

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf:...../2025



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER Académique**

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Electromécanique

Spécialité: Electromécanique

Par: KAFI Haroun Erachide et DEBABGHA Amine

Thème

**Modélisation géométrique, cinématique et maintenance d'un robot
de peinture à 6 degrés de liberté**

Soutenu publiquement, le 22/06/2024 devant le jury composé de:

Mr BEZAZI Abderrezak	Professeur	Univ. Guelma	Président
Mr DJEBALA Abderrazek	Professeur	Univ. Guelma	Encadreur
Mme BENMOHAMED Hanane	MCB	Univ. Guelma	Examinatrice principale
Mme KECHIDA Sihem	Professeur	Univ. Guelma	Examinatrice
Mme KADDECHE Mounia	MCB	Univ. Guelma	Examinatrice

Année Universitaire: 2024/2025

Remerciements



Nous levons nos mains en signe de gratitude et de reconnaissance envers le Tout-Puissant, qui nous a éclairés de Sa lumière et guidés sur le droit chemin, qui nous a comblés du don de la raison et de la réflexion, et nous a accordé la force et la détermination pour avancer sur cette voie, ainsi que la patience et la persévérance pour mener à bien ce modeste travail.

À cette occasion, nous exprimons nos plus profonds remerciements, notre estime et notre reconnaissance à notre honorable encadreur, Professeur DJEBALA Abderrazek qui a été pour nous un véritable soutien et un guide éclairé. Il nous a accompagnés de son immense expérience, nous a conseillés avec ses orientations précieuses, et a consacré de son temps et de ses efforts pour nous aider à surmonter les obstacles et à développer ce travail sur les plans scientifique et méthodologique. Nous lui témoignons tout notre respect et notre gratitude, et nous prions Dieu de le récompenser généreusement et de bénir son savoir et ses contributions. Nous tenons également à exprimer notre gratitude sincère aux membres du jury d'évaluation, pour avoir accepté d'examiner notre travail, pour leurs remarques constructives, et pour le temps précieux qu'ils nous ont consacré. Leur expertise et leurs observations enrichiront sans aucun doute la qualité de ce travail.

Enfin, nous adressons nos remerciements les plus chaleureux à nos familles chéries, pour leur amour, leur patience et leur soutien indéfectible tout au long de ce parcours. Leur présence constante à nos côtés a été une source inestimable de motivation et d'encouragement.

Dédicaces



Je dédie ce mémoire avant tout à ma chère mère, pour son amour, ses sacrifices et son soutien sans faille. Tu as toujours cru en moi, même dans les moments les plus difficiles. Merci pour ta patience, ton courage et ta présence inestimable.

À mon père, que Dieu lui accorde Sa miséricorde et l'accueille dans Son vaste paradis. Ton départ m'a laissé un vide immense, mais aussi une force intérieure que tu m'as transmise. Ce travail, je te l'offre avec tout mon amour et mon respect éternel.

À mes frères, merci pour votre soutien constant, votre encouragement et votre confiance. Votre présence à mes côtés a été précieuse tout au long de ce parcours. Ce mémoire est le fruit de votre amour, vos prières et votre foi en moi. Je vous le dédie avec tout mon cœur.

À mon précieux collègue Amine. A tous mes collègues et mes amis sans exceptions.

[KAFI HAROUN ERACHIDE](#)

Dédicaces



Je dédie ce modeste travail avec un grand amour, une profonde sincérité et immense fierté :

A mes chers parents source de tendresse, de noblesse, de patience et d'encouragements

A mon frère Chakib et mes sœurs Lina et Inès sans oublier mes amis et camarades pour leur soutien, et leur compréhensions

A mon collègue Haroune. A tous mes collègues et mes amis sans exceptions.

Avec mes toutes remercies.

[DEBABGHA AMINE](#)

RESUME

Ce mémoire présente une étude complète portant sur la modélisation et la maintenance d'un robot de peinture à 6 axes de la marque Roby. Cette étude se compose de deux parties : la première partie se concentre sur la modélisation robotique, couvrant les aspects géométriques et cinématiques du robot Roby. Cette phase comprend l'utilisation de concepts clés de la modélisation pour établir des modèles précis. Un programme en MATLAB combiné à la boîte à outils de Peter Corke est utilisé pour visualiser les mouvements 3D de la position de l'organe terminal du robot. Une modélisation cinématique visant la détermination de la vitesse linéaire et angulaire du robot a également été réalisée.

Dans la deuxième partie, l'accent est mis sur la maintenance du robot en exploitant son historique des pannes. L'étude de la maintenance a été réalisée par association d'une étude ABC et des graphes de Pareto, d'une analyse de fiabilité ciblée, et enfin d'une analyse AMDEC détaillée. Des propositions d'amélioration et un plan d'actions de maintenance pratiques et ciblées ont été proposés.

Mots-clés : Robot de peinture, Modélisation géométrique, Modélisation cinématique, Etude de Pareto, Etude de fiabilité, Analyse AMDEC.

Abstract

This thesis presents a comprehensive study on the modeling and maintenance of a Roby 6-axis painting robot. This study consists of two parts: the first part focuses on robotic modeling, covering the geometric and kinematic aspects of the Roby robot. This phase involves the use of key modeling concepts to establish accurate models. A MATLAB program combined with Peter Corke's toolbox is used to visualize the 3D motions of the robot's end-piece position. Kinematic modeling aimed at determining the robot's linear and angular velocity was also performed.

The second part focuses on robot maintenance by exploiting its failure history. The maintenance study was conducted by combining an ABC study and Pareto's charts, a targeted reliability analysis, and finally a detailed FMEA analysis. Improvement proposals and a practical targeted maintenance actions plan were proposed.

Keywords: Painting robot, Geometric modeling, Kinematic modeling, Pareto study, Reliability study, FMEA analysis.

ملخص

تقدم هذه الأطروحة دراسة شاملة حول نمذجة وصيانة روبوت طلاء روبي سداسي المحاور. تتكون هذه الدراسة من جزأين: يركز الجزء الأول على النمذجة الروبوتية، ويغطي الجوانب الهندسية والحركية للروبوت روبي. تتضمن هذه المرحلة استخدام مفاهيم النمذجة الرئيسية لإنشاء نماذج دقيقة. يتم استخدام برنامج MATLAB مع مجموعة أدوات بيتر كورك لتصوير الحركات ثلاثية الأبعاد لموضع القطعة النهائية للروبوت. كما تم إجراء نمذجة حركية تهدف إلى تحديد السرعة الخطية والزاوية للروبوت. يركز الجزء الثاني على صيانة الروبوت من خلال استغلال تاريخ أعطاله. أجريت دراسة الصيانة من خلال الجمع بين دراسة ABC ومخططات باريتو، وتحليل موثوقية مستهدف، وأخيرًا تحليل FMEA مفصل. تم اقتراح مقترحات للتحسين وخطة عمل عملية ومستهدفة للصيانة.

الكلمات المفتاحية: روبوت طلاء، نمذجة هندسية، نمذجة حركية، دراسة باريتو، دراسة الموثوقية، تحليل FMEA.

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1. Robot de soudage	4
Figure 1.2. Robot de peinture.....	4
Figure 1.3. Robot d'assemblage.....	4
Figure 1.4. Robot Agro-alimentaire	4
Figure 1.5. Robot chirurgical.....	4
Figure 1.6. Robot d'exploration	4
Figure 1.7 : Les vocabulaires du robot	5
Figure 1.8 : Structure fonctionnelle d'un robot.....	6
Figure 1.9 : Fiche technique d'un robot industriel.....	7
Figure 1.10 : Robot série à chaîne cinématique ouverte.....	9
Figure 1.11 : Notation de Denavit-Hartenberg.....	10
Figure 1.12. Exemple de solution d'un MGI pour un robot à 6 ddl.....	11

Chapitre 2

Figure 2.1 : Types de la maintenance préventive.....	16
Figure 2.2 : Représentation graphique de la courbe de Pareto.....	19
Figure 2.3 : La démarche d'une AMDEC.....	22
Figure 2.4 : Fonction de défaillance $F(t)$	23
Figure 2.5 : Fonction de fiabilité $R(t)$	23
Figure 2.6 : Allures de $R(t)$ et de $\lambda(t)$ pour différentes valeurs de β	25

Chapitre 3

Figure 3.1. Robot Roby 6x en action.....	28
Figure 3.2. Schéma du robot Roby 6x.....	29
Figure 3.3. Robot Roby 6x en phase d'apprentissage.....	30
Figure 3.4 : Schéma d'un robot Roby montrant l'affectation des repères.....	30
Figure 3.5. Simulation sur MATLAB position 1.....	35
Figure 3.6. Simulation sur MATLAB position 2.....	35
Figure 3.7. Simulation sur MATLAB position 3.....	36

Figure 3.8. Simulation sur MATLAB position 3.....	36
---	----

Chapitre 4

Figure 4.1. Courbe ABC de Pareto.....	51
Figure 4.2. Graphe en « n ».....	52
Figure 4.3. Graphe en « t ».....	52
Figure 4.4. Graphe en « n*t »	52
Figure 4.5. Paramètres du modèle de Weibull de l'organe A du robot.....	54
Figure 4.6. Représentation des TBF sur le papier de Weibull.....	55
Figure 4.7. Fonction de fiabilité $R(t)$ de l'organe A du robot.....	56
Figure 4.8. Fonction de défaillance $F(t)$ de l'organe A du robot.....	56
Figure 4.9. Le taux de défaillance $\lambda()$ de l'organe A du robot.....	57
Figure4.10.Densité de probabilité de défaillance $f(t)$ de l'organe A du robot.....	57
Figure 4.11. Paramètres du modèle de Weibull de l'organe D du robot.....	58
Figure 4.12. Représentation des TBF sur le papier de Weibull	59
Figure 4.13. Fonction de fiabilité $R(t)$ de l'organe D du robot.....	60
Figure 4.14. Fonction de défaillance $F(t)$ de l'organe D du robot.....	60
Figure 4.15. Le taux de défaillance $\lambda()$ de l'organe D du robot.....	61
Figure 4.16. Densité de probabilité de défaillance $f(t)$ de l'organe du robot.....	61
Figure 4.17. Paramètres du modèle de Weibull de l'organe E du robot.....	62
Figure 4.18. Représentation des TBF sur le papier de Weibull.....	63
Figure 4.19. Fonction de fiabilité $R(t)$ de l'organe E du robot.....	64
Figure 4.20. Fonction de défaillance $F(t)$ de l'organe E du robot.....	64
Figure 4.21. Taux de défaillances de l'organe E du robot.....	65
Figure 4.22. Densité de probabilité de défaillance de l'organe E du robot.....	65
Figure 4.23. Paramètres du modèle de Weibull de l'organe F du robot.....	66
Figure 4.23. Paramètres du modèle de Weibull de l'organe F du robot.....	67
Figure 4.23. Paramètres du modèle de Weibull de l'organe F du robot.....	68
Figure 4.26. Fonction de fiabilité $F(t)$ de l'organe E du robot.....	68
Figure 4.26. Fonction de fiabilité $F(t)$ de l'organe E du robot.....	69
Figure 4.28. Densité de probabilité de défaillance de l'organe F.....	69

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau 2.1. Evaluation du critère D ou N.....	21
Tableau 2.2. Evaluation du critère O ou F.....	21
Tableau 2.3. Evaluation du critère G.....	22
Tableau 2.4. Evaluation de la criticité C.....	22

Chapitre III

Tableau 3.1. Caractéristiques du robot Roby 6x.....	29
Tableau 3.2. Paramètres de Denavit-Hanterberg du robot Roby 6x.....	31

Chapitre IV

Tableau 4.1. Historique du robot Roby 6x.....	46
Tableau 4.2. Décomposition du robot et désignation des organes principaux.....	48
Tableau 4.3. Nombre de pannes et temps d'arrêt pour chaque organe du robot.....	48
Tableau 4.4. Application de la méthode ABC sur le robot en s'appuyant sur le nombre de pannes.....	49
Tableau 4.5. Application de la méthode ABC sur le robot en s'appuyant sur le nombre d'organes.....	50
Tableau 4.6. TBF de l'organe A du robot.....	54
Tableau 4.7. TBF de l'organe D calculés à partir de l'historique du robot.....	58
Tableau 4.8. TBF de l'organe E calculés à partir de l'historique du robot.....	62
Tableau 4.9. TBF de l'organe F calculés à partir de l'historique du robot.....	66
Tableau 4.10. Application de l'analyse AMDEC au robot Roby 6x.....	70
Tableau 4.11. Evaluation de la criticité du robot de peinture.....	73
Tableau 4.12. Actions à entreprendre et périodicités de maintenance du robot.....	74

Sommaire

Introduction générale.....	1
 Chapitre I : Notions fondamentales sur la robotique et modélisation des robots.....	2
I.1. Définitions.....	3
I.2. Robots industriels.....	3
I.2.1. Définition.....	3
I.2.2. Classification des robots industriels.....	3
I.2.3. Constituants mécaniques des robots industriels.....	5
I.2.4. Eléments constitutifs d'un robot industriel.....	5
I.2.5. Caractéristiques d'un robot industriel.....	6
I.3. Modélisation des robots industriels.....	7
I.3.1. Modélisation géométrique.....	8
I.3.2. Modélisation cinématique.....	11
I.4. Conclusion du chapitre.....	13
 Chapitre II : Maintenance des robots.....	14
Introduction.....	15
II.1. Notions sur la maintenance.....	15
II.1.1. Définition de la maintenance.....	15
II.1.2. Les types de maintenance.....	15
II.1.3. Les activités de la maintenance.....	16
II.2. Maintenance des robots.....	17
II.2.1. Enjeux de la maintenance des robots.....	17
II.2.2. Politiques de maintenance des robots de peinture.....	17
II.2.3. Bonnes pratiques de maintenance.....	18
II.2.4. Considérations de sécurité et conformité.....	18
II.3. Outils utilisés pour la gestion de la maintenance des robots.....	18
II.3.1. Méthode ABC de Pareto.....	18
II.3.2. La méthode AMDEC.....	19
II.3.3. Etude de la fiabilité.....	23

II.4. Conclusion.....	26
Chapitre III Modélisation géométrique et cinématique d'un robot de peinture de type Roby 6x.....	27
Introduction.....	28
III.1. Présentation du robot Roby 6x.....	28
III.1.1. Description du robot.....	28
III.1.2. Programmation du robot Roby 6x.....	29
III.2. Modélisation géométrique du robot Roby 6x.....	30
III.2.1. Repérage des articulations et détermination des paramètres D-H.....	30
III.2.2. Modélisation géométrique directe du robot.....	31
III.2.3. Simulation du MGD sous MATLAB.....	34
III.3. Modélisation cinématique du robot Roby.....	37
III.3.1. Utilisation de la matrice Jacobéenne analytique.....	37
III.3.2. Utilisation de la matrice Jacobéenne cinématique.....	40
III.4. Conclusion du chapitre.....	43
Chapitre IV Etude de la maintenance du robot de peinture Roby 6.....	44
Introduction.....	45
IV.1. Etude de l'historique des pannes du robot.....	45
IV.2. Application de l'approche de Pareto.....	48
IV.2.1. Courbe ABC de Pareto.....	48
IV.2.2. Graphes de Pareto.....	51
IV.3. Analyse de la fiabilité de robot.....	53
IV.3.1. Présentation du logiciel FAIBOPTIM.....	53
IV.3.2. Etude fiabiliste des organes du robot.....	53
IV. 4. Analyse qualitative des pannes du robot par la méthode AMDEC.....	70
IV.4.1. Tableau AMDEC.....	70
IV.4.2. Evaluation de la criticité.....	72
IV.4.3. Analyse des résultats et actions à entreprendre.....	72
IV.5. Conclusion du chapitre.....	75
Conclusion générale.....	76

Introduction générale

La robotique est un domaine à la croisée de l'ingénierie, de l'informatique et de l'intelligence artificielle, elle joue un rôle de plus en plus crucial dans le monde moderne. Elle a évolué pour devenir une force motrice de l'innovation technologique. Aujourd'hui, les robots sont omniprésents dans divers secteurs, des usines de fabrication en passant par les explorations spatiales et les services domestiques.

L'un des développements les plus remarquables dans ce domaine est le robot de peinture, qui permet de se substituer à l'homme pour l'exécution de cette tâche tout en assurant rapidité et précision. Dans ce contexte, la modélisation géométrique, cinématique, ainsi que la maintenance de tels robots revêtent d'une importance capitale pour garantir le fonctionnement optimal de ces machines.

Ce mémoire se concentre donc sur deux volets distincts : le premier concerne la modélisation géométrique et cinématique d'un robot de peinture. Ces modélisations sont très indispensables pour décrire le fonctionnement du robot ainsi que lors de sa commande et sa programmation. Le deuxième volet concerne l'étude complète de la maintenance de ce robot par association de deux approches distinctes : l'une qualitative et l'autre quantitative.

Le mémoire est structuré en quatre chapitres, chacun abordant un aspect clé de l'étude. Le chapitre 1 offre une vue d'ensemble sur la robotique, couvrant son historique, ses applications actuelles et futures, les différents types de robots utilisés dans l'industrie ainsi que les bases mathématiques de la modélisation géométrique et cinématique des robots. Le chapitre 2 porte sur la présentation des principes fondamentaux des techniques utilisées pour l'étude de la maintenance du robot. Le chapitre 3 est dédié à la modélisation du robot de peinture de la marque Roby à six axes, où nous utilisons les fondements théoriques de la modélisation géométrique, cinématique des robots. Une simulation de la modélisation géométrique a été réalisée sous MATLAB avec la boîte à outils Peter Corke. Cette simulation permet de déterminer, en temps réel, la position de l'organe terminal du robot et ceci sans avoir recours à de longs calculs. Enfin, le chapitre 4 traite une étude qualitative et quantitative de la maintenance de ce robot impliquant une étude ABC et des graphes de Pareto, une étude et analyse de fiabilité ciblée des organes du robot par le logiciel FIABOPTIM, ainsi qu'une analyse AMDEC complète. Des actions de maintenance pratiques ont été proposées sur la base des résultats obtenus.

Chapitre I

Notions fondamentales sur la robotique et modélisation des robots

I.1. Définitions

Un robot est un dispositif qui associe la mécanique, l'électronique et l'informatique, composé d'éléments mécaniques articulés et d'éléments électroniques, conçu pour accomplir automatiquement des tâches imitant ou remplaçant l'action humaine. Il existe de nombreuses définitions du mot robot :

Selon le petit Larousse, « Un robot est défini comme étant un appareil automatique capable de manipuler des objets, ou d'exécuter des opérations selon un programme fixe ou modifiable ». [1]

Selon Robot Institute of America, « Un robot est un manipulateur reprogrammable à fonctions multiples. Il est conçu pour déplacer des matériaux, des pièces, des outils ou des instruments spécialisés suivant des trajectoires variables programmées, en vue d'accomplir des tâches très diverses ». [1]

Selon l'Association Japonaise de Robotique Industrielle, « Un robot est un mécanisme permettant d'effectuer, en tout ou en partie, une tâche normalement réalisée par l'homme ». [1]

Selon l'International Standard Organisation (ISO), « Un robot est une machine formée par un mécanisme incluant plusieurs degrés de libertés, ayant souvent l'apparence d'un ou plusieurs bras se terminant par un poignet capable de tenir des outils, des pièces ou un dispositif d'inspection ». [1]

I.2. Robots industriels

I.2.1. Définition

Un robot qui opère de manière automatique ou semi-automatique pour accomplir des opérations de fabrication.

