qu'un seul réfrigérateur.

**Tableau 2.1** Comparaison entre les classes du risque pour quelques équipements médicaux Fennigkoh et Smith (1989), Emergency Care Research Institute (ECRI) et modèle de logique floue, Tawfik et al. (2013)

Nom de l'équipement	Fennigkoh et Smith (1989)	Emergency Care Research Institute (ECRI)	Modèle de logique floue
Stérilisateur à vapeur (3M)	Faible	Elevé	Moyenne
Ventilateur (Hamilton)	Elevé	Elevé	Elevé
Analyseur d'Hématologie (Erma)	Moyenne	Moyenne	Elevé
Réfrigérateur pour banque de sang (Fricool)	Faible	Moyenne	Elevé
Stimulateur cardiaque externe (FIAB)	Moyenne	Moyenne	Elevé
Diathermie (WEM)	Elevé	Faible	Elevé
Bain d'eau (Jouan)	Faible	Faible	Très Faible
Pompe à perfusion (Atom)	Moyenne	Elevé	Elevé
Pompe à perfusion (Sabratec)	Moyenne	Elevé	Moyenne

Ce modèle est simple et réaliste à cause de la capacité de la logique floue pour simuler la pensée humaine. Ainsi, ce modèle permet d'avoir des scores de risque dynamiques contrairement à d'autres approches qui proposent des scores statiques. Pour cette raison, le service biomédical doit mettre à jour les scores pour ne pas manquer de nouvelles inclusions d'équipements dans les classes de risques.

D'après Tarawneh et El-Sharo (2009), l'état de l'équipement médical peut être évalué en respectant certains facteurs : les performances de fonctionnement, l'âge, la sécurité, le coût de maintenance, les temps d'arrêt, la disponibilité des pièces de rechange, la possibilité de mise à niveau, la disponibilité de nouvelles technologies, etc. Ainsi, Tarawneh et El-Sharo (2009) ont classifié les équipements médicaux en six catégories selon leur taux de disponibilité annuel (voir tableau 2.2) :

**Tableau 2. 2** *Classification des catégories selon le taux de disponibilité*

Taux de disponibilité d'un équipement	Classification des équipements en six catégories selon le taux de disponibilité
95% - 100%	Elevé
90% - 94.9%	Très bonne
80% - 89.9%	Bonne
70% - 79.9%	Moyenne
60% - 69.9%	Faible
< 60%	Pauvre

Selon cette classification, la décision de remplacement de l'équipement peut être prise selon l'algorithme développé par Tarawneh et El-Sharo (2009) en respectant le taux de disponibilité.

Taghipour et al. (2011) ont développé un modèle multicritère de prise de décision en utilisant la méthode AHP « Analysis Hierarchy Process » pour la priorisation des équipements médicaux selon leur score de criticité. La criticité est calculée en fonction des poids des critères et des sous-critères. Les équipements considérés comme critiques sont inclus dans le programme de management des équipements médicaux de l'hôpital. La stratégie de maintenance de l'équipement devrait être définie en fonction des ressources disponibles, du budget, des ressources humaines et des outillages de maintenance. En se basant sur la valeur de score transformé (TSV), trois classes de criticité ont été définies (voir tableau 2.3) :

**Tableau 2. 3** *Répartition de stratégie de maintenance selon la classe de criticité*

Classe de criticité	Valeur de score transformé (TSV)	Stratégies de maintenance
Importante	40% < TSV < 100%	Proactive, prédictive, ou systématique
Moyenne	20% < TSV < 40%	Proactive ou systématique
faible	0% < TSV < 20%	Maintenance corrective

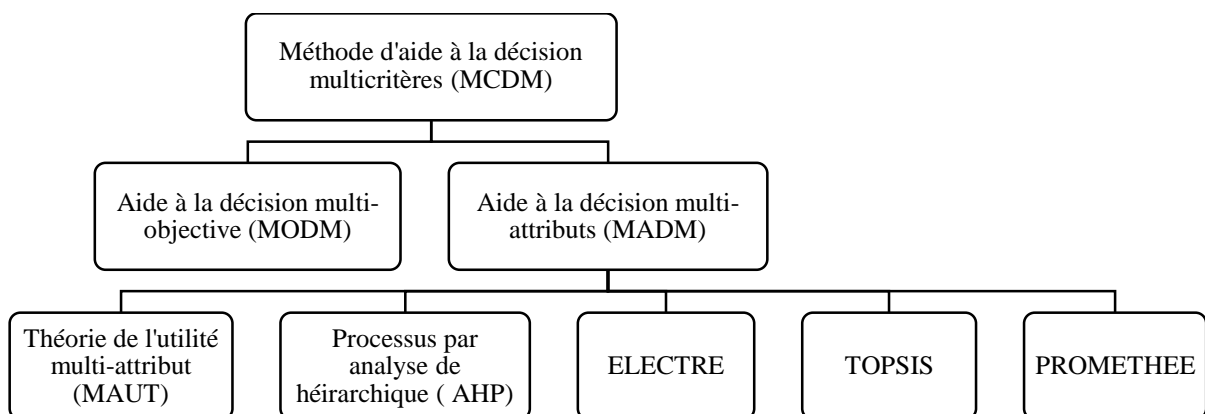
Récemment, Jamshidi et al. (2015), en se basant sur les opinions de différents experts et des incertitudes, ont utilisé l'approche de prise de décision multicritère floue (FMCDM) afin de prioriser les équipements médicaux. Ils ont ensuite proposé un schéma de planification de la maintenance pour identifier la stratégie de maintenance adaptée à chaque équipement sur la base du score total de l'intensité de l'analyse multicritère et de l'indice de priorité du risque.

#### 2.4. Classification des méthodes d'aide à la décision multicritère

L'aide à la décision est un processus qui utilise un ensemble d'informations disponibles à un instant donné, afin de formuler un problème et aboutir à une décision sur un objet précis. Dans le cadre de la décision multicritère, l'objet de la décision est formé par un ensemble d'alternatives. Ainsi, les problèmes réels peuvent être formulés à l'aide des méthodes d'analyse multicritère, selon quatre problématiques décisionnelles de référence (Roy, 1985) :

- La problématique de choix : choisir un sous ensemble des alternatives en vue d'un choix final d'une seule alternative.
- La problématique de tri ou affectation : trier les alternatives d'après des normes. Le résultat est une affectation de chaque alternative à une catégorie définie a-priori.
- La problématique de rangement : ranger les actions selon un ordre de préférence décroissante.
- La problématique de description : éclairer la décision par une description des alternatives et leurs conséquences.

Nous présentons dans cette section les méthodes d'aide à la décision multicritère les plus utilisées (Figure 2.3).



**Figure 2.2** Les méthodes d'aide à la décision multicritère

- **MAUT (Multi-Attribute Utility Theory)** s'applique dans le cas où les évaluations des actions par rapport aux attributs sont aléatoires, alors les évaluations sont incertaines. Elle utilise des fonctions d'agrégation partielle et qui cherche à définir une fonction d'utilité, (Keeney et Raifa, 1976).
- **AHP (Analytic Hierarchy Process)** consiste à aider les décideurs à résoudre des problèmes complexes en représentant le problème de décision par une structure hiérarchique reflétant les interactions entre les divers éléments du problème, à procéder à des comparaisons par paires des éléments de la hiérarchie, et enfin à déterminer les priorités des alternatives, (Saaty, 1980).
- **ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité)** se base sur deux concepts de concordance et discordance afin de classer les alternatives. Elle prend en compte l'incomparabilité sur certains critères. Plusieurs extensions de la méthode ELECTRE sont issues des travaux de Roy (1968) : ELECTRE I, II, III, Is et IV.
- **TOPSIS (Technique for Order by Similarity to Ideal Solution)** consiste à choisir une solution qui se rapproche le plus de la solution idéale (meilleure sur tous les critères) et de s'éloigner le plus possible de la pire solution. Son grand apport est l'introduction des notions d'idéal et d'anti-idéal, (Hwang et Yoon, 1981).
- **PROMETHEE (Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations)** utilise non plus la notion de surclassement, mais la préférence large. Elle se base sur une extension de la notion de critère par l'introduction d'une fonction exprimant la préférence du décideur pour une alternative 1 par rapport à une autre alternative 2, (Brans et Vincke, 1985).

Afin de choisir la méthode la plus pertinente pour une problématique posée, nous présentons une comparaison des méthodes d'aide multicritère (Tableau 2.4).

**Tableau 2. 4** *Comparaison des méthodes d'aide à la décision multicritère (MADM)*

MADM	Avantages	Inconvénients
MAUT	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Basée sur la théorie de l'utilité</li> <li>- Possibilité d'intégrer l'incertitude du décideur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les fonctions d'utilité sont difficiles à concevoir</li> <li>- Exige plusieurs vérifications telles que l'indépendance mutuelle au sens de l'utilité.</li> <li>- Trop complexe surtout dans les cas où il y a de l'incertitude</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les critères doivent être indépendants</li> </ul>
AHP	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modélisation du problème de décision par une structure hiérarchique</li> <li>- Simple et compréhensible</li> <li>- Aspects qualitatifs et quantitatifs</li> <li>- Utilisation d'une échelle sémantique pour exprimer les préférences du décideur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Problème de renversement de rang (deux actions peuvent voir leur ordre de priorité s'inverser suite à une modification (ajout ou suppression d'une ou de plusieurs actions) de l'ensemble des actions.</li> <li>- Un grand nombre d'éléments dans le problème de décision fait exploser le nombre de comparaisons par paires.</li> </ul>
TOPSIS	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Facile à appliquer</li> <li>- Calcule la solution idéale positive (les plus meilleurs) et négative (les plus mauvaises) des attributs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Même si toutes les actions sont mauvaises, la méthode propose la meilleure action parmi les mauvaises</li> </ul>
ELECTRE	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Accepte les insuffisances des informations</li> <li>- Fait un usage minimum de valeurs numériques (la mieux adaptée à des échelles ordinales qu'à des critères à valeurs numériques)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ELECTRE III est difficile à appliquer avec un recours important aux valeurs numériques</li> <li>- ELECTRE II limite le nombre de circuits par rapport à ELECTRE I</li> <li>- Résultats difficiles à interpréter (Brauers et Zavadskas, 2012)</li> </ul>
PROMETHEE	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fonction de préférence du décideur (attribuer un poids et un type pour chaque critère)</li> <li>- Plus facile et compréhensible par rapport à la méthode ELECTRE</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilisation de 6 types de fonctions différentes.</li> </ul>

## 2.5. Externalisation de la maintenance biomédicale

Suite à notre revue de la littérature sur les travaux traitant de l'externalisation de la maintenance et de la modélisation des contrats, nous avons constaté qu'il existait un nombre limité de travaux traitant ce sujet qui demeure un domaine d'actualité (Jamshidi et al.2015). Il n'existe pas de recherches traitant de la modélisation et de l'estimation des coûts des contrats pour la maintenance des équipements médicaux. Cette absence est due au faite que les problématiques

liées à l'organisation et la gestion du système hospitalier telles que la planification en production de soins (les soins primaires, les soins ambulatoires et les soins d'hospitalisation) et en support aux soins (le transport des patients, la gestion des déchets, la maintenance, etc.) sont récemment devenues la préoccupation majeure des chercheurs. En particulier, la gestion de l'activité de maintenance biomédicale est une problématique de recherche qui commence récemment à intéresser certains chercheurs (Mkalaf et al. 2013).

La problématique de l'externalisation de la maintenance biomédicale prend aujourd'hui toute son ampleur. Il n'est d'ailleurs plus possible de gérer les hôpitaux et les établissements de soins, publics ou privés, sans s'interroger sur l'opportunité d'externaliser une partie des activités de maintenance. Par ailleurs, dans le domaine industriel, l'externalisation de la maintenance par des contrats est très utilisée et des recherches sont menées sur la modélisation mathématique et le développement de différentes politiques pour le service des contrats. Pour des équipements dont la vie est considérée longue, Rahman et Chattopadhyay (2007) ont proposé une politique de service de contrat de maintenance avec une période de contrat courte qui ne dépend pas de la vie de l'équipement. Le contrat présente des intervalles fixes de maintenance préventive incluant des réparations (maintenance corrective sont possibles entre ces intervalles). Ce type de contrat est favorable aux équipements complexes, dont le système est réparable et d'une vie longue. La vie d'un équipement médical est en moyenne de 10 ans et peut être considéré comme longue. Le plus important dans cette politique est la modélisation du coût du contrat. Ce dernier inclut les coûts des maintenances préventives, les coûts des maintenances correctives (les réparations), les coûts des inspections et des contrôles qualité, la pénalité de la sécurité, la fiabilité et la disponibilité. D'après khalaf et al. (2013), c'est par l'effet des défaillances que la survie de l'équipement est décroissante, ainsi, la maintenance peut n'avoir aucun effet sur la survie de l'équipement. A ce niveau, le service biomédical doit définir la période optimale du contrat afin de minimiser ses dépenses. Le coût prévu des réparations entre deux maintenances préventives dépend de l'intensité des défaillances. Ainsi, le coût total de ces réparations est la somme des coûts prévus pour chaque intervalle. La limite de la modélisation proposée est que Rahman et Chattopadhyay (2007) ont considéré le coût unitaire de chaque réparation comme constant. Dans le cas réel et d'après nos données sur l'historique de la maintenance biomédicale des hôpitaux tunisiens, le coût dépend essentiellement du coût de la main d'œuvre et des pièces de rechanges. Le profit du prestataire de service de maintenance par contrat est influencé par de nombreux facteurs tels que les termes du contrat, la fiabilité des actifs, les stratégies de la maintenance et le coût des ressources nécessaires pour effectuer la maintenance. Alors, Il est



bien nécessaire de développer des modèles mathématiques afin de maximiser les profits des sous-traitants, minimiser les dépenses du client et comprendre les coûts futurs à inclure dans le prix du contrat, (Rahman et Chattopadhyay, 2007).

Face à l'augmentation de l'externalisation de la maintenance des équipements médicaux, des recherches ont été menées sur la mesure et l'évaluation de la qualité et de la performance des contrats. Mais le plus important est l'estimation des coûts de ces contrats. Par exemple, d'après ECRI « Emergency Care Research Institute » (1995), les hôpitaux des Etats-Unis ont payé environ \$1.6 milliards pour le service support des équipements cliniques aux fournisseurs et autres agences externes.

D'après Cruz et Rinçon (2012), dans plusieurs établissements de soins dans les pays en voie de développement, le service de maintenance avec contrat est souvent inévitable parce que les hôpitaux ont un nombre limité d'employés bien formés et moins de ressources matérielles disponibles pour assurer la maintenance en interne. Ainsi, l'externalisation de la maintenance des équipements médicaux nécessite plus de recherches en l'optimisation. L'objectif général de cette optimisation est de maximiser le profit des fournisseurs et/ou des sous-traitants et de minimiser les dépenses de l'hôpital. En plus, la plupart des équipements médicaux sont complexes et nécessitent une maintenance préventive afin d'augmenter leurs disponibilités et leur fiabilités et de minimiser le taux des défaillances. Ainsi, les contrats doivent considérer la différence des coûts de défaillances (selon la complexité des pannes et la fiabilité de l'équipement), l'occurrence de la maintenance préventive et le coût de la main d'œuvre et des pièces de rechanges. Souvent, les fournisseurs d'équipements et/ou les sous-traitants offrent plusieurs options au service de maintenance biomédicale. Ce dernier est alors confronté au problème de l'option optimale selon la criticité des équipements, la capacité budgétaire et les clauses du contrat. L'objectif est de définir l'intervalle optimal pour la maintenance préventive et pour le temps de remplacement des équipements. D'après AAMI « Association for Advancement of Medical Instrumentation », le coût de service de contrat (pièces de rechanges et main d'œuvre de la maintenance planifiée et les réparations) des fournisseurs de l'équipement représente entre 5% et 15% du prix de l'achat de l'équipement.

La plupart des articles s'intéressent à l'étude de la fiabilité (Khalaf et al. 2010) et de la criticité (Fennigkoh et Smith, (1989), Taghipour et al. (2011), Wang et Levenson, (2000), Mkalaf et al. (2013)) de l'équipement médical. Nous avons identifié quelques travaux qui traitent des critères d'externalisation et du choix de contrat (Georgin et al. 2005). Cruz et Rincon, (2012) confirment que la littérature est bien pauvre dans ce domaine. Cruz et al. (2002) ont proposé une procédure

de sélection et d'évaluation quantitative de la performance des fournisseurs de contrats pour la maintenance des équipements médicaux. Les critères utilisés pour établir l'équation d'évaluation sont : la garantie de disponibilité, la pénalité de non disponibilité, le temps de réponse, les réparations effectuées dans les délais et les réparations effectuées correctement dès la première fois. Ainsi, ils ont trouvé une corrélation linéaire entre la performance des fournisseurs de contrat de service et le ratio (coût de service/coût d'acquisition). Cette relation permet d'identifier les trois classes de performance (pauvre, moyenne, élevée) et la décision de continuer ou d'arrêter le contrat. Comme l'évaluation de ces critères nécessite l'avis d'experts, Cruz et al. (2005) ont proposé le système d'inférence floue pour l'évaluation de la performance des contrats de maintenance d'équipements médicaux. Ce système se base sur des critères quantitatifs similaires aux critères du modèle précédent : le ratio (coût de service/coût d'acquisition), les réparations effectuées correctement dès la première fois et la disponibilité de l'équipement. Ces critères sont classés en trois niveaux (pauvre, moyenne et bonne). Ainsi, la décision de terminer le contrat, la révision pour connaître la possibilité des améliorations ou de maintenir le contrat est prise selon le statut (pauvre, moyen et bon) obtenu grâce à la variable qualité de service. Cruz et al. (2005) ont supposé que ce système peut être utilisé afin de prédire les tendances et d'améliorer la maintenance préventive et la qualité du service de réparation des fournisseurs d'équipements et/ou les sous-traitants. Georgin et al. (2005) proposent une procédure pour le choix du type de contrat par équipement dans le but d'optimiser l'activité de maintenance par réorganisation. Les critères de choix sont principalement la disponibilité des ressources, la formation, le coût des pièces et le MTBF. Un nouveau type de contrat « partenariat » est proposé dans la procédure. Ce type de contrat fait l'objet de certaines études dans la littérature qui témoignent de sa performance (Georgin et al. (2005), De vivol et al. (2004)). Ce contrat existe déjà dans quelques pays développés et dénote un partenariat entre le service de maintenance de l'hôpital et les sous-traitants. N'étant pas disponible actuellement dans le contexte tunisien, il est écarté de cette étude.

L'externalisation des tâches de maintenance a des avantages et des inconvénients qui peuvent être identifiés selon les ressources humaines, les ressources matérielles et le coût global de l'activité (Georgin, 2005). La décision d'externaliser dépend de la disponibilité des outils et des compétences appropriées en interne. D'autres critères liés à l'équipement, l'hôpital et le sous-traitant peuvent être considérés. Nous concluons que les recherches sur l'externalisation des services de maintenance des dispositifs médicaux et les risques qui y sont associés dans les hôpitaux en sont encore à leurs balbutiements.

## **2.2. Conclusion**

Cet état de l'art sur la maintenance des équipements médicaux contient trois volets principaux portant sur la priorisation des équipements médicaux pour le choix des stratégies de maintenance, l'optimisation de la maintenance et le problème externalisation / internalisation. Dans le chapitre 3, nous présenterons le développement d'une procédure pour le choix des stratégies de maintenance et le choix d'externaliser ou d'internaliser la maintenance et le contrat à sélectionner. Dans le chapitre 4, nous aborderons les méthodes d'aide à la décision multicritère qui permettent la priorisation des équipements médicaux et la classification des stratégies de maintenance. Finalement, dans le chapitre 5 nous présenterons deux modèles mathématiques qui peuvent aider les experts des services de maintenance à la sélection de la stratégie, à externaliser ou internaliser et au choix du contrat en considérant le budget alloué et le niveau de disponibilité du matériel.

## **Chapitre 3 : Procédure du choix de la stratégie de maintenance**

Les hôpitaux sous-traitent de nombreuses activités de maintenance afin de se concentrer sur la production de soins de santé. Dans les pays en voie de développement, la maintenance des équipements médicaux est souvent gérée par des contrats, Cruz et Rincon, (2012). Les prix sont ainsi très élevés et dans la plupart des cas non maîtrisés. Aujourd'hui, face aux coûts des soins très élevés, les gouvernements ont mis en place un certain nombre de réformes visant à contrôler les dépenses tout en améliorant l'efficacité et la qualité. Les hôpitaux se forcent ainsi depuis lors à minimiser le coût total de l'activité, à la fois l'activité de production de soins de santé et les activités support. La réorganisation du service de maintenance et le changement de son mode de gestion se présentent comme une priorité. Dans ce sens, nous proposerons dans ce chapitre une procédure visant à déterminer quelle politique est la mieux adaptée pour chaque niveau de maintenance par équipement, quelle activité sera à internaliser, quelle est le type de contrat à choisir dans le cas d'externalisation et quel est le contenu de ce contrat.

Dans les hôpitaux Tunisiens, la maintenance des équipements médicaux est gérée en utilisant des contrats. D'après Letaief et al. (2007), il existe quatre types des contrats :

- ✓ Contrat type A\* : Tout risque (main-d'œuvre et pièces, maintenance préventive et corrective comprise dans le forfait).
- ✓ Contrat type A : Maintenance préventive avec pièces comprise dans le forfait.
- ✓ Contrat type B : Pièces de rechange comprises dans le forfait (correspondant à la maintenance préventive et/ou conditionnelle).
- ✓ Contrat type C : Coup à coup sans forfait

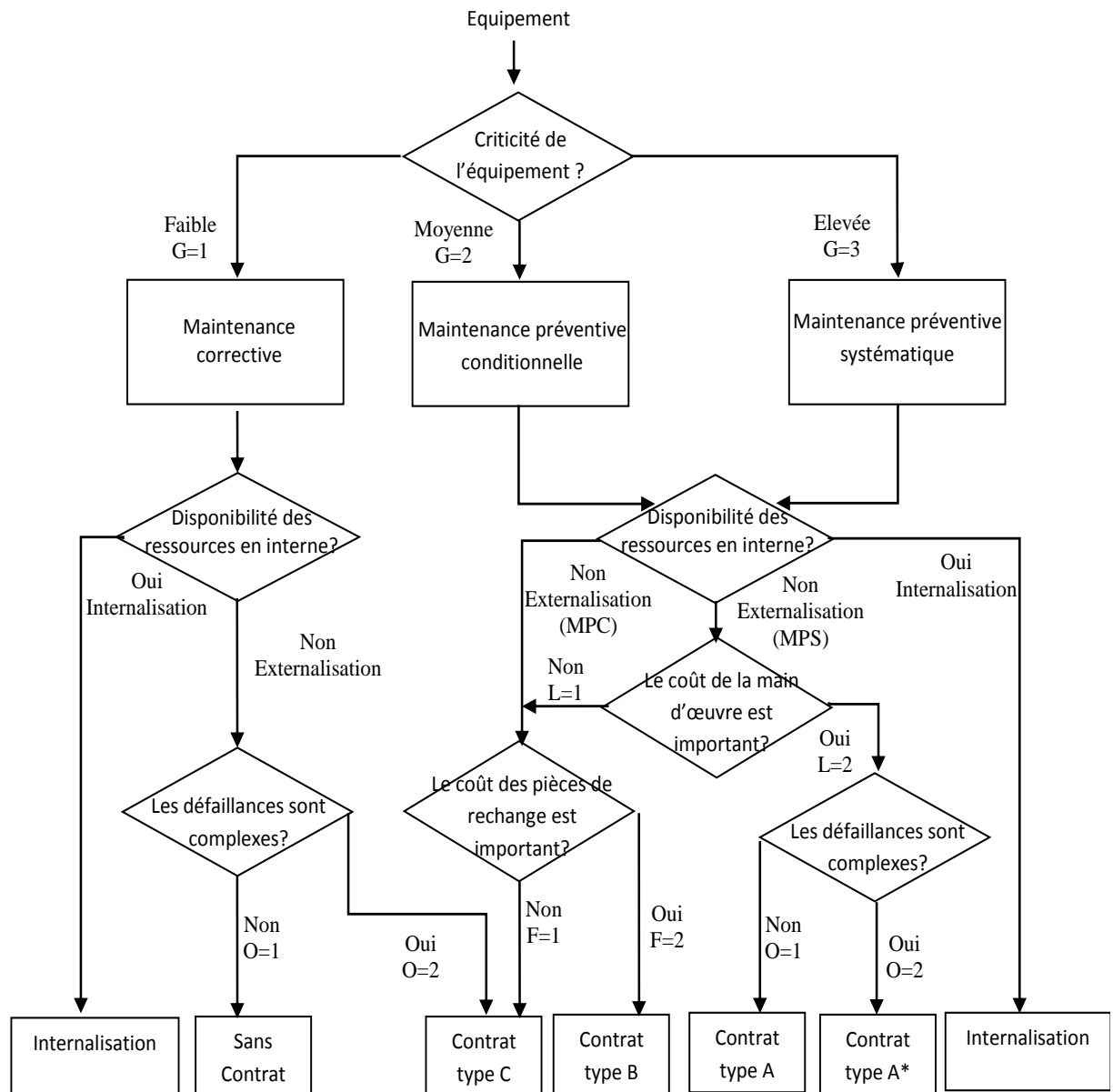
Certaines clauses de ces contrats sont les mêmes, par exemple, la durée de l'intervention, le temps de réponse, les temps d'arrêt. La surveillance est effectuée avec un tableau de bord, qui contient ces indicateurs de performance.

Dans notre travail, nous allons prendre en considération les options des quatre contrats existants dans les hôpitaux tunisiens afin d'estimer le coût de chacun et de faciliter le choix du contrat d'externalisation de la maintenance. Nous prendrons en compte le coût des réparations variables (qui dépend de coût de la main d'œuvre et des pièces de rechanges par complexité des pannes et criticité de l'équipement) contrairement au Rahman et Chattopadhyay (2007).

### **3.1. Nouvelle procédure de décision**

La procédure proposée est basée à la fois sur l'avis des experts du service maintenance du CHU Habib Bourguiba Sfax et sur une étude approfondie de l'état de l'art. Selon la Panayiotou et al. (2009), l'élaboration d'une procédure de maintenance appropriée permet de sélectionner des stratégies de maintenance fondées sur les facteurs existants. Pour cette raison, notre procédure d'aide à la décision est basée sur les critères techniques, financiers, humains et organisationnels :

- Disponibilité des équipements de contrôle de mesure et d'essai « ECME »
- Disponibilité du personnel par niveau de maintenance
- Criticité du matériel qui définit la stratégie la maintenance à appliquer
- Charge horaire et coût de l'activité associée
- Complexité et fréquence de pannes
- Coûts des pièces de rechange



**Figure 3.1** Schéma de la procédure d'aide à la décision proposée (les valeurs  $G$ ,  $O$ ,  $L$  et  $F$  sont expliquées dans les parties suivantes), Masmoudi et al. (2015)

La caractéristique principale de la procédure proposée se résume dans l'application de la stratégie de maintenance préventive pour les équipements critiques. En outre, il est moins coûteux et plus avantageux d'internaliser la maintenance tant que les ressources nécessaires sont disponibles en interne. Enfin, le type de contrat de maintenance devrait dépendre de la complexité des tâches de réparation et du coût des pièces de rechange. En nous basant sur ces critères, nous proposons 4 étapes pour notre procédure :

- **Étape 1** : Calcul de la criticité des équipements à l'aide d'une analyse multicritère.

- **Étape 2** : L'internalisation de la maintenance par l'application d'une simple heuristique qui vérifie la faisabilité basée sur les contraintes internes et les coûts.
- **Étape 3** : Sélection de la stratégie de maintenance par équipement basée sur la disponibilité des ressources et en fonction du budget.
- **Étape 4** : Externalisation du reste avec ou sans contrat et en choisissant le type de pratique du contrat basé sur le coût de pièces de rechange et la complexité des réparations.

### **3.1.1. Première étape**

L'objectif de cette étape est de déterminer la stratégie de maintenance à suivre pour chaque équipement médical (préventive systématique, préventive conditionnelle ou bien corrective). La détermination de la stratégie est basée sur le calcul de la criticité des équipements. Plusieurs méthodes ont été développées dans la littérature pour déterminer la criticité. Dans notre modèle on va calculer la criticité en nous basant sur cinq critères (Degré de complexité de la maintenance, Fonction, Risque, Degré d'importance de la mission et Age) et six sous-critères (Taux d'utilisation, Disponibilité de dispositifs alternatifs, fréquence d'apparition des pannes, détectabilité, impact sur la production de soins et impact sur la sécurité).