I.2.2. Classification des robots industriels

- Robots de soudage (Fig. 1.1) ;
- Robots de peinture (Fig. 1.2) ;
- Robots d'assemblage (Fig. 1.3) ;
- Robots d'emballage et palettisation ;
- Robots de l'industrie agro-alimentaire (Fig. 1.4) ;
- Robots dans les biotechnologies ;
- Robots chirurgicaux (Fig. 1.5) ;

- Robots d'exploration (Fig. 1.6) ;
- Robots de service ;
- Robot de loisirs ;



Figure 1.1. Robot de soudage [2]



Figure 1.2. Robot de peinture [3]



Figure 1.3. Robot d'assemblage [2]



Figure 1.4. Robot Agro-alimentaire [4]

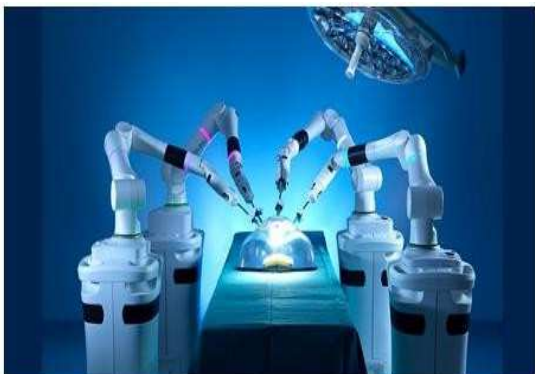


Figure 1.5. Robot chirurgical [5]



Figure 1.6. Robot d'exploration [2]

I.2.3. Constituants mécaniques des robots industriels

Les robots sont composés de différentes pièces mécaniques, électroniques et électromécaniques, la figure (1.7) représente les vocabulaires du robot :

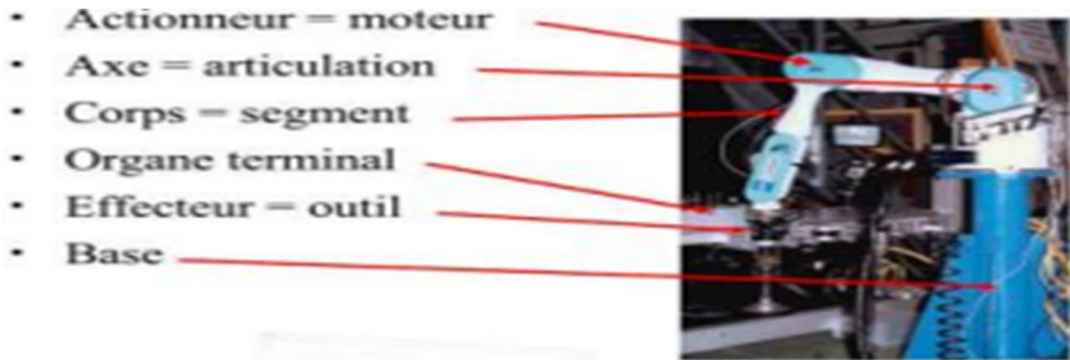


Figure 1.7 : Les vocabulaires du robot [2]

La structure mécanique articulée d'un robot comprend trois ensembles principaux

I.2.3.1. La base : Le support sur lequel repose l'origine du premier élément de la structure articulée formant le bras. [2]

I.2.3.2. Le porteur : Représente l'essentiel du système mécanique articulé, il a pour rôle d'amener l'organe terminal dans une situation donnée imposée par la tâche à réaliser. La situation d'un corps peut être définie comme la position et l'orientation d'un repère attaché à ce corps par rapport à un repère de référence. Cette combinaison de trois degrés de liberté (une rotation et/ou translation) nécessite une classification des robots qui se base sur différentes configurations [4].

I.2.3.3. Organe terminal (effecteur) : Il s'agit d'une interface permettant au robot d'interagir avec son environnement. Un organe terminal peut être multifonctionnel, au sens où il peut être équipé de plusieurs dispositifs ayant différentes fonctionnalités. Il peut aussi être monofonctionnel, mais interchangeable. Enfin un robot peut être multi-bras, chacun des bras portant un organe terminal différent. On utilisera indifféremment le terme organe terminal, préhenseur, outil ou effecteur pour nommer le dispositif d'interaction fixe à l'extrémité mobile de la structure mécanique [4].

I.2.4. Eléments constitutifs d'un robot industriel

La structure fonctionnelle d'un robot comporte une unité dite informationnelle et une unité

dite opérationnelle (voir figure 1.8).

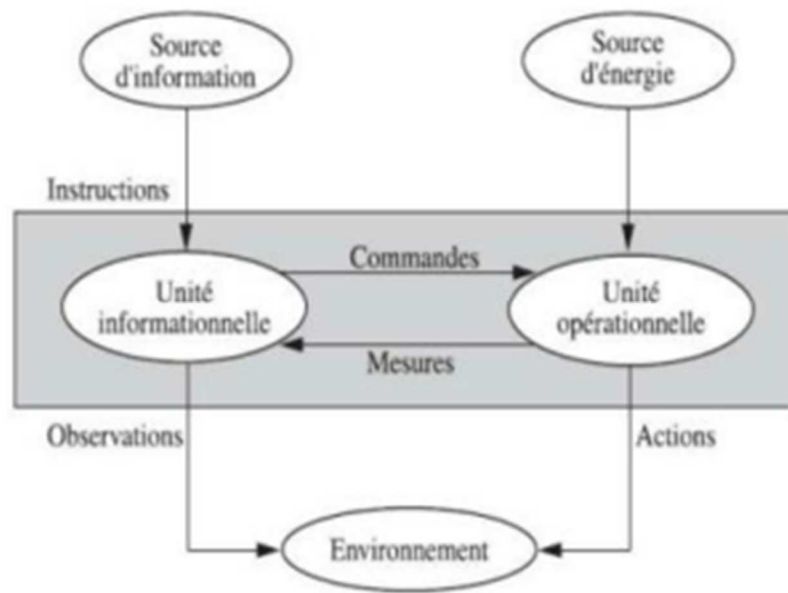


Figure 1.8 : Structure fonctionnelle d'un robot [1]

I.2.4.1. Unité informationnelle

L'unité informationnelle reçoit les instructions décrivant la tâche à accomplir, les mesures relatives à l'état interne de la structure mécanique qui constitue le bras manipulateur et les observations concernant son environnement. Elle élabore en conséquence les commandes de ses différentes articulations en vue de l'exécution de ses tâches. Les systèmes actuels fonctionnent en interaction permanente selon le cycle information décision- action. [1]

I.2.4.2. Unité opérationnelle

L'unité opérationnelle exerce les actions commandées en empruntant la puissance nécessaire à la source d'énergie. Cette partie, qui constitue le robot physique, intègre la structure mécanique (segments, articulations, architecture,...), les modules d'énergie (amplificateurs, variateurs, servovalves....), les convertisseurs d'énergie (moteurs, Vérins....), les chaînes cinématiques de transmission mécanique (réducteurs, vis à billes, courroies crantées), les capteurs de proprioceptifs placés sur chaque axe pour mesurer en permanence leur position et leur vitesse, et enfin l'effecteur, ou organe terminal, qui est en interaction avec l'environnement. [1]

I.2.5. Caractéristiques d'un robot industriel

Le choix d'un robot devrait être déterminé en fonction de l'usage prévu. Voici

quelques paramètres à considérer, le cas échéant :

- Espace (ou volume) de travail : Il s'agit du volume accessible par l'outil du robot, lequel dépend essentiellement de la géométrie du robot et de la longueur de ses segments.
- Positionnement absolu imprécis : Cette dépendance est liée à la souplesse du robot et des erreurs des modèles géométriques.
- Répétabilité : C'est l'erreur maximale de positionnement répété de l'outil en tout point de son espace de travail.
- Vitesse maximale de translation ou de rotation de chaque axe.
- Accélération maximale de chaque axe.
- Charge utile : Il s'agit de la charge maximale que le robot peut supporter sans compromettre la répétabilité et les performances dynamiques.

La figure (1.9) illustre une fiche technique d'un robot, mettant en évidence ses principales caractéristiques [2] :

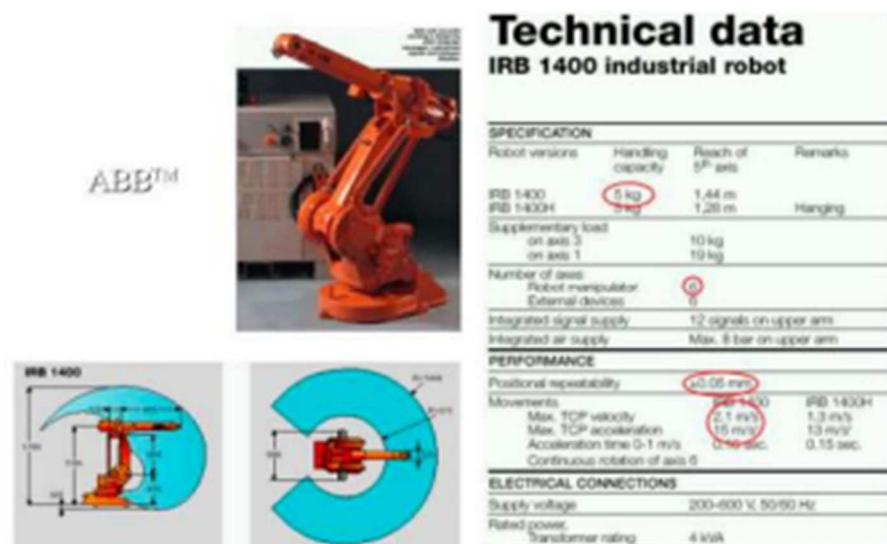


Figure 1.9 : Fiche technique d'un robot industriel [2]

I.3. Modélisation des robots industriels

Pour concevoir et contrôler des robots, il est nécessaire de calculer certains modèles mathématiques. Ces modèles sont établis selon les objectifs visés, les contraintes des tâches à réaliser et les performances recherchées. On distingue trois types : modèle géométrique, modèle cinématique et modèle dynamique. Obtenir ces différents modèles est une tâche ardue, dont la difficulté varie en fonction de la complexité de la chaîne cinématique et du

nombre de degrés de liberté du système. On présente dans ce chapitre quelques méthodes permettant d'établir ces modèles.

I.3.1. Modélisation géométrique

I.3.1.1. Description géométrique directe

En général, un robot est constitué de multiples bras ou éléments rigides interconnectés par des articulations considérées comme idéales, (c'est-à-dire sans jeu mécanique ni déformation), et équipés d'un effecteur final. Assurer la qualité de l'exécution de la tâche nécessite une maîtrise précise de la position de cet effecteur final. Il est donc crucial de développer un modèle géométrique cohérent avec le comportement géométrique de la structure du robot. Dans la littérature scientifique, le modèle géométrique est souvent défini à l'aide d'une séquence de transformations homogènes partant de la base du robot jusqu'à l'effecteur final. [6]

Le Modèle Géométrique Direct permet de connaître les mouvements de l'effecteur dans l'espace de la tâche en fonction des mouvements des articulations du robot. Il permet notamment de déterminer l'espace de travail du robot (domaine atteignable). Le MGD d'un robot est donc l'application f exprimant X en fonction de q :

$$X = f(q) = \begin{bmatrix} \text{position de l'effecteur dans } R_0 \\ \text{orientation de } R_n \text{ par rapport à } R_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} / R_0 \quad (1.1)$$

q : Étant le vecteur des variables articulaires tel que : $q = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]$ et les coordonnées opérationnelles sont définies par : $X = [X_1 \ X_2 \ \dots \ X_n]$.

I.3.1.2. Méthode de Denavit-Hartenberg

Dans les années 1950s, Jacques Denavit et Richard Hartenberg ont eu l'excellente idée de proposer une méthode simple et systématique pour placer des référentiels sur chaque lien d'un mécanisme sériel qui facilite énormément le calcul des matrices de transformation homogène [7]. La méthode Denavit-Hartenberg permet de décrire la transformation homogène entre deux solides adjacents présentant une configuration spécifique de repères pour la position et l'orientation. Cette méthode permet donc, sous certaines conditions, de calculer quatre inconnus au lieu de six. Considérons un robot série de chaîne cinématique

ouverte de la figure (1.10), pour la construction des repères il faut suivre la procédure suivante:

- Nommer les corps du robot de $j=0$ jusqu'à $j=n$ en commençant par la base du robot ;
- Nommer les articulations de $j=1$ à n (1 pour le premier degré de liberté et n pour le dernier) ;
- Pour $j=0$ jusqu'à $j=n-1$ fixer l'axe Z_j sur l'articulation $j+1$;
- L'origine du repère R_0 sera un point quelconque de l'axe Z_0 , de sorte que, X_0 et Y_0 forment un repère orthonormé direct ;
- Pour $j=1,2,\dots,n-1$, l'origine du repère est fixée à l'intersection de l'axe Z_j avec la droite perpendiculaire commune à Z_{j-1} et Z_j . Si les deux axes se coupent, l'origine est le point d'intersection. Si par contre les axes sont parallèles l'origine est l'origine du repère de l'articulation $j+1$;
- L'axe X_j est la droite perpendiculaire commune à Z_{j-1} et Z_j , et l'axe Y_j est choisi de sorte que le repère soit orthonormé direct [7].

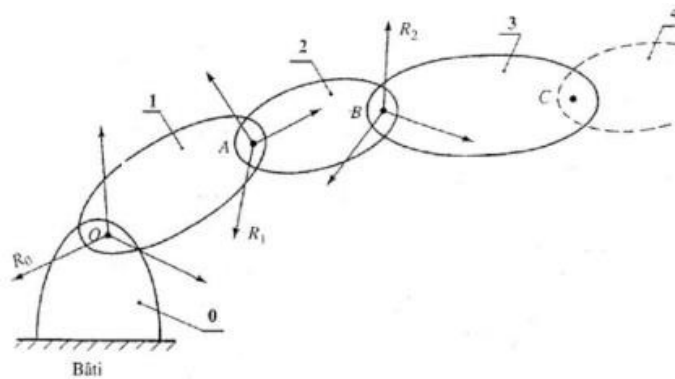


Figure 1.10 : Robot série à chaîne cinématique ouverte [8]

Le passage du repère R_{i-1} au repère R_i s'exprime en fonction des quatre paramètres géométriques suivant [7] comme montré sur la figure (I.11). Ces paramètres sont nommés paramètres de Denavit-Hartenberg ou paramètres D-H :

- α_j : angle entre les axes Z_{j-1} et Z_j correspondant à une rotation autour de X_j ;
- d_j : Distance entre X_{j-1} et X_j le long de Z_j ;
- θ_j : Angle entre les axes X_{j-1} et X_j correspondant à une rotation autour de Z_j ;
- a_j : Distance entre Z_{j-1} et Z_j le long de X_j .

En utilisant ces paramètres, la matrice de transformation homogène ${}^{j-1}T_j$ s'écrit [7] :

$${}^{j-1}T_j = \text{Rot}(Z_{j-1}, \theta_j) \times \text{Trans}(Z_{j-1}, d_j) \times \text{Trans}(X_j, a_j) \times \text{Rot}(X_j, \alpha_j) \quad (1.2)$$

Connaissant les matrices de rotation et de translation, les matrices de transformation s'écrivent [8] :

$${}^{j-1}T_j = \begin{bmatrix} C\theta_j & -S\theta_j & 0 & 0 \\ S\theta_j & C\theta_j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_j \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha_j & -S\alpha_j & 0 \\ 0 & S\alpha_j & C\alpha_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Finalement, nous obtenons la matrice de transformation du repère j-1 au repère j :

$${}^{j-1}T_j = \begin{bmatrix} C\theta_j & -S\theta_j C\alpha_j & S\theta_j S\alpha_j & a_j C\theta_j \\ S\theta_j & C\theta_j C\alpha_j & -C\theta_j S\alpha_j & a_j S\theta_j \\ 0 & S\alpha_j & C\alpha_j & d_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

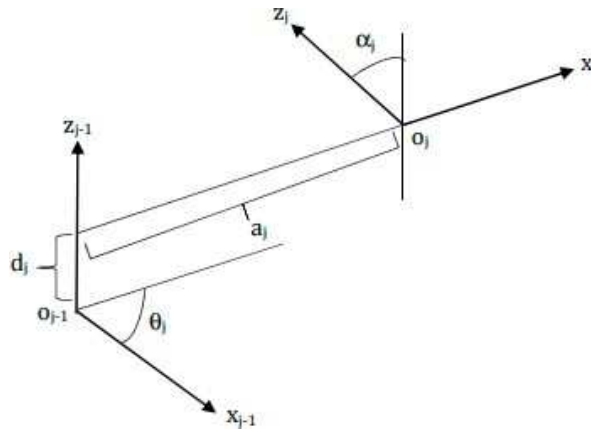


Figure 1.11 : Notation de Denavit-Hartenberg [8]

I.3.1.3. Modèle géométrique inverse d'un robot (MGI)

Il s'agit de déterminer les coordonnées articulaires q permettant d'obtenir une situation désirée pour l'organe terminal et spécifiée par les coordonnées opérationnelles. Il n'existe pas de méthode systématique d'inversion du modèle géométrique. Lorsqu'elle existe, la forme explicite, issue d'une inversion mathématique, qui donne toutes les solutions possibles au problème inverse (il y a rarement unicité de la solution) constitue le modèle géométrique inverse.

Donc, contrairement au MGD, le modèle géométrique inverse exprime les coordonnées articulaires en fonction des coordonnées opérationnelles, tel que :

$$q = f^{-1}(x) \quad (1.5)$$

Il existe un certain nombre de méthodes pour calculer le modèle géométrique inverse, notamment la méthode géométrique, la méthode de Pieper ou celle de Paul qui traite

séparément chaque cas particulier et qui convient pour la plupart des robots industriels. La figure (1.12) montre les solutions possibles d'un MGI pour un robot à 6 ddl. Dans cet exemple il y a 8 solutions possibles pour atteindre la position désirée de l'organe terminal.

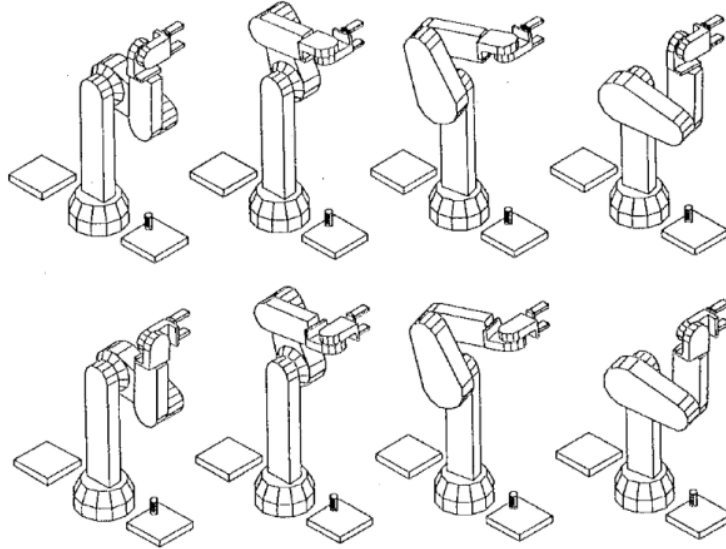


Figure 1.12. Exemple de solution d'un MGI pour un robot à 6 ddl

I.3.2. Modélisation cinématique

La modélisation cinématique permet de représenter la relation entre la vitesse de l'organe terminal et les vitesses articulaires, ainsi que leur inverse.

I.3.2.1. Modèle cinématique direct

Le Modèle Cinématique Direct (MCD) permet de calculer les composantes du torseur cinématique $\dot{X}$ à partir des vitesses articulaires dites généralisées $\dot{q}$, dérivées par rapport au temps des coordonnées généralisées q . Le torseur cinématique est défini par [9] :

$$\dot{X} = f(\dot{q}, q) \quad (1.6)$$

Le MCD fait intervenir la matrice Jacobienne, fonction de la configuration du robot, manipulateur. Le modèle est décrit par l'équation :

$$\dot{X} = J(q) \cdot \dot{q} \quad (1.7)$$

Où : $J(q)$ est la matrice jacobéenne. L'intérêt de la matrice Jacobienne est multiple :

- Elle est à la base du modèle différentiel inverse, permettant de calculer une solution locale des variables articulaires q_j connaissant les coordonnées opérationnelles X_j ;
- En statique, on utilise le Jacobien pour établir la relation liant les efforts exercés par

l'organe terminal sur l'environnement aux forces et couples des actionneurs ;

- Elle facilite le calcul des singularités et de la dimension de l'espace opérationnel accessible du robot.

I.3.2.2. Calcul la matrice Jacobéenne analytique

Le calcul indirect de la matrice Jacobienne analytique consiste à utiliser le modèle géométrique du robot manipulateur. Cette méthode de dérivation est facile à mettre en œuvre pour des robots à deux ou trois degrés de liberté dans le plan, mais pour des robots ayant plus de trois degrés de liberté la dérivation manuelle devient difficile.

La matrice Jacobienne peut s'obtenir en différenciant le modèle géométrique représenté par la fonction vectorielle $f(q)$.

$$J(q) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} & \frac{\partial f_1}{\partial q_2} & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial q_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial q_1} & \frac{\partial f_2}{\partial q_2} & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial q_n} \\ \vdots & \vdots & & & & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial q_1} & \frac{\partial f_n}{\partial q_2} & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial q_n} \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

Pour un robot à 6 axes avec 6 ddl, le modèle cinématique direct est donné par :

$$\begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} & \frac{\partial f_1}{\partial q_2} & \frac{\partial f_1}{\partial q_3} & \frac{\partial f_1}{\partial q_4} & \frac{\partial f_1}{\partial q_5} & \frac{\partial f_1}{\partial q_6} \\ \frac{\partial f_2}{\partial q_1} & \frac{\partial f_2}{\partial q_2} & \frac{\partial f_2}{\partial q_3} & \frac{\partial f_2}{\partial q_4} & \frac{\partial f_2}{\partial q_5} & \frac{\partial f_2}{\partial q_6} \\ \frac{\partial f_3}{\partial q_1} & \frac{\partial f_3}{\partial q_2} & \frac{\partial f_3}{\partial q_3} & \frac{\partial f_3}{\partial q_4} & \frac{\partial f_3}{\partial q_5} & \frac{\partial f_3}{\partial q_6} \\ \frac{\partial f_4}{\partial q_1} & \frac{\partial f_4}{\partial q_2} & \frac{\partial f_4}{\partial q_3} & \frac{\partial f_4}{\partial q_4} & \frac{\partial f_4}{\partial q_5} & \frac{\partial f_4}{\partial q_6} \\ \frac{\partial f_5}{\partial q_1} & \frac{\partial f_5}{\partial q_2} & \frac{\partial f_5}{\partial q_3} & \frac{\partial f_5}{\partial q_4} & \frac{\partial f_5}{\partial q_5} & \frac{\partial f_5}{\partial q_6} \\ \frac{\partial f_6}{\partial q_1} & \frac{\partial f_6}{\partial q_2} & \frac{\partial f_6}{\partial q_3} & \frac{\partial f_6}{\partial q_4} & \frac{\partial f_6}{\partial q_5} & \frac{\partial f_6}{\partial q_6} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \\ \dot{q}_5 \\ \dot{q}_6 \end{Bmatrix} \quad (1.9)$$

I.4. Conclusion du chapitre

Dans le présent chapitre nous avons exploré la définition générale des robots, leurs diverses catégories, caractéristiques, ainsi que les domaines d'application qui leur sont associés. Ces robots industriels jouent un rôle significatif dans le secteur industriel, contribuant à économiser du temps, de la main-d'œuvre et améliorant la précision, entre autres avantages.

Pour représenter un robot sériel avec n articulations, il est nécessaire de décrire son comportement à travers un modèle, ce processus étant appelé modélisation. En général, on cherche toujours le modèle le plus simple capable d'expliquer de manière satisfaisante le comportement du robot dans son domaine d'application, en particulier les modèles de transformation entre l'espace opérationnel et l'espace articulaire. On distingue ainsi : les modèles géométriques qui expriment la situation de l'organe terminal en fonction de la configuration du mécanisme et les modèles cinématiques qui expriment ses vitesses en fonction des vitesses articulaires.

Chapitre II

Maintenance des robots

Introduction

La maintenance est un facteur concurrentiel puisqu'elle influe sur la production, la qualité et les coûts. Elle est essentielle pour prolonger l'espérance de vie des entreprises et de leurs actifs. Elle devient de plus en plus importante comme l'une des fonctions clés de l'ensemble de l'industrie. La tendance vers des niveaux d'automatisation plus élevés et une complexité accrue des machines ne fera que renforcer la nécessité pour les organisations d'avoir une approche formelle et structurée des fonctions de maintenance.

II.1. Notions sur la maintenance

II.1.1. Définition de la maintenance

La maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise [10]. Notons ici que le terme « maintenir » revient à la surveillance et la prévention d'un bien qui remplit les tâches prédéfinies au préalable. Le terme « rétablir » revient aux actions correctives (remise en état) après la perte d'une fonction.

II.1.2. Les types de maintenance

II.1.2.1. La maintenance corrective

Selon la norme AFNOR la maintenance corrective est définie par « Ensemble des activités réalisées après la défaillance d'un bien ou la dégradation de sa fonction pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, au moins provisoirement, ces activités comportent notamment la localisation de la défaillance et son diagnostic, la remise en état avec ou sans modification, le contrôle du bon fonctionnement ». Que ce soit dans des milieux industriels, tertiaires, transports, les processus de maintenance ainsi de la qualité, sont identiques. Ce qui change entre le manufacturier et les processus continus, c'est la constante de temps de réalisation des différentes activités. [11]

II.1.2.2. La maintenance préventive

La maintenance préventive est la maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits, elle est destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien. La maintenance préventive se décompose en trois axes comme mentionné dans la figure (2.1).

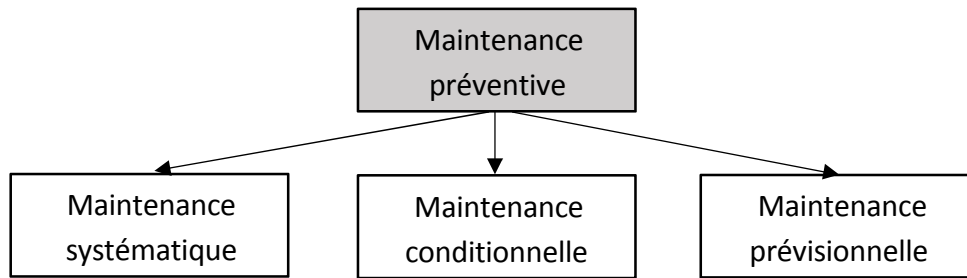


Figure 2.1 : Types de la maintenance préventive

II.1.2.2.1. 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.

II.1.2.2.2. La maintenance conditionnelle

Maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent.

II.1.2.2.3. La maintenance prévisionnelle

Maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien. (C'est dans cette maintenance prévisionnelle que l'on utilise les outils de CND : contrôles non destructifs), comme la thermographie infrarouge, l'analyse des lubrifiants, les mesures des vibrations ou des épaisseurs avec les ultra-sons).

II.1.3. Les activités de la maintenance

- **L'inspection** : C'est un contrôle de conformité réalisé en mesurant, observant, testant ou calibrant les caractéristiques significatives d'un bien.
- **La surveillance** : C'est l'activité exécutée manuellement ou automatiquement ayant pour objectif d'observer l'état réel d'un bien.
- **La réparation** : Ce sont les actions physiques exécutées pour rétablir la fonction requise d'un bien en panne.
- **Le dépannage** : Ce sont les actions physiques exécutées pour permettre à un bien en panne d'accomplir sa fonction requise pendant une durée limitée.

- **L'amélioration** : Ensemble des mesures techniques, administratives et de gestion, destinées à améliorer la sûreté de fonctionnement d'un bien sans changer sa fonction requise.
- **La modification** : Ensemble des mesures techniques, administratives et de gestion, destinées à changer la fonction d'un bien.
- **La révision** : Ensemble complet d'examens et d'actions réalisés afin de maintenir le niveau requis de disponibilité et de sécurité.
- **La reconstruction** : L'objectif de la reconstruction est normalement de donner à un bien une vie utile qui peut être plus longue que celle du bien d'origine.

II.2. Maintenance des robots

Les robots de peinture jouent un rôle fondamental dans l'automatisation des processus industriels, notamment dans les secteurs automobile, aéronautique et manufacturier. Grâce à leur précision et leur régularité, ils permettent une application uniforme des revêtements, réduisant ainsi le gaspillage de peinture et augmentant la qualité du produit fini [12]. Cependant, leur fonctionnement dans des environnements hostiles nécessite une stratégie de maintenance rigoureuse pour garantir performance et sécurité.

II.2.1. Enjeux de la maintenance des robots

Les environnements de peinture sont caractérisés par la présence de solvants, poussières, aérosols et températures variables. Ces conditions extrêmes peuvent affecter les capteurs, actionneurs et composants électroniques du robot [13]. De plus, les robots utilisés dans ces zones doivent être certifiés ATEX conformément à la directive 2014/34/UE, pour éviter tout risque d'explosion. [14]

II.2.2. Politiques de maintenance des robots de peinture

La maintenance des robots de peinture peut être classée en plusieurs catégories :

- **Maintenance préventive** : Elle comprend l'inspection régulière des joints, le nettoyage des buses, la lubrification des articulations, et la mise à jour des logiciels de contrôle. [15]
- **Maintenance corrective** : Elle intervient en cas de panne, par exemple le remplacement d'un moteur de pulvérisation ou d'un capteur défaillant. [15]
- **Maintenance prédictive** : Grâce à l'analyse des données collectées par les capteurs (pression, vibration, température), il est possible d'anticiper une défaillance imminente. [16]

II.2.3. Bonnes pratiques de maintenance

Pour garantir un fonctionnement optimal, les industriels appliquent des protocoles stricts de maintenance :

- Nettoyage fréquent de la cellule de peinture pour éviter l'accumulation de résidus ;
- Vérification des systèmes de ventilation et de filtration ;
- Calibration régulière des bras robotisés ;
- Formation continue des techniciens à l'utilisation des logiciels de diagnostic avancé. [17]

II.2.4. Considérations de sécurité et conformité

La sécurité des opérateurs et la conformité aux normes sont au cœur de toute intervention de maintenance. L'utilisation d'équipements certifiés ATEX est obligatoire dans les environnements explosifs. De plus, les entreprises doivent se conformer aux normes ISO relatives aux robots industriels pour éviter les risques mécaniques et électriques.

II.3. Outils utilisés pour la gestion de la maintenance des robots

II.3.1. Méthode ABC de Pareto

II.3.1.1. Définition

Dans un service d'entretien, les tâches sont nombreuses et les équipements parfois réduits. De plus, les technologies les plus évoluées en matière de maintenance coûtent cher, et ne doivent pas être appliquées sans discernement. Il convient, par conséquent, de s'organiser de façon efficace et rationnelle. L'analyse ABC ou de 'Pareto' permet d'y remédier. Ainsi, un classement des coûts par rapport aux types de pannes donne des priorités sur les interventions à mener

II.3.1.2. Présentation de la méthode ABC de Pareto

La méthode ABC de Pareto est une méthode de choix qui permet de déceler, entre plusieurs problèmes, ceux qui doivent être abordés en priorité. Une mise sous forme graphique permet de distinguer de façon claire les éléments importants de ceux qui le sont moins, ce qui n'est pas toujours évident. Elle consiste à classer les pannes par ordre décroissant de coûts (heures ou argent), chaque panne se rapporte à une machine, ou rubrique. Puis à établir un graphique faisant correspondre les pourcentages de coûts cumulés aux pourcentages de types de pannes cumulés. On obtient ainsi un graphe (figure 2.2) montrant trois zones :

- Zone A : Dans la majorité des cas, on constate qu'environ 20 % des pannes représente 80 % des coûts, ceci constitue la zone de priorités.
- Zone B : Dans cette zone, les 30 % de pannes suivantes ne coûtent que 15 % des coûts.
- Zone C : Dans cette zone, les 50 % de pannes restantes ne reviennent qu'à 5 % des coûts.

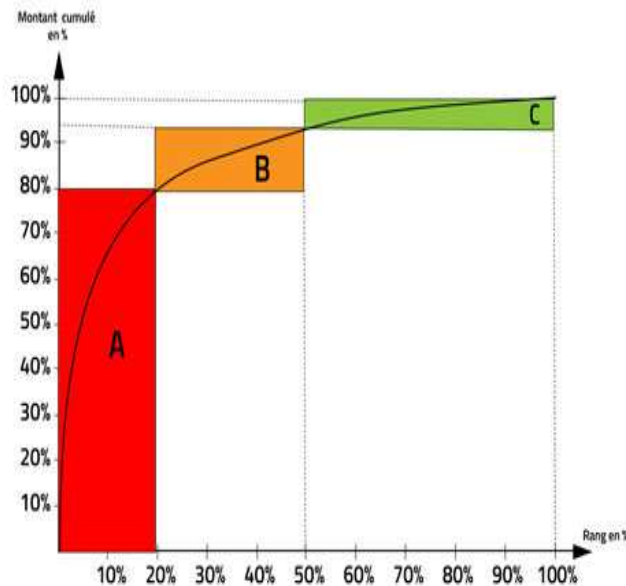


Figure 2.2. Représentation graphique de la courbe de Pareto

II.3.2. La méthode AMDEC

II.3.2.1. Présentation

L'AMDEC, en ce qui concerne la maintenance, est un outil d'analyse de tous types de systèmes quels qu'ils soient, complexes ou non, et qui s'intéresse à la manière dont un constituant peut être le siège d'une dérive (le mode de défaillance), de la conséquence de celle-ci (les effets) et de son importance qualitativement chiffrée (la criticité). [18]

II.3.2.2. Définition

L'AMDEC est une analyse impliquant une réflexion menant au constat d'avarie(s) dont chaque composant peut être le siège. Ensuite, chacune de ces dérives est évaluée par des critères dont le produit exprime la criticité. Chaque réflexion, allant du composant à l'indice de criticité de la défaillance dont il peut être la cause, progresse par étapes : fonction(s), mode(s), cause(s), effet(s) et détection(s). [19]

II.3.2.2.1. Les fonctions

Les fonctions d'un composant sont des actions souvent discrètes par rapport au système complet mais elles permettent la réalisation de la fonction globale. Un composant peut avoir plusieurs fonctions (roulement : guider un arbre en rotation, diminuer les frottements...). Lors de cette étape, l'emploi de verbes à l'infinitif est recommandé car il est plus précis de désigner une fonction par son action : guider, diminuer, pour reprendre l'exemple précédent. [18]

II.3.2.2.2. Les défaillances

L'AMDEC a pour but premier de déceler les défaillances probables ou les points faibles. Il est donc naturel que les événements soient davantage précisés. Ainsi considérerons-nous qu'une défaillance se caractérise par son mode d'apparition, sa cause et ses effets sur le système ainsi que sur les autres composants. La quantification de la défaillance étant précisée, l'évaluation de sa criticité s'obtient par le produit de trois critères chiffrés : détection, occurrence et sévérité. [18]

a)- Les modes de défaillance

Un mode de défaillance est la manière dont un composant peut subir une anomalie au point de ne pouvoir assurer sa part de la fonction globale (absence de la fonction, perte, dégradation, déclenchement intempestif).

b)- Les effets

Il est important pour la précision de l'AMDEC de répartir les effets d'une défaillance selon deux catégories :

- Les effets sur le système. Ils sont les conséquences directes du dysfonctionnement sur l'ensemble du dispositif ;
- Les effets sur d'autres composants. Logiquement, ces autres composants sont fonctionnellement proches de l'organe en question. [18]

d)- La détection

La détection, indiquée dans la dernière colonne de l'analyse qualitative est le moyen par lequel un dysfonctionnement est constaté. Cette constatation peut être faite par le technicien comme par l'opérateur lui-même. Dans cette colonne « détection » ne figurent que des faits constatables : disjonction, blocage, rupture, élévation de température, bruit, fuite, dégagement de fumée, perte de la fonction...etc.

II.3.2.2.3. Les critères

La définition de ces critères doit être absolument rigoureuse pour ne laisser aucune place à l'interprétation afin que quiconque les utilise de manière identique. Généralement, chaque critère reçoit un indice sur une échelle de 1 à 4 en fonction de son importance. Cependant, il est tout à fait logique de se détourner de cet ordinaire et augmenter ou diminuer le découpage selon ses propres besoins ou objectifs. Ainsi, une entreprise qui privilégierait la fiabilité pourrait découper plus finement le critère « occurrence » en 5, 6, 7 niveaux ou plus. L'indispensable étant que leur définition soit, dans tous les cas, exempte d'approximation. [18]

On distingue trois critères différents : le critère D ou N qui prend en considération l'aptitude à la détection de la panne (Tableau 2.1), le critère O ou F qui prend en considération l'occurrence de la panne (Tableau 2.2) et enfin le critère G qui considère la gravité de la panne (Tableau 2.3). Le produit de ces trois critères permet d'évaluer la criticité C de la panne et ainsi situer son ampleur (Tableau 2.4).

La figure (2.3) montre les huit étapes pour entreprendre une analyse AMDEC.

Tableau 2.1. Evaluation du critère D ou N

Niveau	Définition
1	Elémentaire. Signal avant-coureur aisément détectable par l'opérateur. Défaillance possible à éviter.
2	Aisée. Apparition d'une défaillance mais recherche et action corrective évidente
3	Moyenne. Apparition d'une défaillance. Recherche et action corrective menées par un technicien de maintenance.
4	Délicate. Défaillance difficilement détectable et nécessitant démontage et techniciens spécialisés.

Tableau 2.2. Evaluation du critère O ou F

Niveau	Définition
1	Faible. Moins de 1 fois par semestre
2	Possible. En moyenne 1 fois par mois
3	Certaine. En moyenne 1 fois par semaine
4	Forte. Possible 1 fois par jour

Tableau 2.3. Evaluation du critère G

Niveau	Définition
1	Mineure. Défaillance ne provoquant pas d'arrêt de production supérieur à 5 minutes. Aucune dégradation ni production défectueuse.
2	Moyenne. Défaillance provoquant un arrêt de 5 à 30 minutes et nécessitant une réparation sur site.
3	Importante. Défaillance provoquant un arrêt de 30 à 60 minutes et/ou nécessitant le remplacement d'un matériel défectueux.
4	Grave. Défaillance provoquant un arrêt supérieur à 1 heure et/ou impliquant des risques potentiels pour la sécurité des personnes et des biens.

Tableau 2.4. Evaluation de la criticité C

Niveau	Définition
C<9	Faible. Aucun problème particulier. Surveillance habituelle.
9<C<25	Acceptable. Nécessite une surveillance particulière et/ou une révision de la politique de maintenance
C>25	Forte. Surveillance accrue. Remise en cause de la maintenance. Eventuellement, arrêt pour améliorations.
S = 4	Dangereuse. Révision de la politique de maintenance et/ou modifications du système. Arrêt si sécurité menacée.



Figure 2.3 : La démarche d'une AMDEC [20]

II.3.3. Etude de la fiabilité

II.3.3.1. Définition

D'après la norme AFNOR X 60-010 :

« La fiabilité est l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise dans des conditions d'utilisation et pour un intervalle de temps donnés. » Le terme de fiabilité est utilisé comme une caractéristique indiquant une probabilité ou une proportion de succès. Autrement dit, est considéré comme fiable un système dont la probabilité de connaître une défaillance est faible. Le nombre de défaillances par unité de temps ou d'usage est donc le critère d'évaluation de la fiabilité. [21]

II.3.3.2. Expressions mathématiques des lois de fiabilité

On désigne par T la variable aléatoire qui, à tout dispositif choisi au hasard dans la population, associe son temps de bon fonctionnement ou sa durée de vie avant une défaillance. Pour simplifier, l'origine des temps $t = 0$ est choisie lorsque le dispositif est mis en marche pour la première fois. Notre variable T est donc une variable aléatoire continue à valeurs dans $[0 ; +\infty[$. Nous distinguons quatre lois qui permettent l'évaluation de la fiabilité d'un système :

- La densité de probabilité de T , notée $f(t)$ est appelée la densité de défaillance ;
- Le taux de défaillance ; noté $\lambda(t)$ qui reflète la vitesse de survenue des pannes ;
- Fonction de défaillance du système : On appelle fonction de défaillance la fonction $F(t)$ définie pour tout $(t \geq 0)$;
- Fonction de fiabilité du système : $R(t)$ est la probabilité que le système n'ait pas de défaillance avant l'instant t ;

$$R(t_i) = \text{Prob}(T > t_i) = 1 - \text{Prob}(T \leq t_i) = 1 - F(t_i) \quad (2.1)$$

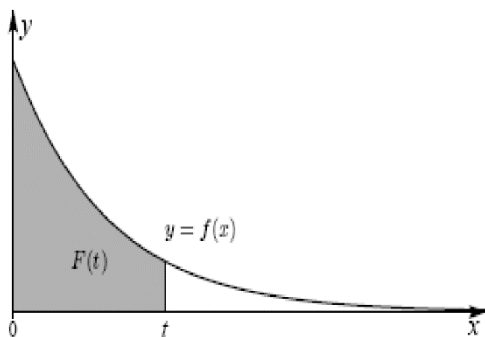


Figure 2.4 : Fonction de défaillance $F(t)$

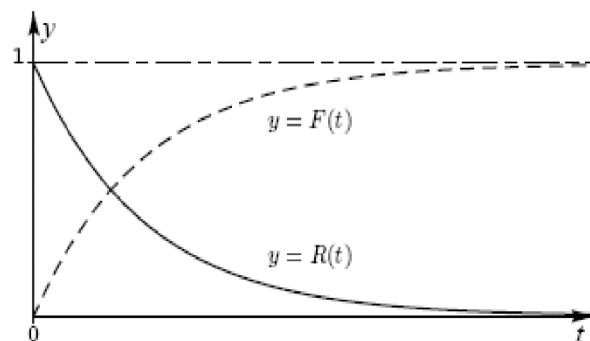


Figure 2.5 : Fonction de fiabilité $R(t)$

Par hypothèse, la probabilité conditionnelle de défaillance entre (t) et $(t + dt)$ est de la forme :

$$\lambda(t).dt = \frac{F(t+dt) - F(t)}{R(t)} = \frac{dF(t)}{1 - F(t)} \quad (2.2)$$

On intègre les deux membres de l'expression, avec la condition initiale : $F(t = 0) = 0$. Ce qui donne :

$$\begin{aligned} \int_0^t \lambda(t).dt &= \int_0^t \frac{dF(t)}{1 - F(t)} \Rightarrow -\int_0^t \lambda(t).dt = -\int_0^t \frac{dF(t)}{1 - F(t)} \\ &\Rightarrow -\int_0^t \lambda(t).dt = [\ln(1 - F(t))]_0^t \\ &\Rightarrow -\int_0^t \lambda(t).dt = \ln(1 - F(t)) \\ &\Rightarrow -e^{\int_0^t \lambda(t).dt} = 1 - F(t) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Finalement, on obtient les trois lois fondamentales liées à la fiabilité :

$$\begin{aligned} R(t) &= e^{-\int_0^t \lambda(t).dt} \\ F(t) &= 1 - R(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t).dt} \\ f(t) &= \lambda(t) \cdot R(t) = \lambda(t) \cdot e^{-\int_0^t \lambda(t).dt} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Pour évaluer cette fiabilité, il est donc nécessaire de recourir à certains outils mathématiques de calcul de probabilité, appelés modèles de fiabilité. Plusieurs modèles de fiabilité existent dans la littérature, nous allons nous limiter au modèle le plus puissant nommé modèle de Weibull.