Dans Taghipour et al. (2011), les auteurs ont utilisé l'ensemble de ces critères pour définir la criticité. Ils ont rajouté en particulier le coût de la maintenance (coût de la main d'œuvre, les outils et les pièces de rechange) comme critère supplémentaire. En se basant sur un ordre décroissant de priorité, ils ont déterminé l'ordre suivant des stratégies de maintenance : maintenance préventive conditionnelle pour les équipements hautement critiques, maintenance préventive systématique pour les équipements moyennement critiques et maintenance corrective pour ses équipements non critiques. Nous émettons certaines critiques par rapport à l'applicabilité de cet ordre dans notre procédure. Le critère « coût » évolue dans ce sens mais le critère « fonction », dont la pondération est la plus importante, évolue dans le sens du classement suivant : maintenance préventive systématique, maintenance préventive conditionnelle et maintenance corrective. De plus, selon l'avis des experts du CHU Habib Bourguiba de Sfax et le contenu des types de contrat, la stratégie de maintenance préventive systématique est celle qu'on associe aux équipements les plus critiques. Nous avons ainsi considéré le classement suivant : préventive systématique, préventive conditionnelle et corrective selon une nouvelle formule de criticité. Cette décision sera confirmée d'une façon scientifique dans le chapitre 4, section 4.2. En effet, ceci est dû au faite que nous avons choisi

de ne pas utiliser le critère de coût dans le calcul de la criticité des équipements et de le conserver pour les étapes suivantes de la procédure de décision.

En outre, au lieu d'utiliser les coefficients de pondération pour les critères, nous avons décidé d'ajuster le critère des niveaux de la façon suivante : pour un critère avec un niveau de 1 à 5 et un coefficient de pondération de 2 comme utilisé par Taghipour et al. (2011), nous considérons 10 niveaux de 2 à 10 sans poids. Cette façon est pratique (facile à implémenter) dans l'hôpital où des milliers d'équipements sont inclus dans l'étude. Ainsi, nous avons confirmé la validité de ces idées avec les experts de service de maintenance biomédicale. Le tableau 3.1 indique les critères et leurs niveaux. Par la suite, nous allons expliquer en détails les différents critères et sous-critères.

**Tableau 3.1** *Les critères et sous critères pour le calcul de la criticité*

<b>Critères</b>	<b>Nombre des sous critères</b>	<b>Nombre des niveaux</b>
Degré de la complexité de maintenance (A)	-	3
Fonction (B)	-	9
Risque (C)	4	3
Degré de l'importance de la mission (D)	2	3
Age (E)	-	2

**a. Degré de complexité de la maintenance (1<sup>er</sup> critère : A)**

D'après Fennigkoh et Smith (1989), on peut considérer ce critère pour le calcul de la criticité des équipements médicaux. Ils ont proposé cinq niveaux pour ce critère selon leurs importances. Dans notre modèle, nous proposons trois niveaux de maintenance avec des scores de 1 à 3 (voir tableau 3.2)

- Complexité élevée de maintenance requise (score = 3) : les équipements à base mécanique, pneumatique ou hydraulique
- Complexité moyenne de maintenance requise (score = 2) : les équipements qui exigent seulement la vérification des performances et des tests de sécurité.
- Faible complexité de maintenance requise (score = 1) : les dispositifs qui reçoivent uniquement des inspections visuelles.



**Tableau 3.2** *Degré de complexité de la maintenance*

Classe	score
Complexité élevée de maintenance requise	3
Complexité moyenne de maintenance requise	2
Complexité faible de maintenance requise	1

**b. La fonction (2<sup>ème</sup> critère : B)**

On définit la fonction d'un équipement médical comme l'objectif principal pour lequel il est utilisé. D'après Fennigkoh et Smith (1989), on peut classer les équipements sur 9 niveaux de fonction (voir tableau 3.3). Dans notre modèle nous utilisons la même définition et nous considérons également les 9 niveaux.

**Tableau 3.3** *Les fonctions des équipements médicaux*

	Catégories	Score
Traitement	Assistance cardio-respiratoire	9
	Soins chirurgicaux et intensif	8
	Soins et traitement physique	7
Diagnostic	Suivi des soins chirurgicaux et intensifs	6
	Suivi physiologique complémentaire et Diagnostique	5
Analyse	Laboratoire d'analyse	4
	Accessoire de laboratoire	3
	Informatique et apparenté	2
Divers	Soins aux patients et autres	1

**c. Risque (3<sup>ème</sup> critère : C)**

Le critère risque est un critère très important pour la détermination de la criticité d'un équipement médical. Plusieurs méthodes sont utilisées pour le déterminer. Il s'agit d'appliquer l'analyse AMDEC ou de donner une estimation dans le cas échéant. Dans Taghipour et al. (2011), les auteurs utilisent des sous critères tels que la détectabilité, la fréquence d'apparition des pannes et leurs conséquences en termes de coût, la sécurité et temps de l'arrêt de production. D'après Taghipour et al. (2011), le risque est la somme des modes des défaillances individuelles des Risques (MDR). Dans notre étude, nous avons considéré tous ces critères sauf le coût et nous proposons la formule suivante :

$$MDR = \text{détectabilité} * \text{fréquence} * (\text{temps d'arrêt de production} + \text{sécurité}) / 2 \quad (3.1)$$

Nous obtenons une valeur entière de MDR qui varie entre 1 et 27. Ensuite, le risque est obtenu par la multiplication d'une valeur entière de 1 à 27 par le nombre maximum de modes de défaillance parmi tous les équipements à l'étude. Par exemple, pour un équipement médical avec 10 modes de défaillance ; le risque est compris entre 10 et 270. Néanmoins, au lieu de calculer les valeurs de risque, nous proposons un raisonnement heuristique pour déduire les trois niveaux de risque : élevé (Score = 3), moyen (score = 2) et faible (Score = 1), en respectant les niveaux des sous-critères affectés à cet équipement. Un raisonnement déterministe comme la logique propositionnelle ou un raisonnement non-déterministe comme la logique floue peut être utilisée, (Rzevsky, 1995). Dans ce cas, les règles d'inférence doivent être établies avant d'évaluer des alternatives. Les règles sont les expressions de connaissances sous la forme de conditions et d'actions. Une règle se compose d'un IF-déclaration et d'une déclaration ALORS. Par exemple, *SI la détectabilité est élevée, Et la fréquence est moyenne, Et temps d'arrêt est moyen, Et la sécurité est élevée, ALORS le risque est élevé*

#### d. Degré d'importance de la mission (4<sup>ème</sup> critère : D)

Wang et Levenson (2000) ont considéré le degré d'importance de la mission ou la criticité de la mission comme l'un des critères pour le calcul de la criticité des équipements médicaux. Ce critère décrit la mesure dans laquelle un équipement est crucial pour le processus de prestation de soins d'un hôpital. Ce critère dépend du taux d'utilisation (la moyenne des heures d'utilisation par semaine divisée par le maximum dont il est considéré de 48 heures par semaine) et de la disponibilité des équipements alternatifs (Taghipour et al. 2011). Dans notre modèle, nous proposons quatre niveaux pour le taux d'utilisation et deux niveaux pour la disponibilité des équipements alternatifs (voir Tableau 3.4).

**Tableau 3.4** Les sous-critères pour le calcul de degré d'importance

Critère	Sous-critère	Description	Score
<b>Degré d'importance</b>	Taux d'utilisation ( <i>TU</i> )	$TU \geq 80\%$	4
		$65\% \leq TU < 80\%$	3
		$30\% \leq TU < 65\%$	2
		$TU < 30\%$	1
	Disponibilité des équipements alternatifs	Non disponible	2
		Disponible	1

Nous considérons une sommation simple de ces deux sous-critères notée (*S*) pour le calcul de degré d'importance de la mission. Cette valeur varie entre 2 et 6. Dans notre modèle, nous

proposons trois niveaux pour ce critère : importance élevée (score = 3), importance moyenne (score = 2) et importance faible (score =1), (voir tableau 3.5). En effet, pour  $TU \geq 80\%$  et la non disponibilité des équipements alternatifs, la mission de l'équipement est d'une importance élevée et  $S=6$ . Sinon si  $TU < 30\%$  et pour quel que soit la disponibilité des équipements alternatifs, ou pour  $30\% \leq TU < 65\%$  et des équipements alternatifs disponibles, nous aurons  $S = 2$  ou 3. Alors, nous considérons la mission de l'équipement est d'une importance faible. Pour le reste, la mission de l'équipement sera considérée d'importance moyenne.

**Tableau 3.5** Degré d'importance de la mission

Niveaux de degré d'importance de la mission	S	Score
élevé	$S = 6$	3
moyen	$S \in \{4, 5\}$	2
faible	$S \in \{2, 3\}$	1

*e. Age (5<sup>ème</sup> critère : E)*

Le score de ce critère est basé sur l'âge actuel d'un équipement médical et de sa durée de vie prévisible (généralement 10 ans). Dans notre modèle, nous proposons deux niveaux pour l'âge : neuf (âge  $\leq 10$  ans, score = 1) sinon ancien avec un score = 2.

**f. Criticité (G)**

Pour le calcul de la criticité, nous proposons une formule simple avec une somme des cinq critères (de A à E). Nous ne considérons pas de pondération car l'importance de chaque critère est déjà considérée à travers le nombre de niveaux associés. Dans notre modèle, le score total de la criticité varie entre 5 et 20. Le tableau 3.6 illustre un exemple pour l'un des équipements les plus critiques.

**Tableau 3.6** Etude de la criticité du respirateur d'anesthésie DRAGER JULIEN

Critères	Description	Score
<b>A</b>	il possède une moyenne maintenance requise	2
<b>B</b>	Dispositif de traitement cardio-respiratoire	9
<b>C</b>	Dispositif a risque moyenne	2
<b>D</b>	High importance of the mission	3
<b>E</b>	Dispositif ancien	2
<b>G</b>	Criticité = A + B + C + D + E	18

### 3.1.2 Deuxième étape

La décision d'internaliser ou externaliser la maintenance est considérée en nous basant sur certains critères complémentaires : la compétence de l'équipe du service de maintenance biomédicale, la disponibilité des outils nécessaires, la charge annuelle estimée, l'équipe de maintenance nécessaire et le coût de la main d'œuvre en externe.

Étant donné que la stratégie de maintenance pour chaque équipement n'est pas encore connue dans cette étape, nous considérons le coût moyen des trois stratégies possibles comme estimation.

#### a. Compétence par niveau de maintenance (H)

Selon la norme NF X60-010-(1994), sont définis cinq niveaux de maintenance entre 1 et 5. La compétence du personnel est identifiée par niveau. Le niveau L1 correspond à des tâches de vérifications simples qui se font par les techniciens en interne (inclus dans le calcul des charges internes) et le niveau L5 correspond à des travaux rares qui demandent l'intervention du constructeur (externe). La décision d'internaliser/externaliser se fera ainsi par rapport aux niveaux L2, L3 et L4.

**Tableau 3.7** *Présence ou non de compétences par niveau de maintenance (1 si oui, 0 si non)*

Stratégies   Niveaux	L1	L2	L3	L4	L5
<i>Compétence</i>	1	0 ou 1	0 ou 1	0 ou 1	0

#### b. Estimation de la charge annuelle par niveau par stratégie de maintenance par équipement (I)

Nous définissons la charge annuelle (en heures) par rapport à la stratégie de maintenance considérée pour chaque niveau de maintenance. Notons que la stratégie de maintenance préventive conditionnelle est uniquement présente dans le niveau L4 alors que la maintenance systématique est présente à tous les niveaux. Le tableau 3.8 représente l'estimation de la charge de maintenance pour le cas de ventilateur d'anesthésie de type DAREGER JULIEN.

**Tableau 3.8** *Estimation de la charge annuelle par niveau pour le respirateur d'anesthésie DRAGER JULIEN*

Stratégies   Niveaux	L1	L2	L3	L4
Maintenance préventive systématique (G=3)	1	2	3	7
Maintenance préventive conditionnelle (G=2)				3
Maintenance corrective (G=1)	10	11	15	8

### c. Estimation de l'équipe nécessaire (technicien/ingénieur) par niveau (J)

Nous avons défini l'équipe des techniciens et des ingénieurs associés pour chaque niveau de maintenance. Le tableau 3.9 illustre l'estimation de l'équipe nécessaire pour la maintenance de l'aspirateur d'anesthésie.

**Tableau 3.9** Composition de l'équipe nécessaire (*{techniciens, ingénieurs}*) par niveau pour le même respirateur d'anesthésie

Stratégies   Niveaux	L1	L2	L3	L4
Maintenance systématique (G = 3)	{1,0}	{2,0}	{1,1}	{1,1}
Maintenance conditionnelle (G = 2)				{1,1}
Maintenance corrective (G = 1)	{1,0}	{1,0}	{2,1}	{0,2}

### d. Coût par heure (K)

Le coût par heure est déterminé par le type de maintenance en interne et en externe et selon la qualification des ressources impliquées (techniciens et ingénieurs). Si l'on suppose qu'un sous-traitant potentiel est identifié pour chaque équipement, nous disposons alors des prix proposés par ce sous-traitant. Il est évident qu'un sous-traitant peut avoir plusieurs équipements en charge. Le coût de la main d'œuvre par sous-traitant est le même quel que soit l'équipement. Le coût en interne par heure est beaucoup moins cher que celui du sous-traitant.

**Tableau 3.10** Coût/heure (DT) : Dinar Tunisien par qualification et par sous-traitant

	En interne	Sous-traitant 1		...	Sous-traitant p	
		Equip.1	Equip. 14		...	Equip. n
<b>Technicien (DT)</b>	3.5	7		...	6	
<b>Ingénieur (DT)</b>	6	30		...	28	

### e. Coût de la main d'œuvre (L)

Le coût de la main-d'œuvre est déterminé par le produit de la charge de maintenance estimée (I) avec le coût horaire de main d'œuvre (J) et de nombre de personnes dans l'équipe selon leurs qualifications (K) :

$$L = I \times J \times K \quad (3.1)$$

L'internalisation se fait selon la faisabilité en termes de compétence et de disponibilité des outils. Dans notre étude, la capacité en interne est limitée et elle est considérée comme un

paramètre d'entrée et non pas comme une variable de décision. Nous proposons une heuristique de trois phases pour internaliser les niveaux qui présentent des valeurs ajoutées importantes en termes d'économie du coût en interne par rapport à l'externalisation (Walreave et al. (2005)). La procédure proposée est la suivante :

Phase 1 : On calcule la charge due à l'internalisation du niveau L1 pour tous les équipements et on déduit la capacité restante :

$$\text{Capacité restante} = \text{capacité en interne} - \sum \text{charge L1} \quad (3.2)$$

Phase 2 : On considère les niveaux de maintenance pour lesquels nous disposons de compétences en interne. On ordonne les niveaux de maintenance (L2, L3 et L4) suivant l'ordre décroissant du coût externe/heure (moyenne) puis la charge moyenne de la maintenance des équipements. Comme la stratégie n'est pas définie encore, nous considérons une estimation du coût externe/heure et de la charge moyenne des trois stratégies de maintenance. Le tableau 3.11 décrit comment les niveaux d'équipement sont juxtaposés et comment les deux critères sont utilisés pour décider d'internaliser ou externaliser les niveaux de maintenance des équipements

Phase 3 : On décide d'internaliser les niveaux de maintenance d'un équipement un par un dans l'ordre décroissant défini dans la phase 2 précédente en vérifiant à chaque fois la faisabilité en termes de charge vs. capacité restante en Technicien (TE) et Ingénieur (ING) :

$$\sum_{i=1}^{4*n} X_i * wo_i \leq TE \text{ capacité restante} \quad (3.3)$$

$$\sum_{i=1}^{4*n} X_i * we_i \leq ENG \text{ capacité restante} \quad (3.4)$$

$n$  est le nombre d'équipements médicaux, 4 est le nombre des niveaux,  $wo_i$  ( $we_i$ ) est la charge en techniciens (ingénieurs) par colonne  $i$  (voir tableau 3.11) et  $X_i$  est égale à 1 si le niveau de la maintenance de l'équipement est internalisé sinon 0.

**Tableau 3.11** Procédure de choix d'Internalisation/ externalisation par niveau par équipement

Equipement, Niveau	1 E=1, L4	2 E=4, L3	...	j E=10, L3	j+1 E=20, L2	...	4*n E=n, L4
Composition de l'équipe	{0,2}	{0,1}	...	{0,2}	{1,1}	...	{2,1}
Charge en techniciens ( $wo_i$ )	0h	0h	...	0h	20h	...	20h
Charge en ingénieurs ( $we_i$ )	40h	30h	...	50h	20h	...	10h

Equipement, Niveau	1 E=1, L4	2 E=4, L3	...	j E=10, L3	j+1 E=20, L2	...	4*n E=n, L4
<b>Coût/ heure en externe (DT)</b>	105	105	...	60	60	...	35
<b>Internalisation</b> ( $X_i = \{0,1\}$ )	1	1	...	0	1	...	0

Pour le reste des niveaux (les niveaux dont on dispose de compétences en interne mais qu'on a décidé de réaliser en externe et les niveaux dont on ne dispose pas de compétence en interne), on applique la procédure pour l'externalisation et la sélection du contrat que nous détaillons dans la quatrième étape.

Le coût réel de la maintenance de l'équipement sera défini dans l'étape 4 quand les contrats, en cas d'externalisation de la maintenance de l'équipement, seront définis. Nous pouvons avoir l'estimation du coût de la maintenance de l'équipement par stratégie de maintenance après la prise de décision dans cette phase (voir tableau 3.12 pour le cas de l'aspirateur d'anesthésie). Cette décision nous aide dans la négociation des coûts de contrats.

**Tableau 3. 12** Coût par an (DT : Dinar Tunisien) pour le respirateur d'anesthésie par stratégie de maintenance

	Respirateur d'anesthésie DRAGER JULIEN			
	Coût de la charge des niveaux externalisés (DT)		Coût estimé des pièces de rechange (DT)	Coût total de la maintenance (DT)
	L3	L4		
Maintenance préventive systématique	206	275.5	10190.56	10672.06
Maintenance préventive conditionnelle	162.25	254.5	7674.63	8091.38
Maintenance corrective	230	213	4838	5281

### 3.1.2. Troisième étape

L'objectif de cette étape est la détermination de la stratégie de maintenance pour chaque équipement en se basant sur le calcul de la criticité. Nous proposons trois classes liées aux stratégies comme le montre le tableau 3.13 ci-dessous :

**Tableau 3.13** *Les différents niveaux de criticité et stratégies*

Stratégies	Criticité	Score
Maintenance préventive systématique (G=3)	Criticité $\geq T_2$	Elevée
Maintenance préventive conditionnelle (G=2)	$T_1 \leq \text{Criticité} < T_2$	Moyenne
Maintenance corrective (G=1)	Criticité $< T_1$	Faible

Les limites  $T_1$  et  $T_2$  entre les classes de criticité sont définies selon le budget disponible alloué à la maintenance des équipements médicaux et les ressources disponibles (voir tableau 3.14). En effet, la maintenance corrective ne requiert pas des ressources pré-planifiées puisque cette stratégie est appliquée pour des équipements non critiques. Cependant, la maintenance préventive systématique requiert des ressources et un budget réservé. Pour la maintenance conditionnelle, elle requiert des outils spéciaux pour la vérification et le contrôle.

**Tableau 3.14** *Définition des limites par ressources requises, coût, main d'œuvre et outils pour les stratégies de maintenance*

Maintenance Corrective	Maintenance Préventive			
	conditionnelle		systématique	
Ressources $\Downarrow$	Ressources $\Uparrow$			
	budget $\Downarrow$		budget $\Uparrow$	
	*Outils $\Uparrow$		*Outils $\Downarrow$	

Dans la première étape, nous avons obtenu un score de criticité entre 5 et 20. Les limites  $T_1$  et  $T_2$  sont alors entre ces deux valeurs, où  $T_2$  est plus grande que  $T_1$ . De plus, le coût total de la maintenance ne doit pas excéder le budget disponible. Ce coût varie selon les stratégies de maintenance définies pour chaque équipement, il dépend alors des valeurs  $T_1$  et  $T_2$  ( $\text{Coût}_{T_1, T_2} = f(T_1, T_2)$ ).

La matrice présentée dans le tableau 3.15 contient une estimation du coût total de la maintenance selon les valeurs  $T_1$  et  $T_2$ . Par exemple,  $C_{5,6}$  correspond au coût de maintenance lorsque la maintenance préventive systématique est appliquée pour tous les équipements.



**Tableau 3.15** Matrice triangulaire supérieure pour le coût total de la maintenance selon les limites ( $T_1$ ,  $T_2$ )

$T_2$	5	6	7	8	...	17	18	19	20
$T_1$									
5	$C_{5,5}=f(5,5)$	$C_{5,6}=f(5,6)$	.	.	....	.	.	.	$C_{5,20}=f(5,20)$
6	0	$C_{6,6}=f(6,7)$		.	...	.	.	.	.
7	0	0	.	.	...	.	.	.	.
8	.		.	.	...	.	.	.	.
9	.	.	.	.	...	.	.	.	.
...	...	...	...	...	...	...	...	...	....
18	.	.	.	.	...	.	.	.	.
19	.	.	.	.	...	.	.	.	.
20	0	0	.	.	...	.	0	0	$C_{20,20}=f(20,20)$

L'objectif est d'appliquer la maintenance préventive au nombre maximum d'équipements disponibles sans excéder le budget disponible. Dans le cas du CHU Habib Bourguiba de Sfax, nous avons proposé des valeurs des limites  $T_1$  et  $T_2$  égales à 10 et 15 respectivement. Ces valeurs correspondent à un coût de maintenance total proche du budget disponible, avec une valeur de  $T_2$  minimale. Le coût total est  $C_{10, 15} = 3885000$  DT avec un budget de 4000000 DT. Pour le respirateur d'anesthésie, la stratégie de maintenance affectée est préventive systématique (criticité est égale à 18) avec un coût de 95000DT.

### 3.1.3. Quatrième étape

Quatre types de contrat sont considérés dans le contexte tunisien et en particulier au CHU Habib Bourguiba de Sfax :

- A\* : contrat tous risques
- A : contrat maintenance préventive
- B : contrat pièces
- C : contrat coup à coup.

Pour ces quatre types de contrat, les clauses concernant le taux de disponibilité de l'équipement (au moins 95%) et le temps de réponse (72 heures) sont les mêmes. Les différences sont liées à la sélection de la stratégie de maintenance et au contenu du forfait (pièces de rechange et main d'œuvre). D'après De melo Brito et al. (2010), la sélection du contrat est une étape importante dans le processus d'externalisation pour la réduction du coût total de maintenance.

La procédure de choix du type de contrat est basée sur les résultats précédents. Ainsi, cette procédure est basée sur quatre critères : la criticité (G), le coût de la main d'œuvre (L), la valeur monétaire des pièces de rechange (F) et la fréquence des défaillances complexes (O). Les deux premiers critères sont bien expliqués dans les étapes précédentes. Pour le coût de la main d'œuvre qui s'avère déjà calculé dans l'étape précédente, nous proposons deux niveaux possibles (élevé avec un score = 2 et faible avec un score = 1). De même, nous proposons deux niveaux pour les deux autres critères. Le critère coût de la main d'œuvre (L) nous permet de choisir entre deux types de contrats en fonction de l'intégration ou non de la main d'œuvre dans le forfait. Par exemple, si on limite le choix de contrat entre A et B et que l'équipement médical requiert un coût de main d'œuvre élevé (un niveau élevé de compétence), on choisit alors le contrat A. Dans le cas contraire, le contrat B sera sélectionné.

#### a. Valeur monétaire des pièces de rechange (F)

Ce critère nous permet de faire le choix entre deux types de contrats en fonction de l'intégration ou non des pièces de rechange dans le forfait. Par exemple, si on limite le choix entre les deux contrats B et C et si le dispositif médical présente un prix élevé de pièce de rechange, on va choisir le contrat B. Sinon, le contrat C sera sélectionné.

**Tableau 3.16** *Les classes selon la valeur monétaire des pièces de rechange*

Classe	Score
Prix de pièce de rechange élevé	2
Prix de pièce de rechange faible	1

#### b. Fréquence des défaillances complexes (O)

Ce critère indique l'occurrence des défaillances complexes inattendues. Il nous permet de faire le choix entre deux types de contrats en regardant s'ils intègrent ou non la maintenance corrective dans le forfait. Par exemple si on a limité le choix entre les deux contrats A et A\* et si le dispositif médical présente un degré élevé de complexité des pannes, on va choisir le contrat A\*. Dans le cas contraire, le contrat A sera sélectionné

**Tableau 3.17** *Niveaux pour le critère O (fréquence de pannes complexes)*

Classe	Score
Forte possibilité de pannes complexes	2
Faible possibilité de pannes complexes	1

Ainsi, la sélection du contrat approprié pour les niveaux de maintenance L2, L3 et L4 de tous les équipements est définie en se basant sur les critères G, F, L et O (voir tableau 3.18). Ceci permet au responsable du service de maintenance de choisir le type de contrat pour chaque équipement avec un certain degré de risque à prendre et de définir le contenu du contrat en relation avec les différents niveaux de maintenance en termes de main d'œuvre et de pièces de rechange.

**Tableau 3.18** *Choix de contrat selon les critères G, F, L et O*

Multicritère	Type de contrat
G= 3, L=2 O=2	A*
G= 3, L=2 O=1	A
G= 3, L=1, F=2	B
G= 3, L=1, F=1	C
G= 2, L=1, F=2	B
G= 2, L=1, F=1	C
G= 1, L=1, F=2	C
G= 1, L=1, F=1	Pas de contrat

Par exemple, appliquons notre procédure pour la sélection du contrat adéquat pour l'équipement respirateur d'anesthésie. Pour le niveau L1, les activités de maintenance sont internalisées. Pour les niveaux L2 et L3, les activités sont externalisées avec le contrat A et pour le niveau L4 le contrat sélectionné est A\*. Enfin, le responsable a le choix entre deux possibilités :

- le contrat de type A\* dont le forfait est constitué de maintenance préventive et des pièces de rechange associées pour les niveaux de maintenance L2, L3 et L4 avec la maintenance corrective et les pièces de rechange associées pour le niveau L4.
- le contrat de type A dont le forfait contient uniquement la maintenance préventive et les pièces de rechange associées pour les niveaux de maintenance L2, L3 et L4 sans avoir la maintenance corrective.

Un certain degré de risque doit être considéré dans le cas où le sous-traitant propose des contrats avec des formules rigides. Notre procédure nous permet de prendre les meilleures décisions avec un minimum de risque.

Pour les hôpitaux dans les pays développés, l'activité des services de maintenance biomédicale est en grande partie sous-traitée à des entreprises privées. Cette décision de sous-traitance de la maintenance est due à la haute technologie utilisée des équipements médicaux ainsi qu'à la non-

disponibilité de l'expertise en interne. Cependant, dans les pays en voie de développement, les contrats couvrent la main d'œuvre et les pièces de rechange. En plus les clauses et les types de contrat sont différents pour les pays développés et en voie de développement.

Notre procédure proposée est générique. Elle peut être appliquée dans les hôpitaux des pays développés avec des différences dans la définition des limites et les types de contrats, par exemple, l'âge moyen de l'équipement peut être plus ou moins de 10 ans et le contrat de partenariat peut être ajouté (De vivol et al., (2004)).

### **3.2. Conclusion**

Dans ce chapitre, une procédure de choix d'une stratégie de maintenance, d'externalisation et d'internalisation des niveaux de maintenance et du type de contrat appropriée par équipement a été proposée sur la base des critères que nous avons validés par les experts. Nous avons défini les critères de gestions du budget de maintenance disponible et la possibilité de négocier le type de contrat avec le sous-traitant.

Compte tenu de la nécessité d'une procédure de sélection des contrats plus structurée et robuste, nous allons nous concentrer sur le développement de méthodologies fondées sur des approches multicritère quantitatifs (Chapitre 4). Ensuite, nous allons nous concentrer sur le développement de modèles mathématiques pour réduire les coûts et augmenter la disponibilité des équipements médicaux.

## **Chapitre 4 : Etude de la criticité des équipements médicaux en utilisant des approches multicritère**

Le service de maintenance dans un hôpital est chargé d'assurer la sécurité des équipements médicaux et leur disponibilité tout en minimisant le coût de la maintenance. La sélection de la meilleure stratégie de maintenance est une décision clé pour réduire le temps d'arrêt des équipements, augmenter la disponibilité et diminuer les coûts de maintenance.

Dans ce chapitre, nous présenterons une approche multicritère utilisant une combinaison de deux outils multicritère : AHP « Analytical Hierarchy Process » et TOPSIS « Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution » déterministe et floue. Ces deux outils seront utilisés pour : déterminer la criticité, prioriser les équipements médicaux et classer les différentes stratégies de maintenance en fonction de leur importance, respectivement. Nous avons appliqué notre approche au CHU Habib Bourguiba Sfax en Tunisie, et les résultats numériques ont montré l'efficacité de notre approche.

### **4.1. Modèle de priorisation des équipements médicaux**

L'aide à la décision multicritère (MCDM) se présente comme une alternative aux méthodes d'optimisation classiques et nécessite la prise en compte de plusieurs critères. Il ne s'agit pas de rechercher un optimum, mais de trouver une solution compromis qui peut prendre diverses formes : choix, affectation ou classement. En effet, dans le cas d'un problème multicritère, l'objectif consiste à déterminer une solution qui soit un compromis acceptable entre tous les critères considérés (C. Nguyen et al. 2012). L'aide à la décision multicritère comporte deux catégories : l'aide à la décision multi-attribue et l'aide à la décision multi-objective (Triantaphyllou, 2000). La prise de décision multi-attributs (MADM) prend des décisions de préférence telles que l'évaluation, la hiérarchisation et la sélection entre les alternatives disponibles, caractérisées par de multiples attributs, (Hwang et Yoon, 1981).

L'AHP « Analytical Hierarchy Process » est une méthodologie de MADM (Saaty, 1980, 1994), qui s'appuie sur des comparaisons par paires en se basant sur les jugements des experts afin d'obtenir les échelles de priorisation (Saaty, 2008). L'AHP a été largement utilisée dans de nombreuses applications impliquant la prise de décision (Vaidya et Kumar, (2006), Ho (2008)). Elle est souvent utilisée pour établir la priorité des alternatives lorsque plusieurs critères doivent être pris en considération (Modarres, 2006). Al Harbi (2001) présente l'AHP comme une méthode potentielle de prise de décision pour la gestion du projet. Mahdi et al. (2002) et Fong

et Choi (2000) utilisent l'AHP pour la sélection des entrepreneurs. Bevilacqua et Barglia (2000) utilisent l'AHP pour la sélection de la stratégie de maintenance dans une raffinerie de pétrole italienne, Ramadhan et al. (1999) l'utilisent pour déterminer les poids rationnels des facteurs de classement prioritaires de la chaussée, (Labib et al. 1998) proposent un modèle pour aider à prendre une décision de maintenance. Simpson et Cochran (1987) utilisent l'AHP pour prioriser les projets de construction lorsque le budget est limité, ceci afin de s'assurer que les projets les plus importants reçoivent un financement. Brièvement, l'AHP est un processus composé de trois étapes, (Hwang et Yoon, (1981), Saaty, (1994)) :

Etape 1 : Création d'une structure hiérarchique : décomposition du problème complexe en une structure hiérarchique, dans laquelle l'objectif global de décision se trouve au sommet et les critères, les sous-critères et les alternatives se trouvent à chaque niveau de la hiérarchie descendante (Partovi et Banerjee, 1989).

Etape 2 : Création des jugements comparatifs : les décideurs comparent ensuite chaque critère (sous-critère) à tous les autres critères (sous-critères) au même niveau de la hiérarchie à l'aide d'une comparaison par paires. Des matrices de comparaison sont introduites pour trouver le poids ou l'importance relative des critères (sous-critères).

Etape 3 : Évaluation des solutions : les décideurs évaluent les alternatives de décision en tenant compte des poids des différents critères. Selon Saaty (1994), la solution optimale est l'alternative avec le plus grand poids cumulé.

#### ***4.1.1. Etablissement de la structure hiérarchique de problème.***

Nous avons défini les critères et les sous-critères qui caractérisent la stratégie de maintenance pour les équipements médicaux en se basant sur les avis des experts du CHU Habib Bourguiba de Sfax et sur la littérature portant sur la criticité des équipements médicaux. A partir de la littérature, nous avons défini sept critères principaux (dont cinq ont été définis dans le chapitre 3 précédent) et six sous-critères pour la sélection des stratégies de maintenance qui peuvent se présenter comme suit :

- Le degré de complexité de la maintenance (A) : dépend des exigences de la maintenance de l'équipement médical avec trois classes définies.
- Fonction (B) : Quatre groupes en fonction de la criticité de la mission sont classés par Fennigkoh et Smith (1989) : thérapeutique, diagnostique, analytique et divers. Des notes de 1 à 9 sont attribuées à ce critère. Ces notes ont été considérées dans notre modèle.

- Risque (C) : il définit l'un des critères les plus importants dans la sélection de la stratégie de maintenance. Il est estimé comme étant une fonction des quatre sous-critères : la détectabilité, la fréquence, la sécurité et les temps d'arrêt de la production.
  - La détectabilité (C1) : c'est la capacité à détecter une défaillance potentielle avant qu'elle ne se produise.
  - La fréquence (C2) : la fréquence des défaillances est la probabilité d'une défaillance (Taghipour et al. (2011)).
  - La sécurité (C3) : une défaillance potentielle d'un équipement peut entraîner des blessures ou même la mort des patients et des utilisateurs. Ce sous-critère a une importance élevée pour le calcul du risque.
  - Temps d'arrêt de la production (C4) : le temps d'arrêt est le temps moyen où un équipement n'est pas fonctionnel en raison d'une défaillance potentielle.

Ces données d'entrée peuvent être extraites ou estimées à partir de l'historique des bons de travail de maintenance. Nous avons classé ce critère en trois classes (grade) : élevée, moyenne et faible risque. Cette classification est expliquée dans la section 3.1.1 pour le critère risque.

- Degré d'importance de la mission (D) : ce critère est considéré pour le calcul de périphériques et décrit le degré de criticité pour laquelle un équipement médical est crucial pour le processus de prestation de soins de santé de l'hôpital (Taghipour et al. (2011)). Il dépend de deux sous-critères : le taux d'utilisation et la disponibilité des équipements alternatifs.
  - Taux d'utilisation (D1) : le taux d'utilisation des dispositifs médicaux se calcule par le rapport entre la moyenne des heures de son utilisation par semaine et le nombre maximum d'heures par semaine. Dans notre cas, le nombre maximal d'heures par semaine est considéré à 48 heures.
  - Disponibilité des équipements alternatifs (D2) : Selon Taghipour et al. (2011), le nombre de patients desservis par des équipements similaires a un impact sur la disponibilité de ces équipements. La disponibilité d'autres équipements est considérée comme une fonction du nombre d'équipements identiques et de leur demande par unité de temps.

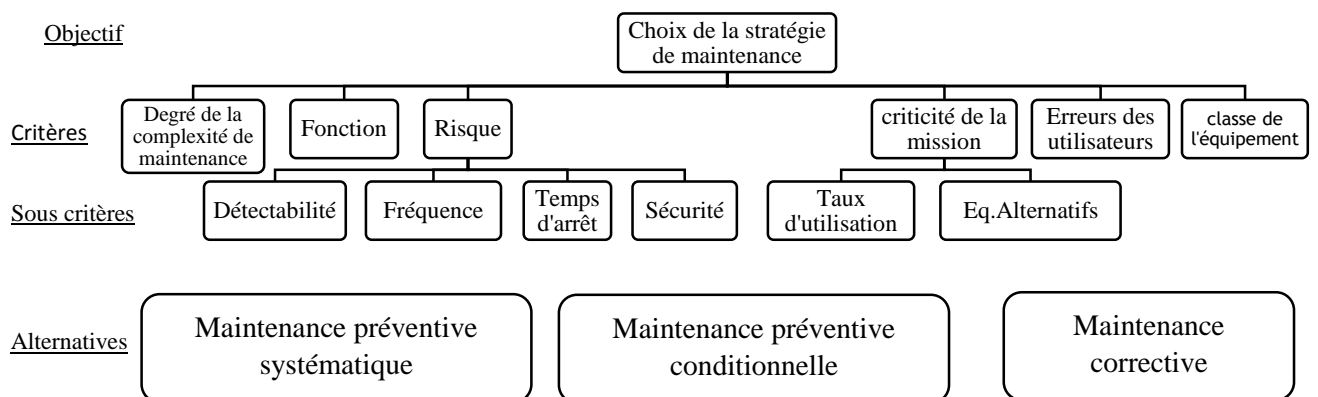
Trois classes (grade) sont envisagées pour ce critère : nécessaire, important et critique.

- Age (E) : Nous pouvons obtenir la durée de vie d'un groupe d'équipements similaires de l'hôpital à partir de la date de démarrage de l'équipement et de la date de réforme. Nous avons observé que la durée de vie moyenne de l'équipement médical est de dix

ans. Pour cette raison, une classification d'équipements médicaux a été établie selon leurs âge : nouvel équipement qui a moins de 10 ans, et ancien équipement sinon.

- Les erreurs des utilisateurs (F) : ce critère prend en compte le nombre et les catégories des rappels et des alertes de panne pouvant survenir pour un équipement dus aux erreurs des utilisateurs en cas de non fonctionnement. Ce critère devrait être jugé important dans le classement des équipements médicaux pour les activités de maintenance. Le FDA « US Food and Drug Administration » des États-Unis a classé ce critère en trois catégories selon le niveau de risque (Taghipour et al. (2011)).
- Classe de l'équipement (G) : la classification des équipements médicaux a pour but principal d'attribuer un niveau de risque pour lui affecter des règles de contrôle et d'évaluation nécessaires à ce niveau. L'objectif est d'assurer la sécurité et l'efficacité des équipements médicaux. Selon la FDA, les équipements médicaux peuvent être divisés en quatre classes correspondant au niveau de risque :
  - Classe I : faible degré de risque
  - Classe IIa : degré de risque moyen
  - Classe IIb : degré de risque élevé
  - Classe III : très haut degré de risque

Pour atteindre notre objectif, nous considérons les trois stratégies de maintenance utilisées dans les hôpitaux tunisiens : la maintenance préventive systématique, la maintenance préventive conditionnelle et la maintenance corrective comme les alternatives de la méthode AHP. Puis, nous plaçons tous les critères requis pour la sélection de la stratégie de maintenance au niveau hiérarchique approprié. Dans la figure 4.1, nous présentons la hiérarchie de décision utilisée pour la sélection de stratégie de maintenance.



**Figure 4.1** La structure hiérarchique pour la sélection de stratégie de maintenance



#### 4.1.2. Calcul des poids des critères et sous critères

Une fois l'objectif, les critères et les alternatives ont été définis, la comparaison de ces critères se fait par paire. Cela nécessite une échelle pour la méthode de sur-classement. Pour ce faire, nous avons choisi l'échelle de Saaty (voir tableau 4.1) qui consiste à comparer les critères suivant cinq niveaux d'importance par rapport à une satisfaction globale : « égale », « modérée », « forte », « très forte », et « absolue », respectivement quantifiés à 1, 3, 5, 7, et 9. Cependant, les valeurs intermédiaires entre deux niveaux de jugements sont acceptées aussi.

**Tableau 4.1** Echelle des niveaux d'importance pour la comparaison (Saaty AHP's scale, 1980)

Jugements verbaux	Degré d'importance
L'égalité des importances	1
Importance modérée de l'un sur l'autre	3
Importance forte de l'un sur l'autre	5
Très forte importance	7
Importance absolue	9
Les valeurs intermédiaires entre les jugements adjacentes	2,4,6,8

Cette étape nécessite l'intervention des décideurs (dans notre cas les techniciens du service de maintenance de l'hôpital Habib Bourguiba) pour la comparaison entre les critères en s'appuyant sur l'échelle précédente. Un questionnaire a été préparé permettant aux experts du service de maintenance d'exprimer leurs préférences entre les critères pour le choix de la meilleure stratégie de maintenance. Ce questionnaire est complété par l'avis commun des techniciens du service de maintenance de l'hôpital Habib Bourguiba de Sfax. Cette étape sera traduite dans les prochaines étapes par la pondération des critères.

Soit  $C$  la matrice de préférence, dont les éléments  $C_{ij}$  constituent une comparaison entre une paire de critères ( $C_i, C_j$ ), appartenant au niveau 1, avec  $C_{ij}=1/C_{ji}$  et  $C_{ii}=1$ .

Après le développement de toutes les comparaisons par paires, on commence par l'addition des colonnes de la matrice obtenue. Ensuite, on normalise la matrice. Pour ce faire, chaque entrée de la matrice doit être divisée par le total de sa colonne. La normalisation de la matrice permet d'obtenir alors des comparaisons significatives entre les éléments. Enfin, il faut calculer le vecteur propre normalisé c'est-à-dire la moyenne des lignes. Tous les éléments d'une même ligne de la matrice normalisée sont additionnés, puis divisés par le nombre de critères qu'elle comporte. Ainsi, le vecteur calculé exprime le poids ou l'importance relative des critères par rapport à l'objectif global.

Dans notre étude, la méthode AHP sera limitée à cette étape pour tirer la performance de la combinaison de cette approche à la technique TOPSIS à la faveur de notre problématique.

La méthode AHP introduit un paramètre spécial appelé « ratio de cohérence » noté ( $CR$ ). Ce paramètre est utilisé pour mesurer la cohérence des jugements obtenus. Il peut être défini comme étant la probabilité que la matrice de comparaison paire à paires soit complétée aléatoirement. Les jugements sont considérés cohérents si  $CR < 0.1$ . Sinon, dans le cas de l'incohérence, les jugements doivent être reformulés.

Après le calcul des poids des critères et des sous critères, nous calculons l'indice d'incohérence ( $CI$ ) à l'aide de l'équation (4.1) où  $n$  est le nombre total des critères et  $\lambda_{max}$  est le maximum des valeurs propres de la matrice, (Shyjith et al. 2008).

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n-1)} \quad (4.1)$$

Le paramètre  $CR$  représente le rapport entre  $CI$  et l'indice d'incohérence aléatoire connue ( $RI$ ), (Shyjith et coll. 2008).

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4.2)$$

Saaty (1980) a fourni les valeurs du paramètre  $RI$  pour des matrices de comparaisons paires à paires de tailles différentes. Par exemple, pour une matrice de  $n=7$ ,  $RI=1.32$ .

### **4.1.3. Application de la méthode AHP**

Une fois que tous les critères et les sous-critères ont été identifiés (section 4.1.1), nous déterminons leur importance relative en se basant sur les jugements des experts de service maintenance du CHU Habib Bourguiba de Sfax. Les Tableaux 4.2, 4.3, 4.4 et 4.5 illustrent les valeurs de poids  $W_i$  obtenues. Il est important de noter que ces valeurs sont valables pour l'application développée et qu'on pourrait obtenir des résultats différents avec d'autres groupes d'experts d'un autre hôpital.

**Tableau 4.2** *Calcul des poids des critères*

<i>Critères</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	<b><i>W<sub>i</sub></i></b>
<i>A</i>	0,079	0,084	0,048	0,036	0,302	0,147	0,191	<b>0,13</b>
<i>B</i>	0,393	0,419	0,570	0,215	0,302	0,235	0,255	<b>0,34</b>
<i>C</i>	0,314	0,140	0,190	0,358	0,181	0,206	0,191	<b>0,23</b>
<i>D</i>	0,157	0,140	0,038	0,072	0,015	0,147	0,255	<b>0,12</b>
<i>E</i>	0,016	0,060	0,063	0,287	0,060	0,088	0,032	<b>0,09</b>
<i>F</i>	0,016	0,052	0,027	0,014	0,020	0,029	0,013	<b>0,02</b>
<i>G</i>	0,026	0,105	0,063	0,018	0,121	0,147	0,064	<b>0,08</b>

**Tableau 4.3** *Calcul des poids des sous critères (du critère risque)*

<i>Sous critères</i>	<b><i>C<sub>1</sub></i></b>	<b><i>C<sub>2</sub></i></b>	<b><i>C<sub>3</sub></i></b>	<b><i>C<sub>4</sub></i></b>	<b><i>W<sub>ij</sub></i></b>
<b><i>C<sub>1</sub></i></b>	0,221	0,179	0,313	0,417	<b>0,28</b>
<b><i>C<sub>2</sub></i></b>	0,662	0,536	0,313	0,417	<b>0,48</b>
<b><i>C<sub>3</sub></i></b>	0,044	0,107	0,063	0,028	<b>0,06</b>
<b><i>C<sub>4</sub></i></b>	0,074	0,179	0,313	0,139	<b>0,18</b>

**Tableau 4.4** *Calcul des poids des sous critères (du critère Degré d'importance de la mission)*

<i>Sous critères</i>	<b><i>D<sub>1</sub></i></b>	<b><i>D<sub>2</sub></i></b>	<b><i>W<sub>ij</sub></i></b>
<b><i>D<sub>1</sub></i></b>	0,750	0,750	<b>0,75</b>
<b><i>D<sub>2</sub></i></b>	0,250	0,250	<b>0,25</b>

**Tableau 4.5** Les valeurs des poids des critères et sous critères

Critère $i$	Grade ( $G_i$ )	Poids ( $W_i$ )	Sous-critère $ij$	Grade ( $G_{ij}$ )	Poids ( $W_{ij}$ )
A : Degré de complexité de la maintenance	3	0.13			
B : Fonction	9	0.34			
C : Risque	3	0.23	$C_1$ : Détectabilité	3	0.28
			$C_2$ : Fréquence	3	0.48
			$C_3$ : Sécurité	3	0.06
			$C_3$ : Temps d'arrêt	3	0.18
D : Degré d'importance de la mission	3	0.12	$D_1$ : Taux d'utilisation	4	0.75
			$D_2$ : Disponibilité des équipements alternatifs.	2	0.25
E : Age	2	0.09			
F : Erreurs d'utilisateurs	3	0.02			
G : Classes de l'équipement	4	0.08			

Une fois que toutes les pondérations (poids) des critères et des sous-critères sont calculés, nous évaluons le jugement des experts en calculant le ratio de cohérence ( $CR$ ) à l'aide du maximum de valeurs propres  $\lambda_{max}$  et de l'indice de cohérence aléatoire ( $RI$ ) comme indiqué dans les équations (4.1) et (4.2).

Le calcul de  $CR$  dans la comparaison par paires de différents critères permet au modèle d'être capable de produire plus de précision et de cohérence au poids des critères par rapport à l'affectation directe des poids. Si  $CR < 0.1$ , alors les résultats sont acceptables et indiquent un bon niveau de cohérence dans les jugements comparatifs, Saaty, (1980). Le tableau 4.6 montre la cohérence des résultats. Nous concluons que les poids calculés des critères sont cohérents.

**Tableau 4.6** Le ratio de cohérence pour la matrice de comparaison des paires de critères

	Résultats
$\lambda_{max}$	7.567
Indice de cohérence ( $CI$ )	0.094
Ratio de cohérence ( $CR$ )	$0.072 < 0.1$ alors nous avons un bon niveau de cohérence des jugements comparatifs.

Une fois que les poids des critères et des sous critères sont calculés, nous calculons la criticité totale des équipements médicaux et nous les classons.

Chaque équipement médical doit être évalué selon tous les critères, du critère le plus bas ou sous critère attachés aux alternatives et on doit lui attribuer un grade (note) approprié (Saaty (2008)). Ensuite, le calcul du score de criticité de l'équipement représente la somme des poids des critères ( $W_i$ ) multipliée par les grades correspondants ( $G_i$ ) de chaque critère comme le montre l'équation (4.3)

$$\text{Criticality score} = \sum_{i=1}^7 W_i * G_i \quad (4.3)$$

En exception, pour les critères qui ont des sous critères, le grade ( $G_i$ ) dépend du poids et du grade du sous critère.

$$G_i = \sum_{\forall j} W_{ij} * G_{ij} \quad \forall i = 1, \dots, 7 \quad (4.4)$$

Par exemple, pour le calcul du ( $G_i$ ) du critère « degré d'importance de la mission », on a comme suit :

$$G_D = W_{D1} * G_{D1} + W_{D2} * G_{D2} \quad (4.5)$$

Dans notre modèle proposé, l'équipement médical pourrait avoir un score de criticité entre 1 et 5.12. La valeur 1 est obtenue lorsque nous considérons les grades les plus faibles de ( $G_i$ ) de tous les critères et ( $G_{ij}$ ) de tous les sous-critères en les multipliant par les poids correspondants ( $W_i$ ). Le score total de criticité 5.12 correspond à l'équipement médical affecté au plus élevé ( $G_i$ ) de chaque critère unique  $i$  et sous-critère  $j$  en multipliant par les poids correspondants.

Par exemple, pour le ventilateur d'anesthésie de type DRAGER JULIEN, la valeur de score de criticité est :

$$(2 \times 0.13) + (9 \times 0.34) + [(1 \times 0.28 + 3 \times 0.48 + 3 \times 0.06 + 2 \times 0.18) \times 0.23] + [(4 \times 0.75 + 1 \times 0.25) \times 0.12] + (2 \times 0.09) + (2 \times 0.02) + (3 \times 0.08) = 4.69$$

En se basant sur les poids des critères (sous-critères) et les valeurs de grade attribués à chaque critère et à chaque sous-critère, les scores de criticité des équipements sont déterminés et classés selon un ordre croissant. Dans la section suivante, nous allons établir une classification des trois stratégies de maintenance (alternatives), selon leurs coefficients d'importance.

## 4.2. Classification des stratégies de maintenance

La méthode TOPSIS « Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution » est l'une des méthodes classiques de résolution des problèmes de prise de décision multicritère (MCDM) dans le monde réel (Hwang et Yoon, (1981)). Elle est basée sur un simple concept du choix de la meilleure solution ayant la distance la plus courte de la solution idéale positive et la distance la plus longue de la solution idéale négative. La solution idéale positive est celle qui possède un bénéfice maximal. En revanche, la solution idéale négative est celle qui a le bénéfice minimal et la pire valeur des alternatives. Ces deux solutions idéales sont calculées en fonction du jugement d'experts. Enfin, les alternatives sont classées selon les valeurs du poids relatives à la solution idéale (Shyjith et al. (2008)).

Les matrices de performance pour les alternatives correspondantes (les stratégies de maintenance) sont construites en nous basant sur les valeurs proposées par le responsable du service de maintenance. On note  $a_{ij}, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m$ , les valeurs correspondantes dans les matrices de performance avec  $n$  correspondant au nombre total des critères et des sous-critères (dans notre cas, d'après le tableau 4.5,  $n = 9$ ) et  $m$  correspondant au nombre d'alternatives (dans notre cas  $m = 3$ , maintenance systématique, conditionnelle et corrective). On normalise les  $a_{ij}$  données dans l'équation (4.6) :

$$a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m a_{ij}^2}} \quad \forall i=1, \dots, n \quad (4.6)$$

L'étape suivante consiste à créer la matrice globale pondérée des performances normalisées des alternatives (voir l'équation 4.7). Dans notre cas, elle est obtenue à partir de la méthode AHP.

$$x_{ij} = a'_{ij} * W_i \quad \forall i = 1, \dots, n ; \forall j = 1, \dots, m \quad (4.7)$$

Où  $W_i$  est le poids du critère  $i$ , voir tableau 4.5.

Par la suite, nous considérons  $A_i^+$  la solution idéale positive, définie comme le meilleur score des résultats de performance de toutes les alternatives sur un critère. De même, la solution idéale négative  $A_i^-$  est définie comme le pire score des résultats de performance de toutes les alternatives sur un critère (Shyjith et al. (2008)). Ensuite, les solutions  $A_i^+$  et  $A_i^-$  de tous les critères et sous-critères sont calculées comme suit (Hwang et Yoon 1981) :

$$A_i^+ = \text{Max}_j (x_{ij}) \quad \forall i = 1, \dots, n ; \forall j = 1, \dots, m \quad (4.8)$$

$$A_i^- = \text{Min}_j (x_{ij}) \quad \forall i = 1, \dots, n ; \forall j = 1, \dots, m \quad (4.9)$$

Une fois que les solutions idéales positives et négatives sont définies, nous calculons la distance ( $D_j^+$ ) par rapport à la solution idéale positive et la distance ( $D_j^-$ ) par rapport à la solution idéale négative pour chaque alternative comme suit (Hwang et Yoon (1981)) :

$$D_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - A_i^+)^2} \quad \forall j = 1, \dots, m \quad (4.10)$$

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - A_i^-)^2} \quad \forall j = 1, \dots, m \quad (4.11)$$

La dernière étape de la méthode TOPSIS est de calculer le degré de similarité ou la proximité relative ( $R_j$ ) de la solution idéale positive (ou d'une façon équivalente la plus éloignée de la solution idéale négative) pour chaque alternative. Le calcul se fait à travers l'équation (4.12) suivante (Hwang et Yoon (1981)) :

$$R_j = \frac{D_j^-}{D_j^+ + D_j^-} \quad \forall j = 1, \dots, m \quad (4.12)$$

La meilleure alternative est celle qui correspond à la la valeur de proximité relative ( $R_j$ ) maximale représente la meilleure. Les autres sont classées dans l'ordre décroissant de leur proximité relative.

Les stratégies de maintenances considérées dans notre étude expérimentale comme des alternatives dans notre structure hiérarchique sont : La maintenance préventive systématique (MPS), la maintenance préventive conditionnelle (MPC), et la maintenance corrective (MC). Le tableau 4.7 présente la matrice globale pondérée des performances normalisées des alternatives ( $x_{ij}$ ). Ces valeurs sont calculées en multipliant la matrice de performance normalisée par les poids des critères et sous critères obtenus à partir de la méthode AHP.

**Tableau 4.7** Les degrés d'importances globales des stratégies de maintenance

$$(x_{ij} ; \forall i = 1, \dots, 11 ; \forall j = 1, 2, 3)$$

Alternatives	MPS	MPC	MC
Degré de complexité de maintenance	0,100	0,071	0,043
Fonction	0,227	0,202	0,152
Déteçtabilité	0,197	0,173	0,099
Fréquence	0,335	0,261	0,224
Sécurité	0,049	0,029	0,019
Temps d'arrêt	0,138	0,092	0,069
Taux d'utilisation	0,482	0,542	0,301
Disponibilité des équipements alternatifs	0,139	0,093	0,186
Age	0,045	0,063	0,045
Erreurs des utilisateurs	0,011	0,016	0,057
Classe de l'équipement	0,043	0,005	0,036

Après l'établissement des matrices de performance, nous identifions les solutions idéales positives et négatives ( $A_i^+$  et  $A_i^-$ ). Puis, nous calculons les distances en utilisant les équations (4.10) et (4.11). Les résultats sont illustrés dans les tableaux 4.8 et 4.9.

**Tableau 4.8** Les solutions idéales positives et négatives correspondantes pour les critères et sous-critères

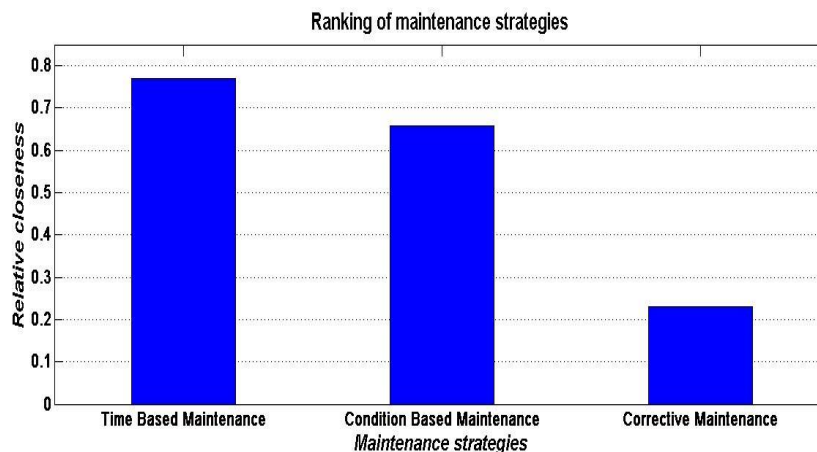
Critères et sous-critères	Degré de complexité de la maintenance	Fonction	Déteçtabilité	Fréquence	Sécurité	Temps d'arrêt	Taux d'utilisation	Disponibilité des alternative devices	Age	Erreurs des utilisateurs	Classe de l'équipement
$A_i^+$	0,100	0,227	0,197	0,335	0,049	0,138	0,542	0,186	0,063	0,016	0,057
$A_i^-$	0,043	0,152	0,099	0,224	0,019	0,069	0,301	0,093	0,045	0,005	0,036



**Tableau 4.9** Calcul des distances négatives et positives de chaque alternative

Alternatives	MPS	MPC	MC
$D_j^+$	0.08	0.137	0.308
$D_j^-$	0.268	0.264	0.093

Le classement des alternatives est obtenu à partir du calcul des proximités relatives par rapport à la solution idéale (Equation 4.12). Nous avons obtenu le classement des stratégies illustré dans la figure 4.2 ci-dessous :

**Figure 4.2** Le classement des stratégies de maintenance en fonction de leur proximité relative

Les résultats obtenus montrent que la maintenance préventive systématique (MPS) avec une proximité relative  $R_{MPS} = 0.771$  est la meilleure stratégie pour l'équipement à haute criticité, ensuite on retrouve la maintenance préventive conditionnelle avec  $R_{MPC} = 0.659$  et enfin la maintenance corrective avec  $R_{MC} = 0,231$ .

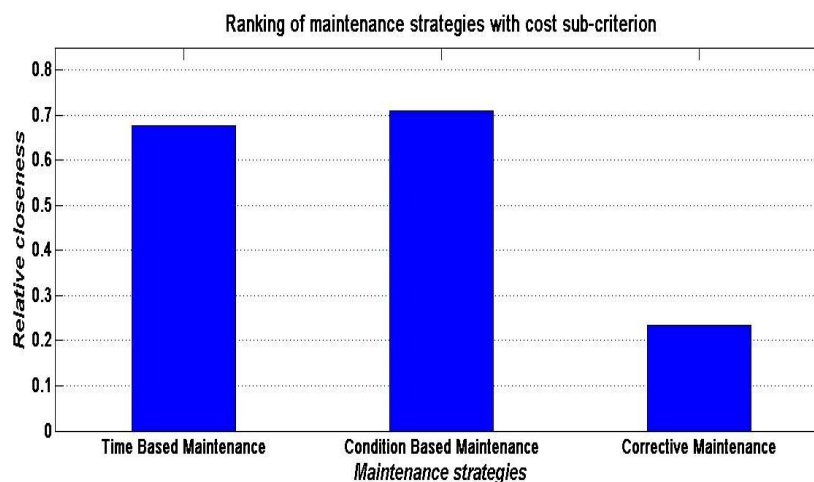
En plus de tous les critères décrits précédemment, le coût de maintenance (coût de la main d'œuvre, des outils et des pièces de rechange) est intégré en tant que sous critère du critère « risque » dans le travail de Taghipour et al. (2011). Ils estiment, en se basant sur le point de vue des experts, que la MPC est la meilleure stratégie pour les équipements les plus critiques, ensuite la MPS et finalement la MC. De même, le coût de maintenance qui contient des coûts fixes (par exemple, les coûts des pièces de rechange) et d'autres coûts variables (comme le coût de maintenance par des experts) ont été considérés récemment par Jamshidi et al. (2015). Ainsi, le classement des stratégies de maintenance est : la MPC avec une haute priorité pour les équipements critiques, puis MPS et MC. Pour vérifier ce classement, nous avons appliqué notre approche AHP couplée à TOPSIS pour les mêmes critères additionnés au coût de maintenance.