II.3.3.3. Modèle de Weibull

Ce mathématicien et ingénieur suédois a choisi une loi sous forme de puissance (calcul facile d'intégrales) avec 3 paramètres (β, γ, η) qui permettent d'ajuster toutes sortes de résultats expérimentaux et opérationnels. La loi de Weibull convient quel que soit le taux de défaillance. Grâce à sa souplesse elle s'adapte à toutes les valeurs de $\lambda(t)$ mais permet en plus de déterminer dans quelle période de sa vie (jeunesse, maturité, obsolescence) se trouve le système étudié. Outre son adaptabilité à toute situation, le modèle de Weibull livre d'autres informations en plus du niveau de fiabilité d'un dispositif à un instant t . Les trois paramètres (β, γ, η) de son expression, permettent une analyse plus fine et donc une image plus précise de l'état du système.

- Le paramètre de forme β (avec : $\beta > 0$) fournit des indications à la fois qualitatives et quantitatives du taux de défaillance instantané ;
- Le paramètre de position γ (avec : $-\infty < \gamma < +\infty$) indique la date de début des défaillances ;
- Le paramètre d'échelle η (avec : $\eta > 0$) permet la détermination de la MTBF et de l'écart type de la distribution à l'aide de la table de la loi de Weibull.

Ces trois paramètres peuvent être déterminés par une méthode graphique utilisant un papier appelé papier de Weibull ou l'utilisation de logiciels de fiabilité comme nous allons le faire dans ce mémoire.

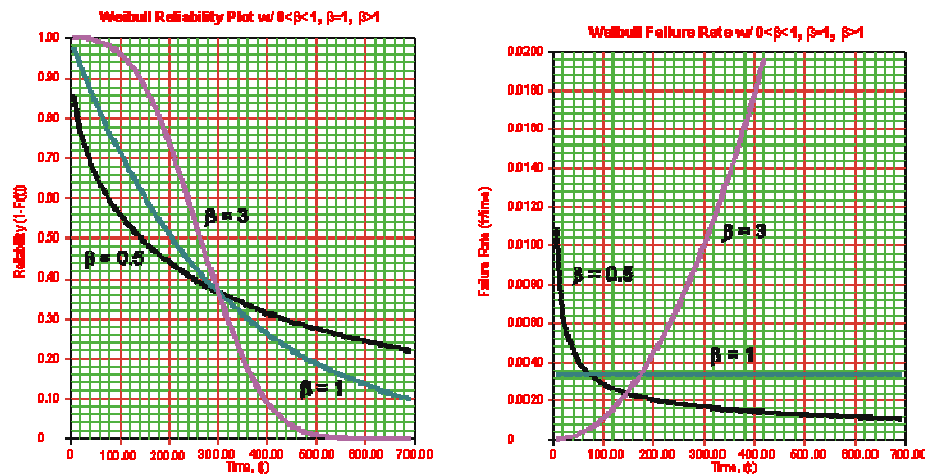


Figure 2.6 : Allures de $R(t)$ et de $\lambda(t)$ pour différentes valeurs de β

Ainsi les quatre lois de fiabilité précédentes se résument pour le modèle de Weibull à :

- La densité de probabilité est donnée par l'expression suivante :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta - 1} \cdot e^{-\left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta}} \quad (2.5)$$

- La fonction de répartition est donnée par l'expression suivante :

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta}} \quad (2.6)$$

- La fiabilité correspondante est donc $R(t) = 1 - F(t)$:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta}} \quad (2.7)$$

- Le taux de défaillance instantané est donné par l'expression :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta - 1} \quad (2.8)$$

$$MTBF = A \eta + \gamma \quad (2.9)$$

Où : A et B sont des paramètres qui peuvent être déterminés d'après la table de la loi de Weibull

II.4. Conclusion du chapitre

La maintenance des robots de peinture constitue un enjeu stratégique majeur dans l'industrie moderne. En assurant un fonctionnement fiable, précis et sécurisé de ces systèmes automatisés, elle contribue directement à l'efficacité de la production, à la qualité des produits finis et à la réduction des coûts d'exploitation. Face aux conditions extrêmes dans lesquelles évoluent les robots de peinture : atmosphères explosives, produits chimiques corrosifs, variations thermiques, il est impératif de mettre en place une politique de maintenance rigoureuse, intégrant les dimensions préventive, corrective et prédictive. Ces approches permettent non seulement de prolonger la durée de vie des équipements, mais aussi d'anticiper les pannes critiques, évitant ainsi les interruptions de production coûteuses.

Dans cet esprit nous avons présenté dans ce chapitre les principaux outils que nous allons utiliser dans ce mémoire pour étudier la maintenance d'un robot de peinture. L'approche et les fondements mathématiques de chaque outil ont été présentés. Ces trois outils permettront ainsi de procéder à une approche qualitative et quantitative pour 'évaluation de la maintenance du robot de peinture.

Chapitre III

Modélisation géométrique et cinématique d'un robot de peinture de type Roby 6x

Introduction

La modélisation des robots exige la formulation de divers modèles mathématiques incluant les modèles géométrique, cinématique et dynamique. Dans ce chapitre nous allons procéder à la modélisation géométrique et cinématique d'un robot de peinture de la marque Roby à six degrés de liberté. Les modélisations seront réalisées conformément aux fondements mathématiques décrites au chapitre 1. Une simulation sous MATLAB est réalisée en utilisant la boîte à outil Peter Corke, elle permet de connaître en temps réel la position de l'organe terminal sans avoir recours à de longs calculs. Rappelons que la détermination de ces modèles est indispensable pour la programmation et la commande du robot.

III.1. Présentation du robot Roby 6x

III.1.1. Description du robot

Roby est un robot anthropomorphe à six axes indiqué pour la peinture automatique avec du liquide ou des poudres et pour la pulvérisation en général. Il a été conçu pour opérer dans des milieux particulièrement hostiles, où on se sert de systèmes électrostatiques. On l'utilise dans différents secteurs et sur différents matériaux tels que : bois, plastique, métal, céramique, ...etc. On peut également l'utiliser pour pulvériser des produits servant à sceller, de la colle, de la résine pour renforcer ou des produits anti-adhérents sur moules. [22]

La figure (3.1) montre des photos du robot Roby 6x en action, tandis que la figure (3.2) montre son schéma indiquant ses principales dimensions ainsi que son espace de travail. Le tableau (3.1) montre les principales caractéristiques de ce robot sous ses trois versions.



Figure 3.1. Robot Roby 6x en action

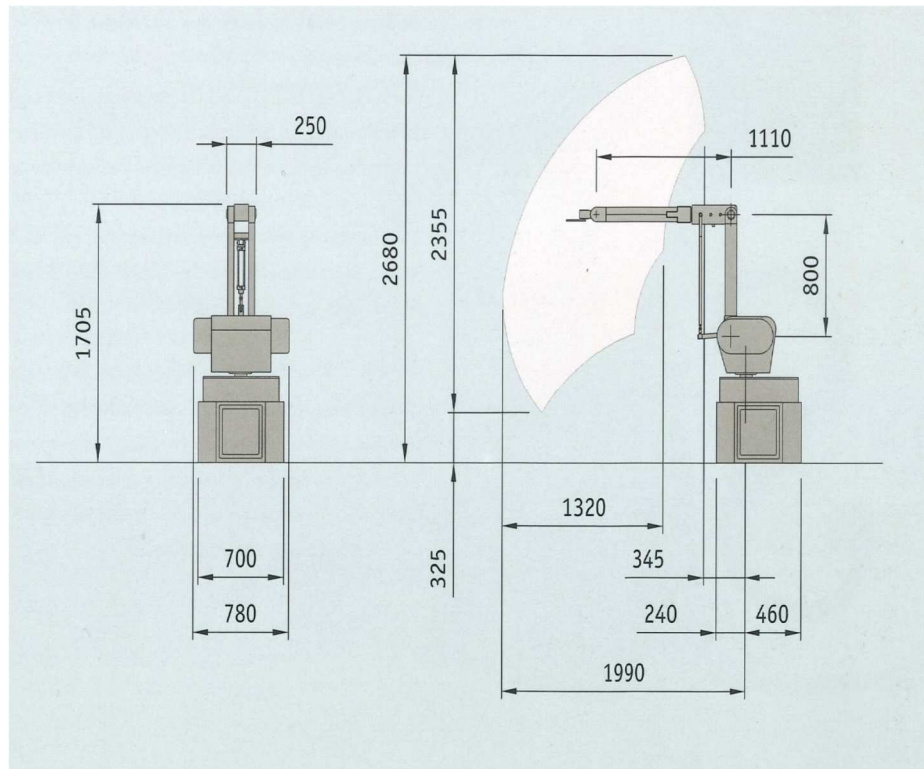


Figure 3.2. Schéma du robot Roby 6x

Tableau 3.1. Caractéristiques du robot Roby 6x

Roby 6	ST	G/GM	C
Nombre d'axes	6	6	6
Axes poignée	3	3	3
Vitesse maximale	1,5 m/sec	1,5 m/sec	1,5 m/sec
Charge maximale	3 kg	3 kg	3 kg
Répétabilité	3 mm	3 mm	3 mm
Poids	450 kg	800 kg	710 kg

III.1.2. Programmation du robot Roby 6x

La programmation se fait à l'aide du mode de programmation par auto apprentissage direct. En guidant le robot manuellement, l'opérateur effectue un cycle complet de peinture sur une pièce échantillon, l'ordinateur de contrôle mémorise toutes les trajectoires et les commandes effectuées pour pouvoir les répéter ensuite fidèlement durant la phase de peinture. Le robot est extrêmement maniable durant toutes les phases et les positions de programmation. Ce système permet de contrôler le programme mémorisé durant la phase en cours et rend le robot extrêmement simple à utiliser. La figure (3.3) montre un opérateur en phase d'apprentissage

du robot Roby 6x. La mémorisation et la gestion des programmes se fait à l'aide du micro-ordinateur incorporé dans le contrôle. La version standard permet de mémoriser 9999 programmes différents. La visualisation des programmes se fait localement avec possibilité de visualiser graphiquement les pièces à peindre.



Figure 3.3. Robot Roby 6x en phase d'apprentissage

III.2. Modélisation géométrique du robot Roby 6x

III.2.1. Repérage des articulations et détermination des paramètres D-H

La première phase de la modélisation géométrique est le repérage des articulations du robot. Les repères sont donc mis sur le schéma équivalent du robot conformément aux règles de Denavit-Hartenberg décrites au chapitre 1 comme montré par la figure (3.4).

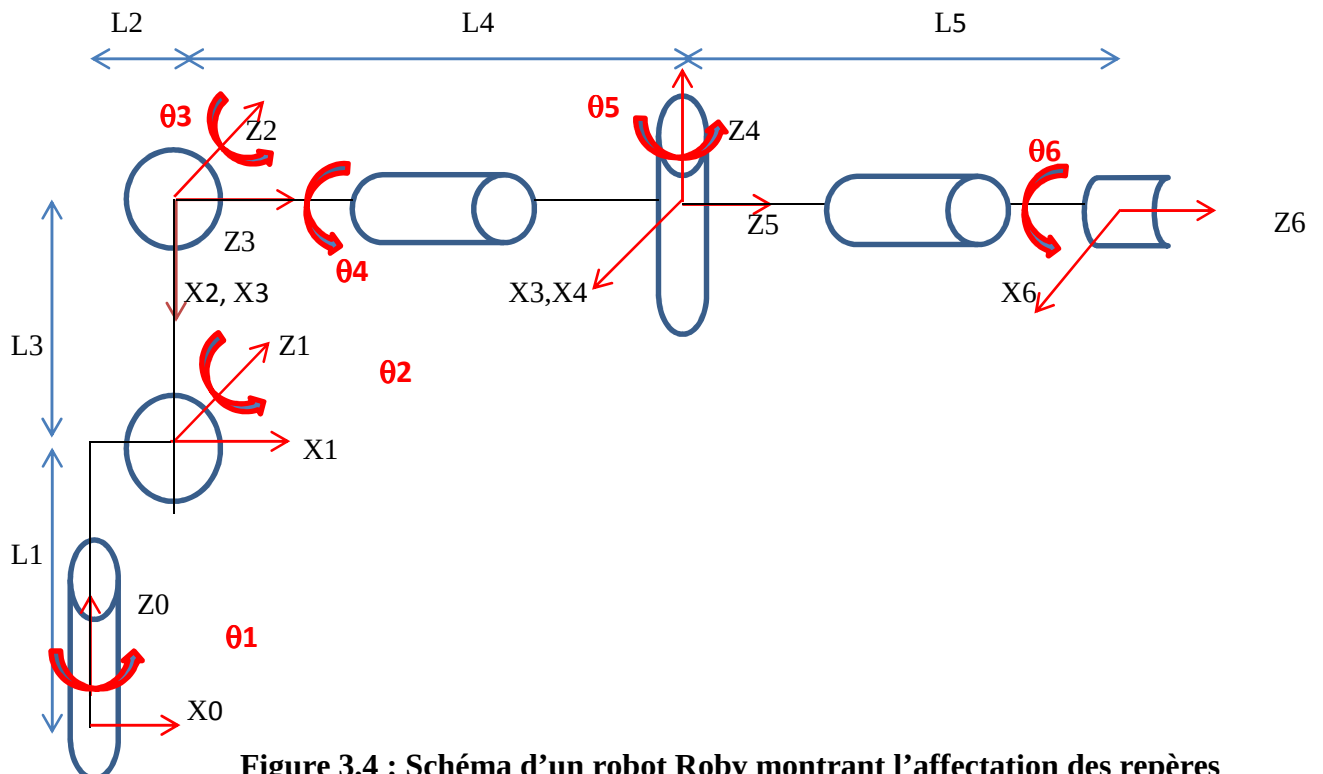


Figure 3.4 : Schéma d'un robot Roby montrant l'affectation des repères

A partir de la figure (3.4), nous avons calculé les six paramètres de Denavit-Hanterberg correspondant à notre robot. Ces paramètres permettront par la suite au calcul des matrices de transformation homogène et du modèle géométrique direct. Les paramètres avec étoiles sont les coordonnées articulaires du robot (tableau 3.2).

Tableau 3.2. Paramètres de Denavit-Hanterberg du robot Roby 6x

Articulation (J)	θ_j	α_j	a_j	d_j
1	θ_1	$-\pi/2$	L1	L2
2	$\pi/2 + \theta_2$	0	L3	0
3	θ_3	$\pi/2$	0	0
4	$-\pi/2 + \theta_4$	$\pi/2$	0	L4
5	θ_5	$-\pi/2$	0	0
6	θ_6	0	0	L5

III.2.2. Modélisation géométrique directe du robot

À partir du tableau D-H, les matrices ${}^jT_{j-1}$ de taille $[4 \times 4]$ représentent la transformation nécessaire pour passer du repère $[R_{j-1}]$ au repère $[R_j]$. Pour notre cas nous avons six matrices à calculer. Nous allons donc remplacer les paramètres D-H calculés dans la matrice de transformation homogène décrite dans le chapitre 1. Les six matrices de transformation homogène correspondant au robot Roby 6x sont donc les suivantes :

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 & L2 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & L2 \sin \theta_1 \\ 0 & -1 & 0 & L1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} -\sin \theta_2 & -\cos \theta_2 & 0 & -L3 \sin \theta_2 \\ \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & L3 \cos \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & \sin \theta_3 & 0 \\ \sin \theta_3 & 0 & -\cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} \sin \theta_4 & 0 & -\cos \theta_4 & 0 \\ -\cos \theta_4 & 0 & -\sin \theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & 0 & -\sin \theta_5 & 0 \\ \sin \theta_5 & 0 & \cos \theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$${}^5_6T = \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & 0 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Finalelement nous obtenons la matrice de transformation homogène du robot en multipliant de manière successive les matrices associées aux repères R0 jusqu'à R6. Cette matrice global est nommée modèle géométrique direct du robot. D'une manière pratique elle permet de déterminer la position de l'organe terminale en connaissant les coordonnées articulaires. Rappelons que la matrice (3*3) à gauche représente l'orientation de l'organe terminale, tandis que le vecteur (3*1) en rouge est son vecteur de position.

$${}^0_6T = {}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T \cdot {}^3_4T \cdot {}^4_5T \cdot {}^5_6T$$

$${}^0_6T = \begin{bmatrix} A^{11} & A^{12} & A^{13} & A^{14} \\ A^{21} & A^{22} & A^{23} & A^{24} \\ A^{31} & A^{32} & A^{33} & A^{34} \\ A^{41} & A^{42} & A^{43} & A^{44} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Nous aboutirons don aux éléments du modèle géométrique direct suivants :

$$A_{11} = -\cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \sin \theta_4 \cos \theta_5 \cos \theta_6 - \cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 \sin \theta_4 \cos \theta_5 \cos \theta_6 + \sin \theta_1 \cos \theta_4 \cos \theta_5 \cos \theta_6 - \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \sin \theta_4 \cos \theta_6 + \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 \sin \theta_5 \cos \theta_6 - \cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \cos \theta_4 \sin \theta_6 - \cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_2 \cos \theta_4 \sin \theta_6 - \sin \theta_1 \sin \theta_4 \sin \theta_6.$$

$$A_{12} = \cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \sin \theta_4 \cos \theta_4 \sin \theta_6 + \cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 \sin \theta_4 \cos \theta_5 \sin \theta_6 - \sin \theta_1 \cos \theta_4 \cos \theta_5 \sin \theta_6 + \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \sin \theta_5 \sin \theta_6 - \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 \sin \theta_5 \sin \theta_6 - \cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \cos \theta_4 \cos \theta_6 - \cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_2 \cos \theta_4 \cos \theta_6 - \sin \theta_1 \sin \theta_4 \cos \theta_6.$$

$$A_{13} = \cos\theta_1 \sin\theta_2 \cos\theta_3 \sin\theta_4 \sin\theta_5 + \cos\theta_1 \cos\theta_2 \sin\theta_3 \sin\theta_4 \sin\theta_5 + \sin\theta_1 \cos\theta_4 \sin\theta_5 - \cos\theta_1 \sin\theta_2 \sin\theta_3 \cos\theta_5 + \cos\theta_1 \cos\theta_2 \cos\theta_3 \cos\theta_5.$$

$$A_{14} = L_5 \cos\theta_1 \sin\theta_2 \cos\theta_3 \sin\theta_4 \sin\theta_5 + L_5 \cos\theta_1 \cos\theta_2 \sin\theta_3 \sin\theta_4 \sin\theta_5 + L_5 \sin\theta_1 \cos\theta_4 \sin\theta_5 - L_5 \cos\theta_1 \sin\theta_2 \sin\theta_3 \cos\theta_5 + L_5 \cos\theta_1 \cos\theta_2 \cos\theta_3 \cos\theta_5 - L_4 \cos\theta_1 \sin\theta_2 \sin\theta_3 + L_4 \cos\theta_1 \cos\theta_2 \cos\theta_3 - L_3 \sin\theta_2 \cos\theta_1 + L_2 \cos\theta_1.$$

$$A_{21} = -\sin\theta_1 \sin\theta_2 \cos\theta_3 \sin\theta_4 \cos\theta_5 \cos\theta_6 - \sin\theta_1 \cos\theta_2 \sin\theta_3 \sin\theta_4 \cos\theta_5 \cos\theta_6 - \cos\theta_1 \cos\theta_4 \cos\theta_5 \cos\theta_6 - \sin\theta_1 \sin\theta_2 \sin\theta_3 \sin\theta_5 \cos\theta_6 + \sin\theta_1 \cos\theta_2 \cos\theta_3 \sin\theta_5 \cos\theta_6 - \sin\theta_1 \sin\theta_2 \cos\theta_3 \cos\theta_4 \sin\theta_6 - \sin\theta_1 \cos\theta_2 \sin\theta_3 \cos\theta_4 \sin\theta_6 + \cos\theta_1 \sin\theta_4 \sin\theta_6.$$