Le tableau 4.10 illustre les nouvelles valeurs des poids des critères et des sous-critères obtenus par la méthode AHP.

**Tableau 4.10** Les nouvelles valeurs des poids avec intégration de sous critère coût de la maintenance

Critères	$W_i$	Sous critères	$W_{ij}$
A : Degré de complexité de la maintenance	0.13		
B : Fonction	0.34		
C : Risque D : Degré de l'importance de la mission	0.23	$C_1$ : Détectabilité	0.17
		$C_2$ : Fréquence	0.26
		$C_3$ : Sécurité	0.05
		$C_4$ : Temps d'arrêt	0.13
		$C_5$ : <b>Coût</b>	<b>0.40</b>
E : Age	0.12	$D_1$ : Taux d'utilisation	0.75
		$D_2$ : Disponibilité des équipements alternatives	0.25
F : Erreurs d'utilisateurs	0.09		
G : Classes de l'équipement	0.02		
A : Degré de complexité de la maintenance	0.08		

Une fois les nouveaux poids ont été définis, nous avons calculé la proximité relative de chaque stratégie de maintenance et avons classé les alternatives comme présenté dans la figure 4.3.



**Figure 4.3** Classement des stratégies de maintenance en intégrant le coût

Les résultats montrent que le classement des stratégies de maintenance est comme suit :

- Classement 1 : MPS, MPC et MC, lorsque le coût de maintenance n'est pas considéré dans l'étude de criticité de l'équipement (Figure 4.3).
- Classement 2 : MPC, MPS et MC (Taghipour et al. (2011) ; Jamshidi et al. (2015)), lorsque le coût de maintenance est considéré dans l'étude de criticité de l'équipement (Figure 4.4).

### **4.3. Intégration de la logique floue dans l'application de AHP et TOPSIS**

D'après Hsieh et al. (2004), l'analyse de prise de décision multicritère floue (FMCDM) est très utilisée dans le traitement des problèmes de prise de décision basés sur l'évaluation multicritère ou la sélection des alternatives. Certains auteurs comme Tawfik et al. (2013) ont proposé un modèle de logique floue pour la classification des équipements médicaux. Le modèle de la logique floue proposé est utilisé pour simuler des pensées humaines et pour minimiser les évaluations subjectives des experts. Pour le calcul du risque du dispositif médical, ils n'ont utilisé que quatre critères. Ensuite, ils ont comparé les résultats obtenus avec les travaux précédents. Récemment, Jamshidi et al. (2015) ont développé une structure pour la hiérarchisation des dispositifs médicaux critiques fondée sur l'évaluation linguistique floue d'experts pour prendre en considération les incertitudes dans leurs opinions. Ainsi, ils ont proposé une classification simple des stratégies de maintenance à partir d'un schéma basé sur deux facteurs : l'indice de priorité de risque de chaque équipement (RPI) et de l'intensité totale (TI). Malgré ce cadre innovant proposé, le choix des stratégies de maintenance doit être à notre avis plus largement étudié en fonction des scores de criticité. Puis, inspiré par la logique et les outils MCDM flous appliqués dans la fabrication et les industries, nous avons proposé un modèle de prise de décision multicritère floue afin de sélectionner la stratégie de maintenance appropriée pour chaque équipement. Ce modèle consiste à combiner l'AHP et le TOPSIS comme il est expliqué dans les sections précédentes section 4.1 et section 4.2 mais en y intégrant l'ensemble flou dans l'expression des jugements des experts du service de maintenance du CHU Habib Bourguiba de Sfax.

#### **4.3.1. Exploitation de l'AHP Floue**

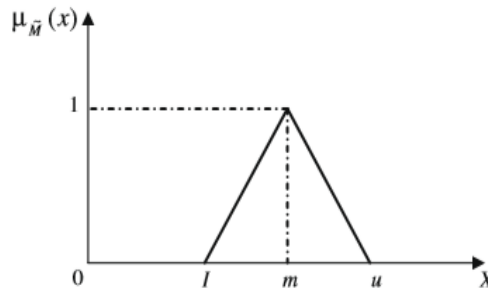
A cause des jugements humains toujours soumis à un certain niveau d'incertitude et des avis qui diffèrent d'un expert à un autre en fonction de leurs différentes expériences, nous avons choisi d'utiliser les techniques floues pour déterminer quelle stratégie était la mieux adaptée à chaque équipement.

D'après Kabir et al. (2011), la méthode AHP floue (FAHP) peut être considérée comme une combinaison de l'AHP et de la théorie des ensembles flous. Cette combinaison vise principalement à affiner le processus de décision en examinant la cohérence et la logique des préférences du décideur. En effet, elle permet de structurer les problèmes complexes en associant des poids pour chaque critère selon la logique, les jugements, les préférences et les expériences des décideurs.

**a. Définition d'un nombre flou**

La notation d'un ensemble flou a été introduite pour la première fois par Zadeh (1965) afin de représenter mathématiquement l'imprécision relative à certaines classes d'objets.

Il y a différentes classes de nombres flous. Dans le cadre de cette thèse, nous utilisons les nombres flous triangulaires. En général, le nombre flou triangulaire qui est défini par trois nombres (triplet) réels exprimés en  $(l, m, u)$ , voir figure 4.4. D'après Deng (1999),  $m$  est la valeur la plus probable du nombre flou,  $l$  et  $u$  représentent les bornes inférieures et supérieures respectivement. Elles sont souvent utilisées pour illustrer le flou des données.



**Figure 4.4** Définition d'un nombre flou triangulaire, Hsieh et al. (2004)

Un nombre flou triangulaire est présenté par une fonction d'appartenance  $\mu_m(x) : \rightarrow R[0,1]$  comme suit (Hsieh et al. (2004)) :

$$\mu_m(x) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{x-l}{m-l} \text{ si } l \leq x \leq m, \\ \frac{u-x}{u-m} \text{ si } m \leq x \leq u, \\ 0 \text{ sinon} \end{array} \right\} \tag{4.13}$$

Un ensemble d'opérations arithmétiques de base floue est défini pour les nombres flous (Hsieh et al. (2004)). Soit  $M_1 = (l_1, m_1, u_1)$  et  $M_2 = (l_2, m_2, u_2)$  deux nombres flous triangulaires positifs tels que :

$$M_1^{-1} = \left( \frac{1}{u_1}, \frac{1}{m_1}, \frac{1}{l_1} \right) \tag{4.14}$$

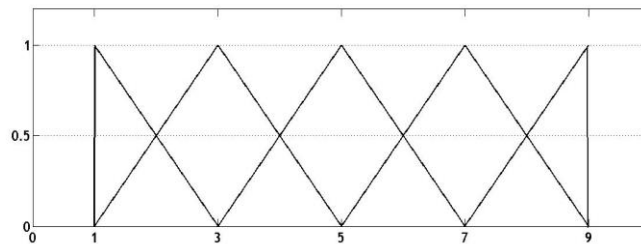
$$M_1 \otimes M_2 = (l_1, m_1, u_1) \otimes (l_2, m_2, u_2) = (l_1 \times l_2, m_1 \times m_2, u_1 \times u_2) \tag{4.15}$$

$$M_1 \oplus M_2 = (l_1, m_1, u_1) \oplus (l_2, m_2, u_2) = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \quad (4.16)$$

Une échelle linguistique est utilisée pour expliquer les nombres flous qui sont utilisés pour décrire les poids des critères (Tableau 4.11 ci-dessous).

**Tableau 4.11** Les variables linguistiques décrivant les poids des critères

Échelle linguistique pour les jugements	nombres flous	Échelle floue triangulaire ( $l, m, u$ )
L'égalité des importances entre deux critères	$\tilde{1}$	(1, 1, 3)
Importance modérée de l'un des critères sur l'autre	$\tilde{3}$	(1, 3, 5)
Importance forte du premier critère sur l'autre	$\tilde{5}$	(3, 5, 7)
Très forte importance du premier critère sur l'autre	$\tilde{7}$	(5, 7, 9)
Importance absolue du premier critère sur l'autre	$\tilde{9}$	(7, 9, 9)



**Figure 4.5** L'échelle de Saaty exprimé en un ensemble flou

**b. Calcul des poids des critères et sous critères**

En exploitant les mêmes critères et sous critères de la section précédente (4.1) et la structure hiérarchique de l'AHP (figure 4.1), nous avons construit la matrice de comparaison par paires des critères (de même pour les sous critères). Le tableau 4.12 illustre la matrice obtenue en se basant sur l'avis des experts du service de maintenance.

**Tableau 4.12** Matrice de comparaison par paires des critères

	Degré de complexité de la maintenance	Fonction	Risque	Criticité de la mission	Age	Erreurs des utilisateurs	Classe de l'équipement
Degré de complexité de la maintenance	(1,1,1)	(1/7,1/5,1/3)	(1/5,1/3,1)	(1/5,1/3,1)	(3,5,7)	(1/5,1/3,1)	(1/7,1/5,1/3)
Fonction	(3,5,7)	(1, 1,1)	(1, 3,5)	(1, 3,5)	(3, 5,7)	(3, 5,7)	(1, 3,5)
Risque	(1,3,5)	(1/5,1/3,1)	(1, 1,1)	(3, 5,7)	(3, 5,7)	(1, 3,5)	(1, 1,3)
Criticité de la mission	(1,3,5)	(1/5,1/3,1)	(1/7,1/5,1/3)	(1, 1,1)	(3, 5,7)	(1, 3,5)	(1, 1,3)
Age	(1/7,1/5,1/3)	(1/7,1/5,1/3)	(1/7,1/5,1/3)	(1/7,1/5,1/3)	(1, 1,1)	(1/5,1/3,1)	(1/5,1/3,1)

<b>Erreurs des utilisateurs</b>	(1,3,5)	(1/7,1/5,1/3)	(1/5,1/3,1)	(1/5,1/3,1)	(1, 3,5)	(1, 1,1)	(1/5,1/3,1)
<b>Classe de l'équipement</b>	(3,5,7)	(1/5,1/3,1)	(1/3, 1,1)	(1/3, 1,1)	(1, 3,5)	(1, 3,5)	(1, 1,1)

L'étape suivante consiste à calculer le poids flou pour chaque critère en utilisant la technique moyenne géométrique comme l'a expliquée Kabir et al. (2011) :

$$\tilde{r}_i = (\tilde{a}_{i1} \otimes \tilde{a}_{i2} \otimes \tilde{a}_{i3} \otimes \tilde{a}_{i4} \otimes \tilde{a}_{i5} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{i7})^{1/n} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (4.17)$$

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_1 \oplus \tilde{r}_2 \oplus \tilde{r}_3 \oplus \tilde{r}_4 \oplus \dots \oplus \tilde{r}_n)^{-1} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (4.18)$$

Avec  $\tilde{a}_{ij}$  est la valeur floue obtenue après la normalisation du tableau 4.12 et  $n$  est le nombre des critères. Le tableau 4.13 illustre les résultats numériques obtenus de  $\tilde{r}_i$  et  $\tilde{w}_i$  ( $\forall i = 1, \dots, n$ ) :

**Tableau 4.13** Les résultats numériques de calcul

$\tilde{r}_i$	$\tilde{w}_i$
$\tilde{r}_1 = (0.337, 0.496, 0.965)$	$\tilde{w}_1 = (0.0227, 0.0542, 0.1931)$
$\tilde{r}_2 = (1.601, 3.192, 4.589)$	$\tilde{w}_2 = (0.1078, 0.3487, 0.9185)$
$\tilde{r}_3 = (1.088, 1.853, 3.231)$	$\tilde{w}_3 = (0.0732, 0.2024, 0.6466)$
$\tilde{r}_4 = (0.704, 1.17, 2.091)$	$\tilde{w}_4 = (0.0474, 0.1278, .4186)$
$\tilde{r}_5 = (0.208, 0.291, 0.533)$	$\tilde{w}_5 = (0.014, 0.0318, 0.1067)$
$\tilde{r}_6 = (0.38, 0.679, 1.354)$	$\tilde{w}_6 = (0.0256, 0.0742, 0.2710)$
$\tilde{r}_7 = (0.679, 1.472, 2.091)$	$\tilde{w}_7 = (0.0256, 0.0742, 0.2710)$

Une fois que les poids flous sont calculés, on procède à l'étape de la *défuzzification* pour le calcul de la valeur BNP «Best Non fuzzy Performance Value » selon Wang et al. (2007) comme suit :

$$BNP_{wi} = \frac{[(U_{wi} - L_{wi}) + (M_{wi} - L_{wi})]}{3} + L_{wi} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (4.19)$$

Pour obtenir le poids final  $w_i$ , une procédure de normalisation simple est considérée comme suit :

$$w_i = \frac{BNP_{wi}}{\sum_{i=1}^n BNP_{wi}} \quad (4.20)$$

**Tableau 4.14** Les valeurs BNP et les valeurs de pondération (poids) des critères et des sous critères

Les critères	Grade ( $G_i$ )	$BNP_{W_i}$	$W_i$	Sous critères	Grade ( $G_{ij}$ )	$BNP_{W_i}$	$W_i$
Degré de complexité de maintenance	3	0,090	0,06				
Fonction	9	0,458	0,32				
Risque	3	0,307	0,21	Délectabilité	3	0,368	0,29
				Fréquence	3	0,454	0,35
				Sécurité	3	0,341	0,26
				Temps d'arrêt	3	0,132	0,10
Degré d'importance de la mission	3	0,198	0,14	Taux d'utilisation	4	0,87	0,71
				Disponibilité des alternatives	2	0,36	0,29
Age	2	0,051	0,04				
Erreurs des utilisateurs	3	0,124	0,09				
Classe de l'équipement	4	0,208	0,15				

Finalement, pour vérifier la cohérence des jugements, nous avons calculé l'indice de consistance ( $CI$ ), (voir tableau 4.15).

**Tableau 4.15** Ratio de cohérence de la matrice de jugements

$\lambda_{\max}$	7.762
Indice de consistance (CI)	0.127
Ratio de consistance (CR)	0.096 < 0.1

Nous avons validé le résultat de la méthode FAHP (AHP floue) avec les experts du service de maintenance biomédical de l'hôpital Habib Bourguiba de Sfax. La cohérence des jugements des experts est positive comme il est indiqué dans le tableau 4.15.

#### 4.3.2. Exploitation de TOPSIS Floue

Ilangkumaran et Kumanan. (2008) ont proposé une technique de TOPSIS combinée avec la méthode d'analyse hiérarchique multicritère FAHP pour sélectionner la meilleure stratégie de maintenance pour l'industrie textile. Nous avons exploité cette combinaison avec l'utilisation de TOPSIS floue pour réduire au minimum l'incertitude des données d'entrée de la matrice de performance. La technique de TOPSIS floue peut être utilisée pour classer les alternatives disponibles et pour choisir la stratégie de maintenance optimale qui peut augmenter la disponibilité des équipements médicaux critiques.

Comme il est indiqué dans la méthode FAHP, et selon Hsieh et al. (2004), le nombre flou utilisé pour la technique TOPSIS flou est représenté par un triplé  $M = (l, m, u)$  correspondant à chacune des variables linguistiques (voir tableau 4.16).

**Tableau 4.16** Les Variables linguistiques pour le classement de chaque politique de maintenance

Les variables linguistiques	Importance du poids de chaque critère
Très bas	(1, 1,3)
Bas	(1, 3,5)
Moyen	(3, 5,7)
Haut	(5, 7,9)
très haut	(7, 9, 9)

Après avoir mis en place la matrice de performance floue des alternatives (MPS, MPC et MC) basée essentiellement sur le jugement des experts et les nombres flous (voir tableau 4.17), nous procédons la normalisation de cette matrice. La matrice de performance floue normalisée est donnée par :

$$\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n} \quad \forall i = 1, \dots, m ; \forall j = 1, \dots, n \quad (4.21)$$

avec  $m$  est le nombre des alternatives et  $n$  est le nombre des critères et sous critères d'évaluation. Pour des nombres flous triangulaires  $\tilde{x}_{ij} = (\tilde{a}_{ij}, \tilde{b}_{ij}, \tilde{c}_{ij})$ , les valeurs normalisées sont calculées comme suit :



$$\tilde{r}_{ij} = \left( \frac{\tilde{a}_{ij}}{c_j^+}, \frac{\tilde{b}_{ij}}{c_j^+}, \frac{\tilde{c}_{ij}}{c_j^+} \right) \quad \forall i = 1, \dots, m ; \forall j = 1, \dots, n \quad (4.22)$$

Avec :  $c_j^+ = \max_i \tilde{c}_{ij}$

**Tableau 4.17** La matrice de performance floue

	Degré de complexité de la maintenance	Fonction	Déteçtabilité	Fréquence	Sécurité	Temps d'arrêt	Taux d'utilisation	Disponibilité des alternative devices	Age	Erreurs des utilisateurs	Classe de l'équipement
MPS	(5,7 ,9)	(7, 9,9)	(3,5, 7)	(7,9, 9)	(5,7 ,9)	(5,7, 9)	(5,7, 9)	(3,5, 7)	(5,7 ,9)	(1,1, 3)	(5, 7,9)
MPC	(3,5, 7)	(5,7 ,9)	(5,7 ,9)	(3,5, 7)	(3,5, 7)	(3,5, 7)	(7,9, 9)	(3,5, 7)	(7,9 ,9)	(1,1, 3)	(5,7 ,9)
MC	(1,3, 5)	(3,5 ,7)	(1,3 ,5)	(1,3, 5)	(1,3, 5)	(3,5, 7)	(3,5, 7)	(3,5, 7)	(3,5, 7)	(1,1, 3)	(3,5 ,7)

Ensuite, la matrice de décision de poids normalisée est calculée en multipliant la matrice de performance normalisée par les poids flous de multiples critères (sous critères) obtenus dans la section 4.3.1 de l'application de l'AHP floue (voir tableau 4.14). Les valeurs normalisées de la matrice de performance normalisée sont notés comme suit (Hong et al. (2012)) :

$$\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n} \quad \forall i = 1, \dots, m ; \forall j = 1, \dots, n \quad (4.23)$$

avec  $\tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij} * \tilde{w}_{ij}$  et  $\tilde{w}_{ij}$  est le poids en nombre flou du critère.

**Tableau 4.18** La matrice de performance de poids normalisée

	Degré de complexité de la maintenance	Fonction	Déteçtabilité	Fréquence	Sécurité	Temps d'arrêt	Taux d'utilisation	Disponibilité des alternative devices	Age	Erreurs des utilisateurs	Classe de l'équipement
MPS	(0.013 ,0.04, 0.19)	(0.083 ,0.35, 0.92)	(0.037 ,0.16, 0.36)	(0.109 ,0.29, 0.58)	(0.061 ,0.26, 0.32)	(0.022 ,0.07, 0.17)	(0.17 ,0.58, 1.55)	(0.06 ,0.18, 0.69)	(0.008 ,0.02, 0.11)	(0.009 ,0.02, 0.27)	(0.026 ,0.1, 3,0.42)
MPC	(0.008 ,0.03, 0.15)	(0.059 ,0.27, 0.92)	(0.061 ,0.23, 0.46)	(0.047 ,0.16, 0.45)	(0.037 ,0.18, 0.25)	(0.013 ,0.05, 0.13)	(0.044 ,0.7, 5,1.55)	(0.06 ,0.18, 0.69)	(0.01, 0.03, 0.11)	(0.009 ,0.02, 0.27)	(0.026 ,0.1, 3,0.42)
MC	(0.003 ,0.02, 0.11)	(0.036 ,0.27, 0.71)	(0.012 ,0.10, 0.26)	(0.016 ,0.10, 0.32)	(0.012 ,0.11, 0.18)	(0.013 ,0.05, 0.13)	(0.103 ,0.4, 2,1.2)	(0.06 ,0.18, 0.69)	(0.005 ,0.02, 0.08)	(0.009 ,0.02, 0.27)	(0.015 ,0.09, 0.33)

Nous désignons les trois étapes suivantes pour calculer les coefficients de proximité relatifs et pour classer les alternatives :

- Etape 1 : Calcul de la solution idéale positive et la solution idéale négative

Nous considérons  $A^+$  la solution idéale positive (PIS) et  $A^-$  la solution idéale négative (NIS) sont définies par Hong et al. (2012) :

$$A^+ = (\tilde{v}_1^+, \tilde{v}_2^+, \dots, \tilde{v}_n^+) = \{(max_i v_{ij}, i = 1, \dots, m), j = 1, \dots, n\} \quad (4.24)$$

$$A^- = (\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_n^-) = \{(min_i v_{ij}, i = 1, \dots, m), j = 1, \dots, n\} \quad (4.25)$$

avec  $\tilde{v}_j^+ = (1,1,1)$  et  $\tilde{v}_j^- = (0,0,0) \quad \forall j = 1, \dots, n$

- Etape 2 : Calcul des distances entre chaque alternative

Nous avons calculé la distance entre chaque alternatif et la solution PIS et entre chaque alternatif et la solution NIS (voir tableau 4.19) en utilisant les équations (4.26) et (4.27), Hong et al. (2012) :

$$D_i^+ = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+) \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (4.26)$$

$$D_i^- = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-) \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (4.27)$$

**Tableau 4.19** Mesure des distances

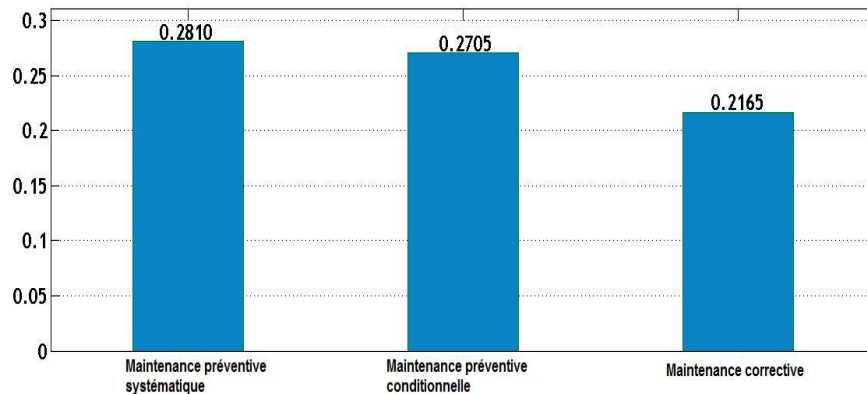
Stratégie la maintenance	Solution idéale positive (PIS)	Solution idéale négative (NIS)
Maintenance préventive systématique (MPS)	8.91	3.48
Maintenance préventive conditionnelle (MPC)	9.01	3.36
Maintenance corrective (MC)	9.40	2.60

- Etape 3 : calcul des coefficients de proximité relatifs et classement des alternatives

La dernière étape dans la technique de TOPSIS floue est de calculer le coefficient de proximité  $CC_i$  pour chaque alternative, Hong et al. (2012) :

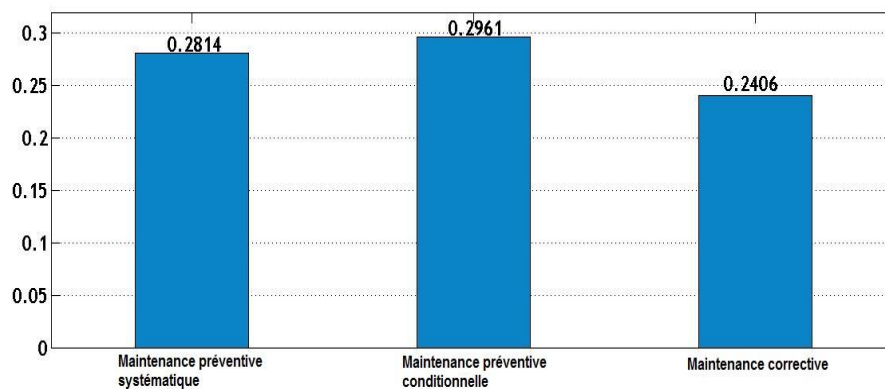
$$CC_i = \frac{D_i^-}{(D_i^+ + D_i^-)} \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (4.28)$$

Les alternatives sont classées par ordre décroissant selon leurs coefficients  $CC_i$  (voir figure 4.6). En effet, l'alternative avec le plus grand  $CC_i$ , sera la meilleure alternative.



**Figure 4.6** Classement des stratégies de maintenance en fonction de leurs coefficients de proximité

Nous avons repris toutes les étapes de FAHP à FTOPSIS, en ajoutant le coût comme sous critère de risque comme nous avons procédé dans la section 4.3.1. La figure 4.7 montre les résultats du nouveau classement des stratégies de maintenance qui confirme la démarche de Taghipour et al. (2011) et Jamshidi et al. (2015).



**Figure 4.7** Classement des stratégies de maintenance en fonction de leurs coefficients de proximité (avec le sous-critère coût)

L'avantage de l'exploitation de la théorie des ensembles flous est :

- Employer des ratios flous au lieu des ratios exacts pour gérer la difficulté des gens à attribuer les rapports exactes lors de la comparaison des deux critères.
- Etre capable de présenter des données incertaines.
- Faire face à la subjectivité dans le processus de comparaison par paires.

#### **4.4. Conclusion**

Notre approche de la méthode AHP couplée avec la technique TOPSIS a permis d'identifier la MPS comme la stratégie de maintenance optimale pour les équipements médicaux critiques. Ainsi, nous avons justifié les deux classements des stratégies de maintenance en relation avec le sous critère de coût. Dans notre étude, selon le responsable du service de maintenance, le premier classement est plus approprié. En outre, le coût de maintenance sera inclus comme une contrainte dans le développement du modèle mathématique « MILP » dans le chapitre suivant.

## **Chapitre 5 : Choix des stratégies de maintenance, internalisation/externalisation**

L'optimisation de la production des soins représente un enjeu majeur pour les gestionnaires de l'hôpital, en particulier la planification de la production et de la maintenance vu leur impact majeur sur la performance des équipements médicaux. En effet, le service de la maintenance biomédicale a pour objectif d'améliorer la disponibilité des équipements et de réduire la fréquence des défaillances tout en minimisant les coûts engendrés par les pannes et tout en assurant leur fiabilité.

La maintenance des équipements médicaux contribue principalement à maintenir l'équipement en fonctionnement, à réduire le taux de défaillances tout en gardant les exigences de sécurité et à améliorer la qualité du service de santé (Jamshidi et al. (2015)). Les équipements médicaux continuent à augmenter en nombre et en complexité pour satisfaire la demande croissante des services de santé. Dans les dernières décennies, la sophistication des équipements médicaux et l'augmentation continue de leur coût se sont accompagnées d'une augmentation de la complexité et du coût de leur maintenance (Jamshidi et al. (2014)). Généralement, les coûts de maintenance sont élevés en raison de la sélection d'une stratégie de maintenance non adaptée. Peu d'études existent dans le domaine hospitalier pour aider le décideur à choisir la meilleure stratégie de maintenance des équipements médicaux (Jamshidi et al. (2014)).

Dans un souci de rapidité d'intervention et de maîtrise du budget disponible, les établissements de soins ont recours à l'externalisation de la maintenance des équipements médicaux avec ou sans contrat. Les interventions externalisées sont généralement pour les équipements médicaux lourds (scanner à rayons X, imagerie par résonance magnétique, automate de laboratoire, radiothérapie, etc.), les interventions de calibrage ou de requalification de certains équipements (automates de laboratoires, autoclaves, etc.) ou les équipements nécessitant un agrément (contrôle de rayonnement pour les salles radiologiques).

Plusieurs notions motivent le recours à l'externalisation de la maintenance, telles que la diminution des coûts des activités de maintenance coûteuses, l'atténuation du manque des compétences techniques spécifiques ou le manque de disponibilité du personnel, etc.

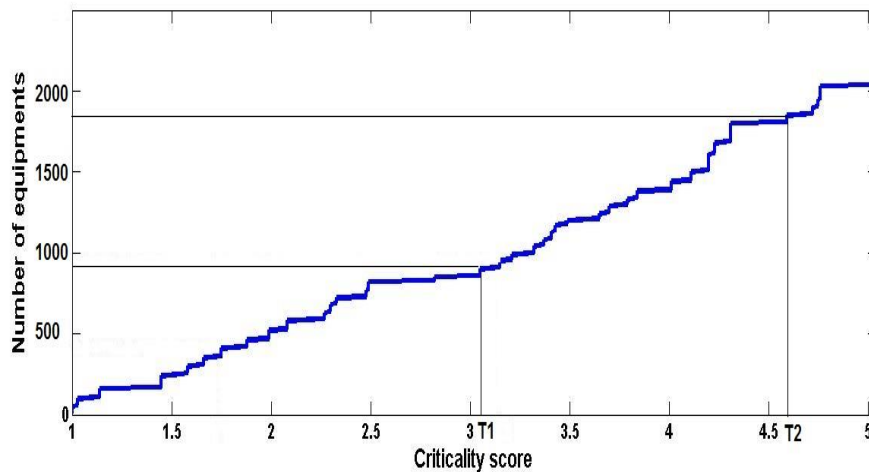
Nous nous concentrerons principalement sur ces deux importants problèmes. Deux modèles mathématiques MILP ont été développés afin de choisir la meilleure stratégie de maintenance pour chaque équipement, l'internalisation/externalisation et le meilleur contrat de maintenance

qui maximisera l'importance totale et satisfera le budget de l'hôpital et l'insuffisance des ressources.

## 5.1. Sélection de la stratégie de maintenance en utilisant le modèle mathématique MILP

### 5.1.1. Modélisation du problème

Une fois la criticité des équipements médicaux est calculée et les stratégies de maintenance sont classifiées, nous déterminons quel ensemble d'équipements devra être maintenu en fonction de trois stratégies : MPS, MPC, et MC. Pour ce faire, nous définissons les deux limites de criticité  $T_1$  et  $T_2$  qui séparent les trois stratégies possibles pour déterminer la stratégie de maintenance pour chaque équipement (voir la figure 5.1). Les équipements avec les scores de criticité inférieurs à  $T_1$  sont affectés à la stratégie MC, puis ceux qui ont les scores de criticité entre  $T_1$  et  $T_2$  sont affectés à la stratégie MPC, et enfin ceux qui ont les scores de criticité plus grand que  $T_2$  sont affectés à la stratégie MPS.



**Figure 5.1** Les stratégies de maintenance correspondantes en fonction des seuils

Le coût de maintenance de l'équipement est donné en fonction de la stratégie de maintenance correspondante. Ainsi, le but de cette partie consiste à définir les meilleures valeurs de  $T_1$  et  $T_2$ , qui permettent de sélectionner la stratégie de maintenance appropriée par équipement en maximisant les activités de maintenance préventive. Plus la valeur de la limite  $T_1$  est élevée, moins d'équipements seront censés subir une maintenance préventive *et vice-versa*.

Pour résoudre le problème, nous proposons dans ce qui suit un modèle mathématique linéaire en entiers mixtes « MILP » efficace pour minimiser les deux limites de criticité  $T_1$  et  $T_2$

(maximiser les activités de maintenance préventive) avec le respect du budget alloué au service de maintenance. Pour la fonction objectif nous avons considéré les sommes pondérées obtenues par la méthode TOPSIS dans la section 4.2. Dans notre modèle, les estimations de coûts de maintenance et le budget alloué au service de maintenance biomédicale sont considérées comme des entrées. Les indices, les paramètres et les variables de décision considérés dans notre modèle sont les suivants :

Les indices :

$i$  : indice pour le nombre total des équipements ( $n$ ) ;  $i = 1, \dots, n$ .

$j$  : indice pour les stratégies de maintenance considérées ;  $j = 1, \dots, 3$ . Comme étant données, les stratégies de maintenance possibles sont : MC (1), MPC (2) et MPS (3).

Les paramètres :

$Cr_i$  : Score de criticité de l'équipement médical, sachant que les équipements sont classés selon un ordre croissant de criticité ( $Cr_i \leq Cr_{i+1}, \forall i = 1, \dots, n - 1$ ).

$Cost_{i,j}$  : Coût de maintenance de chaque équipement  $i$ , selon la stratégie de maintenance  $j$ .

*Budget* : Le montant d'argent réservé pour le service de maintenance.

Les variables de décision :

$T_1$  : Limite de criticité entre la MC ( $j = 1$ ) et la MPC ( $j = 2$ ).

$T_2$  : Limite de criticité entre la MPC ( $j = 2$ ) et la MPS ( $j = 3$ )

$X_{i,j}$  : Variable booléenne, égale à 1 si la stratégie de maintenance  $j$  est considérée pour l'équipement  $i$ , 0 sinon.

Le modèle MILP :

$$\text{Maximiser } 0.23 * \sum_{i=1}^{i=n} X_{i,1} + 0.66 * \sum_{i=1}^{i=n} X_{i,2} + 0.77 * \sum_{i=1}^{i=n} X_{i,3} \quad (5.1)$$

*S/contrainte :*

$$\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=3} Cost_{i,j} * X_{i,j} \leq \text{Budget} \quad (5.2)$$

$$\sum_{j=1}^{j=3} X_{i,j} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (5.3)$$

$$X_{i,1} + 2X_{i,2} + 4X_{i,3} \leq X_{i+1,1} + 2X_{i+1,2} + 4X_{i+1,3} \quad \forall i = 1, \dots, n - 1 \quad (5.4)$$

$$\sum_{i=1}^{i=n-1} Cr_i * (X_{i,1} - X_{i+1,1}) = T_1 \quad (5.5)$$

$$\sum_{i=1}^{i=n-1} Cr_i * (X_{i,1} - X_{i+1,1} + X_{i,2} - X_{i+1,2}) = T_2 \quad (5.6)$$

$$1 \leq T_1 < T_2 \leq 5.12 \quad (5.7)$$

$$X_{i,j} \in \{0, 1\} \quad \forall i = 1, \dots, n ; \forall j = 1 \dots 3 \quad (5.8)$$

en prenant les résultats de la proximité relative de TOPSIS comme un poids de la stratégie)

La fonction objectif (5.1) maximise la moyenne pondérée de l'ensemble des équipements médicaux visant à être maintenu avec la MC, la MPC et la MPS. Les poids des trois stratégies sont obtenus depuis la technique TOPSIS de la section 4.2. Comme les poids de la MPC et la MPS sont plus élevés que celle de la MC, le problème d'optimisation donnera le plus grand nombre possible d'équipements (satisfaisant aux contraintes) pour recevoir la MPC et la MPS. La contrainte (5.2) assure le fait que le coût total de la maintenance est plus petit que le budget disponible. L'équation (5.3) garantit l'affectation d'une seule stratégie de maintenance par équipement. Etant donné que les équipements médicaux sont classés selon l'ordre croissant de leur score de criticité  $Cr_i$ . La contrainte (5.4) garantit que, pour deux équipements 'v' et 's' dans l'ensemble  $\{1, \dots, n\}$ , si  $v \leq s$  (c'est-à-dire,  $Cr_v \leq Cr_s$ ), alors les stratégies de maintenance correspondantes  $S_v$  et  $S_s$  dans  $\{1, 2, 3\}$  sont telles que  $S_v \leq S_s$ . Par exemple, si la stratégie de maintenance pour l'équipement 's' est MPS, alors tous les équipements placés après 's' sont sélectionnés pour MPS. La contrainte (5.5) définit la limite de criticité  $T_1$  entre les équipements maintenus avec la MC et la MPC. La limite  $T_1$  représente la plus haute criticité des équipements médicaux avec la stratégie corrective, c'est à dire, la criticité de l'équipement  $i$  avec  $X_{i,1} = 1$  et  $X_{i+1,1} = 0$ . De même, la contrainte (5.6) définit la limite  $T_2$  entre les stratégies MPC et MPS. La limite  $T_2$  représente la plus haute criticité des dispositifs médicaux avec la stratégie de MPC, soit la criticité de dispositif  $i$  avec  $X_{i,2} = 1$  et  $X_{i+1,2} = 0$ . La contrainte (5.7) spécifie le domaine des limites  $T_1$  et  $T_2$  selon les niveaux minimal et maximal des valeurs de criticité définies dans la section 4.1.3. Les valeurs de score de criticité varient entre 1 et 5.12. Cette contrainte garantit que  $T_1$  est toujours inférieure à  $T_2$ . Enfin, la contrainte (5.8) spécifie le domaine de la variable de décision  $X_{i,j}$ .



### 5.1.2. Les résultats expérimentaux du modèle mathématique

Nous avons implémenté notre modèle mathématique « MILP » sur le solveur 'CPLEX 12.5" en utilisant un ordinateur avec un processeur ayant les caractéristiques suivantes : Intel (R) Pentium (R) La CPU 2020M 2.60 GHz. Nous avons considéré les données d'entrée réelles des équipements médicaux du service de maintenance du CHU Habib Bourguiba de Sfax, Tunisie. Nous avons testé notre modèle avec de nombreuses instances tout en variant le nombre des équipements médicaux entre 20 et 2000. Dans le tableau 5.1, nous illustrons le temps de calcul en secondes pour chacune de ces instances testées. La plus grande instance peut être résolue en un temps réduit égal à 15.18 secondes.

**Tableau 5.1** Temps de calcul pour huit instances différentes

<i>N° de l'instance</i>	<i>Nombre des équipements</i>	<i>Temps de calcul (secondes)</i>
1	20	0.39
2	50	0.56
3	100	1.12
4	200	1.52
5	500	3.82
6	1000	5.15
7	1500	10.11
8	2000	15.18

Pour le cas du CHU Habib Bourguiba de Sfax, nous avons examiné tous les équipements médicaux (2000 équipements). En fait, afin de décider quelle stratégie de maintenance à appliquer pour chaque équipement, il faut inclure tous les équipements car, dans le cas contraire, les décisions pourraient être erronées. Par exemple, si le modèle mathématique est seulement appliqué à un ensemble des équipements, les responsables de la maintenance pourraient allouer tout le budget disponible uniquement à cet ensemble et décider d'appliquer la maintenance préventive pour l'ensemble ce qui peut s'avérer inutile.

Les scores de criticité varient entre 1 et 5.12 et les équipements sont classés dans l'ordre croissant. L'objectif principal de cette instance est de trouver les meilleures valeurs des limites  $T_1$  et  $T_2$  pour optimiser les activités de la maintenance préventive en ce qui concerne le budget

disponible. Le calcul est réalisé en seulement 15.18 secondes. Les résultats pour la sélection de la stratégie de maintenance par équipement sont résumés dans le tableau 5.2. Dans ce tableau, nous constatons que tous les équipements avec une criticité plus petite que 3.04 ( $= T_1$ ) devraient être maintenus selon la stratégie de MC. Toutefois, ceux avec une criticité supérieure ou égale à 4.66 ( $= T_2$ ) devraient être maintenus selon la stratégie de MPS. Les équipements restants devraient être maintenus selon stratégie MPC.

**Tableau 5.2** MILP Résultats pour 2000 équipements médicaux en utilisant le solveur CPLEX

<i>N°</i>	<i>Criticité</i>	<i>MC</i>	<i>MPC</i>	<i>MPS</i>
1	1	1	0	0
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
<b>1219</b>	<b>3.04</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>1220</b>	<b>3.08</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
1221	3.08	0	1	0
1916	4.66	0	1	0
<b>1917</b>	<b>4.66</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
<b>1918</b>	<b>4.69</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>
1919	4.69	0	0	1
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
2000	5.12	0	0	1

Le budget disponible pour l'activité de maintenance (corrective et préventive) est fixé à 4.000.000 DT (Dinar Tunisien). La répartition des coûts et l'affectation des équipements entre les différentes stratégies sont comme suit : 1219 équipements avec la stratégie de MC (50.79% des équipements) avec un coût de maintenance de 617.012 DT. Pour la stratégie de MPC, nous

avons 698 équipements (34.9 % des équipements) avec un coût de maintenance de 2.842.336 DT. Enfin, le reste est égal à 83 équipements et il est affecté à la stratégie de MPS (4.15% des équipements) avec un coût de maintenance de 540.648 DT. L'écart entre le budget disponible et le coût total de maintenance est d'environ 4 DT seulement.

Par conséquent, l'étude computationnelle prouve l'efficacité de notre méthode dans la sélection de la stratégie de maintenance adéquate pour chaque équipement médical selon son score de criticité et le budget disponible. En plus, notre modèle mathématique de type « MILP » cherche à trouver le meilleur nombre d'équipements à affecter aux stratégies MPC et MPS pour maximiser la disponibilité de l'équipement médical et augmenter sa fiabilité. Ensuite, les différents types d'équipements médicaux sont considérés afin de déterminer la manière d'allouer le budget disponible pour le management des équipements et quelle stratégie de maintenance doit être appliquée à chaque équipement.

### 5.1.3. Etude de sensibilité du modèle mathématique

Une analyse de sensibilité a été effectuée pour déterminer l'impact de la variation du montant du budget disponible de maintenance sur l'ensemble des équipements, voir tableau 5.3. L'analyse montre que, lorsque le budget de maintenance (considéré comme entrée) diminue, les limites  $T_1$  et  $T_2$  (sorties) varient de telle sorte qu'on obtienne plus d'équipements affectés à la stratégie MC. Le résultat implique également que plus le budget disponible est important, plus nous avons des dispositifs médicaux maintenus avec des stratégies de MPC et MPS et moins d'équipements avec la stratégie MC (les limites  $T_1$  et  $T_2$  sont diminuées) *et vice versa*.

**Tableau 5.3** Les Résultats de la variation du budget disponible de maintenance

% de la variation	$T_1$	$T_2$	% des équipements avec MC	% des équipements avec MPC	% des équipements avec MPS
- 15%	4.59	5.09	92.5%	6.2%	1.3%
-10%	4.26	5.04	84.6%	11.95%	3.45%
-5%	3.86	5.02	76.25%	19.75%	4 %
La solution initiale	3.04	4.66	60.95%	34.9%	4.15%
+5%	2.63	4.66	52.4%	42.5%	5%
+10%	1.56	4.63	41.6%	52.65%	5.75%

+15%	1	4.46	0.05%	89.5%	10.45%
+20%	1	3.78	0.05%	70.3%	29.65%
+25%	1	2.42	0.05%	51.25%	48.7%

## 5.2. Modélisation mathématique globale de problème de maintenance biomédicale

### 5.2.1. Les hypothèses du modèle

Les hypothèses du modèle sont :

- Dans notre modèle, on discrétise l'horizon d'un an de planification en des intervalles de temps d'une taille égale un mois.
- Les actions de maintenance corrective sont considérées comme des «réparations minimales». L'équipement revient à l'état avant la défaillance. Cela signifie, qu'après la réparation, l'équipement n'est pas considéré comme neuf « as good as new ». Cette hypothèse est réaliste, en particulier, pour l'équipement complexe constitué de plusieurs composants dont la défaillance peut être attribuée à la défaillance de quelques composants. Le remplacement de ces composants défectueux dans une action de maintenance corrective ramène l'équipement à son état avant la défaillance.
- L'action la maintenance préventive est planifiée au début du mois  $m$  s'il y a une maintenance préventive planifiée dans ce mois. L'état de l'équipement après la maintenance préventive est « as good as new ». L'action de maintenance préventive comprend l'inspection approfondie de l'équipement, le remplacement d'un ensemble de composants dégradés, le nettoyage et le réglage.
- L'âge de l'équipement n'a pas d'effet sur la fonction taux de défaillance. En effet, la durée des opérations d'un équipement peut recevoir plusieurs actions de maintenance préventive. L'équipement médical n'est considéré ancien qu'après 10 ans.
- Une action de maintenance préventive au plus peut être effectuée dans un mois pour un équipement. Cependant, il peut y avoir de multiples réparations minimales par équipement par période.

La conviction commune des organismes de santé est que les équipements médicaux essentiellement électroniques ont des taux de défaillances constants. Bien que le manuel le

plus connu et utilisé, MIL-HDBK-217 (United States Department of Defense, 1995), propose des modèles de fiabilité basés sur l'hypothèse du taux de défaillances constant. Cette hypothèse a été jugée inexacte et il a été mentionné que son utilisation peut entraîner des décisions erronées. Ainsi, elle ne devrait plus être acceptée comme une règle (Mortin et al.1995, Choi et Seong, 2008). En fait, la fiabilité et les modes de défaillances des équipements peuvent être affectés par des facteurs externes (conditions de fonctionnement, niveau d'expertise des techniciens, le stress environnemental, etc.). Par conséquent, les équipements doivent être étudiés dans leurs contextes d'exploitation. Nous supposons que les dispositifs médicaux ont un taux de défaillance qui est proportionnel au temps. Plus précisément, on note  $\lambda(t)$  qui représente le taux de défaillance d'un équipement l'instant  $t$ . Le taux de défaillance au moment  $s$ ,  $s > t$ , est tel que  $\lambda(s) = \lambda(t)e^{bt}$ , où  $b$  est un paramètre positif entre  $[0,1]$  qui dépend du niveau de risque de l'équipement. Cette hypothèse est similaire à la fonction du taux de risque proportionnel bien connu avec la co-variable linéaire unique de Cox (1972).

### 5.2.2. Les Indices

- $n$  : Le nombre d'équipements médicaux,  $i=1, \dots, n$  ; les équipements sont classés selon un ordre croissant de leur score de criticité.
- $s=1, \dots, 3$ : indice des stratégies de maintenance. Comme il est bien mentionné au début, nous avons trois stratégies de maintenance possibles : MC ( $s = 1$ ), MPC ( $s = 2$ ) et MPS ( $s = 3$ ).
- $m=1, \dots, 12$ : indice du mois par an (horizon de la planification).
- $j=1, \dots, 6$ : indice pour le mode de maintenance avec  $j=1$  pour l'internalisation de la maintenance. en cas d'externalisation de la maintenance, nous avons 5 mode :  $j=6$  avec contrat A\*,  $j=5$  pour contrat A,  $j=4$  pour contrat B,  $j=3$  pour contrat C, et  $j=2$  pour le cas de l'externalisation sans contrat.

### 5.2.3. Les paramètres

$CF_{i,s,j}$  : Le coût du forfait selon la stratégie  $s$  et le mode  $j$  pour chaque équipement  $i$ .

$TE_i$  : La durée des opérations de maintenance pour équipement  $i$  en cas d'externalisation de l'activité de maintenance.

$TIP_{i,m}$  : La durée moyenne de l'opération de maintenance préventive pour chaque équipement  $i$  en cas d'internalisation de l'activité au mois  $m$ .

$TIC_{i,m}$  : La durée moyenne de l'opération de maintenance corrective pour chaque équipement  $i$  en cas d'internalisation de l'activité au mois  $m$ .

$CL_{i,s,j}$  : Coût de la main d'œuvre selon la stratégie  $s$  et le mode  $j$ .

$CSP_{i,s,j}$  : Coût des pièces de rechange selon la stratégie  $s$  et le mode  $j$ .

$B$  : Le budget annuel disponible pour le service de maintenance biomédicale.

$A_{i,m}$  : La durée de disponibilité (temps d'arrêt planifié) pour un équipement  $i$  (en heures) pour effectuer la maintenance au mois  $m$ .

$Ca_m$  : La capacité mensuelle du service de maintenance biomédicale (nombre d'heures de main d'œuvre).

$Cr_i$  : Le score de criticité de l'équipement  $i$ . Les équipements sont classés selon un ordre croissant de la criticité ( $Cr_i \leq Cr_{i+1}, \forall i = 1, \dots, N - 1$ ).

$\eta_m, \beta_m$  : représentent le début et la fin du mois  $m$  respectivement.

$\lambda_{\max i}$  : le maximum du taux de défaillance qui déclenche l'activité préventive systématique, au cas où la maintenance systématique est sélectionnée pour un équipement  $i$ ,

$\lambda_{cb i}$  : le maximum du taux de défaillance qui déclenche l'activité préventive conditionnelle à faire, au cas où la maintenance conditionnelle est sélectionnée pour un équipement  $i$

$r_{0 i}$  : Taux de défaillance de l'équipement  $i$  juste après l'action de la MPS.

$r_{cb i}$  : Taux de défaillance de l'équipement  $i$  juste après l'action de la MPC.

Pour la stratégie  $s$  et le mode  $j$ , nous définissons les paramètres suivants :

$$K_{o,s,j} = \begin{cases} 1, & \text{si le coût de la main d'œuvre de la maintenance préventive} \\ & \text{n'est pas inclut dans le forfait ;} \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$R_{s,j} = \begin{cases} 1, & \text{si le coût des pièces de rechange de la maintenance préventive} \\ & \text{n'est pas inclut dans le forfait ;} \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$L_{s,j} = \begin{cases} 1, & \text{si le coût de la main d'œuvre de la maintenance corrective} \\ & \text{n'est pas inclut dans le forfait ;} \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$U_{s,j} = \begin{cases} 1, & \text{si le coût des pièces de rechange de la maintenance corrective} \\ & \text{n'est pas inclut dans le forfait ;} \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$Ho_{s,j} = \begin{cases} 1, & \text{si le service de maintenance a les compétences pour effectuer} \\ & \text{les actions de maintenance ;} \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases}$$

#### 5.2.4. Les variables de décision

$D$  : la déviation entre le coût total de la maintenance et le budget disponible de maintenance.

$$X_{i,s,j} = \begin{cases} 1, & \text{si la stratégie } s \text{ et le mode } j \text{ sont considérés pour l'équipement } i ; \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$l_{i,s,m} = \begin{cases} 1, & \text{si l'action de la maintenance préventive est considérée pour l'équipement} \\ & i \text{ selon la stratégie } (s=2 \text{ MPC, } s=3 \text{ MPS}) \text{ au mois } m ; \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$Z_{i,s} = \begin{cases} 1, & \text{si la stratégie de maintenance } s \text{ est considérée} \\ & \text{pour l'équipement } i ; \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases}$$

#### 5.2.5. Les variables auxiliaires

$T_1$  : Limite de criticité entre la MC ( $s=1$ ) et la MPC ( $s=2$ ).

$T_2$  : Limite de criticité entre la MPC ( $s=2$ ) et la MPS ( $s=3$ ).

$\lambda_i(t)$  : Fonction taux de défaillances de l'équipement  $i$ .

$\lambda_i(\eta_m)$  : Fonction taux de défaillance au début du mois  $m$  de l'équipement  $i$ .

$NP_{i,s}$  : Nombre annuel d'opérations de maintenance préventive pour chaque équipement  $i$  et selon la stratégie  $s$ .

$NC_{i,s}$  : Nombre annuel des opérations de maintenance corrective pour chaque équipement  $i$  et selon la stratégie  $s$ .

$C_{i,s,j}$  : Coût de maintenance de chaque équipement  $i$  selon la stratégie de maintenance  $s$  et le mode  $j$ .

$G_{i,s,j}$  : Coût total de la maintenance de l'équipement  $i$  selon la stratégie de maintenance  $s$  et le mode  $j$ .

$W_{i,m}$  : La charge de maintenance en interne allouée à l'équipement  $i$  au mois  $m$  (en heures).

### 5.2.6. Modélisation mathématiques

$$\text{Minimiser } D \quad (5.9)$$

S/C

$$B - \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{s=1}^{s=3} \sum_{j=1}^{j=6} G_{i,s,j} \leq D \quad (5.10)$$

$$C_{i,s,j} - (1 - X_{i,s,j}) \cdot B \leq G_{i,s,j} \leq C_{i,s,j} \quad \forall i = 1, \dots, n; \forall s=1, \dots, 3; \forall j=1, \dots, 6 \quad (5.11)$$

$$0 \leq G_{i,s,j} \leq B \cdot X_{i,s,j} \quad \forall i = 1, \dots, n; \forall s = 1, \dots, 3; \forall j = 1, \dots, 6 \quad (5.12)$$

$$\sum_{s=1}^{s=3} \sum_{j=1}^{j=6} X_{i,s,j} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (5.13)$$

$$\sum_{s=1}^{s=3} Z_{i,s} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (5.14)$$

$$Z_{i1} + 2Z_{i,2} + 4Z_{i,3} \leq Z_{i+1,1} + 2Z_{i+1,2} + 4Z_{i+1,3} \quad \forall i = 1, \dots, n-1 \quad (5.15)$$

$$\sum_{i=1}^{i=n-1} Cr_i (Z_{i,1} - Z_{i+1,1}) = T_1 \quad (5.16)$$

$$\sum_{i=1}^{i=n-1} Cr_i \cdot (Z_{i,1} - Z_{i+1,1} + Z_{i,2} - Z_{i+1,2}) = T_2 \quad (5.17)$$

$$C_{i,s,j} = CF_{i,s,j} + CL_{i,s,j} (NP_{i,s} K_{j,s} + NC_{i,s} L_{j,s}) + CSP_{i,s,j} (NP_{i,s} R_{j,s} + NC_{i,s} U_{j,s}) \quad \forall i = 1, \dots, n; \forall s=1, \dots, 3; \forall j=1, \dots, 6 \quad (5.18)$$

$$X_{i,s,1} \leq Ho_{i,s} \quad \forall i = 1, \dots, n; \forall s=1, \dots, 3 \quad (5.19)$$

$$NC_{i,s} = \sum_{m=1}^{m=12} \int_{\eta_m}^{\beta} \lambda_i(t) dt \quad \forall i = 1, \dots, n; \forall s=1, \dots, 3 \quad (5.20)$$

$$NP_{i,s} = \sum_{m=1}^{m=12} l_{i,s,m} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (5.21)$$



$$l_{i,s,m} \leq Z_{i,s} \quad \forall i = 1, \dots, n; \forall s=1, \dots, 3; \forall j=1, \dots, 6 \quad (5.22)$$

$$TE_{i,m} + W_{i,m} \leq A_{i,m} \quad \forall i = 1, \dots, n; \forall m=1, \dots, 12 \quad (5.23)$$

$$\sum_{i=1}^n W_{i,m} \leq Ca_m \quad \forall m=1, \dots, 12 \quad (5.24)$$

$$W_{i,m} = TIP_{i,m} \cdot (l_{i,3,m} + l_{i,2,m}) + TIC_{i,m} \cdot \int_{\eta_m}^{\beta_m} \lambda_i(t) dt \quad \forall i=1 \dots N; m=1 \dots 12 \quad (5.25)$$

$$\lambda_i(\eta_m) = r_{oi} \cdot l_{i,3,m} + r_{cbi} \cdot l_{i,2,m} + \lambda_i(\eta_{m-1}) e^{b_i(\eta_m - \eta_{m-1})} (1 - l_{i,2,m} - l_{i,3,m}) \quad \forall i = 1, \dots, n; \forall m=1, \dots, 12 \quad (5.26)$$

$$0 \leq \lambda_i(\eta_m) \leq (l_{i,3,m} \lambda_{maxi} + l_{i,2,m} \lambda_{cbi}) \quad \forall i = 1, \dots, n; \forall m=1, \dots, 12 \quad (5.27)$$

$$1 \leq T_1 < T_2 \leq 5.12 \quad (5.28)$$

$$D; B; N; \lambda_{maxi}; \lambda_{cbi}; TIP_{i,m}; TIC_{i,m}; W_{i,m}; Ca_m; A_{i,m} \geq 0 \quad (5.29)$$

$$Ko_{s,j}, R_{s,j}, L_{s,j}, U_{s,j}, Ho_{s,j}, X_{i,s,j}, l_{i,s,j}, Z_{i,s} \in \{0,1\} \quad (5.30)$$

La fonction objectif (5.9) consiste à minimiser la déviation  $D$  entre le coût total de maintenance et le budget disponible de maintenance. La contrainte (5.10) concerne la déviation entre le coût total de maintenance et le budget disponible. Les Contraintes (5.11) et (5.12) garantissent que le coût total est toujours positif et n'excède pas le budget disponible. La contrainte (5.13) assure qu'une seule stratégie et un seul mode sont affectés à un équipement  $i$ . La Contrainte (5.14) assure qu'une seule stratégie est affectée à l'équipement  $i$ . Les contraintes (5.15), (5.16) (5.17) sont utilisées et expliquées dans le premier modèle mathématique (section 5.1.1). La contrainte (5.18) permet de calculer le coût de la maintenance pour chaque équipement  $i$  selon la stratégie et le mode sélectionnés. La contrainte (5.19) garantit que le service maintenance a les compétences pour réaliser la maintenance en interne. La contrainte (5.20) donne le nombre total annuel attendu des actions de maintenance corrective en se basant sur le taux de défaillances. Notons que la contrainte (5.20) est basée sur l'hypothèse de réparation minimale des activités de maintenance corrective précédemment défini. La contrainte (5.21) donne le nombre d'actions de maintenance préventive. La contrainte (5.22) assure qu'au plus une seule maintenance préventive peut être effectuée au mois  $m$  (MPS ;  $s=3$ , ou MPC ;  $s=2$ ). La contrainte (5.23) assure que la charge des actions de maintenance (corrective et préventive, en interne et en externe) n'excède pas la disponibilité de l'équipement pour la maintenance. La contrainte (5.24) assure que la charge de maintenance en interne n'excède pas la capacité de service de maintenance par mois  $m$ . La contrainte (5.25) donne la charge de maintenance en

interne par mois. Les contraintes (5.26) et (5.27) définissent la fonction de taux de défaillances de l'équipement  $i$  au début du mois  $m$ . Notons que la contrainte (5.26) est basée sur l'hypothèse du taux de défaillance proportionnel au temps défini précédemment. La Contrainte (5.28) définit le domaine des limites  $T_1$  et  $T_2$ . La Contrainte (5.29) assure la positivité des variables. Finalement, la contrainte (5.30) assure que les variables utilisées sont binaires.