$$A_{22} = \sin\theta_1 \sin\theta_2 \cos\theta_3 \sin\theta_4 \cos\theta_5 \sin\theta_6 + \sin\theta_1 \cos\theta_2 \sin\theta_3 \sin\theta_4 \cos\theta_5 \sin\theta_6 + \cos\theta_1 \cos\theta_4 \cos\theta_5 \sin\theta_6 + \sin\theta_1 \sin\theta_2 \sin\theta_3 \sin\theta_5 \sin\theta_6 - \sin\theta_1 \cos\theta_2 \cos\theta_3 \sin\theta_5 \sin\theta_6 - \sin\theta_1 \sin\theta_2 \cos\theta_3 \cos\theta_4 \cos\theta_6 - \sin\theta_1 \cos\theta_2 \sin\theta_3 \cos\theta_4 \cos\theta_6 + \cos\theta_1 \sin\theta_4 \cos\theta_6.$$

$$A_{23} = \sin\theta_1 \sin\theta_2 \cos\theta_3 \sin\theta_4 \sin\theta_5 + \sin\theta_1 \cos\theta_2 \sin\theta_3 \sin\theta_4 \sin\theta_5 + \cos\theta_1 \cos\theta_4 \sin\theta_5 - \sin\theta_1 \sin\theta_2 \sin\theta_3 \cos\theta_5 + \sin\theta_1 \cos\theta_2 \cos\theta_3 \cos\theta_5.$$

$$A_{24} = L_5 \sin\theta_1 \sin\theta_2 \cos\theta_3 \sin\theta_4 \sin\theta_5 + L_5 \sin\theta_1 \cos\theta_2 \sin\theta_4 \sin\theta_3 \sin\theta_5 + L_5 \cos\theta_1 \cos\theta_4 \sin\theta_5 - L_5 \sin\theta_1 \sin\theta_2 \sin\theta_3 \cos\theta_5 + \sin\theta_1 \cos\theta_2 \cos\theta_3 \cos\theta_5 - L_4 \sin\theta_1 \sin\theta_2 \sin\theta_3 + L_4 \sin\theta_1 \cos\theta_2 \cos\theta_3 - L_3 \sin\theta_2 \sin\theta_1 + L_2 \sin\theta_1.$$

$$A_{31} = -\cos\theta_2 \cos\theta_3 \sin\theta_4 \cos\theta_5 \cos\theta_6 + \sin\theta_2 \sin\theta_3 \sin\theta_4 \cos\theta_5 \cos\theta_6 - \cos\theta_2 \sin\theta_3 \sin\theta_5 \cos\theta_6 - \sin\theta_2 \cos\theta_3 \sin\theta_5 \cos\theta_6 - \cos\theta_2 \cos\theta_3 \cos\theta_4 \sin\theta_6 + \sin\theta_2 \sin\theta_3 \cos\theta_4 \sin\theta_6.$$

$$A_{32} = \cos\theta_2 \cos\theta_3 \sin\theta_4 \cos\theta_5 \sin\theta_6 - \sin\theta_2 \sin\theta_3 \sin\theta_4 \cos\theta_5 \sin\theta_6 + \cos\theta_2 \sin\theta_3 \sin\theta_5 \sin\theta_6 + \sin\theta_2 \cos\theta_3 \sin\theta_5 \sin\theta_6 - \cos\theta_2 \cos\theta_3 \cos\theta_4 \cos\theta_6 + \sin\theta_2 \sin\theta_3 \cos\theta_4 \cos\theta_6.$$

$$A_{33} = \cos\theta_2 \cos\theta_3 \sin\theta_4 \sin\theta_5 - \sin\theta_2 \sin\theta_3 \sin\theta_4 \sin\theta_5 - \cos\theta_2 \sin\theta_3 \cos\theta_5 - \sin\theta_2 \cos\theta_3 \cos\theta_5$$

$$A_{34} =$$

$$L_5 \cos\theta_2 \cos\theta_3 \sin\theta_4 \sin\theta_5 - L_5 \sin\theta_2 \sin\theta_3 \sin\theta_4 \sin\theta_5 - L_5 \cos\theta_2 \sin\theta_3 \cos\theta_5 - L_5 \sin\theta_2 \cos\theta_3 \cos\theta_5 - L_4 \cos\theta_2 \sin\theta_3 - L_4 \sin\theta_2 \cos\theta_3 - L_3 \cos\theta_2 + L_1$$

$$A_{41} = 0$$

$$A_{42} = 0$$

$$A_{43} = 0$$

$$A_{44} = 1$$

On constate que dans le vecteur position la sixième coordonnée articulaire θ_6 correspondant à la rotation de l'organe terminale n'apparaît pas. En regardant de près le robot Roby on constate que peu importe la valeur de cette coordonnée, le robot reste dans la même position, ce n'est que son orientation qui change.

III.2.3. Simulation du MGD sous MATLAB

En utilisant la boîte à outils de Peter Corke pour la robotique, nous avons pu simuler avec précision le modèle géométrique direct (MGD) de notre robot. Cette boîte à outils offre une gamme complète d'outils pour la modélisation, la simulation et le contrôle des robots. En créant une interface graphique MATLAB pour observer les mouvements 3D de notre robot, nous avons conçu une plateforme comportant trois champs dédiés à l'édition et à l'affichage des trois articulations principales, ainsi que trois autres pour les coordonnées opérationnelles. Les figures ci-dessous représentent des essais effectués pour le modèle géométrique direct.

Teach	
X:	53.000
Y:	0.000
Z:	55.000
R:	-0.0
P:	0.0
Y:	90.0
q1	0
q2	30
q3	0
q4	0
q5	0

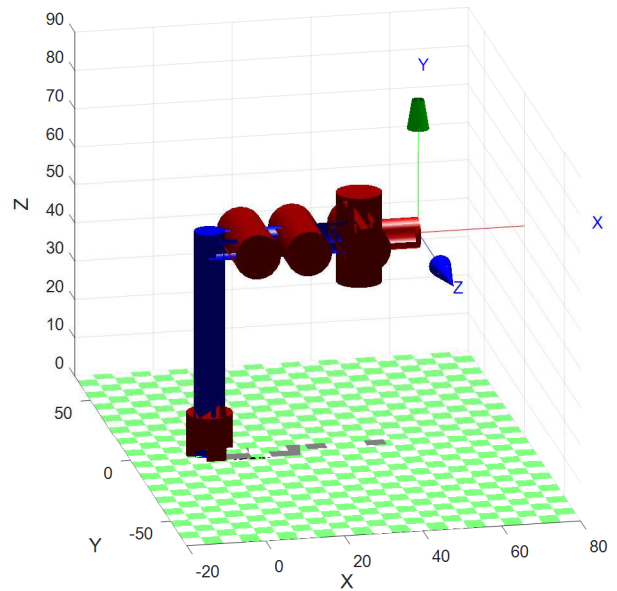


Figure 3.5. Simulation sur MATLAB position 1

Teach	
X:	49.138
Y:	-4.645
Z:	70.500
R:	11.4
P:	-5.4
Y:	90.0
q1	-5.4
q2	36.6
q3	-18.0
q4	0.0
q5	7.2

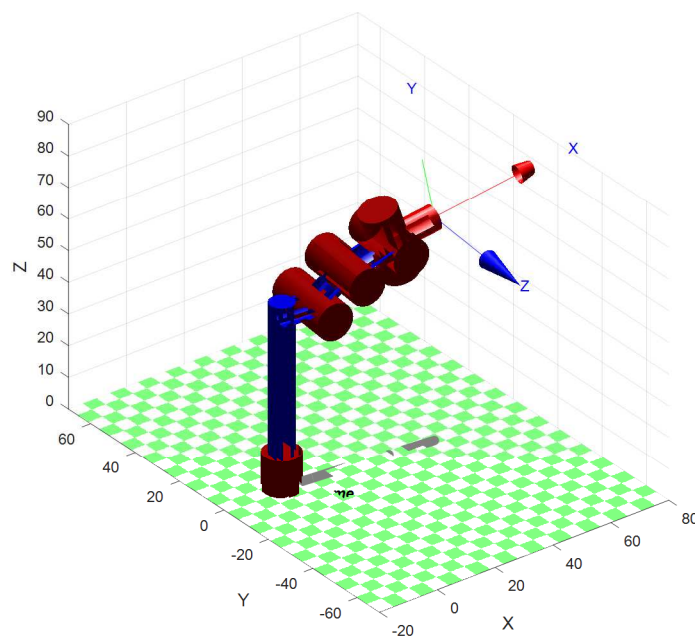


Figure 3.6. Simulation sur MATLAB position 2

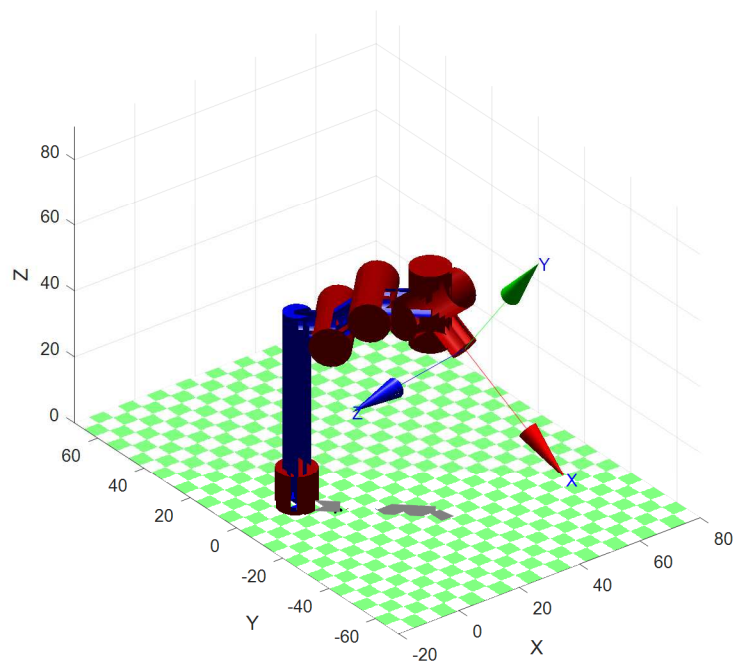
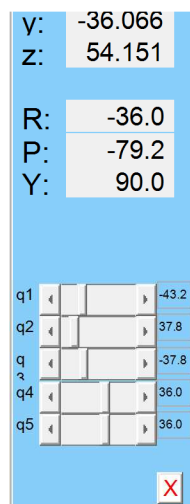


Figure 3.7. Simulation sur MATLAB position 3

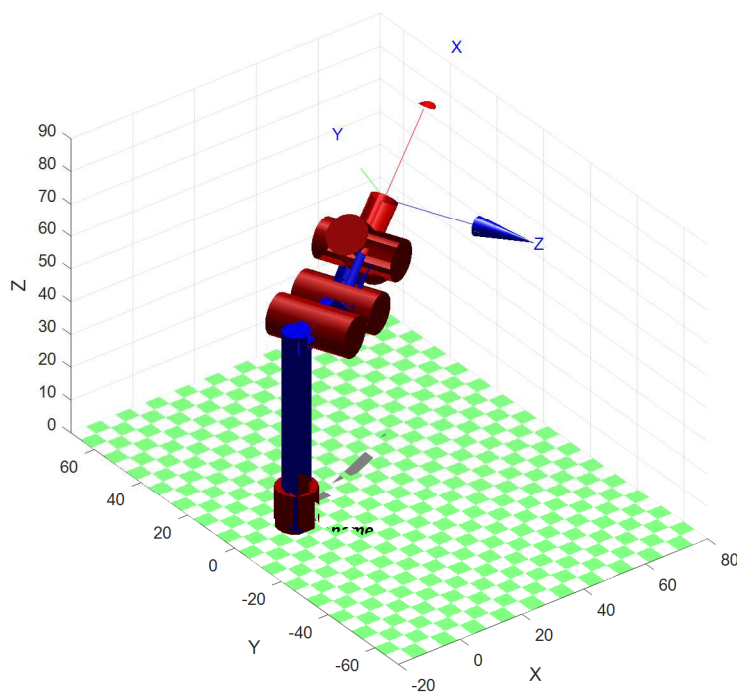
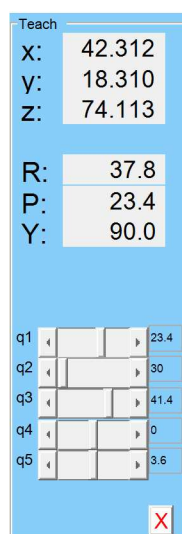


Figure 3.8. Simulation sur MATLAB position 3

III.3. Modélisation cinématique du robot Roby

Le modèle cinématique direct est donné par l'équation suivante :

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad (3.8)$$

Avec : $\mathbf{J}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{m \times n}$ est la matrice Jacobéenne

On distingue deux types de matrices Jacobéenne ; la matrice Jacobéenne analytique qui prend en considération les trois composantes de la vitesse linéaire de l'organe terminal et la matrice Jacobéenne cinématique qui prend en considération sa vitesse angulaire. Puisque les composantes de ces deux matrices seront considérablement encombrantes nous allons calculer chaque matrice Jacobéenne séparément.

II.3.1. Utilisation de la matrice Jacobéenne analytique

Par définition, la matrice Jacobéenne analytique est la matrice des dérivées partielles de la fonction par rapport aux coordonnées généralisées, ainsi :

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f1}{\partial \theta1} & \frac{\partial f1}{\partial \theta2} & \frac{\partial f1}{\partial \theta3} & \frac{\partial f1}{\partial \theta4} & \frac{\partial f1}{\partial \theta5} & \frac{\partial f1}{\partial \theta6} \\ \frac{\partial f2}{\partial \theta1} & \frac{\partial f2}{\partial \theta2} & \frac{\partial f2}{\partial \theta3} & \frac{\partial f2}{\partial \theta4} & \frac{\partial f2}{\partial \theta5} & \frac{\partial f2}{\partial \theta6} \\ \frac{\partial f3}{\partial \theta1} & \frac{\partial f3}{\partial \theta2} & \frac{\partial f3}{\partial \theta3} & \frac{\partial f3}{\partial \theta4} & \frac{\partial f3}{\partial \theta5} & \frac{\partial f3}{\partial \theta6} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Sachant que :

$$\begin{aligned} x &= L5\cos\theta1\sin\theta2\cos\theta3\sin\theta4\sin\theta5 + L5\cos\theta1\cos\theta2\sin\theta3\sin\theta4\sin\theta5 \\ &\quad + L5\sin\theta1\cos\theta4\sin\theta5 - L5\cos\theta1\sin\theta2\sin\theta3\cos\theta5 \\ &\quad + L5\cos\theta1\cos\theta2\cos\theta3\cos\theta5 - L4\cos\theta1\sin\theta2\sin\theta3 \\ &\quad + L4\cos\theta1\cos\theta2\cos\theta3 - L3\sin\theta2\cos\theta1 + L2\cos\theta1 \\ &= f1(\theta1, \theta2, \theta3, \theta4, \theta5, \theta6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y &= L5\sin\theta1\sin\theta2\cos\theta3\sin\theta4\sin\theta5 + L5\sin\theta1\cos\theta2\sin\theta4\sin\theta3\sin\theta5 \\ &\quad + L5\cos\theta1\cos\theta4\sin\theta5 - L5\sin\theta1\sin\theta2\sin\theta3\cos\theta5 \\ &\quad + \sin\theta1\cos\theta2\cos\theta3\cos\theta5 - L4\sin\theta1\sin\theta2\sin\theta3 + L4\sin\theta1\cos\theta2\cos\theta3 \\ &\quad - L3\sin\theta2\sin\theta1 + L2\sin\theta1 = f2(\theta1, \theta2, \theta3, \theta4, \theta5, \theta6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z &= L5\cos\theta_2\cos\theta_3\sin\theta_4\sin\theta_5 - L5\sin\theta_2\sin\theta_3\sin\theta_4\sin\theta_5 - L5\cos\theta_2\sin\theta_3\cos\theta_5 \\
 &\quad - L5\sin\theta_2\cos\theta_3\cos\theta_5 - L4\cos\theta_2\sin\theta_3 - L4\sin\theta_2\cos\theta_3 - L3\cos\theta_2 + L1 \\
 &= f_3(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6)
 \end{aligned}$$

Après avoir effectué les calculs, nous obtenons la matrice Jacobéenne analytique :

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial f_1}{\partial \theta_1} &= L5\sin\theta_1\sin\theta_2\cos\theta_3\sin\theta_4\sin\theta_5 - L5\sin\theta_1\cos\theta_2\sin\theta_3\sin\theta_4\sin\theta_5 \\
 &\quad + L5\cos\theta_1\cos\theta_4\sin\theta_5 + L5\sin\theta_1\sin\theta_2\sin\theta_3\cos\theta_5 \\
 &\quad - L5\sin\theta_1\cos\theta_2\cos\theta_3\cos\theta_5 + L4\sin\theta_1\sin\theta_2\sin\theta_3 \\
 &\quad - L4\sin\theta_1\cos\theta_2\cos\theta_3 + L3\sin\theta_2\sin\theta_1 - L2\sin\theta_1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial f_1}{\partial \theta_2} &= L5\cos\theta_1\cos\theta_2\cos\theta_3\sin\theta_4\sin\theta_5 - L5\cos\theta_1\sin\theta_2\sin\theta_3\sin\theta_4\sin\theta_5 \\
 &\quad - L5\cos\theta_1\cos\theta_2\sin\theta_3\cos\theta_5 - L5\cos\theta_1\sin\theta_2\cos\theta_3\cos\theta_5 \\
 &\quad - L4\sin\theta_1\cos\theta_2\sin\theta_3 - L4\cos\theta_1\sin\theta_2\cos\theta_3 - L3\cos\theta_2\cos\theta_1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial f_1}{\partial \theta_3} &= -L5\cos\theta_1\sin\theta_2\sin\theta_3\sin\theta_4\sin\theta_5 + L5\cos\theta_1\cos\theta_2\cos\theta_3\sin\theta_4\sin\theta_5 \\
 &\quad - L5\cos\theta_1\sin\theta_2\cos\theta_3\cos\theta_5 - L5\cos\theta_1\cos\theta_2\sin\theta_3\cos\theta_5 \\
 &\quad - L4\cos\theta_1\sin\theta_2\cos\theta_3 - L4\cos\theta_1\cos\theta_2\sin\theta_3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial f_1}{\partial \theta_4} &= L5\cos\theta_1\sin\theta_2\cos\theta_3\cos\theta_4\sin\theta_5 + L4\cos\theta_1\cos\theta_2\sin\theta_3\cos\theta_4\sin\theta_5 \\
 &\quad - L5\sin\theta_1\sin\theta_4\sin\theta_5
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial f_1}{\partial \theta_5} &= L5\cos\theta_1\sin\theta_2\cos\theta_3\sin\theta_4\cos\theta_5 + L5\cos\theta_1\cos\theta_2\sin\theta_3\sin\theta_4\cos\theta_5 \\
 &\quad + L5\sin\theta_1\cos\theta_4\cos\theta_5 + L5\cos\theta_1\sin\theta_2\sin\theta_3\sin\theta_5 \\
 &\quad - L5\cos\theta_1\cos\theta_2\cos\theta_3\sin\theta_5
 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial \theta_6} = 0$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial f_2}{\partial \theta_1} = & -L_5 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \sin \theta_4 \cos \theta_5 - L_5 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 \sin \theta_4 \cos \theta_5 \\ & + L_5 \cos \theta_1 \cos \theta_4 \cos \theta_5 - L_5 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \sin \theta_5 \\ & + L_5 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 \sin \theta_5\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial f_2}{\partial \theta_2} = & L_5 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 \sin \theta_4 \sin \theta_5 - L_5 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_4 \sin \theta_3 \sin \theta_5 \\ & - L_5 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 \cos \theta_5 - \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \cos \theta_5 \\ & - L_4 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 - L_4 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 - L_3 \cos \theta_2 \sin \theta_1\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial f_2}{\partial \theta_3} = & -L_5 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \sin \theta_4 \sin \theta_5 + L_5 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_4 \cos \theta_3 \sin \theta_5 \\ & - L_5 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \cos \theta_5 - \sin \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 \cos \theta_5 \\ & - L_4 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 - \sin \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial f_2}{\partial \theta_4} = & L_5 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \cos \theta_4 \sin \theta_5 + L_5 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_4 \sin \theta_3 \sin \theta_5 \\ & - L_5 \cos \theta_1 \sin \theta_4 \sin \theta_5\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial f_2}{\partial \theta_5} = & L_5 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \sin \theta_4 \cos \theta_5 + L_5 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_4 \sin \theta_3 \cos \theta_5 \\ & + L_5 \cos \theta_1 \cos \theta_4 \cos \theta_5 + L_5 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \sin \theta_5 \\ & - \sin \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 \sin \theta_5\end{aligned}$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial \theta_6} = 0$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial \theta_1} = 0$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial f_3}{\partial \theta_2} = & -L_5 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \sin \theta_4 \sin \theta_5 - L_5 \cos \theta_2 \sin \theta_3 \sin \theta_4 \sin \theta_5 + L_5 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \cos \theta_5 \\ & - L_5 \cos \theta_2 \cos \theta_3 \cos \theta_5 + L_4 \sin \theta_2 \sin \theta_3 - L_4 \cos \theta_2 \cos \theta_3 + L_3 \sin \theta_2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial f_3}{\partial \theta_3} = & -L_5 \cos \theta_2 \sin \theta_3 \sin \theta_4 \sin \theta_5 - L_5 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \sin \theta_4 \sin \theta_5 - L_5 \cos \theta_2 \cos \theta_3 \cos \theta_5 \\ & + L_5 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \cos \theta_5 - L_4 \cos \theta_2 \cos \theta_3 + L_4 \sin \theta_2 \sin \theta_3\end{aligned}$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial \theta_4} = L_5 \cos \theta_2 \cos \theta_3 \cos \theta_4 \sin \theta_5 - L_5 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \cos \theta_4 \sin \theta_5$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_3}{\partial \theta_5} &= L_5 \cos \theta_2 \cos \theta_3 \sin \theta_4 \cos \theta_5 - L_5 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \sin \theta_4 \cos \theta_5 + L_5 \cos \theta_2 \sin \theta_3 \sin \theta_5 \\ &+ L_5 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \sin \theta_5 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial \theta_6} = 0$$

Donc la model cinématique directe est exprimé comme suit.

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_3} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_4} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_5} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_6} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta_3} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta_4} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta_5} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta_6} \\ \frac{\partial f_3}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_3}{\partial \theta_3} & \frac{\partial f_3}{\partial \theta_4} & \frac{\partial f_3}{\partial \theta_5} & \frac{\partial f_3}{\partial \theta_6} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \\ \dot{\theta}_5 \\ \dot{\theta}_6 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

III.3.2. Utilisation de la matrice Jacobéenne cinématique

Puisqu'il s'agit uniquement d'articulation de type rotoïde, la Jacobéenne des six articulations est donnée par :

$$J_w = \begin{bmatrix} {}^0R & \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} {}^0R & \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} {}^0R & \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} {}^0R & \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} {}^0R & \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} {}^0R \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Articulation 1 :

$${}^0R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \stackrel{J=1}{\Leftrightarrow} {}^0R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Articulation 2 :

$${}^0R \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \stackrel{J=2}{\Rightarrow} = \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 \\ \cos \theta_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Articulation 3 :

$${}^0_2R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\theta_1\sin\theta_2 & -\cos\theta_1\cos\theta_2 & -\sin\theta_1 \\ -\sin\theta_1\sin\theta_2 & -\sin\theta_1\cos\theta_2 & \cos\theta_1 \\ -\cos\theta_2 & \sin\theta_2 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \xRightarrow{j=3} = \begin{bmatrix} -\sin\theta_1 \\ \cos\theta_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Articulation 4 :

$${}^0_3R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\theta_1\sin\theta_2\sin\theta_3 + \cos\theta_1\cos\theta_2\cos\theta_3 \\ -\sin\theta_1\sin\theta_2\sin\theta_3 + \sin\theta_1\cos\theta_2\cos\theta_3 \\ -\cos\theta_2\sin\theta_3 - \sin\theta_2\cos\theta_3 \end{bmatrix}$$

Articulation 5 :

$${}^0_4R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1\sin\theta_2\cos\theta_3\cos\theta_4 + \cos\theta_1\cos\theta_2\sin\theta_3\cos\theta_4 + \sin\theta_1\sin\theta_4 \\ \sin\theta_1\sin\theta_2\cos\theta_3\cos\theta_4 + \sin\theta_1\cos\theta_2\sin\theta_3\cos\theta_4 \\ \cos\theta_2\cos\theta_3\cos\theta_4 - \sin\theta_2\sin\theta_3\cos\theta_4 \end{bmatrix}$$

Articulation 6 :

$${}^0_5R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1\sin\theta_2\cos\theta_3\sin\theta_4\sin\theta_5 + \cos\theta_1\cos\theta_2\sin\theta_3\sin\theta_4\sin\theta_5 + \sin\theta_1\cos\theta_4\sin\theta_5 - \cos\theta_1 \\ \sin\theta_2\sin\theta_3\cos\theta_5 + \cos\theta_1\cos\theta_2\cos\theta_3\cos\theta_5 \\ \sin\theta_1\sin\theta_2\cos\theta_3\sin\theta_4\sin\theta_5 + \sin\theta_1\cos\theta_2\sin\theta_3\sin\theta_4\sin\theta_5 + \cos\theta_1\cos\theta_4\sin\theta_5 - \sin\theta_1 \\ \sin\theta_2\sin\theta_3\cos\theta_5 + \sin\theta_1\cos\theta_2\cos\theta_3\cos\theta_5 \\ \cos\theta_2\cos\theta_3\sin\theta_4\sin\theta_5 - \sin\theta_2\sin\theta_3\sin\theta_4\sin\theta_5 - \cos\theta_2\sin\theta_3\cos\theta_5 - \sin\theta_2\cos\theta_3\cos\theta_5 \end{bmatrix}$$

Finalement, le modèle cinématique directe est exprimée comme suit :

$$\begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} = J_w * \left\{ \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \\ \dot{\theta}_5 \\ \dot{\theta}_6 \end{bmatrix} \right\} \quad (3.12)$$

$$J_w = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & J_{14} & J_{15} & J_{16} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & J_{24} & J_{25} & J_{26} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} & J_{34} & J_{35} & J_{36} \end{bmatrix}$$

Les composants de la matrice Jacobéene cinématique sont donc comme suit :

$$J_{11}=0$$

$$J_{12}= -\sin\theta_1$$

$$J_{13}= -\sin\theta_1$$

$$J_{14}= -\cos\theta_1\sin\theta_2\sin\theta_3 + \cos\theta_1\cos\theta_2\cos\theta_3$$

$$J_{15}= \cos\theta_1\sin\theta_2\cos\theta_3\cos\theta_4 + \cos\theta_1\cos\theta_2\sin\theta_3\cos\theta_4 + \sin\theta_1\sin\theta_4$$

$$J_{16}= \cos\theta_1\sin\theta_2\cos\theta_3\sin\theta_4\sin\theta_5 + \cos\theta_1\cos\theta_2\sin\theta_3\sin\theta_4\sin\theta_5 + \sin\theta_1\cos\theta_4\sin\theta_5 - \cos\theta_1\sin\theta_2\sin\theta_3\cos\theta_5 + \cos\theta_1\cos\theta_2\cos\theta_3\cos\theta_5$$

$$J_{21}=0$$

$$J_{22} = \cos \theta_1$$

$$J_{23} = \cos \theta_1$$

$$J_{24} = -\sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 + \sin \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3$$

$$J_{25} = \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \cos \theta_4 + \sin \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 \cos \theta_4$$

$$J_{26} = \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \sin \theta_4 \sin \theta_5 + \sin \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 \sin \theta_4 \sin \theta_5 + \\ \cos \theta_1 \cos \theta_4 \sin \theta_5 - \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \cos \theta_5 + \sin \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 \cos \theta_5$$

$$J_{31} = 1$$

$$J_{32} = 0$$

$$J_{33} = 0$$

$$J_{34} = -\cos \theta_2 \sin \theta_3 - \sin \theta_2 \cos \theta_3$$

$$J_{35} = \cos \theta_2 \cos \theta_3 \cos \theta_4 - \sin \theta_2 \sin \theta_3 \cos \theta_4$$

$$J_{36} = \cos \theta_2 \cos \theta_3 \sin \theta_4 \sin \theta_5 - \sin \theta_2 \sin \theta_3 \sin \theta_4 \sin \theta_5 - \cos \theta_2 \cos \theta_3 \cos \theta_5 - \\ \sin \theta_2 \cos \theta_3 \cos \theta_5$$

III.4. Conclusion du chapitre

Ce chapitre est dédié à la modélisation géométrique et cinématique d'un robot de peinture à six degrés de liberté de la marque Roby 6x. Après la présentation générale du robot nous avons commencé par le repérage de ses articulations conformément aux règles de Denavit-Hartenberg. A partir de ce repérage nous avons déterminé les quatre paramètres D-H de chaque articulation. Ces paramètres ainsi injectés dans la matrice de transformation D-H, nous ont permis de calculer les six matrices de transformation homogène du robot. La détermination du modèle géométrique direct s'effectue ensuite par la multiplication des six matrices. Une simulation sous MATLAB du MGD a été réalisée grâce à la boîte à outils Peter Corke. Cette modélisation permet de déterminer en temps réel la position de l'organe terminal et son orientation sans avoir recourt à de longs calculs.

La modélisation cinématique nous a permis de trouver le modèle cinématique direct du robot qui nous permet de déterminer les vitesses de l'organe terminal en fonction des coordonnées et vitesses articulaires. A ce propos nous avons calculé les deux vitesses de l'organe terminal, à savoir la vitesse linéaire et la vitesse angulaire. Les deux matrices Jacobéennes, analytique et cinématique, ont donc été calculées malgré la difficulté des calculs

Chapitre IV

Etude de la maintenance du robot de peinture Roby 6x

Introduction

Dans ce chapitre nous proposons une étude appliquée sur la maintenance d'un robot 6 ddl en analysant ses composants, les pannes potentielles et les stratégies de maintenance adaptées, qu'elles soient préventives, correctives ou prédictives. L'objectif est de garantir une performance optimale du robot tout au long de son cycle de vie, en s'appuyant sur des observations pratiques. Trois approches seront utilisées pour optimiser la maintenance de ce robot :

- Une analyse ABC de Pareto pour cerner les pannes relativement onéreuses et dont la surveillance des organes concernés est prioritaire ;
- Une analyse fiabiliste détaillée ciblant les organes les plus importants, permettant ainsi de situer la période de vie de chaque organe et d'appliquer la politique de maintenance adéquate ;
- Une analyse AMDEC complémentaire à l'analyse de fiabilité permettant de faire un bilan détaillé des pannes et dégageant les actions de maintenance à entamer.

IV.1. Etude de l'historique des pannes du robot

Le robot en question est le robot de peinture Roby 6x ayant six degrés de liberté comme nous l'avons déjà évoqué au chapitre 3. Une première analyse est faite sur la base de l'historique des pannes de ce robot. Cette analyse vise en premier lieu à cerner les différents types de pannes affectant les différents organes du robot. Le tableau (4.1) montre l'historique couvrant la période allant du 18/11/2018 au 24/01/2020 [23]. Notons que nous avons modifié les années de l'historique pour donner un aspect nouveau, mais les dates des pannes sont exactement identiques. Pour montrer l'importance de l'historique en tant que donnée essentielle pour entamer toute la partie maintenance, nous avons choisi de le mettre dans le corps du chapitre et ne figure donc pas comme une simple annexe.

Une décomposition fonctionnelle du robot est faite pour désigner les organes principaux. Il était donc possible à partir de la conception du robot et de l'historique des pannes de décomposer le robot Roby 6x en neuf organes principaux en plus d'un mode de défaillance (Repère G) comme montré dans le tableau (4.2).

Un bilan des différentes défaillances qui se sont produites sur le robot est réalisé. Ainsi le nombre de pannes et les temps d'arrêt relatifs à ces pannes sont calculés pour chaque organe. Cette étape est très importante pour entamer l'analyse de Pareto soit par l'approche ABC ou par les trois graphes de Pareto comme nous allons l'évoquer plus tard dans ce chapitre. Le

tableau (4.3) montre les résultats obtenus, il est à noter que l'organe C (Bras horizontal) n'a pas subi de pannes durant la période de collecte des données historiques.

Tableau 4.1. Historique du robot Roby 6x

Date	Temps d'arrêt	Nature du travail/défaut	Repère
18-11-2018	20 min	Mauvaise trajectoire en cours de travail Réglage vitesse, pistolet arrêté continue à peindre	E
22-11-2018	45 min	Départ cycle défaillant, difficulté programmation	E
13-01-2019	25 min	Avance du bras saccadée Changement disquette et lecteur	E
18-01-2019	95 min	Mauvaise trajectoire après enregistrement Réglage du temps d'amortissement sur la carte DH	I
18-01-2019	10 min	Avance par saccade (carte Servo) Réglage gain du Servo 1, carte n°4	J
27-01-2019	10 min	Pas de départ cycle Refixer rôle support bras du robot Fins de courses déplacées	F
09-03-2019	30 min	Départ compagne, mauvaise trajectoire (échange disquette)	H
28-03-2019	30 min	Câble électrovanne de pulvérisation arraché	A
16-04-2019	10 min	Plus de reproduction de l'enregistrement Fin de course coincée par la peinture	G
30-05-2019	15 min	Mauvaise trajectoire après enregistrement Echange carte	B
14-06-2019	15 min	Echange EV commande du pistolet	A
14-06-2019	30 min	Arrêt pendant le cycle Contact des poignées de programmation collées par la peinture	D
15-06-2019	225 min	Plus de rotation trompe (nettoyage)	E
28-06-2019	80 min	Cycle trop long (nettoyage poignée et vérification fonctionnement)	D
29-06-2019	30 min	Mauvais enregistrement	D

29-06-2019	320 min	Pas de fin d'enregistrement	D
07-09-2019	10 min	Prise d'enregistrement pleine de peinture	D
14-09-2019	100 min	Mauvais contact dans câble d'alimentation EV du pistolet	A
11-10-2019	25 min	Mauvaise projection de peinture Echange EV	A
18-10-2019	50 min	Mauvaise reproduction de cycle	E
19-10-2019	35 min	Difficulté de reproduction de cycle	E
26-10-2019	20min	Pas d'arrêt rotation Bras du robot coincé	F
07-11-2019	20 min	Pas d'arrêt rotation mandrin après enregistrement (contact bloqué par protection plastique)	F
07-11-2019	80 min	Mauvais recopiage Jeu important dans la tête et vibrations Contrôle Servo	E
17-11-2019	10 min	Arrêt en coures de reproduction	F
19-11-2019	20 min	Pas d'arrêt rotation du mandrin	F
20-11-2019	15 min	Contact fin de course non relâché (trop enfoncée)	F
22-11-2019	10 min	Pas d'arrêt rotation et fin de coure non libérée	F
28-11-2019	20 min	Mauvaise reproduction de cycle	E
29-11-2019	120 min	Décalage de la reproduction du cycle	E
29-11-2019	45 min	Jeu sur rotules (pendant changement)	E
01-12-2019	25 min	Contact support bras reste collé	F
11-12-2019	170 min	Jeu dans la tête Servos bloquées	E
19-12-2019	60 min	Pas de rotation après enregistrement (permuter poignée enregistrement)	D
03-01-2020	20 min	Pas de rotation	F
11-01-2020	15 min	Débit air faible (électrovanne pistolet)	A
15-01-2020	35 min	En fin de programmation le robot ne revient pas en position initiale (carte mémoire de bras)	I
18-01-2020	60 min	Mauvaise reproduction, trompe bouge rotule cassée	E
24-01-2020	30 min	Arrêt en cours de cycle	E

Tableau 4.2. Décomposition du robot et désignation des organes principaux

Repère	Désignation
A	Electrovanne pistolet
B	Vérin
C	Bras horizontal
D	Poignée de programmation
E	Nez robot
F	Fin de course du support bras
G	Manque de pression (mode de défaillance)
H	Disquette
I	Carte DH
J	Carte (s) Servo

Tableau 4.3. Nombre de pannes et temps d'arrêt pour chaque organe du robot

Organes	Nombre des pannes	Temps d'arrêt (min)
A	5	185
B	1	15
D	6	530
E	13	925
F	9	150
G	1	10
H	1	30
I	2	130
J	1	10

IV.2. Application de l'approche de Pareto

IV.2.1. Courbe ABC de Pareto

L'analyse ABC de Pareto vise à dégager la priorité, c'est-à-dire cibler les pannes/organes prioritaires qui nécessitent plus d'importance et de surveillance par rapport à d'autres. Pour ce faire les organes sont classés par ordre décroissant de temps d'arrêt et l'approche ABC est ensuite entamée comme nous l'avons expliqué dans le chapitre 2. Le tableau (4.4) montre les résultats obtenus et fait donc apparaître le pourcentage des pannes cumulées correspondant au

pourcentage des temps d'arrêt cumulés. En se référant à l'approche même de la méthode ABC de Pareto et sa philosophie on s'aperçoit qu'il n'y a pas de priorité à dégager, tous les organes semblent avoir la même importance. En effet il n'y a pas un pourcentage de pannes cumulées avoisinant les 20% donnant un pourcentage des temps d'arrêt cumulés avoisinant les 80% comme le stipule l'approche ABC (ou 20-80 comme certains aiment l'appeler). Les valeurs les plus proches sont 61.53% des pannes donnant 82.61% de temps d'arrêt, ce qui est très loin d'être une priorité.

Tableau 4.4. Application de la méthode ABC sur le robot en s'appuyant sur le nombre de pannes

Organes	Classement par ordre décroissant de coût (Temps d'arrêt)	Cumul des coûts	% des coûts	Nombre de pannes	Cumul des pannes	% des pannes
E	925	925	46.59	13	13	33.33
D	530	1455	73.29	6	19	48.71
A	185	1640	82.61	5	24	61.53
F	150	1790	90.17	9	33	84.61
I	130	1920	96.72	2	35	89.74
H	30	1950	98.23	1	36	92.30
B	15	1965	98.99	1	37	94.87
G	10	1975	99.49	1	38	97.43
J	10	1985	100	1	39	100
Total	1985			39		

N'ayant pas pu dégager une priorité, nous avons procédé à une deuxième approche ABC en s'appuyant sur les organes plutôt que sur leur nombre de pannes. Donc l'organe est comptabilisé comme une seule entité sans tenir compte de son nombre de pannes. Le tableau (4.5) montre les résultats obtenus et qui font apparaître une parfaite concordance avec la théorie de l'approche ABC :

- La zone A [E, D] en vert : Constituée des organes E : Nez robot et D : Poignée de programmation. Ces deux organes constituent seulement 22% de l'ensemble des organes du

robot mais sont responsables de 73.29% des temps d'arrêt. Ce résultat constitue un parfait taux de priorité et met les organes E et D en première position dans la zone A comme organes prioritaires.

La zone B [A, F, I] en rouge : Elle est constituée des organes A : Electrovanne pistolet, F : Fin de course du support bras et l'organe I : Carte DH. Ces trois organes constituent 33% de l'ensemble des organes du robot (55%-22%) mais coûtent seulement 23.43% du nombre total des temps d'arrêt (96.72%-73.29%). Ces organes appartiennent donc à la classe B et sont d'une importance moyenne moindre par rapport aux organes de la classe A.

La zone C : [H, B, G, J] en bleu : Enfin les organes H : Disquette, B : Vérin, G : Manque de pression et J : Carte (s) Servo. Ces quatre organes représentent 45% du total des organes du robot (100%-55%) mais ne coûtent que 3.28% du nombre total des temps d'arrêt (100%-96.72%). Ils appartiennent désormais à la classe C, à savoir les organes qui ont peu ou pas d'importance.

La figure (4.1) montre la courbe ABC de Pareto illustrant clairement les trois zones.