### 5.2.7. Linéarisation du modèle mathématique

Les contraintes (5.20), (5.25) et (5.23) sont non linéaires.

- Linéarisation de la contrainte (5.20) :

Evolution du taux des défaillances :

Si on n'a pas de maintenance préventive au mois  $m$ , alors  $l_{i,2,m} = l_{i,3,m} = 0$ .

$$\lambda_i(t) = \lambda_i(\eta_m) e^{b(t-\eta_m)} ; \quad \forall i = 1, \dots, n; \forall m = 1, \dots, 12 \quad (5.31)$$

Sinon si on a de la maintenance préventive conditionnelle au mois  $m$ , alors  $l_{i,2,m} = 1$ , et  $l_{i,3,m} = 0$ .

$$\lambda_i(t) = r_{cbi} e^{b(t-\eta_m)} \quad \forall i = 1, \dots, n; \forall m = 1, \dots, 12 \quad (5.32)$$

Sinon si on a de la maintenance préventive systématique au mois  $m$ ,  $l_{i,3,m} = 1$  et  $l_{i,2,m} = 0$ .

$$\lambda_i(t) = r_{oi} e^{b(t-\eta_m)} \quad \forall i = 1, \dots, n; \forall m = 1, \dots, 12 \quad (5.33)$$

Alors on a :

$$\lambda_i(t) = [\lambda_i(\eta_m) (1 - (l_{i,2,m} + l_{i,3,m})) + r_{cbi} l_{i,2,m} + r_{oi} l_{i,3,m}] e^{b(t-\eta_m)} \\ \forall i = 1, \dots, n; \forall m = 1, \dots, 12 \quad (5.34)$$

$$\lambda_i(t) = [\lambda_i(\eta_m) (1 - l_{i,2,m} - l_{i,3,m}) + r_{cbi} l_{i,2,m} + r_{oi} l_{i,3,m}] e^{b(t-\eta_m)} \\ \forall i = 1, \dots, n; \forall m = 1, \dots, 12 \quad (5.35)$$

Pour la linéarisation de cette contrainte, on suppose la variable  $h_{i,m}$  tel que :

$$h_{i,m} = \lambda_i(\eta_m) (1 - l_{i,2,m} - l_{i,3,m}) \quad \forall i = 1, \dots, n; \forall m = 1, \dots, 12 \quad (5.36)$$

Cette variable satisfait les contraintes suivantes :

$$\lambda_i(\eta_m) - (l_{i,3,m} \lambda_{maxi} + l_{i,2,m} \lambda_{cbi}) \leq h_{i,m} \leq \lambda_i(\eta_m) \\ \forall i = 1, \dots, n; \forall m = 1, \dots, 12 \quad (5.37)$$

$$0 \leq h_{i,m} \leq \lambda_{maxi}(1 - l_{i,2,m} - l_{i,3,m}) + \lambda_{cbi}(1 - l_{i,2,m} - l_{i,3,m})$$

$$\forall i = 1, \dots, n; \forall m = 1, \dots, 12 \quad (5.38)$$

Ainsi,

$$\lambda_i(t) = [h_{i,m} + r_{oi} l_{i,3,m} + r_{cbi} l_{i,2,m}] e^{b_i(t-\eta_m)}$$

$$\forall i = 1, \dots, n; \forall m=1, \dots, 12 ; t \in [\eta_m, \beta_m] \quad (5.39)$$

On introduit ensuite la fonction  $f_i = \int_{\eta_m}^{\beta_m} e^{b_i(t-\eta_m)} dt = \frac{(e^{b_i(\beta_m-\eta_m)}-1)}{b_i}$ . Avec,  $\beta_m - \eta_m$  est une constante indépendante de  $i$  et  $m$ . D'où on a :

$$NC_{i,s} = \sum_{m=1}^{12} f_i (h_{i,m} + r_{oi} l_{i,3,m} + r_{cbi} l_{i,2,m}) \quad \forall i = 1, \dots, n; \forall s = 1, \dots, 3 \quad (5.40)$$

On remplace alors la contrainte (5.20) est par les contraintes (5.37), (5.38), (5.39) et (5.40) pour sa linéarisation.

- Linéarisation de la contrainte (5.25) :

Pour la linéarisation de cette contrainte, on a remplacé la fonction  $\lambda_i(t)$  par sa forme linéarisée depuis la contrainte (5.38). La contrainte (5.41) est proposée pour linéariser la contrainte (5.25).

$$W_{i,m} = TIP_{i,m}(l_{i,3,m} + l_{i,2,m}) + TIC_{i,m} f_i (h_{i,m} + r_{oi} l_{i,3,m} + r_{cbi} l_{i,2,m})$$

$$\forall i = 1, \dots, n; \forall m = 1, \dots, 12 \quad (5.41)$$

- Linéarisation de la contrainte (5.26) :

Pour la linéarisation de cette contrainte, on a introduit une variable auxiliaire  $k_{i,m}$  avec

$$k_{i,m} = \lambda_i(\eta_{m-1}) (1 - l_{i,2,m} - l_{i,3,m}) \quad (5.42)$$

Cette variable satisfait les contraintes suivantes :

$$\lambda_i(\eta_{m-1}) - (l_{i,3,m} \lambda_{maxi} + l_{i,2,m} \lambda_{cbi}) \leq k_{i,m} \leq \lambda_i(\eta_{m-1})$$

$$\forall i = 1, \dots, n; \forall m = 1, \dots, 12 \quad (5.43)$$

$$0 \leq k_{i,m} \leq \lambda_{maxi}(1 - l_{i,2,m} - l_{i,3,m}) + \lambda_{cbi}(1 - l_{i,2,m} - l_{i,3,m})$$

$$\forall i = 1, \dots, n; \forall m = 1, \dots, 12 \quad (5.44)$$

Alors on obtient :

$$\lambda_i(\eta_m) = r_{oi} \cdot l_{i,3,m} + r_{cbi} \cdot l_{i,2,m} + k_{i,m} e^{b_i(\beta_m-\eta_m)} \quad \forall i = 1, \dots, n; \forall m = 1, \dots, 12 \quad (5.45)$$

Finalement, la contrainte (5.26) est remplacée par l'ensemble des contraintes (5.43), (5.44) et (5.45).

$h_{i,m}$  et  $k_{i,m}$  sont des variables auxiliaires utilisées pour la linéarisation du modèle mathématique proposé. On note que l'ensemble des nouvelles contraintes sont bien équivalentes aux contraintes (5.20), (5.25) et (5.27).

### 5.2.8. Les résultats numériques

Afin d'évaluer le comportement de notre modèle proposé dans le cas réel, nous présentons les résultats numériques obtenus. Le modèle MILP global est résolu avec "CPLEX 15.2" en utilisant un ordinateur avec un processeur ayant les caractéristiques suivantes : Intel (R) Pentium (R) CPU 2020m 2.60 GHz. Nous considérons les données d'entrée réelles des équipements médicaux du CHU Habib Bourguiba de Sfax - Tunisie. Nous avons testé notre modèle avec des différentes instances, variant entre 10 et 2000 équipements. Le tableau 5.4 montre les temps de calcul en secondes pour ces instances.

**Tableau 5.4** Les résultats du temps de calcul

N° de l'instance	Nombre des équipements médicaux	Temps de calcul (secondes)
1	10	1.83
2	20	3.13
3	50	4.61
4	100	11.21
5	200	23.48
6	500	61.95
7	1000	74.04
8	2000	171.58

Ces résultats montrent une efficacité de calcul, même pour un problème de grande taille. Dans le tableau 5.5, nous montrons les résultats des stratégies de maintenance sélectionnées pour 100 dispositifs médicaux critiques, avec des seuils de criticité  $T_1 = 1,19$  et  $T_2 = 1,21$ .

**Tableau 5.5** Les résultats numériques du modèle MILP pour 100 équipements (sélection des stratégies de maintenance)

	Maintenance corrective	Maintenance conditionnelle	Maintenance systématique
Équipement 1	<b>1</b>	0	0
	...	...	...
Équipement 11	<b>1</b>	0	0
Équipement 12	0	<b>1</b>	0
	...	...	...
Équipement 14	0	<b>1</b>	0
Équipement 15	0	0	<b>1</b>
.	...	...	...
Équipement 100	0	0	<b>1</b>

Nous avons également testé la même instance (100 équipements médicaux) en réduisant le budget disponible de 5%. Le tableau 5.6 montre que, lorsque le budget de maintenance est réduit (5%), nous avons plus d'équipements médicaux avec la maintenance corrective et moins avec la maintenance préventive avec la criticité des seuils  $T_1 = 1.3$  et  $T_2 = 1.51$ . Les résultats numériques montrent que les dispositifs médicaux avec une maintenance corrective deviennent maintenus préventivement en augmentant le budget disponible. Pour les décisions d'internalisation / externalisation, le tableau 5.6 présente une comparaison du nombre de contrats et du nombre d'équipements maintenus en interne lorsque le budget est réduit de 5%. En fait, en réduisant le budget disponible, le nombre d'équipements maintenus en interne est réduit et en général moins de contrats sont exécutés. En plus, notre modèle permet d'identifier le mois correspondant à effectuer la maintenance préventive à l'équipement  $i$  en fonction de  $l_{i,s,m}$ .

**Tableau 5.6** Résultats comparatives du MILP pour 100 équipements médicaux (sélection du mode de maintenance) : internalisation/externalisation et type du contrat

	En interne (j=1)	Sans Contrat (j=2)	Contrat C (j=3)	Contrat B (j=4)	Contrat A (j=5)	Contrat A* (j=6)
Avec le budget disponible	1	2	9	6	10	72
Avec une réduction de 5% du budget disponible	3	2	12	13	3	67

### 5.3. Conclusion

Nous avons développé un premier modèle mathématique pour attribuer la stratégie de maintenance adéquate à chaque équipement médical tout en respectant le budget disponible. Les résultats du modèle proposé sont validés avec une base des données réelles collectée du CHU Habib Bourguiba de Sfax. Notre modèle proposé est original, il produit une hiérarchisation efficace des équipements médicaux et non pas un simple classement. En outre, il permet aux responsables de la maintenance biomédicale de choisir la meilleure stratégie de maintenance pour chaque équipement médical selon leurs scores de criticité. Ce modèle peut être intégré au module de maintenance biomédical. Il permet de garantir une haute disponibilité des équipements médicaux de l'hôpital et principalement ceux qui ont une criticité élevée. De plus, il est nécessaire à tout autre hôpital d'adapter les paramètres selon les données de maintenance.

## Conclusions et perspectives

Dans le domaine industriel, il existe plusieurs modèles d'optimisation de l'activité de maintenance. Dans le domaine hospitalier, la modélisation mathématique est relativement nouvelle. La plupart des travaux de recherche proposent des méthodes d'évaluation ou d'amélioration de la fiabilité des équipements. Les hôpitaux souffrent de l'indisponibilité des équipements médicaux en raison d'une mauvaise gestion de l'activité de maintenance. Généralement, l'utilisateur ne détecte pas la détérioration de l'équipement jusqu'à ce que la défaillance devienne dangereuse pour les patients. En conséquence, la réparation génère des coûts de maintenance élevés.

Dans cette thèse, nous avons proposé une procédure qui permet aux responsables de maintenance dans l'hôpital de choisir la stratégie de maintenance adaptée, d'externaliser ou internaliser des niveaux de maintenance et de choisir le type de contrat appropriée par équipement. Ensuite, nous avons présenté une combinaison de deux méthodes d'aide à la décision multicritère : AHP et TOPSIS. La méthode AHP est utilisée pour la priorisation des équipements médicaux selon leur criticité. Pour l'évaluation de la criticité des équipements, nous avons considéré sept critères : le degré de la complexité de maintenance, la fonction, le risque, le degré d'importance de la mission, l'âge, les erreurs des utilisateurs et la classe de l'équipement. Une comparaison par paires des critères a été réalisée et le ratio de consistance a été calculé pour produire des poids de critères précis et cohérents. Ensuite, une classification des trois stratégies de maintenance utilisées dans les hôpitaux : maintenance préventive systématique, maintenance préventive conditionnelle et maintenance corrective est réalisée par la technique TOPSIS. Afin de prendre en compte les incertitudes dans les jugements des experts, nous avons intégré l'ensemble des nombres flous dans l'expression des avis. Le modèle proposé inclut les critères les plus importants pour évaluer la criticité des équipements médicaux. L'étude est générique et peut être appliquée à n'importe quel hôpital. Pour la validation de notre étude, nous avons travaillé avec le service de maintenance du CHU Habib Bourguiba de Sfax, Tunisie. Nous nous sommes basés sur des données historiques et nous avons validé les résultats par les experts du service maintenance du CHU Habib Bourguiba de Sfax

Afin de permettre aux experts de choisir la meilleure stratégie de maintenance pour chaque équipement, nous avons développé un modèle mathématique (MILP) « Mixed Integer Linear

Programming » permettant de définir les limites de criticité entre les stratégies de maintenance en respectant le budget disponible alloué au service maintenance.

Le service maintenance dispose de ressources limitées pour maintenir le bon fonctionnement des équipements médicaux. Par conséquent, la sélection des équipements qui peuvent être maintenus en interne ou traités en externe et le choix du contrat à utiliser sont considérés comme des décisions tactiques. Un deuxième modèle mathématique (MILP) a été développé permettant la résolution de ce problème. L'objectif est de minimiser les coûts annuels de la maintenance en garantissant la disponibilité des équipements médicaux critiques. Les résultats ont montré l'efficacité du modèle mathématique développé.

En termes de perspectives, les modèles mathématiques proposés dans ce travail de recherche peuvent être enrichis par l'incorporation d'hypothèses plus réalistes en prenant en compte le coût variable pour chaque maintenance, le coût des différents composants à remplacer par équipement, le coût du temps d'arrêt, la disponibilité des outillages spécifiques de contrôle de performances désignés par ECME, etc. Une autre extension peut être considérée telle que le recours à des heures supplémentaires et des intérimaires. Pour le choix du contrat, nous avons considéré un seul prestataire possible par équipement. Dans la réalité, il existe plusieurs sous-traitants, et le choix du prestataire adéquat selon le budget disponible et selon un ensemble des paramètres (durée de la maintenance, coût de la maintenance, le risque, le taux de défaillance, la disponibilité, etc.) pourrait faire l'objet d'une bonne extension. Pour finir, de nouveaux types de contrats, comme le contrat de partenariat entre hôpital et prestataire, peuvent être développés et pris en compte dans le modèle.



## Références bibliographiques

### A

---

- Al Harbi, K.M. (2001). Application of AHP in project management. *International Journal of Project Management* 19(4): 19–27.
- AFNOR 13306 NF, EN. Maintenance terminology. AFNOR, 2001
- Almeida, A.T. and Bohoris, G.A. (1995), “Decision theory in maintenance decision making”, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 1 No. 1, pp. 39-45.
- Asgharizadeh, E., & Murthy, D. (2000). Service contracts: A stochastic model. *Mathematical and Computer Modelling*, 31, 11–20.
- Association for the Advancement of Medical Instrumentation (AAMI, 1985) ‘Guidelines for the Establishing and Administering Medical Instrumentation Maintenance Programs’. USA.

### B

---

- Baglin, G., Bruel, O., Garreau, A., Greif, M., Kerbache, L. and van Delft, C. (2005). Management industriel et logistique. Economica,.
- Ben Houria Z., Besbes M., El Aoud B., Masmoudi M., Masmoudi F. (2015). Maintenance strategy selection for medical equipments using fuzzy multiple criteria decision making approach, *45th International Conference on Computers & Industrial Engineering (CIE45)*, 10/2015, Metz, France.
- Ben Houria Z., Masmoudi M., Al Hanbali A., Khatrouch I. and Masmoudi F. Quantitative techniques for medical equipment maintenance management, *European Journal of Industrial Engineering (EJIE)*.
- Bevilacqua, M. and Braglia, M. (2000), “The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection”, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 70 No. 1, pp. 71-83.
- Brans J.P., Vincke Ph. (1985). A Preference Ranking Organization Method. *Management Science*, Vol. 31, issue. 6. pp.647-656.
- Brauers, W. K. M.; Zavadskas, E. K. 2012. A multi-objective decision support system for project selection with an application for the Tunisian textile industry, *E & M Economie a Management* Vol.15, Issue 1, pp. 28–43.

Blumberg D.F. (2004). New strategic directions in acquiring and outsourcing high-tech services by hospitals and implications for clinical engineering organizations and ISO. In: Dyro JF. *Clinical engineering handbook*. San Diego (United States): Elsevier Academic Press; 2004. 137–146.

## C

---

Castanier, B. (2001) Modélisation stochastique et optimisation de la maintenance conditionnelle des systèmes à dégradation graduelle. PhD thesis, Université de Technologies de Troyes, 2001.

Choi J.G. and Seong P.H. (2008). Reliability of Electronic Components. Reliability and Risk Issues in Large Scale Safety-critical Digital Control Systems, Ch. 1, Seong P.H. (ed.). Springer: New York.

Coulibaly, S., Kouam P. et Page M. (2001) Organisation de la maintenance préventive en milieu hospitalier. ITBM-RBM 2001, Vol 22, pp.125-133

Cox, David R (1972). Regression Models and Life-Tables. *Journal of the Royal Statistical Society*, Series B 34 (2): 187–220.

Cruz, A. and Denis, E. (2006). A neural-network-based model for the removal of biomedical equipment from a hospital inventory. *Journal of Clinical Engineering*, 31(3), 140–144.

Cruz, A. and Rincon, A. (2012). Medical device maintenance outsourcing: Have operation management research and management theories forgotten the medical engineering community? a mapping review. *European Journal of Operational Research*, 221 (1), 186-197.

Cruz, A. M. ,Usaquen Perilla, S. P., and Vanegas Pabon, N. N. (2010); Clustering Techniques : Measuring the Performance of Contract Service Providers, *IEEE Engineering in medicine and biology magazine*, pp. 119-126

Cruz, A., Aguilera-Huertas, W., & Días-Mora, D. (2010). A comparative study of maintenance services using the data-mining technique. *Revista Panamericana de Salud Pública* (Bogota), 11(4), 653–661.

Cruz, A., Haugan, G. and Rincon, A. (2014). The effects of asset specificity on maintenance financial performance: an empirical application of transaction cost theory to the medical device maintenance field. *European Journal of Operational Research*, 237 (3), 1037-1053.

Cruz, A.M., Denis, E.R., (2005). A fuzzy inference system to evaluate contract service provider performance. *Biomedical Instrumentation & Technology* 39 (4), 320– 325.

## D

---

De Melo Brito ,A.J., Almeida A. (2010). Multi-criteria decision model for selecting repair contracts by applying utility theory and variable interdependent parameters ,*Journal of Management Mathematics*. Vol. 21, pp. 349-361.

De Vivo<sup>1</sup>, L., Derrico<sup>1</sup>, P., Tomaiuolo<sup>1</sup>, D., Capussotto<sup>1</sup>, C. and Reali, A. (2004). Evaluating alternative service contracts for medical equipment', *Proceedings of the 26th Annual International Conference of the IEEE EMBS, San Francisco, CA, USA*

Dekker,R., Kleijn, M.J. and De Rooij P J (1998). A spare parts stocking policy based on equipment criticality. *International Journal of Production Economics* 56-57: 69-77.

Deng, H. 1999. Multicriteria analysis with fuzzy pairwise comparison, *International Journal of Approximate Reasoning*, 21, pp. 215-231.

Dhillon, B. (2009). *Life cycle costing for engineers*. CRC Press

## E

---

Ebeling, C. (2004). *An introduction to reliability and maintainability engineering*. Tata McGraw-Hill Education, 2004.

Ertugrul, I. and Karakasoglu, N. (2007). “Comparison of fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods for facility location selection”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 783-95.

Emergency Care Research Institute (Ecri, 1995) “*Inspection and preventive Maintenance System*”, 3<sup>rd</sup> edition.

## F

---

Fennigkoh L. and Smith B. (1989). *Clinical equipment management*, Jcaho Ptsm Ser Vol. 2, pp. 5-14

Fong S W and Choi S K Y (2000). Final contractor selection using the analytical hierarchy process. *Construction Management and Economics* 18(5): 547–557.

Food and Drug Administration, *Protecting and promoting your Health*, <http://www.fda.gov>.

## G

---

- Georgin, D., Natan, J., Szymczak, H., and Farges, G. (2005) Management de l'externalisation de la maintenance biomédicale, *ITBM-RBM News*, 26 (6), December 2005, 7-11
- Gits, C.W. (1992). Design of maintenance concepts', *International journal of production economics*, Vol. 24, pp. 217-226.

## H

---

- Ho, W. (2008). Integrated analytic hierarchy process and its applications - a literature review. *European Journal of Operational Research* 186(1): 211–228.
- Hsieh, T. Y., Lu, S.T., Tzeng, G.H. 2004. Fuzzy MCDM approach for planning and design tenders selection in public office buildings, *International journal of Project Management*, 22, pp. 573-584.
- Hummel J., (2001). "Supporting medical technology development with the analytic hierarchy process", *Wageningen: Grafischbedrijf Ponsen & Looijenbv*. p.199.
- Hwang, C.L. and Yoon, K. (1981), *Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications*, Springer, New York, NY.

## I

---

- Ilangkumaran M. and Kumanan S. (2009). "Selection of maintenance policy for textile industry using hybrid multi-criteria decision making approach", *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 20 N°7, pp.1009-1022.
- Ivlev I., Kneppo P. and Bartak M. (2014). 'Multicriteria decision analysis: a multifaceted approach to medical equipment management', *Technological and Economic Development of Economy*, Volume 20, Issue 3.

## J

---

- J. Tixier, G. Dusserre, O. Salvi, D. Gaston, (2002). Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants, *J. Loss Prevent. Process Ind.* N°15; pp. 291–303.
- Jamshidi A, Abbasgholizadeh Rahimi S., Ait-kadi D., Ruiz A., (2015) A comprehensive fuzzy risk-based maintenance framework for prioritization of medical devices, *Applied Soft Computing* 32 pp. 322-334.

- Jamshidi A., Abbasgholizadeh R.S., Ait-kadi D. and Ruiz A. (2012), “A risk-based Maintenance Strategy using Fuzzy HFMEA for prioritization of Critical Medical Equipment”, Proceedings of the 1<sup>st</sup> Annual World Conference of the Society for Industrial and Systems Engineering, Washington, USA.
- Jamshidi A., Abbasgholizadeh Rahimi S., Ait-kadi D. and Ruiz A. (2014), “Medical devices Inspection and Maintenance; a Literature Review”, Proceeding of the 2014 Industrial and Systems Engineering Research Conference.
- John Endrenyi and George J. Anders (2006), « Aging Maintenance and Reliability », IEEE power & energy magazine, May, 59-67.
- Jlassi J., (2011), Amélioration de la performance par la modélisation des flux logistiques des patients dans un service d’urgence hospitalier, méthodes Quantitatives Productique et Génie Industriel, thèse de doctorat, Université de Paris 8 et l’Université de Sfax.

## K

---

- Kabir, G.and Dr. Ahsan Akhtar Hasis, M. (2011). Comparative analysis of AHP and fuzzy AHP models for multicriteria inventory classification, *International Journal of Fuzzy Logic Systems(IJFLS)*, 1(1), pp 1-16
- Keeney R., Raifa H. (1976). Decision with Multiobjectives, Preferences and Value Trade-Offs. Wiley, New York, 1976.
- Keil, O.R. (2008). Unnecessary Preventative Maintenance: Its Effect on Opportunity Costs. *Journal of Clinical Engineering* 33(1): 8.
- Khalaf A.B., Hamam Y., Djouani K. (2012) ‘Mathematical Maintenance Model for Medical Equipment’ , University of Versailles Saint –Quentin-en- Yvelines.
- Khalaf, A.B. (2004), “Maintenance model for minimizing risk and optimizing cost-effectiveness of medical equipment in Palestine”, *Journal of Clinical Engineering*, Vol 14, pp. 3649-3653.
- Khalaf,A.B., Djouani K., Hamam Y., and Alayli Y. (2010). “Evidence-based mathematical maintenance model for medical equipment”. in *Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA)*
- Khalaf,A.B., Djouani K., Hamam Y., and Alayli Y. (2014). “Maintenance Strategies and Failure-Cost Model for Medical Equipment” *Quality and Reliability Engineering International*, Vol 31, issue 6, pp. 935-947.

Khan, F.I., Haddara, M. (2003). Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning, *Journal Loss Prevent. Process Ind.* 16 561–573

## L

---

Labib,A.W, Williams,G.B and O’Conner,R.F. (1998). An intelligent maintenance model (system): An application of analytic hierarchy process and a fuzzy logic rule-based controller. *Journal of the Operational Research Society* 49: 745–757.

Letaief, F., Kammoun, A. Khayat, S., Allita S., Mejri, R. Hassine, M., Mekni, M., Lazreg, R., Dhahri, H. (2007). *Manuel des Procédures de Gestion de la Maintenance Biomédicale et Hospitalière*, Tome III.

## M

---

Mahdi,I.M, Riley,M.J, Fereig S.M and Alex A.P. (2002). A multi-criteria approach to contractor selection. *Engineering, Construction and Architectural Management* 9(1): 29–37.

Masmoudi, M., Ben Houria, Z. Al Hanbali, A. and Masmoudi, F. (2016). Decision support procedure for Medical Equipment Maintenance Management, *Journal of Clinical Engineering*. January/March 2016 - Volume 41 - Issue 1, 19–29

Masmoudi, M., Ben Houria, Z. and Masmoudi, F. (2014). Multicriteria decision making for medical equipment maintenance: Insourcing, outsourcing and service contract. *IEEE, 2<sup>nd</sup> International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CODIT’14)*, 269-275.

Miguel, C., Barr, C. and Pozo Puñales, E. (2007). Improving corrective maintenance efficiency in clinical engineering departments. *IEEE Engineering in Medicine and Biology*, 26(3), 60–65.

Miguel, C., Denis, E. and Sanchez, V. (2002). Management of service contracts using an independent service provider (ISP) as support technology. *Journal of Clinical Engineering*, 27, 202–209.

Mkalaf, K. , Gibson, P. and Flanagan, J. (2013) A Study of Current Maintenance Strategies and the Reliability of Critical Medical Equipment in Hospitals in Relation to Patient Outcomes,

World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index 82, International Journal of Social, Human Science and Engineering, (2013) Vol 7, No. 10, pp. 15 – 22

Modarres,M. (2006). Risk analysis in engineering: techniques, tools, and trends. CRC Press: Boca Raton, FL.

Mortin D.E., Krolewski J.G. and Cushing M.J. (1995). Consideration of Component Failure Mechanisms in the Reliability Assessment of Electronic Equipment- Addressing the Constant Failure Rate Assumption. Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 54-59.

Moubray,J. (1997). *Reliability-centered Maintenance II*. 2nd ed. Industrial Press: New York, NY.

Murthy, D. N. and Yeung, V. (1996). Modeling and analysis of maintenance service contracts. *Mathematical and Computer Modelling*, 22, 219–225.

Murthy, D.N. and Jack, N., (2008). Maintenance outsourcing. *Complex system maintenance handbook*, 373–393. Springer Series in Reliability Engineering, Part E.

## N

---

N.S. Arunraj and J. Maiti (2007). “Risk-based maintenance Techniques and applications”, *Journal of Hazardous Materials*, 142 pp 653–66.

Norme NF-X60-010. (1994). Concepts et définitions des activités de maintenance.

## P

---

Panayiotou, N.A., Ponis, S.T. and Gayialis, S.P. (2009), “Designing an industrial maintenance system: a proposed methodological framework”, *Int. J. Information Technology and Management*, Vol. 8, No. 4, pp.361–381.

Partovi F Y, Burton J, and Banerjee A (1989). Application of Analytic Hierarchy Process in Operations Management. *International Journal of Operations & Production Management* Vol. 10, No. 3: pp.5-19.

## R

---

Rahman, A., Chattopadhyay, G. (2007). Optimal service contract policies for outsourcing maintenance service of assets to the service providers. *International Journal of Reliability and Applications*, Vol. 8, No.2, pp. 183–197.

Ramadhan, R.H., Al-Abdul Wahhab, H.I. and Duffuaa, O.S. (1999), “The use of an analytical hierarchy process in pavement maintenance priority ranking”, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 5 No. 1, pp. 25-39.

Roy B. (1968). *Classement et Choix en Présence de Points de Vue Multiples (la Méthode Electre)* . *Revue française d'informatique et de recherche opérationnelle*. Vol 2, N° 8, p57-75.

Roy B. (1985). *Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision*. Economica, Paris, 1985.

Rzevsky G. (1995), *Mechatronics: Designing Intelligent Machines* Butterworth-Heinemann, England.

## S

---

Saaty, T.L. (1980), “The Analytic Hierarchy Process”, McGraw-Hill, New York, NY.

Saaty, T.L. (1994). *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the AHP*, RWS Publications, Pittsburgh, PA, USA, 1994.

Saaty, T.L. (2008). Decision making with the analytical hierarchy process, *Int J Serv Sci* 1(1): 83-98.