Tableau 4.5. Application de la méthode ABC sur le robot en s'appuyant sur le nombre d'organes

Organes	Cumul des coûts	% des coûts cumulés	N° de l'organe	% d'organes cumulés
E	925	46.59	1	11
D	1455	73.29	2	22
A	1640	82.61	3	33
F	1790	90.17	4	44
I	1920	96.72	5	55
H	1950	98.23	6	66
B	1965	98.99	7	77
G	1975	99.49	8	88
J	1985	100	9	100
Total	1985		9	

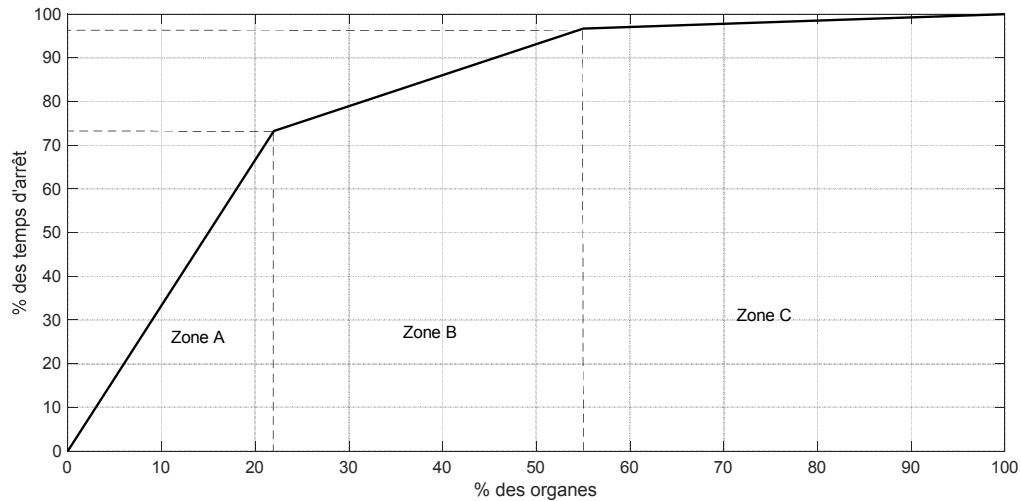


Figure 4.1. Courbe ABC de Pareto

En conclusion l'étude ABC montre que les organes E et D sont les organes prioritaires, ils sont responsables de 73.29% des temps d'arrêt, donc des coûts de maintenance. Par conséquent il est indispensable de pratiquer une politique de maintenance basée sur une surveillance accrue de ces organes. Pour les organes A,F,I, ils sont responsables seulement de 23.43% des coûts, donc du point de vue maintenance ces organes sont d'une importance moyenne. Enfin les organes H,B,G,J n'ont que peu ou pas d'importance du fait qu'ils ne provoquent que 3.28% des temps d'arrêt.

IV.2.2. Graphes de Pareto

Les diagrammes de Pareto par criticité est un moyen de classement des problèmes par ordre d'importance, ils prennent la forme d'histogrammes. Ils permettent de sélectionner des mesures ciblées pour améliorer une situation. En maintenance ils sont au nombre de trois : le graphe en « n » qui prend en considération le nombre de pannes et donc oriente vers la fiabilité, le graphe en « t » qui prend en considération les temps d'arrêt et oriente vers la maintenabilité, et enfin le diagramme en produit artificiel « n*t » qui oriente vers la disponibilité.

Le graphe « n » de la figure (4.2) montre que les organes E et F sont ceux où on enregistre le maximum de pannes, ils sont donc prioritaires pour l'amélioration de leur fiabilité. Le graphe en « t » de la figure (4.3) montre que les organes E et D sont ceux où on enregistre le maximum de temps d'arrêt, ils sont donc prioritaires pour l'amélioration de leur maintenabilité. Enfin la figure (4.4) montre que l'organe E est très loin des autres organes en terme de produit artificiel n*t et se place donc prioritaire pour une amélioration de sa disponibilité.

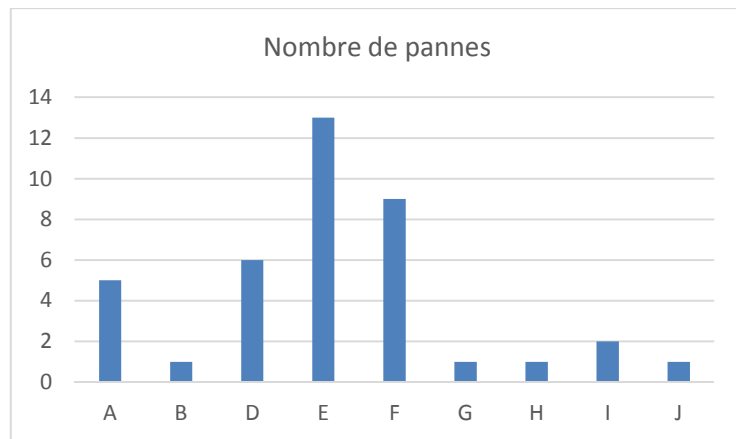


Figure 4.2. Graphe en « n »

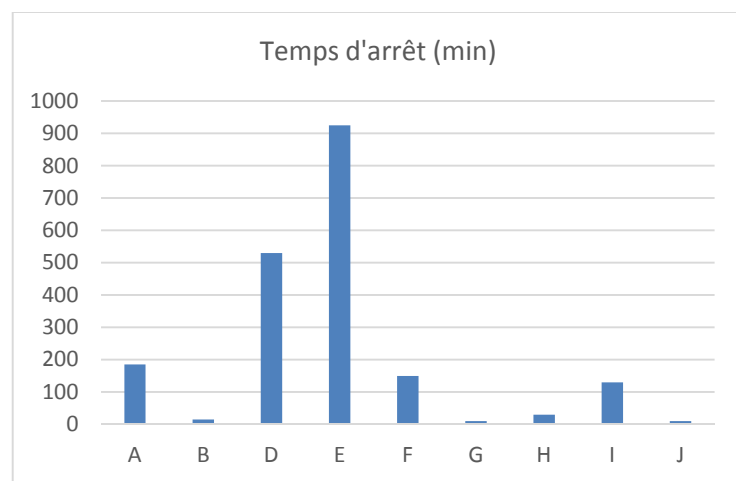


Figure 4.3. Graphe en « t »

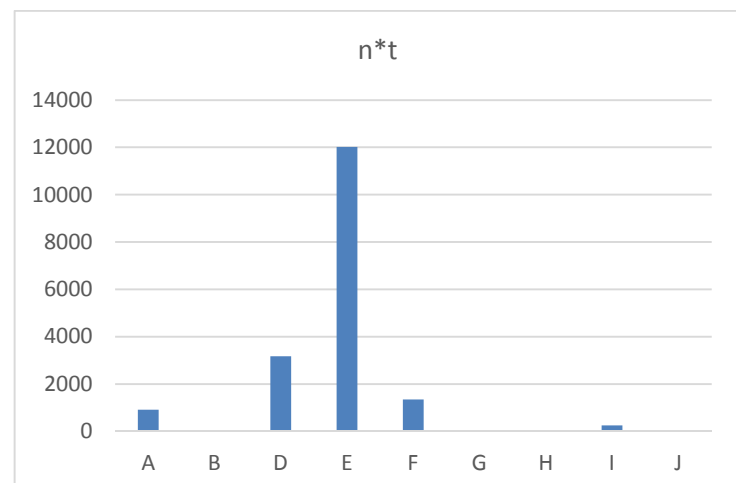


Figure 4.4. Graphe en « n*t »

IV.3. Analyse de la fiabilité de robot

IV.3.1. Présentation du logiciel FIABOPTIM

FIABOPTIM est un logiciel destiné à l'analyse numérique et graphique des données de fiabilité. Il permet, à partir de données opérationnelles ou expérimentales, d'estimer la loi de distribution des défaillances, d'estimer les paramètres caractéristiques de ces lois et de calculer ensuite la fiabilité prévisionnelle du système étudié pour les dates (temps, cycles, km, etc...) désirées. Conçu par des spécialistes de la fiabilité ayant une grande expérience du terrain, FIABOPTIM se veut un outil pratique, simple et efficace. Son aspect pratique provient de la connaissance acquise par la société OPTIM DEVELOPPEMENT des problèmes concrets rencontrés par les entreprises, notamment dans les évaluations de fiabilité prévisionnelle de leur produit. FIABOPTIM a également été développé dans le souci d'une grande simplicité d'utilisation pour convenir aussi bien au spécialiste qu'au néophyte. Un grand soin a donc été apporté à la logique de l'enchaînement des opérations du logiciel ainsi qu'à sa présentation pour aboutir à une simplicité et une convivialité optimale. Son efficacité, enfin, qui découle aussi des qualités précédentes, est due à l'utilisation des modèles mathématiques les plus récents en matière d'estimation.

IV.3.2. Etude fiabiliste des organes du robot

Nous allons dans la partie qui suit entamer l'étude de la fiabilité de quatre organes du robot dont l'étude ABC a démontré l'importance capitale, à savoir les organes E,D de la zone A prioritaire ainsi que les organes A et F classés dans la zone B. L'organe I a subi seulement 2 défaillances pendant la période couverte par l'historique, donc nous n'avons pas assez de données pour entamer l'étude de fiabilité de cet organe. Notons que les données de base pour entamer une étude de la fiabilité sont les Temps de Bon Fonctionnement (TBF), ceux-ci ont été calculés à partir de l'historique des pannes de chaque organe. Le modèle de fiabilité utilisé est celui de Weibull étant le modèle le plus souple et le plus utilisé en pratique.

IV.3.2.1. Etude de la fiabilité de l'organe A (Electrovanne pistolet)

Le tableau (4.6) montre les TBF de cet organe calculés à partir de l'historique du robot. On introduit ensuite ces données dans le logiciel FIABOPTIM. On obtient ainsi les valeurs numériques concernant les paramètres de la loi de weibull ainsi que la moyenne des TBF (MTBF).

Tableau 4.6. TBF de l'organe A du robot

N°	1	2	3	4	5
TBF (h)	448	512	168	520	88

VI.3.2.1.1. Paramètres du modèle

Après application du modèle de Weibull via le logiciel, nous avons obtenu les paramètres suivants (figure 4.5):

Beta = 1.0631295

Eta = 390.05891 heures

Gamma = 25.855122

MTBF = 406.68163 heures

Plusieurs remarques sont à signaler :

1. Le fait que le paramètre β est égal à 1 indique que l'organe A est en période de maturité, la politique de maintenance à appliquer doit se faire sur cette base.
2. Le paramètre Gamma indique qu'aucune défaillance ne se produit avant 25.85 heures de fonctionnement ;
3. L'organe A travaille en moyenne 406.6 heures avant de subir une panne. La détermination de la MTBF est très indispensable pour la mise à jour du plan de maintenance préventive de l'organe.

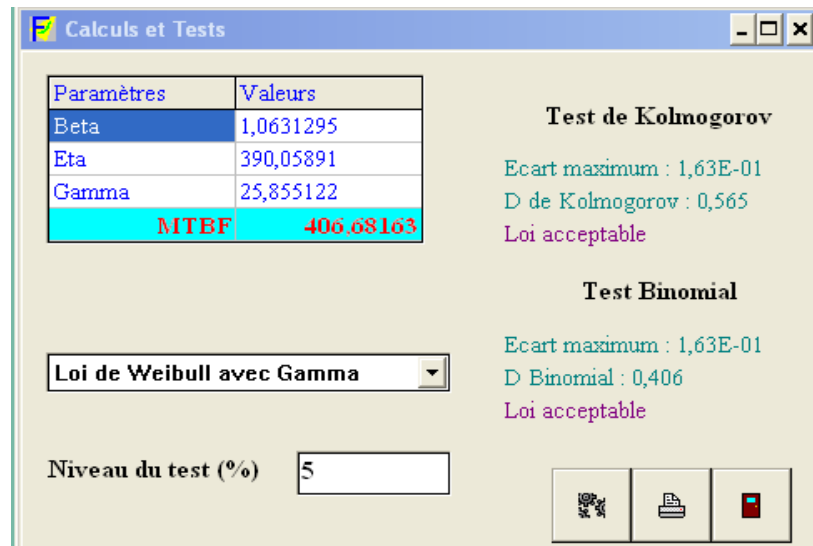


Figure 4.5. Paramètres du modèle de Weibull de l'organe A du robot

IV.3.2.1.2. Interprétation graphique des résultats

La figure (4.6) montre la représentation des TBF sur le papier de Weibull ainsi que l'ajustement fait par le logiciel et qui a conduit à l'obtention des résultats



Figure 4.6. Représentation des TBF sur le papier de Weibull

➤ Fonction de fiabilité de l'organe A

A partir des paramètres de Weibull et conformément aux expressions mathématiques des lois de la fiabilité décrites dans le chapitre 2, l'équation de fiabilité $R(t)$ de l'organe A est donnée par :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} = e^{-\left(\frac{t-25.85}{390.05}\right)^{1.06}} \quad (4.1)$$

Nous pouvons par ce fait calculer la fiabilité de l'organe A à n'importe quel instant. La représentation graphique de la fiabilité est donnée par la figure (4.7). Celle-ci est décroissante avec le temps ce qui implique que la probabilité de bon fonctionnement de l'organe A décroît avec le temps.

➤ Probabilité de défaillance de l'organe A

La fonction défaillance $F(t)$ est donnée par :

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} = 1 - e^{-\left(\frac{t-25.85}{390.05}\right)^{1.06}} \quad (4.2)$$

Comme elle est l'inverse de la fonction fiabilité, la fonction de défaillance est croissante avec le temps, ceci indique que la probabilité d'avoir une panne augmente avec le temps. Rappelons que cette probabilité peut être calculée à n'importe quel instant grâce à la formule (4.2) ou à partir de la courbe de la figure (4.8).

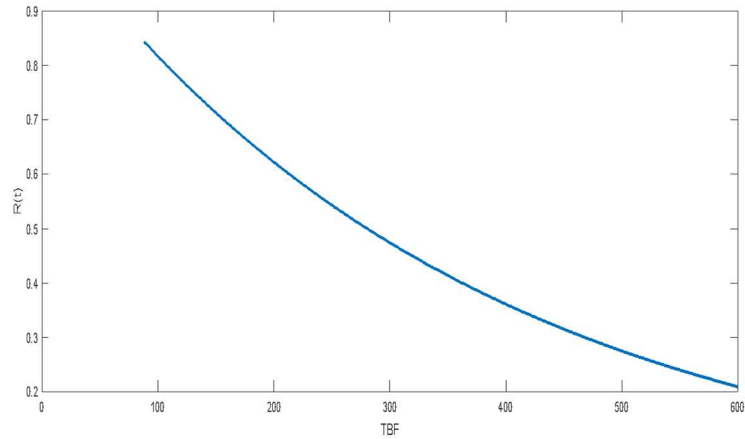


Figure 4.7. Fonction de fiabilité R(t) de l'organe A du robot

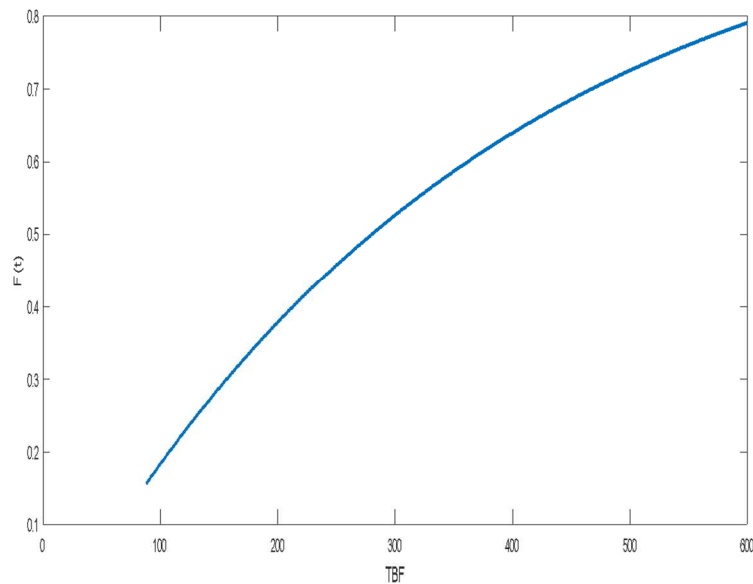


Figure 4.8. Fonction de défaillance F(t) de l'organe A du robot

➤ Taux de défaillance de l'organe A

Le taux de défaillance est donné par l'expression suivante :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} = \frac{1.06}{390.05} \left(\frac{t-25.85}{390.05} \right)^{0.06} \quad (4.3)$$

La figure (4.9) montre que le taux de défaillance est sensiblement constant (varie dans des proportions très faibles), ce qui signifie que l'organe A est en période de maturité, ceci est confirmé par la valeur de β égale à 1. Dans cette période les défaillances se manifestent d'une manière aléatoire, donc une maintenance corrective est à envisager en premier lieu, plus une maintenance préventive conditionnelle.

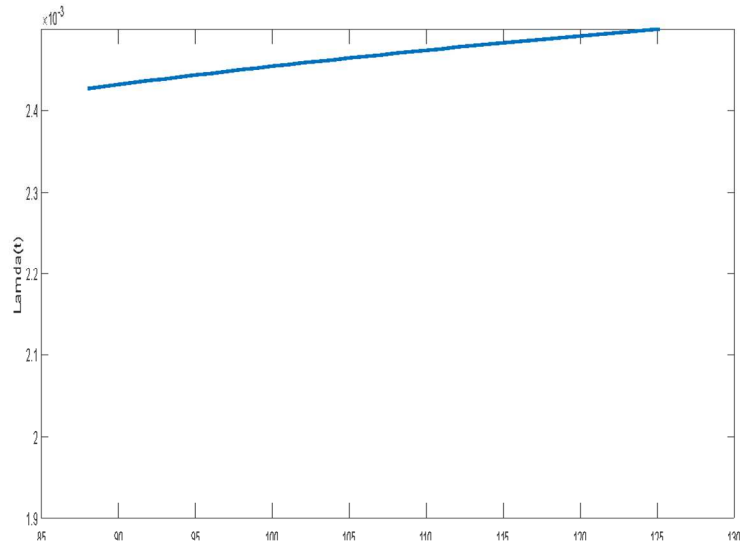


Figure 4.9. Le taux de défaillance $\lambda(t)$ de l'organe A du robot

➤ **Densité de probabilité de défaillance $f(t)$**

Elle permet d'estimer à n'importe quel instant la densité d'avoir une panne, elle est égale au produit entre le taux de défaillance et la fonction de fiabilité, soit :

$$f(t) = \lambda(t) * R(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta}} = \frac{1.06}{390.05} \left(\frac{t-25.85}{390.05} \right)^{0.06} e^{-\left(\frac{t-25.85}{390.05} \right)^{1.06}} \quad (4.4)$$

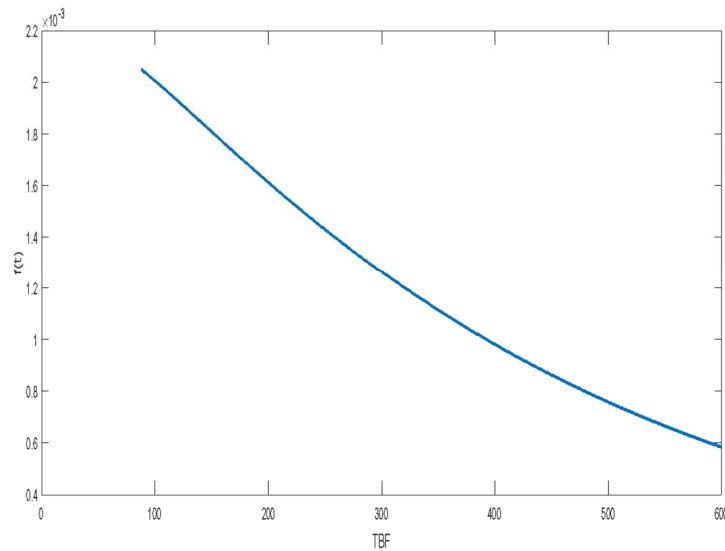


Figure 4.10. Densité de probabilité de défaillance $f(t)$ de l'organe A du robot

IV.3.2.2. Etude de la fiabilité de l'organe D (Poignée de programmation)

De la même manière qu'auparavant, nous avons commencé par calculer les TBF relatifs à cet organe comme montré dans le tableau (4.7).

Tableau 4.7. TBF de l'organe D calculés à partir de l'historique du robot

N°	1	2	3	4	5	6
TBF (h)	80	14	4	416	584	208

VI.3.2.2.1. Paramètres du modèle

Après application du modèle de Weibull via le logiciel, nous avons obtenu les paramètres suivants (figure 4.11):

Beta = 0.4934

Eta = 196.65 heures

Gamma = 1.3682

MTBF = 404.50 heures

Plusieurs remarques sont à signaler :

1. Le fait que le paramètre β est inférieur à 1 indique que l'organe D est en période de jeunesse, la politique de maintenance à appliquer doit se faire sur cette base.
2. Le paramètre Gamma indique qu'aucune défaillance ne se produit avant 1.3682 heures de fonctionnement.
3. L'organe D travaille en moyenne 404.5 heures avant de subir une panne. La détermination de la MTBF est très indispensable pour la mise à jour du plan de maintenance préventive de l'organe.