Shyjith K., Ilangkumaran M. and Kumanan S. (2008), “Multi-criteria decision-making approach to evaluate optimum maintenance strategy in textile industry” , *Journal of Quality in Maintenance Engineering* Vol. 14 No. 4, 2008, pp 375-386.

Simpson, G.W and Cochran J.K. (1987). An Analytic Approach to Prioritizing Construction Projects. *Civil Engineering and Environmental Systems* 4(4): 185-190.

## T

---

Taghipour S., Banjevic, D. and Jardine A .K. S. (2011), “Prioritization of Medical Equipment for Maintenance Decisions”, *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 62, No. 9, pp. 1666-1687.

Tarawneh, W. and El-Sharo, S. (2009). Assessment Of Medical Equipment In Respect To Their Down Time. *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering*, September 7 - 12, 2009, Munich, Germany, Volume 25/7 of the series IFMBE Proceedings pp 267-270

Tawfik B., Ouda B.K. and Abd El Samad Y.M. 2013. A Fuzzy Logic Model for Medical Equipment Risk Classification, *Journal of Clinical Engineering*, 38 (4), pp 185-190



Triantaphyllou E (2000). Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study. Kluwer Academic Publishers: Netherland.

## U

---

United States Department of Defense (1995). US Mil-Hdbk-217. Reliability Prediction of Electronic Equipment, version F.

## V

---

Vaidya O S and Kumar S (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications. European Journal of Operational Research 169(1): 1–29.

Vellani, K.H. (2006). Strategic Security Management: A Risk Assessment Guide for Decision Makers. Butterworth-Heinemann: England.

## W

---

Walraeve, B. Vigneau, P. (2005). Guide pratique, Maintenance des dispositifs médicaux, obligations et recommandations, Direction régionale des affaires sanitaires et sociales de Midi-Pyrénées

Wang, B. and Levenson A. (2000), Equipment inclusion criteria - a new interpretation of JCAHO's medical equipment management standard, Journal of Clinical Engineering, Vol. 25, N°1, pp. 26-35

Wang, B. (2006). Fennigkoh and Smith Model for Inclusion Criteria: 15-Year Retrospective Interview with Larry Fennigkoh. Journal of Clinical Engineering, January/March 2006, pp. 26-30

Wang, L., Chu, J., Wu, J. (2007). Selection of optimum maintenance strategies based on a fuzzy analytic hierarchy process, Int.J.Production Economics 107, pp 151-163.

World Health Organisation (WHO, 2011). *Medical equipment maintenance program overview.*

## **Annexes**

**Annexe 1** : Listing des équipements (exemple service Anesthésie Réanimation)

**Annexe 2** : Extrait des activités d'interventions par période

**Annexe 3** : Extrait du nombre d'intervention et coût de tout type d'intervention pour les différentes stratégies de maintenance

**Annexe 4** : Méthode Pareto appliquée aux services selon critère : nombre d'interventions Corrective causés par l'absence de maintenance préventive.

**Annexe 5** : Méthode Pareto appliquée aux services selon critère : nombre d'interventions corrective causés par l'absence de panne.

**Annexe 6** : Méthode Pareto appliquée aux services selon critère : nombre d'interventions corrective causés par la panne normale.

**Annexe 7** : Méthode Pareto appliquée aux services selon critère : nombre d'interventions corrective causés par l'erreur de manipulation.

**Annexe 8** : Méthode Pareto appliquée aux services selon critère : nombre d'interventions corrective causés par l'usure prématurée.

## Annexe 1 : Listing des équipements (exemple service Anesthésie Réanimation)

Service	N° Inv.	Équipement	Marque	Modèle	N° Série	Mise en service
ANESTHESIE REANIMATION	3200205S09	EVAPORATEUR D"ANESTHESIE	PENLON	SIGMA DELTA 8% SEVO	D0910-0997	17/09/2011
ANESTHESIE REANIMATION	3200205S10	EVAPORATEUR D"ANESTHESIE	PENLON	SIGMA DELTA 5 % ISO	D1110-0393	17/09/2011
ANESTHESIE REANIMATION	3200205S11	EVAPORATEUR D"ANESTHESIE	PENLON	SIGMA DELTA 5% ISO	D1110-0404	17/09/2011
ANESTHESIE REANIMATION	3200205S07	EVAPORATEUR D"ANESTHESIE	PENLON	ISOFLURANE	11100402	15/04/2011
ANESTHESIE REANIMATION	3200205S08	EVAPORATEUR D"ANESTHESIE	PENLON	SIVOFLOLANE	D09101021	15/04/2011
ANESTHESIE REANIMATION	3240105S60	POUSSE SERINGUES	LONGFIAN SCITECH	JAZ-F6	8,0051E+15	22/12/2010
ANESTHESIE REANIMATION	0948201/01	DESINFECTION TERMINALE (EP)	MCR	FOA	F82	09/06/1994
ANESTHESIE REANIMATION	0532405/06	POMPE A NUTRITION	VIAL MEDICAL	ALASKA	14311394	26/03/1992
ANESTHESIE REANIMATION	0532402/01	POMPE A PERFUSION	VIAL MEDICAL	P3000B	15061043	16/06/1994
ANESTHESIE REANIMATION	0532402/02	POMPE A PERFUSION	VIAL MEDICAL	P3000B	15061042	16/06/1994
ANESTHESIE REANIMATION	0532402/03	POMPE A PERFUSION	VIAL MEDICAL	P3000B	15061048	16/06/1994
ANESTHESIE REANIMATION	0532402/04	POMPE A PERFUSION	VIAL MEDICAL	P3000B	15061046	15/06/1994
ANESTHESIE REANIMATION	0532402/05	POMPE A PERFUSION	VIAL MEDICAL	P3000B	15061045	15/06/1994
ANESTHESIE REANIMATION	0532402/06	POMPE A PERFUSION	VIAL MEDICAL	P3000B	15061044	16/06/1994
ANESTHESIE REANIMATION	0532401/13	POUSSE SERINGUES	VIAL MEDICAL	SE400B	15091875	06/06/1994
ANESTHESIE REANIMATION	0532405/02	POMPE A NUTRITION	PETERS	NPR3000	3907	06/06/1994
ANESTHESIE REANIMATION	0532405/03	POMPE A NUTRITION	PETERS	NPR3000	3908	06/06/1994
ANESTHESIE REANIMATION	0532405/04	POMPE A NUTRITION	PETERS	NPR3000	3914	06/06/1994
ANESTHESIE REANIMATION	0532405/08	POMPE A NUTRITION	PETERS	NPR 3000	3839	06/06/1994
ANESTHESIE REANIMATION	0844502/03	AEROSOL THERAPIE (EP)	PETERS	NEB 400	452	06/06/1994
ANESTHESIE REANIMATION	0844502/04	AEROSOL THERAPIE (EP)	PETERS	NEB 400	453	06/06/1994
ANESTHESIE REANIMATION	532205040	MELANGEUR DE GAZ	SIEMENS	6006709E.375.E	1294	23/07/1994
ANESTHESIE REANIMATION	0532201/29	VENTILATEUR PULMONAIRE	SIEMENS	SERVO 900C	178632	18/05/1996
ANESTHESIE REANIMATION	0532201/15	VENTILATEUR PULMONAIRE	SIEMENS	SERVO 900 D	174878	28/04/1994
ANESTHESIE REANIMATION	0532201/51	VENTILATEUR PULMONAIRE	SIEMENS	710	3480	15/05/1999
ANESTHESIE REANIMATION	0532002/17	EVAPORATEUR D"ANESTHESIE	SIEMENS	HV950	7167	18/05/1996
ANESTHESIE REANIMATION	0532002/02	EVAPORATEUR D"ANESTHESIE	SIEMENS	E-342-E-HV950	6840	05/01/1995
ANESTHESIE REANIMATION	0315908/01	MONITEUR DE SAO2	SIEMENS	MICR O2	7235	23/07/1994
ANESTHESIE REANIMATION	0315908/11	MONITEUR DE SAO2	SIEMENS	MICRO2	7235	23/07/1994
ANESTHESIE REANIMATION	0500202C03	RADIOGRAPHIE MOBILE	SIEMENS	POLYMOBIL PLUS	12168	23/10/2004
ANESTHESIE REANIMATION	0532205/02	MELANGEUR DE GAZ	OHMEDA	QUANTIFLEX	77456	10/07/1990
ANESTHESIE REANIMATION	0532205/03	MELANGEUR DE GAZ	OHMEDA	QUANTIFLEX	77422	10/07/1990
ANESTHESIE REANIMATION	0532205.06	MELANGEUR DE GAZ	OHMEDA	QUANTIFLEX	77423	10/07/1990

ANESTHESIE REANIMATION	0532205/01	MELANGEUR DE GAZ	OHMEDA	QUANTIFLEX	77424	09/07/1991
ANESTHESIE REANIMATION	0532002/03	EVAPORATEUR D"ANESTHESIE	OHMEDA	FLUOTEC 3	BBNT00308	10/07/1990
ANESTHESIE REANIMATION	0532002/05	EVAPORATEUR D"ANESTHESIE	OHMEDA	FLUOTEC 5	BCXX00343	23/07/1994
ANESTHESIE REANIMATION	0532002/04	EVAPORATEUR D"ANESTHESIE	OHMEDA	FLUOTEC 3	BBNT00309	10/07/1990
ANESTHESIE REANIMATION	1590703C01	MONITEUR DE CO2	OHMEDA	M-CAIO	4506626	29/12/2001
ANESTHESIE REANIMATION	0211104/01	MONITEUR IMAGE	SCHILLER	MAGSCREEN	88310456	14/01/2004
ANESTHESIE REANIMATION	0315900/18	MONITEUR DE SURVEILLANCE CARDIO- RESPIRATOIRE	SCHILLER	MAGLIFE-C	84320477	14/01/2004
ANESTHESIE REANIMATION	0500202C05	RADIOGRAPHIE MOBILE	SCHIMADZU	MUX 10	262P83001	23/06/2006

## Annexe 2 : Extrait des activités d'interventions par période

ACTIVITE D'INTERVENTIONS PAR PERIODE 10ans						
Période: du 01/01/2003 au :01/03/2014						
Intervention			Equipement			Coût Total
Date	N°Interv	Type	N° Inv.	Désignation	Service	
01/01/2003	20030012	MAINTENANCE CURATIVE	0636904/03	MOTEUR CHIRURGICAL	BLOC OPERATOIRE MAXILO-FACIAL	315,013
01/01/2003	20030038	MAINTENANCE PREVENTIVE	0844601/01	LITHOTRITEUR EXTRACORPOREL	LITHOTRIPTIE	10692,451
03/01/2003	20030095	MAINTENANCE PREVENTIVE	0424001/04	ANALYSEUR MULTIPARAMETRIQUE DE BIOCHIMIE	BIOCHIMIE	2500
07/01/2003	20050088	MAINTENANCE CURATIVE	0532401/17	POUSSE SERINGUES	URGENCES S A M U	237,3
09/01/2003	20030087	MAINTENANCE PREVENTIVE	0844601/01	LITHOTRITEUR EXTRACORPOREL	LITHOTRIPTIE	0
15/01/2003	20030019	MAINTENANCE CURATIVE	0532201/27	VENTILATEUR PULMONAIRE	ANESTHESIE REANIMATION	147,6
15/01/2003	20030021	MAINTENANCE CURATIVE	0532201/51	VENTILATEUR PULMONAIRE	ANESTHESIE REANIMATION	147,6
15/01/2003	20030020	MAINTENANCE CURATIVE	0532201/42	VENTILATEUR PULMONAIRE	ANESTHESIE REANIMATION	141,6
16/01/2003	20030125	MAINTENANCE CURATIVE	0424102/06	ANALYSEUR D"IONS	URGENCES S A M U	1967,65
20/01/2003	20030088	MAINTENANCE CURATIVE	0844601/01	LITHOTRITEUR EXTRACORPOREL	LITHOTRIPTIE	0
31/01/2003	20050086	MAINTENANCE CURATIVE	0532401/24	POUSSE SERINGUES	REANIMATION MEDICALE	108,5
31/01/2003	20050091	MAINTENANCE CURATIVE	0532401/30	POUSSE SERINGUES	CHIRURGIE CARDIO VASCULAIRE ET THORACIQUE	211,3
01/02/2003	20030001	MAINTENANCE CURATIVE	0424601/07	AUTOMATE POUR NUMERATION ET FORMULE SANGUINE	HEMATOLOGIE	0
02/02/2003	20030002	MAINTENANCE CURATIVE	0424601/07	AUTOMATE POUR NUMERATION ET FORMULE SANGUINE	HEMATOLOGIE	0
03/02/2003	20030003	MAINTENANCE CURATIVE	0424601/07	AUTOMATE POUR NUMERATION ET FORMULE SANGUINE	HEMATOLOGIE	0
04/02/2003	20030004	MAINTENANCE CURATIVE	0424601/07	AUTOMATE POUR NUMERATION ET FORMULE SANGUINE	HEMATOLOGIE	0
07/02/2003	20030121	MAINTENANCE CURATIVE	0424802/05	COAGULOMETRE	HEMATOLOGIE	350
07/02/2003	20030018	MAINTENANCE CURATIVE	0636904/27	MOTEUR CHIRURGICAL	BLOC OPERATOIRE DE NEURO CHIRURGIE	402,37
08/02/2003	20040030	MAINTENANCE CURATIVE	0424802/05	COAGULOMETRE	HEMATOLOGIE	296,61
10/02/2003	20050094	MAINTENANCE CURATIVE	0424103/03	ANALYSEUR PH-GAZ DU SANG	BIOCHIMIE	810
20/02/2003	20030050	MAINTENANCE CURATIVE	0424103/04	ANALYSEUR PH-GAZ DU SANG	BIOCHIMIE	283,2
20/02/2003	20050082	MAINTENANCE CURATIVE	0532201/52	VENTILATEUR PULMONAIRE	ANESTHESIE REANIMATION	620

22/02/2003	20030131	MAINTENANCE CURATIVE	0315509/01	RETINOGRAPHE	OPHTALMOLOGIE	171,1
24/02/2003	20030006	MAINTENANCE CURATIVE	0424103/03	ANALYSEUR PH-GAZ DU SANG	BIOCHIMIE	2829,077
24/02/2003	20050111	MAINTENANCE CURATIVE	0532401/43	POUSSE SERINGUES	CHIRURGIE CARDIO VASCULAIRE ET THORACIQUE	842,2
26/02/2003	20030086	MAINTENANCE CURATIVE	0844601/01	LITHOTRITEUR EXTRACORPOREL	LITHOTRIPTIE	0
28/02/2003	20030049	MAINTENANCE PREVENTIVE	0844103/01	APPAREIL DE TELEGAMMATHERAPIE	RADIOTHERAPIE	1991,007
06/03/2003	20050098	MAINTENANCE CURATIVE	0424103/05	ANALYSEUR PH-GAZ DU SANG	URGENCES S A M U	1721,11
06/03/2003	20030040	MAINTENANCE PREVENTIVE	0424103/04	ANALYSEUR PH-GAZ DU SANG	BIOCHIMIE	2423,814
13/03/2003	20030055	MAINTENANCE CURATIVE	0424403/04	ANALYSEUR POUR IMMUNOCHIMIE	IMMUNOLOGIE	734,973
14/03/2003	20030051	MAINTENANCE CURATIVE	0636301/14	BISTOURI ELECTRIQUE / COAGULATEUR	BLOC OPERATOIRE C C V T	70,8
14/03/2003	20030122	MAINTENANCE CURATIVE	0636301/14	BISTOURI ELECTRIQUE / COAGULATEUR	BLOC OPERATOIRE C C V T	0
15/03/2003	20030062	MAINTENANCE PREVENTIVE	0844601/01	LITHOTRITEUR EXTRACORPOREL	LITHOTRIPTIE	10692,451
27/03/2003	20030035	MAINTENANCE CURATIVE	0315901/47	MONITEUR DE SURVEILLANCE CARDIO-RESPIRATOIRE	BLOC OPERATOIRE C C V T	2006
27/03/2003	20030061	MAINTENANCE CURATIVE	0636904/03	MOTEUR CHIRURGICAL	BLOC OPERATOIRE MAXILO-FACIAL	323,904
27/03/2003	20030060	MAINTENANCE CURATIVE	0636904/02	MOTEUR CHIRURGICAL	BLOC OPERATOIRE MAXILO-FACIAL	158,403
03/04/2003	20040013	MAINTENANCE CURATIVE	0636904/04	MOTEUR CHIRURGICAL	BLOC OPERATOIRE DE NEURO CHIRURGIE	111,486
04/04/2003	20030057	MAINTENANCE CURATIVE	0636201/04	MICROSCOPE OPERATOIRE	BLOC OPERATOIRE OPHTALMOLOGIE	421,5
05/04/2003	20030056	MAINTENANCE CURATIVE	0532201/31	VENTILATEUR PULMONAIRE	ANESTHESIE REANIMATION	2319
10/04/2003	20030085	MAINTENANCE CURATIVE	0844601/01	LITHOTRITEUR EXTRACORPOREL	LITHOTRIPTIE	0
10/04/2003	20030053	MAINTENANCE CURATIVE	0315908/21	MONITEUR DE SAO2	ANESTHESIE REANIMATION	993,52
15/04/2003	20040022	MAINTENANCE CURATIVE	0315101/17	ELECTROCARDIOGRAPHE	CHIRURGIE ORTHOPEDIQUE	1275
17/04/2003	20030126	MAINTENANCE CURATIVE	0948401/11	STERILISATEUR PAR LA CHALEUR HUMIDE	MICROBIOLOGIE	2950
25/04/2003	20030058	MAINTENANCE CURATIVE	0428004/04	MICROTOME	ANATOMIE PATOLOGIQUE/IMMUNO-HISTO- CYTOLOGIE	731,6
02/05/2003	20030080	MAINTENANCE CURATIVE	0532201/77	VENTILATEUR PULMONAIRE	URGENCES S A M U	489,194
05/05/2003	20030091	MAINTENANCE CURATIVE	0844601/01	LITHOTRITEUR EXTRACORPOREL	LITHOTRIPTIE	10692,451
05/05/2003	20050070	MAINTENANCE PREVENTIVE	0532201/68	VENTILATEUR PULMONAIRE	REANIMATION MEDICALE	543,99
05/05/2003	20030032	MAINTENANCE PREVENTIVE	0532201/66	VENTILATEUR PULMONAIRE	REANIMATION MEDICALE	543,98
05/05/2003	20030028	MAINTENANCE PREVENTIVE	0532201/60	VENTILATEUR PULMONAIRE	REANIMATION MEDICALE	1707,209
05/05/2003	20030094	MAINTENANCE CURATIVE	0424102/06	ANALYSEUR D"IONS	URGENCES S A M U	1345,2
06/05/2003	20030030	MAINTENANCE PREVENTIVE	0532201/70	VENTILATEUR PULMONAIRE	REANIMATION MEDICALE	543,98

07/05/2003	20030059	MAINTENANCE CURATIVE	0532401/48	POUSSE SERINGUES	REANIMATION MEDICALE	435
08/05/2003	20030103	MAINTENANCE CURATIVE	0420001/02	BALANCE DE LABORATOIRE	ANATOMIE PATOLOGIQUE/IMMUNO-HISTO-CYTOLOGIE	330,4
08/05/2003	20030104	MAINTENANCE CURATIVE	0424102/01	ANALYSEUR D'IONS	BIOCHIMIE	2181,82
12/05/2003	20030029	MAINTENANCE PREVENTIVE	0532201/67	VENTILATEUR PULMONAIRE	REANIMATION MEDICALE	543,98
12/05/2003	20030031	MAINTENANCE PREVENTIVE	0532201/48	VENTILATEUR PULMONAIRE	REANIMATION MEDICALE	815,38
15/05/2003	20030092	MAINTENANCE CURATIVE	0844601/01	LITHOTRITEUR EXTRACORPOREL	LITHOTRIPTIE	0
22/05/2003	20030082	MAINTENANCE PREVENTIVE	0532201/61	VENTILATEUR PULMONAIRE	REANIMATION MEDICALE	1994,218
23/05/2003	20040044	MAINTENANCE CURATIVE	0205203/01	PORTE-POTTER MURAL	RADIOTHERAPIE	802,2
24/05/2003	200301124	CONTROLE QUALITE	0636301/11	BISTOURI ELECTRIQUE / COAGULATEUR	BLOC OPERATOIRE CHIRURGIE	0
24/05/2003	200301123	CONTROLE QUALITE	0636301/17	BISTOURI ELECTRIQUE / COAGULATEUR	BLOC OPERATOIRE CHIRURGIE	80
02/06/2003	20030117	MAINTENANCE CURATIVE	0420801/21	CENTRIFUGEUSE	BIOCHIMIE	248
03/06/2003	20030096	MAINTENANCE CURATIVE	0636301/11	BISTOURI ELECTRIQUE / COAGULATEUR	BLOC OPERATOIRE CHIRURGIE	928,625
05/06/2003	20030097	MAINTENANCE CURATIVE	0636301/14	BISTOURI ELECTRIQUE / COAGULATEUR	BLOC OPERATOIRE C C V T	2226,149
05/06/2003	20030116	MAINTENANCE CURATIVE	0636904/27	MOTEUR CHIRURGICAL	BLOC OPERATOIRE DE NEURO CHIRURGIE	100,612
05/06/2003	20030083	MAINTENANCE CURATIVE	0532201/55	VENTILATEUR PULMONAIRE	ANESTHESIE REANIMATION	428,3
05/06/2003	20040023	MAINTENANCE CURATIVE	0315101/19	ELECTROCARDIOGRAPHE	CHIRURGIE GENERALE OU CHIRURGIE	1275
12/06/2003	20060043	MAINTENANCE CURATIVE	0424601/03	AUTOMATE POUR NUMERATION ET FORMULE SANGUINE	HEMATOLOGIE	295,1
12/06/2003	20030078	MAINTENANCE CURATIVE	0532401/23	POUSSE SERINGUES	REANIMATION MEDICALE	462,908
13/06/2003	20030079	MAINTENANCE PREVENTIVE	0844103/01	APPAREIL DE TELEGAMMATHERAPIE	RADIOTHERAPIE	1977,007
24/06/2003	20030081	MAINTENANCE PREVENTIVE	0532201/69	VENTILATEUR PULMONAIRE	REANIMATION MEDICALE	543,98
30/06/2003	20040005	MAINTENANCE CURATIVE	0424001/02	ANALYSEUR MULTIPARAMETRIQUE DE BIOCHIMIE	BIOCHIMIE	3650
01/07/2003	20040004	MAINTENANCE CURATIVE	0636902/02	BISTOURI A ULTRASONS	BLOC OPERATOIRE OPHTALMOLOGIE	3418,483
02/07/2003	20030109	MAINTENANCE CURATIVE	0315901/01	MONITEUR DE SURVEILLANCE CARDIO-RESPIRATOIRE	ANESTHESIE REANIMATION	200,6
03/07/2003	20030033	MAINTENANCE CURATIVE	0532201/73	VENTILATEUR PULMONAIRE	ANESTHESIE REANIMATION	0
04/07/2003	20040015	MAINTENANCE PREVENTIVE	0844103/01	APPAREIL DE TELEGAMMATHERAPIE	RADIOTHERAPIE	1977,007
07/07/2003	20030110	MAINTENANCE CURATIVE	0424802/04	COAGULOMETRE	HEMATOLOGIE	106,4
09/07/2003	20030093	MAINTENANCE CURATIVE	0532401/51	POUSSE SERINGUES	REANIMATION MEDICALE	468
09/07/2003	20040007	MAINTENANCE PREVENTIVE	0424103/04	ANALYSEUR PH-GAZ DU SANG	BIOCHIMIE	2464,443
14/07/2003	200301129	MAINTENANCE CURATIVE	0636904/29	MOTEUR CHIRURGICAL	BLOC OPERATOIRE ORTHOPEDIE	2578

18/07/2003	20040045	MAINTENANCE CURATIVE	0315901/87	MONITEUR DE SURVEILLANCE CARDIO-RESPIRATOIRE	REANIMATION MEDICALE	1251,65
21/07/2003	20030107	MAINTENANCE PREVENTIVE	0532201/65	VENTILATEUR PULMONAIRE	RADIOTHERAPIE	1137
23/07/2003	20030108	MAINTENANCE CURATIVE	0532201/60	VENTILATEUR PULMONAIRE	REANIMATION MEDICALE	1148,827
11/08/2003	20030077	MAINTENANCE CURATIVE	0948401/11	STERILISATEUR PAR LA CHALEUR HUMIDE	MICROBIOLOGIE	1933,69
16/08/2003	20040016	MAINTENANCE PREVENTIVE	0844103/01	APPAREIL DE TELEGGAMMATHERAPIE	RADIOTHERAPIE	1977,007
20/08/2003	20030132	MAINTENANCE CURATIVE	0315901/44	MONITEUR DE SURVEILLANCE CARDIO-RESPIRATOIRE	REANIMATION MEDICALE	658,5
20/08/2003	20030133	MAINTENANCE CURATIVE	0315901/28	MONITEUR DE SURVEILLANCE CARDIO-RESPIRATOIRE	REANIMATION MEDICALE	808,3
28/08/2003	20030134	MAINTENANCE CURATIVE	0532201/11	VENTILATEUR PULMONAIRE	REANIMATION MEDICALE	1282,335
02/09/2003	20030128	MAINTENANCE CURATIVE	0532401/42	POUSSE SERINGUES	NEURO CHIRURGIE	386,61
02/09/2003	20030127	MAINTENANCE CURATIVE	0532401/49	POUSSE SERINGUES	REANIMATION MEDICALE	493
03/09/2003	20040024	MAINTENANCE CURATIVE	0424601/06	AUTOMATE POUR NUMERATION ET FORMULE SANGUINE	HEMATOLOGIE	206,5
09/09/2003	20030102	INSTALLATION	0315303/01	SPIROMETRE	EXPLORATIONS FONCTIONNELLES	12800
17/09/2003	20030118	MAINTENANCE CURATIVE	0420801/21	CENTRIFUGEUSE	BIOCHIMIE	142,956
17/09/2003	20030119	MAINTENANCE CURATIVE	0420801/16	CENTRIFUGEUSE	BIOCHIMIE	145,256
17/09/2003	20030120	MAINTENANCE CURATIVE	0420801/16	CENTRIFUGEUSE	BIOCHIMIE	145,256
19/09/2003	20040017	MAINTENANCE CURATIVE	0532401/32	POUSSE SERINGUES	REANIMATION MEDICALE	645
19/09/2003	20030135	MAINTENANCE CURATIVE	0532401/64	POUSSE SERINGUES	URGENCES S A M U	323,649
20/09/2003	20040010	MAINTENANCE CURATIVE	0315901/78	MONITEUR DE SURVEILLANCE CARDIO-RESPIRATOIRE	CHIRURGIE GENERALE OU CHIRURGIE	831,05
20/09/2003	20030115	MAINTENANCE CURATIVE	0315601/01	BAIE D"URODYNAMIQUE	UROLOGIE	0
25/09/2003	20050046	MAINTENANCE CURATIVE	0424802/05	COAGULOMETRE	HEMATOLOGIE	893
26/09/2003	20060045	MAINTENANCE CURATIVE	0424601/06	AUTOMATE POUR NUMERATION ET FORMULE SANGUINE	HEMATOLOGIE	259,8
26/09/2003	20070090	MAINTENANCE CURATIVE	0636404/01	LASER YAG CONTINU	OPHTALMOLOGIE	728,16
26/09/2003	20050033	MAINTENANCE CURATIVE	0424802/04	COAGULOMETRE	HEMATOLOGIE	1475,278
26/09/2003	20060056	MAINTENANCE CURATIVE	0424802/04	COAGULOMETRE	HEMATOLOGIE	588
27/09/2003	20040012	MAINTENANCE CURATIVE	0532501/12	DEFIBRILLATEUR NON IMPLANTABLE	URGENCES S A M U	171,1
27/09/2003	20040011	MAINTENANCE CURATIVE	0532501/11	DEFIBRILLATEUR NON IMPLANTABLE	URGENCES S A M U	171,1
07/10/2003	20030130	MAINTENANCE CURATIVE	0532401/79	POUSSE SERINGUES	ANESTHESIE REANIMATION	0
07/10/2003	20050044	MAINTENANCE PREVENTIVE	0424601/07	AUTOMATE POUR NUMERATION ET FORMULE SANGUINE	HEMATOLOGIE	3481



24/10/2003	20040026	MAINTENANCE CURATIVE	0424601/07	AUTOMATE POUR NUMERATION ET FORMULE SANGUINE	HEMATOLOGIE	82,6
30/10/2003	20040003	MAINTENANCE CURATIVE	0532401/43	POUSSE SERINGUES	CHIRURGIE CARDIO VASCULAIRE ET THORACIQUE	457,145
30/10/2003	20040002	MAINTENANCE CURATIVE	0532401/58	POUSSE SERINGUES	URGENCES S A M U	553,57
05/11/2003	20050100	MAINTENANCE CURATIVE	0844104/01	CURIETHERAPIE (EP)	RADIOTHERAPIE	294
13/11/2003	20050047	MAINTENANCE CURATIVE	0424601/07	AUTOMATE POUR NUMERATION ET FORMULE SANGUINE	HEMATOLOGIE	206,5
20/11/2003	20070134	MAINTENANCE PREVENTIVE	0420301/03	AUTOMATE DE PREPARATION/DISTRIBUTION	BACTERIOLOGIE	493,908
24/11/2003	20040031	MAINTENANCE CURATIVE	0315101/17	ELECTROCARDIOGRAPHE	CHIRURGIE ORTHOPEDIQUE	0
28/11/2003	20040039	MAINTENANCE CURATIVE	0844103/01	APPAREIL DE TELEGAMMATHERAPIE	RADIOTHERAPIE	0
03/12/2003	20040009	MAINTENANCE CURATIVE	0315908/17	MONITEUR DE SAO2	URGENCES S A M U	82,5
06/12/2003	20040008	MAINTENANCE CURATIVE	0315101/20	ELECTROCARDIOGRAPHE	URGENCES S A M U	961
08/12/2003	20050048	MAINTENANCE CURATIVE	0424601/07	AUTOMATE POUR NUMERATION ET FORMULE SANGUINE	HEMATOLOGIE	9440
09/12/2003	20040021	MAINTENANCE CURATIVE	0532401/00	POUSSE SERINGUES	URGENCES S A M U	357,16
10/12/2003	20060032	MAINTENANCE CURATIVE	0424601/07	AUTOMATE POUR NUMERATION ET FORMULE SANGUINE	HEMATOLOGIE	820
02/01/2004	20050106	MAINTENANCE CURATIVE	0532401/64	POUSSE SERINGUES	URGENCES S A M U	357
03/01/2004	20040040	MAINTENANCE CURATIVE	0844103/01	APPAREIL DE TELEGAMMATHERAPIE	RADIOTHERAPIE	7
05/01/2004	20040001	MAINTENANCE CURATIVE	0424102/06	ANALYSEUR D"IONS	URGENCES S A M U	3,5
12/01/2004	20040018	MAINTENANCE CURATIVE	0532201/52	VENTILATEUR PULMONAIRE	ANESTHESIE REANIMATION	539,624
17/01/2004	20050020	MAINTENANCE CURATIVE	0844103/01	APPAREIL DE TELEGAMMATHERAPIE	RADIOTHERAPIE	1829
22/01/2004	20040042	MAINTENANCE CURATIVE	0532201/63	VENTILATEUR PULMONAIRE	ANESTHESIE REANIMATION	465,406
23/01/2004	20040041	MAINTENANCE PREVENTIVE	0844103/01	APPAREIL DE TELEGAMMATHERAPIE	RADIOTHERAPIE	1984,007
27/01/2004	20070061	MAINTENANCE CURATIVE	0315908/29	MONITEUR DE SAO2	URGENCES S A M U	374,8
27/01/2004	20050058	MAINTENANCE PREVENTIVE	0532201/68	VENTILATEUR PULMONAIRE	REANIMATION MEDICALE	2228,045
27/01/2004	20060034	MAINTENANCE CURATIVE	0424601/07	AUTOMATE POUR NUMERATION ET FORMULE SANGUINE	HEMATOLOGIE	4678,8
28/01/2004	20060031	MAINTENANCE PREVENTIVE	0424601/06	AUTOMATE POUR NUMERATION ET FORMULE SANGUINE	HEMATOLOGIE	3021
30/01/2004	20060035	MAINTENANCE CURATIVE	0424601/07	AUTOMATE POUR NUMERATION ET FORMULE SANGUINE	HEMATOLOGIE	1101,04
06/02/2004	20040043	MAINTENANCE CURATIVE	0532201/53	VENTILATEUR PULMONAIRE	ANESTHESIE REANIMATION	4853,09
10/02/2004	20040034	ASSISTANCE TECHNIQUE	0315907/01	MONITEUR DE CO2	BLOC OPERATOIRE CHIRURGIE	3,5
11/02/2004	20060038	MAINTENANCE CURATIVE	0424601/06	AUTOMATE POUR NUMERATION ET FORMULE SANGUINE	HEMATOLOGIE	1335,86

19/02/2004	20070091	MAINTENANCE CURATIVE	0428001/01	DISTRIBUTEUR DE PARAFFINE	ANATOMIE PATOLOGIQUE/IMMUNO-HISTO-CYTOLOGIE	215,9
19/02/2004	20070088	MAINTENANCE CURATIVE	0636201/04	MICROSCOPE OPERATOIRE	BLOC OPERATOIRE OPHTALMOLOGIE	975,9
20/02/2004	20060042	MAINTENANCE CURATIVE	0424601/06	AUTOMATE POUR NUMERATION ET FORMULE SANGUINE	HEMATOLOGIE	1563,6
20/02/2004	20060036	MAINTENANCE CURATIVE	0424601/07	AUTOMATE POUR NUMERATION ET FORMULE SANGUINE	HEMATOLOGIE	3286,872
24/02/2004	20040025	MAINTENANCE CURATIVE	0424601/06	AUTOMATE POUR NUMERATION ET FORMULE SANGUINE	HEMATOLOGIE	293,62
26/02/2004	20050114	MAINTENANCE CURATIVE	0532401/58	POUSSE SERINGUES	URGENCES S A M U	466,1
26/02/2004	20050109	MAINTENANCE CURATIVE	0315901/35	MONITEUR DE SURVEILLANCE CARDIO-RESPIRATOIRE	URGENCES S A M U	433
26/02/2004	20050113	MAINTENANCE CURATIVE	0532401/56	POUSSE SERINGUES	URGENCES S A M U	529
28/02/2004	20050093	MAINTENANCE CURATIVE	0424103/03	ANALYSEUR PH-GAZ DU SANG	BIOCHIMIE	70,8
28/02/2004	20050126	MAINTENANCE CURATIVE	0532401/43	POUSSE SERINGUES	CHIRURGIE CARDIO VASCULAIRE ET THORACIQUE	380,2
09/03/2004	20040038	MAINTENANCE CURATIVE	0532401/20	POUSSE SERINGUES	URGENCES S A M U	565,784
11/03/2004	20040027	MAINTENANCE CURATIVE	0424601/07	AUTOMATE POUR NUMERATION ET FORMULE SANGUINE	HEMATOLOGIE	991,2
12/03/2004	20040019	MAINTENANCE CURATIVE	0424103/03	ANALYSEUR PH-GAZ DU SANG	BIOCHIMIE	106,2
13/03/2004	20070097	MAINTENANCE CURATIVE	0420301/04	AUTOMATE DE PREPARATION/DISTRIBUTION	ANATOMIE PATOLOGIQUE/IMMUNO-HISTO-CYTOLOGIE	218,4
17/03/2004	20060044	MAINTENANCE CURATIVE	0424601/06	AUTOMATE POUR NUMERATION ET FORMULE SANGUINE	HEMATOLOGIE	324,6
18/03/2004	20060051	MAINTENANCE PREVENTIVE	0424802/04	COAGULOMETRE	HEMATOLOGIE	4131,118
19/03/2004	20060119	MAINTENANCE CURATIVE	0637001/08	FIBROSCOPE	ANESTHESIE REANIMATION	4133,427
22/03/2004	20050090	MAINTENANCE CURATIVE	0532401/30	POUSSE SERINGUES	CHIRURGIE CARDIO VASCULAIRE ET THORACIQUE	407,3
22/03/2004	20050107	MAINTENANCE CURATIVE	0532401/48	POUSSE SERINGUES	REANIMATION MEDICALE	326,46
24/03/2004	20050099	MAINTENANCE PREVENTIVE	0424103/04	ANALYSEUR PH-GAZ DU SANG	BIOCHIMIE	5060
27/03/2004	20080063	MAINTENANCE CURATIVE	0532401/76	POUSSE SERINGUES	MAINTENANCE ET GESTION DES EQUIPEMENTS BIOMEDICAUX	559,979
29/03/2004	20060021	MAINTENANCE CURATIVE	0424601/07	AUTOMATE POUR NUMERATION ET FORMULE SANGUINE	HEMATOLOGIE	218,5
03/04/2004	20050108	MAINTENANCE CURATIVE	0315900/16	MONITEUR DE SURVEILLANCE CARDIO-RESPIRATOIRE	URGENCES S A M U	0
03/04/2004	20050127	MAINTENANCE CURATIVE	0532401/51	POUSSE SERINGUES	REANIMATION MEDICALE	462,12
07/04/2004	20050092	MAINTENANCE CURATIVE	0532401/23	POUSSE SERINGUES	REANIMATION MEDICALE	340,3
13/04/2004	20050063	MAINTENANCE PREVENTIVE	0532201/69	VENTILATEUR PULMONAIRE	REANIMATION MEDICALE	1974,218
15/04/2004	20040020	MAINTENANCE CURATIVE	0532501/17	DEFIBRILLATEUR NON IMPLANTABLE	ANESTHESIE REANIMATION	558

21/04/2004	20070128	MAINTENANCE CURATIVE	0636201/05	MICROSCOPE OPERATOIRE	BLOC OPERATOIRE OPHTALMOLOGIE	1691,04
21/04/2004	20040028	MAINTENANCE CURATIVE	0424102/06	ANALYSEUR D"IONS	URGENCES S A M U	649
26/04/2004	20050072	MAINTENANCE CURATIVE	0532201/46	VENTILATEUR PULMONAIRE	URGENCES S A M U	540,093
05/05/2004	20050112	MAINTENANCE CURATIVE	0532401/55	POUSSE SERINGUES	REANIMATION MEDICALE	339
05/05/2004	20050115	MAINTENANCE CURATIVE	0532401/45	POUSSE SERINGUES	CHIRURGIE GENERALE OU CHIRURGIE	375,8
05/05/2004	20050105	MAINTENANCE CURATIVE	0532401/79	POUSSE SERINGUES	ANESTHESIE REANIMATION	313
06/05/2004	20050059	MAINTENANCE PREVENTIVE	0532201/66	VENTILATEUR PULMONAIRE	REANIMATION MEDICALE	1994,218
08/05/2004	20060108	MAINTENANCE CURATIVE	0844103/01	APPAREIL DE TELEGGAMMATHERAPIE	RADIOTHERAPIE	3311
12/05/2004	20050065	MAINTENANCE PREVENTIVE	0532201/48	VENTILATEUR PULMONAIRE	REANIMATION MEDICALE	461
13/05/2004	20040053	MAINTENANCE PREVENTIVE	0740301/01	POMPE A BALLONNET INTRA- AORTIQUE	CHIRURGIE CARDIO VASCULAIRE ET THORACIQUE	7429,044
19/05/2004	20050067	MAINTENANCE PREVENTIVE	0532201/67	VENTILATEUR PULMONAIRE	REANIMATION MEDICALE	1562,96
19/05/2004	20060046	MAINTENANCE CURATIVE	0424601/06	AUTOMATE POUR NUMERATION ET FORMULE SANGUINE	HEMATOLOGIE	1386,7
20/05/2004	20060022	MAINTENANCE CURATIVE	0424601/07	AUTOMATE POUR NUMERATION ET FORMULE SANGUINE	HEMATOLOGIE	129,9
20/05/2004	20050021	MAINTENANCE CURATIVE	0844103/01	APPAREIL DE TELEGGAMMATHERAPIE	RADIOTHERAPIE	1829
20/05/2004	20040033	ASSISTANCE TECHNIQUE	0420304/01	AGITATEUR	IMMUNOLOGIE	0
24/05/2004	20060023	MAINTENANCE CURATIVE	0424601/07	AUTOMATE POUR NUMERATION ET FORMULE SANGUINE	HEMATOLOGIE	950
25/05/2004	20050066	MAINTENANCE PREVENTIVE	0532201/70	VENTILATEUR PULMONAIRE	REANIMATION MEDICALE	1562,96
28/05/2004	20050079	MAINTENANCE CURATIVE	0532201/63	VENTILATEUR PULMONAIRE	ANESTHESIE REANIMATION	3322,187
29/05/2004	20060025	MAINTENANCE CURATIVE	0424601/07	AUTOMATE POUR NUMERATION ET FORMULE SANGUINE	HEMATOLOGIE	129,9

### Annexe 3 : Extrait du nombre d'intervention et coût de tout type d'intervention pour les différentes stratégies de maintenance

TOTAL ET COÛTS DES INTERVENTIONS PAR PERIODE TRIES PAR SERVICE HOSPITALIER 10 ans							
Période: du 01/01/2003 au :01/03/2014							
Service	Nombre Intervention	Nombre Heures	Coûts				Coût Total
			M.O.INT	M.O.EXT	P.R.INT	P.R.EXT	
MEDECINE NUCLEAIRE/RADIO ISOTOPES/ISOTOPE S	83	232	745,80 DT	236 480,00 DT	2 129,20 DT	285 846,00 DT	525 201,00 DT
BLOC OPERATOIRE OPHTALMOLOGIE	51	108,9	258,15 DT	12 136,80 DT	1 607,80 DT	41 089,00 DT	55 091,75 DT
BLOC OPERATOIRE MAXILO- FACIAL	18	33	130,10 DT	2 357,82 DT	4 283,93 DT	3 474,68 DT	10 246,53 DT
OPHTALMOLOGIE	51	95	225,70 DT	7 344,30 DT	126,44 DT	64 955,00 DT	72 651,44 DT
BLOC OPERATOIRE C C V T	62	141,6	299,34 DT	11 940,50 DT	6 917,80 DT	16 270,60 DT	35 428,24 DT
ANESTHESIE REANIMATION	479	959,9	25 728,40 DT	53 660,70 DT		288 688,00 DT	368 077,10 DT
MEDECINE PHYSIQUE ET REEDUCTION FONCTIONNELLE	10	15	71,40 DT	1 548,80 DT	- DT	5 648,40 DT	7 268,60 DT
ANATOMIE PATOLOGIQUE/IMM UNO-HISTO-CYTOLOGIE	28	63	150,90 DT	2 069,84 DT	51,21 DT	3 934,56 DT	6 206,51 DT
MEDECINE CARCINOLOGIQUE	11	18	49,80 DT	938,20 DT	847,14 DT	866,18 DT	2 701,32 DT
BLOC OPERATOIRE	236	587	1 304,70 DT	28 661,40 DT	37 540,36 DT	146 104,00 DT	213 610,46 DT
PHARMACIE INTERNE	1	0	- DT	94,40 DT	- DT	- DT	94,40 DT
MAINTENANCE ET GESTION DES EQUIPEMENTS BIOMEDICAUX	8	7,9	42,65 DT	995,27 DT	- DT	- DT	1 037,92 DT
BLOC OPERATOIRE O.R.L	27	49	117,10 DT	3 559,67 DT	2 066,39 DT	35 970,50 DT	41 713,66 DT
CHIRURGIE ORTHOPEDIQUE	15	39	157,40 DT	442,20 DT	592,25 DT	1 845,80 DT	3 037,65 DT
CHIRURGIE CARDIO VASCULAIRE ET THORACIQUE	94	208	362,10 DT	13 553,20 DT	845,99 DT	28 597,70 DT	43 358,99 DT
RADIOTHERAPIE	140	378,2	1 442,70 DT	65 865,90 DT	- DT	350 518,00 DT	417 826,60 DT
HEMATOLOGIE	144	437,3	1 011,00 DT	20 974,60 DT	4 546,78 DT	111 958,00 DT	138 490,38 DT
REANIMATION MEDICALE	588	1505,5	2 249,25 DT	50 670,70 DT	12 563,89 DT	247 231,00 DT	312 714,84 DT

UNITE DE BRULES	6	4	11,30 DT	1 790,00 DT	- DT	98,40 DT	1 899,70 DT
CHIRURGIE MAXILO FACIALE ET STOMATOLOGIE	8	10	43,50 DT	210,00 DT	26,00 DT	1 249,80 DT	1 529,30 DT
PARASITOLOGIE	4	11,6	14,10 DT	118,00 DT	- DT	148,68 DT	280,78 DT
BACTERIOLOGIE	20	38	107,70 DT	3 660,60 DT	156,00 DT	10 267,40 DT	14 191,70 DT
POST OPERATOIRE CHIRURGIE	2	2	12,00 DT	207,40 DT	- DT	300,00 DT	519,40 DT
URGENCE	1	1	2,30 DT	- DT	398,93 DT	- DT	401,23 DT
CONSULTATION EXTERNE DES SPECIALITES CHIRURGICALES	75	155,5	844,25 DT	12 152,10 DT	- DT	10 193,00 DT	23 189,35 DT
HYGIENE HOSPITALIERE	1	0	- DT	- DT	- DT	- DT	- DT
URGENCES MEDICALES	16	24	124,00 DT	2 309,40 DT	953,24 DT	836,90 DT	4 223,54 DT
CHIRURGIE GENERALE OU CHIRURGIE	33	43	133,70 DT	1 419,15 DT	5 079,32 DT	5 274,43 DT	11 906,60 DT
RADIOLOGIE / IMAGERIE MEDICALE	836	1677,5	9 960,75 DT	##### #####	932,20 DT	224 068,00 DT	##### #####
BLOC OPERATOIRE SEPTIQUE	7	18	41,70 DT	537,88 DT	15,93 DT	335,12 DT	930,63 DT
EXPLORATIONS FONCTIONNELLES	11	45	49,00 DT	944,20 DT	398,93 DT	17 543,40 DT	18 935,53 DT
CHIRURGIE REPARATRICE	5	7	42,00 DT	819,50 DT	- DT	- DT	861,50 DT
MEDECINE LEGALE	1	1	6,00 DT	41,00 DT	- DT	100,60 DT	147,60 DT
BLOC OPERATOIRE CHIRURGIE	66	125,9	334,03 DT	9 217,12 DT	4 984,82 DT	36 683,70 DT	51 219,67 DT
BLOC OPERATOIRE UROLOGIE	64	125,3	489,95 DT	11 414,30 DT	750,82 DT	41 149,40 DT	53 804,47 DT
UROLOGIE	15	43	38,00 DT	5 127,35 DT	4 133,50 DT	27 317,00 DT	36 615,85 DT
URGENCES S A M U	192	311,1	742,92 DT	16 686,20 DT	5 143,34 DT	67 683,60 DT	90 256,06 DT
IMMUNOLOGIE	21	72	69,20 DT	1 070,60 DT	2 261,74 DT	1 809,37 DT	5 210,91 DT
CHIRURGIE ORL/OTO-NEURO- CHIRURGIE MAXILO-FACIALE	14	27,3	80,29 DT	5 392,00 DT	403,01 DT	22 631,50 DT	28 506,80 DT
REANIMATION POLYVALENTE	10	9,6	40,90 DT	1 717,66 DT	- DT	559,75 DT	2 318,31 DT

#### Annexe 4 : Méthode Pareto appliquée aux services selon critère

« Nombre d'interventions Corrective causés par l'absence de maintenance préventive. »

Réf	ELEMENT	QUANTITE	%	CUMUL	CUMUL %
3	radiologie/imagerie médicale	89	55%	89	55%
2	anesthésie réanimation	22	14%	111	69%
13	consultations externes des chirurgiens	21	13%	132	81%
1	réanimation médicale	5	3%	137	85%
17	bloc opératoire orthopédique	3	2%	140	86%
7	médecine carcinologique	3	2%	143	88%
18	bloc opératoire ophtalmologie	2	1%	145	90%
11	bloc opératoire	2	1%	147	91%
6	radiothérapie	2	1%	149	92%
5	bactériologie	2	1%	151	93%
4	urgences médicales	2	1%	153	94%
20	bloc opératoire chirurgie	1	1%	154	95%
19	bloc opératoire de neurochirurgie	1	1%	155	96%
16	bloc opératoire septique	1	1%	156	96%
15	médecine nucléaire/radio isotope	1	1%	157	97%
14	médecine physique et réduction de la douleur	1	1%	158	98%
12	microbiologie	1	1%	159	98%
10	chirurgie générale ou chirurgie	1	1%	160	99%
9	neurochirurgie	1	1%	161	99%
8	lithotriptie	1	1%	162	100%

## Annexe 5 : Méthode Pareto appliquée aux services selon critère

« Nombre d'interventions corrective causés par l'absence de panne »

Réf	ELEMENT	QUANTITE	%	CUMUL	CUMUL %
3	réanimatio médicale	96	22%	96	22%
15	medecine nucléaire	47	11%	143	32%
14	radiologie/imagerie médicale	45	10%	188	42%
19	radiothérapie	42	9%	230	52%
6	bloc opératoire	36	8%	266	60%
20	anesthésie réanimation	24	5%	290	65%
11	bloc opératoire CCVT	22	5%	312	70%
4	chirurgie cardio vasculaire et	20	4%	332	75%
5	réanimation polyvalente	15	3%	347	78%
30	lithotropie	13	3%	360	81%
8	bloc opératoire chirurgie	11	2%	371	83%
10	bloc opératoire ORL	9	2%	380	85%
13	bloc opératoire orthopédie	7	2%	387	87%
17	biochimie	6	1%	393	88%
27	bloc opératoire urologie	5	1%	398	89%
25	chirurgie réparatrice	5	1%	403	91%
21	bloc opératoire de neuro-chi	5	1%	408	92%
16	bloc opératoire ophtalmologie	5	1%	413	93%
9	anatomie pathologique/immu	5	1%	418	94%
2	urgence samu	5	1%	423	95%
7	bloc opératoire maxil-faciale	4	1%	427	96%
18	hématologie	3	1%	430	97%
1	immunologie	3	1%	433	97%
26	chirurgie ORL/OTO	2	0%	435	98%
24	bactériologique	2	0%	437	98%
33	exploration fonctionnelle	1	0%	438	98%
32	chirurgie maxilo-faciale et sto	1	0%	439	99%
31	urologie	1	0%	440	99%
29	hygiene hospitalier	1	0%	441	99%
28	unité de brulure	1	0%	442	99%
23	consultation externe	1	0%	443	100%
22	medecine carcinologique	1	0%	444	100%
12	chirurgie générale ou chirurg	1	0%	445	100%

## Annexe 6 : Méthode Pareto appliquée aux services selon critère

« Nombre d'interventions corrective causés par la panne normale »

Réf	ELEMENT	QUANTITE	%	CUMUL	CUMUL %
4	radiologie/imagerie medic.	367	21%	367	21%
3	réanimation médicale	280	16%	647	37%
2	anesthésie réanimation	213	12%	860	50%
21	bloc opératoire	189	11%	1049	60%
7	urgence samu	105	6%	1154	67%
17	radiothérapie	84	5%	1238	71%
16	chirurgie cardio vasculaire	43	2%	1281	74%
23	bloc opératoire chirurgie	35	2%	1316	76%
8	ophtalmologie	34	2%	1350	78%
15	réanimation polyvalente	32	2%	1382	80%
20	hématologie	29	2%	1411	81%
18	biochimie	28	2%	1439	83%
13	bloc opératoire ophtalmol	25	1%	1464	84%
11	bloc opératoire de neuro-c	22	1%	1486	86%
14	bloc opératoire urologie	21	1%	1507	87%
1	chirurgie générale ou chiru	21	1%	1528	88%
36	lithotriptie	18	1%	1546	89%
24	bloc opératoire CCYT	18	1%	1564	90%
5	bloc opératoire orthopédi	18	1%	1582	91%
27	anatomie pathologique	15	1%	1597	92%
22	consultation externe et sp	15	1%	1612	93%
12	bloc opératoire ORL	15	1%	1627	94%
38	chirurgie ORL/OTO	12	1%	1639	95%
26	immunologie	12	1%	1651	95%
29	urgence médical	9	1%	1660	96%
32	maintenance et gestion de	8	0%	1668	96%
31	exploration fonctionnelle	8	0%	1676	97%
30	neuro chirurgie	8	0%	1684	97%
28	parasitologie	7	0%	1691	98%
10	chirurgie orthopédique	6	0%	1697	98%
39	medecine physique	5	0%	1702	98%
35	bactériologie	5	0%	1707	98%
25	urologie	5	0%	1712	99%
19	medecine physique et réed	5	0%	1717	99%
34	medecine nucléaire	4	0%	1721	99%
9	unités de brulures	4	0%	1725	99%
40	chirurgie réparatrice	3	0%	1728	100%
6	bloc opératoire masil-faci	3	0%	1731	100%
33	medecine legale	2	0%	1733	100%
37	hygiène hospitalier	1	0%	1734	100%



**Annexe 7 : Méthode Pareto appliquée aux services selon critère : nombre d'interventions correctives causés par l'erreur de manipulation**

Réf	ELEMENT	QUANTITE	%	CUMUL	CUMUL %
4	radiologie/imagerie médicale	146	53%	146	53%
3	réanimation médicale	23	8%	169	62%
2	anesthésie réanimation	18	7%	187	68%
5	bloc opératoire orthopédie	14	5%	201	73%
23	bloc opératoire chirurgie	11	4%	212	77%
22	consultation externe et spécialité	11	4%	223	81%
7	urgence samu	11	4%	234	85%
16	chirurgie cardio vasculaire et torax	5	2%	239	87%
11	bloc opératoire de neuro-chirurgie	5	2%	244	89%
19	medecine physique et rééducation	3	1%	247	90%
17	radiothérapie	3	1%	250	91%
12	bloc opératoire ORL	3	1%	253	92%
6	bloc opératoire maxil-faciale	3	1%	256	93%
1	chirurgie générale ou chirurgie	3	1%	259	95%
21	bloc opératoire	2	1%	261	95%
18	biochimie	2	1%	263	96%
15	réanimation polyvalente	2	1%	265	97%
10	chirurgie orthopédique	2	1%	267	97%
9	unités de brulures	2	1%	269	98%
8	ophtalmologie	2	1%	271	99%
20	hématologie	1	0%	272	99%
14	bloc opératoire urologie	1	0%	273	100%
13	bloc opératoire ophtalmologie	1	0%	274	100%

**Annexe 8 : Méthode Pareto appliquée aux services selon critère : nombre d'interventions correctives causés par l'usure prématurée**

Réf	ELEMENT	QUANTITE	%	CUMUL	CUMUL %
2	radiologie/imagerie médicale	259	71%	259	71%
11	consultation externe et spécialité	31	9%	290	80%
1	réanimation médicale	23	6%	313	86%
3	bloc opératoire orthopédie	11	3%	324	89%
4	urgence samu	5	1%	329	91%
20	urgence médicale	4	1%	333	92%
7	bloc opératoire urologie	4	1%	337	93%
5	chirurgie orthopédique	4	1%	341	94%
18	anesthésie réanimation	3	1%	344	95%
10	bloc opératoire	3	1%	347	96%
8	chirurgie cardio vasculaire et torax	3	1%	350	96%
12	bloc opératoire chirurgie	2	1%	352	97%
9	hématologie	2	1%	354	98%
22	neurologie ou neurologie médicale	1	0%	355	98%
21	chirurgie generale	1	0%	356	98%
19	bloc opératoire neuro chirurgie	1	0%	357	98%
17	bactériologie	1	0%	358	99%
16	medecine legale	1	0%	359	99%
15	neuro chirurgie	1	0%	360	99%
14	anatomie pathologique	1	0%	361	99%
13	immunologie	1	0%	362	100%
6	bloc opératoire de neuro-chirurgie	1	0%	363	100%

---

---

# Optimisation du service de maintenance biomédicale

---

---

**Zeineb BEN HOURIA**

---

---

**Résumé** : Les travaux de recherche de cette thèse s'inscrivent dans le cadre de la proposition des outils d'aide à la décision qui permettent une meilleure maîtrise des coûts de maintenance des équipements médicaux. Ceci en assurant la sécurité des patients et des utilisateurs et en maintenant des performances optimales de l'ensemble des équipements médicaux. Une heuristique a été proposée pour le choix de l'internalisation/externalisation de la maintenance et pour la sélection du contrat adéquat. Un couplage de l'approche multicritère AHP « Analytical Hierarchy Process » à la technique TOPSIS « Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution » est proposé pour la priorisation des équipements et le choix adapté d'une stratégie de maintenance. Une évaluation linguistique floue est intégrée pour exprimer l'incertitude des jugements. Deux modèles mathématiques sont proposés permettant de sélectionner pour chaque équipement, la stratégie de maintenance, internaliser ou externaliser la maintenance et le type du contrat tout en considérant le budget disponible et la charge/capacité du service maintenance.

**Abstract:** The research of this thesis proposes in the context of providing tools to help the biomedical maintenance service of the hospital to make decisions that allow a better control of costs, while ensuring patient and user safety and maintaining optimal performance of medical equipment. A heuristic has been proposed for the choice of internalization or outsourcing maintenance and for the selection of the appropriate contract. We proposed multi-criteria decision-making tools to select the appropriate maintenance strategies. A coupling of the AHP approach "Analytical Hierarchy Process" with TOPSIS technique "Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution" has been provided for prioritization of medical equipment and the selection of adequate maintenance strategies. We integrated the fuzzy language assessment of the criticality of the equipment and the selection of the maintenance strategy. We developed two mathematical models that allow selecting for each equipment, the maintenance strategy, the internalization or the outsourcing of the maintenance and the type of contract while considering the available budget and the workload / capacity of the maintenance department.

**Mots clés** : Equipements médicaux, stratégies de maintenance, internalisation/externalisation, multicritère, priorisation, AHP, TOPSIS, floue, modélisation mathématique.

**Key words:** Medical equipment, maintenance strategies, internalization/outsourcing, multi-criteria, prioritization, AHP, TOPSIS, Fuzzy set, mathematical model.