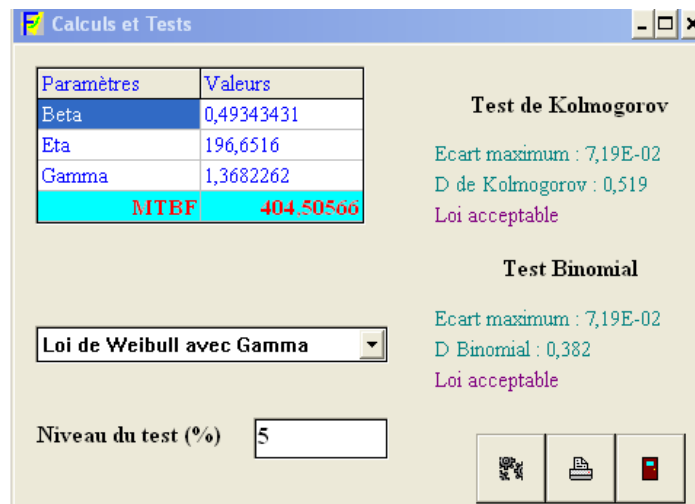


Figure 4.11. Paramètres du modèle de Weibull de l'organe D du robot

IV.3.2.2.2. Interprétation graphique des résultats

La figure (4.12) montre la représentation des TBF sur le papier de Weibull ainsi que l'ajustement fait par le logiciel et qui a conduit à l'obtention des résultats

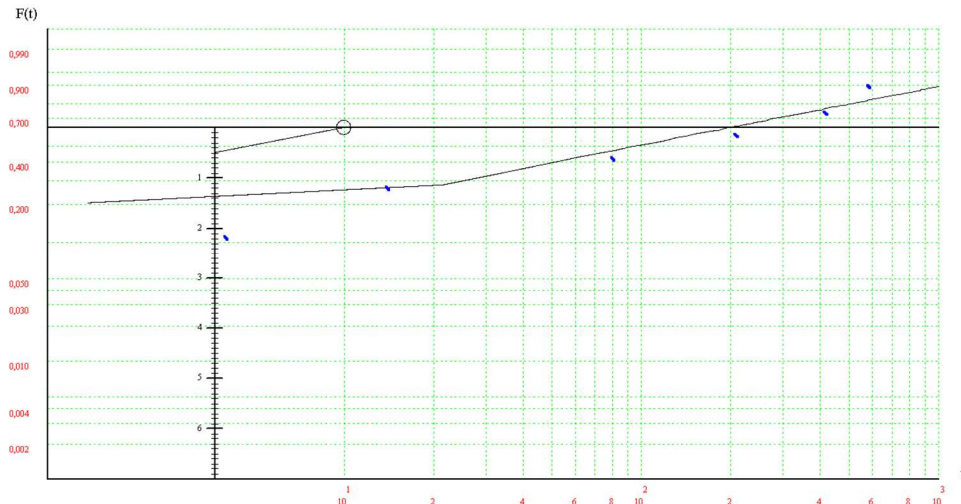


Figure 4.12. Représentation des TBF sur le papier de Weibull

➤ Fonction de fiabilité de l'organe D

L'équation de fiabilité $R(t)$ de l'organe D est donnée par :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} = e^{-\left(\frac{t-1.36}{196.65}\right)^{0.49}} \quad (4.5)$$

Nous pouvons par ce fait calculer la fiabilité de l'organe D à n'importe quel instant. La représentation graphique de la fiabilité est donnée par la figure (4.13). Celle-ci est décroissante avec le temps ce qui implique que la probabilité de bon fonctionnement de l'organe D décroît avec le temps.

➤ Probabilité de défaillance de l'organe D

La fonction de défaillance $F(t)$ est donnée par :

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} = 1 - e^{-\left(\frac{t-1.36}{196.65}\right)^{0.49}} \quad (4.6)$$

Comme elle est l'inverse de la fonction de fiabilité, la fonction de défaillance est croissante avec le temps, ceci indique que la probabilité d'avoir une panne augmente avec le temps. Rappelons que cette probabilité peut être calculée à n'importe quel instant grâce à la formule (4.6) ou à partir de la courbe de la figure (4.14).

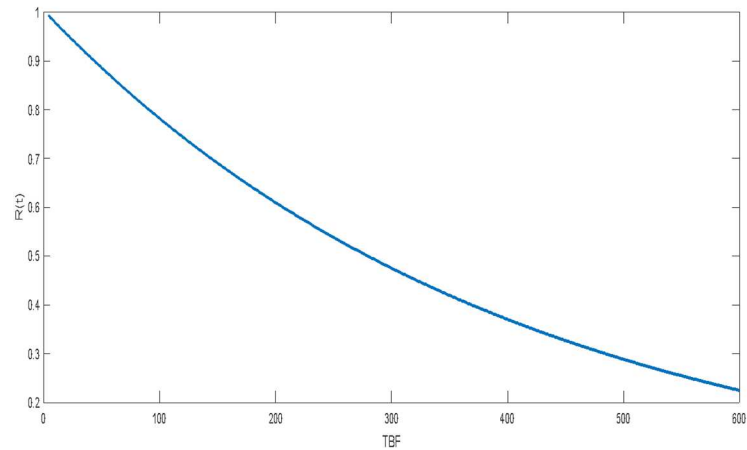


Figure 4.13. Fonction de fiabilité R(t) de l'organe D du robot

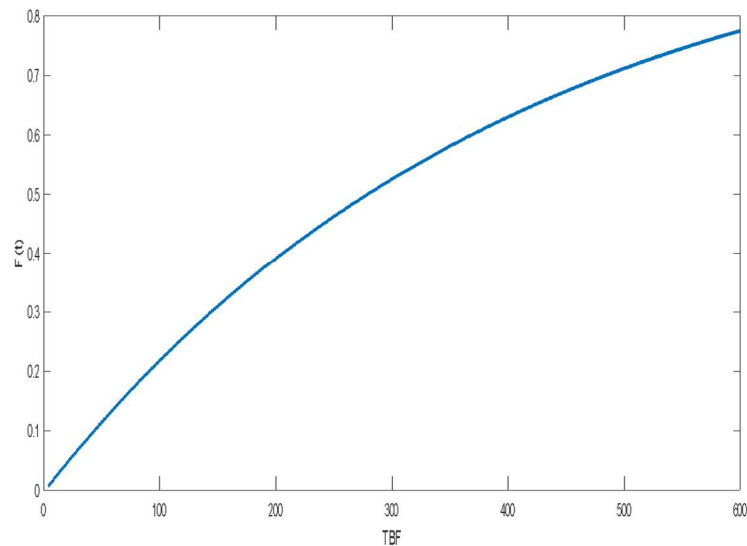


Figure 4.14. Fonction de défaillance F(t) de l'organe D du robot

➤ Taux de défaillance de l'organe D

Le taux de défaillance est donné par l'expression suivante :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} = \frac{0.49}{196.65} \left(\frac{t-1.36}{196.65} \right)^{-0.51} \quad (4.7)$$

La figure (4.15) montre que le taux de défaillance est sensiblement décroissant, ce qui signifie que l'organe D est en période de jeunesse, ceci est confirmé par la valeur de β inférieure à 1. Dans cette période les défaillances peuvent être dues à des défauts de conception, fabrication, montage ou exploitation. Une maintenance préventive avec une surveillance accrue du robot sont à envisager.

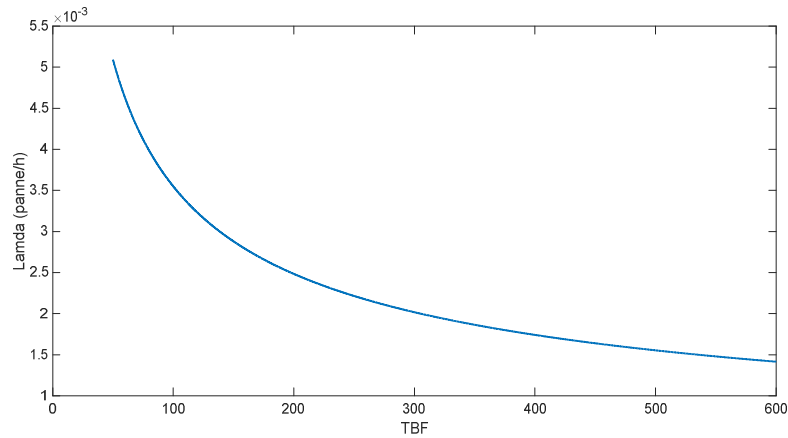


Figure 4.15. Le taux de défaillance $\lambda(t)$ de l'organe D du robot

➤ **Densité de probabilité de défaillance $f(t)$**

Elle permet d'estimer à n'importe quel instant la densité d'avoir une panne, elle est égale au produit entre le taux de défaillance et la fonction de fiabilité, soit :

$$f(t) = \lambda(t) * R(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta}} = \frac{0.49}{196.65} \left(\frac{t-1.36}{196.65} \right)^{-0.51} e^{-\left(\frac{t-1.36}{196.65} \right)^{0.49}} \quad (4.8)$$

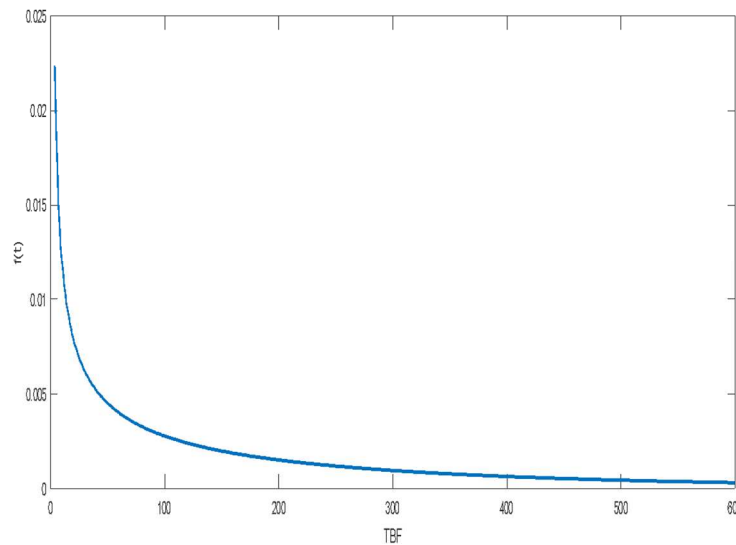


Figure 4.16. Densité de probabilité de défaillance $f(t)$ de l'organe D du robot

IV.3.2.3. Etude de la fiabilité de l'organe E (Nez robot)

Le tableau (4.8) montre les TBF de cet organe calculés à partir de l'historique du robot. On introduit ensuite ces données dans le logiciel FIABOPTIM. On obtient ainsi les valeurs numériques concernant les paramètres de la loi de weibull ainsi que la moyenne des TBF (MTBF).

Tableau 4.8. TBF de l'organe E calculés à partir de l'historique du robot

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
TBF (h)	8	24	296	888	720	15	120	120	8	7	72	256

VI.3.2.3.1. Paramètres du modèle

Après application du modèle de Weibull via le logiciel, nous avons obtenu les paramètres suivants (figure 4.17):

Beta = 0,4680

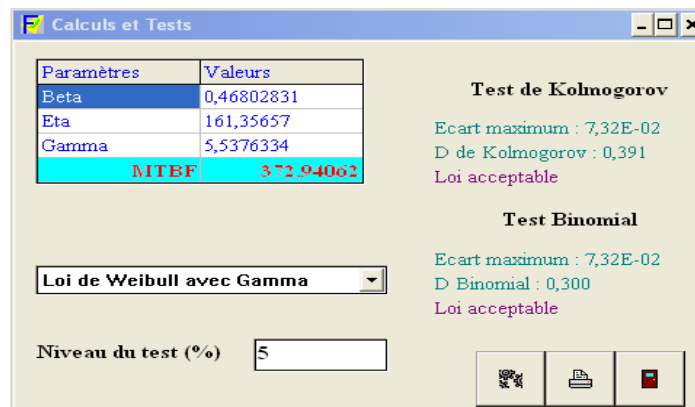
Eta=161,35 heures

Gamma=5,5376

MTBF=372,94 heures

Plusieurs remarques sont à signaler :

1. Le fait que le paramètre β est inférieur à 1 indique que l'organe E est en période de jeunesse, la politique de maintenance à appliquer doit se faire sur cette base.
2. Le paramètre Gamma indique qu'aucune défaillance ne se produit avant 5,53 heures de fonctionnement.
3. L'organe E travaille en moyenne 372,94 heures avant de subir une panne. La détermination de la MTBF est très indispensable pour la mise à jour du plan de maintenance préventive de l'organe.

**Figure 4.17. Paramètres du modèle de Weibull de l'organe E du robot****IV.3.2.3.2. Interprétation graphique des résultats**

La figure (4.18) montre la représentation des TBF sur le papier de Weibull ainsi que l'ajustement fait par le logiciel et qui a conduit à l'obtention des résultats

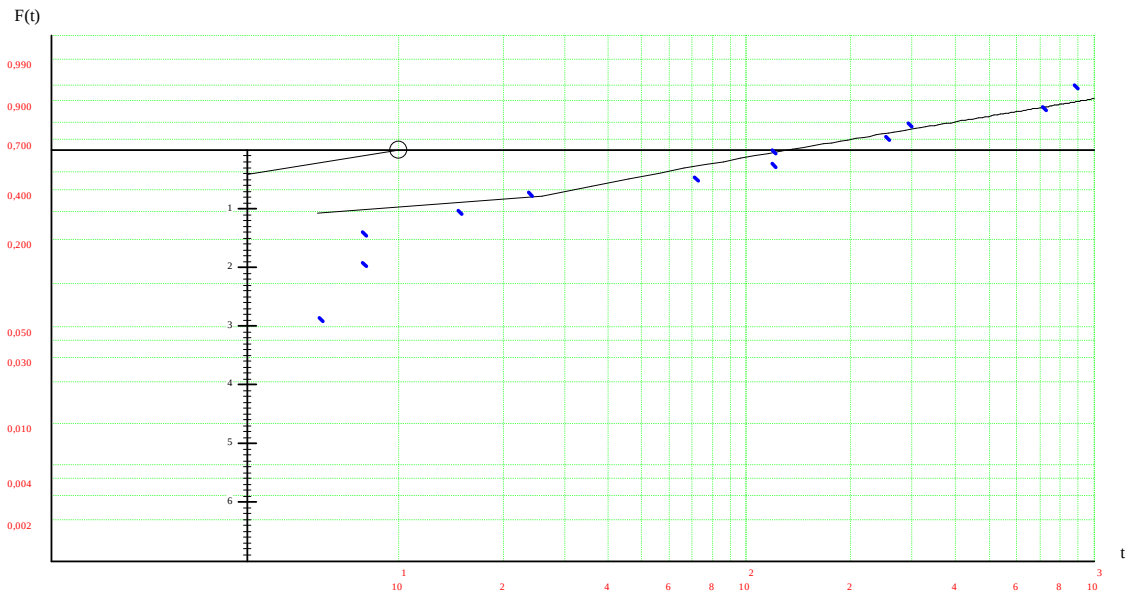


Figure 4.18. Représentation des TBF sur le papier de Weibull

➤ Fonction de fiabilité de l'organe E

L'équation de fiabilité $R(t)$ de l'organe D est donnée par :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} = e^{-\left(\frac{t-5.53}{161.35}\right)^{0.46}} \quad (4.9)$$

Nous pouvons par ce fait calculer la fiabilité de l'organe E à n'importe quel instant. La représentation graphique de la fiabilité est donnée par la figure (4.19). Celle-ci est décroissante avec le temps ce qui implique que la probabilité de bon fonctionnement de l'organe E décroît avec le temps.

.

➤ Probabilité de défaillance de l'organe E

La fonction défaillance $F(t)$ est donnée par :

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} = 1 - e^{-\left(\frac{t-5.53}{161.35}\right)^{0.46}} \quad (4.10)$$

Comme elle est l'inverse de la fonction fiabilité, la fonction de défaillance est croissante avec le temps, ceci indique que la probabilité d'avoir une panne augmente avec le temps. Rappelons que cette probabilité peut être calculée à n'importe quel instant grâce à la formule (4.10) ou à partir de la courbe de la figure (4.20).

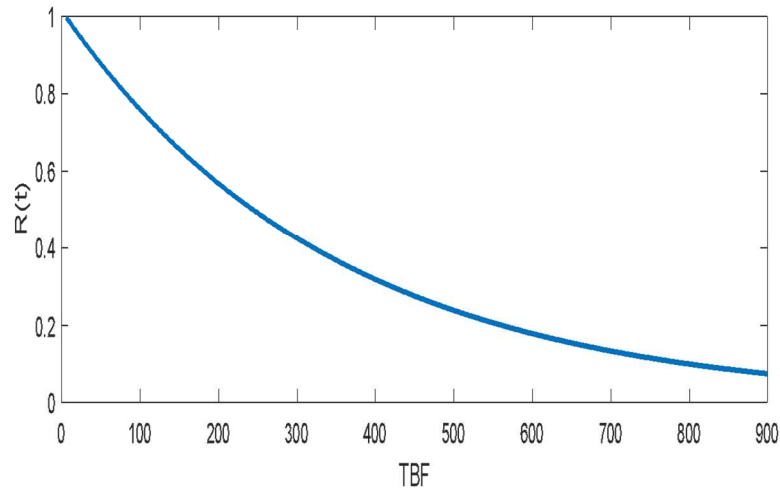


Figure 4.19. Fonction de fiabilité R(t) de l'organe E du robot

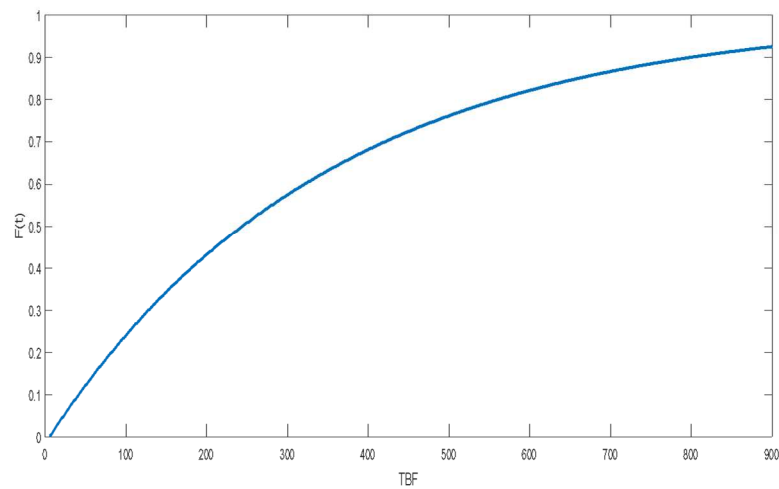


Figure 4.20. Fonction de défaillance F(t) de l'organe E du robot

➤ Taux de défaillance de l'organe E

Le taux de défaillance est donné par l'expression suivante :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} = \frac{0.46}{161.35} \left(\frac{t-5.53}{161.35} \right)^{-0.54} \quad (4.11)$$

La figure (4.21) montre que le taux de défaillance est décroissant, ce qui signifie que l'organe E est en période de jeunesse, ceci est confirmé par la valeur de β inférieure à 1. Dans cette période les défaillances peuvent être dues à des défauts de conception, fabrication, montage ou exploitation. Une maintenance préventive avec une surveillance accrue du robot sont à envisager.

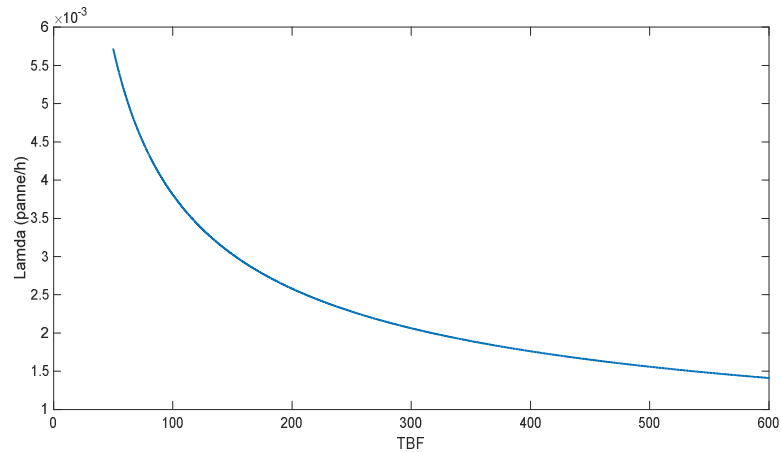


Figure 4.21. Taux de défaillances de l'organe E du robot

➤ Densité de probabilité de défaillance $f(t)$

Elle permet d'estimer à n'importe quel instant la densité d'avoir une panne, elle est égale au produit entre le taux de défaillance et la fonction de fiabilité, soit :

$$f(t) = \lambda(t) * R(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta}} = \frac{0.46}{161.35} \left(\frac{t-5.53}{161.35} \right)^{-0.54} e^{-\left(\frac{t-5.53}{161.35} \right)^{0.46}} \quad (4.12)$$

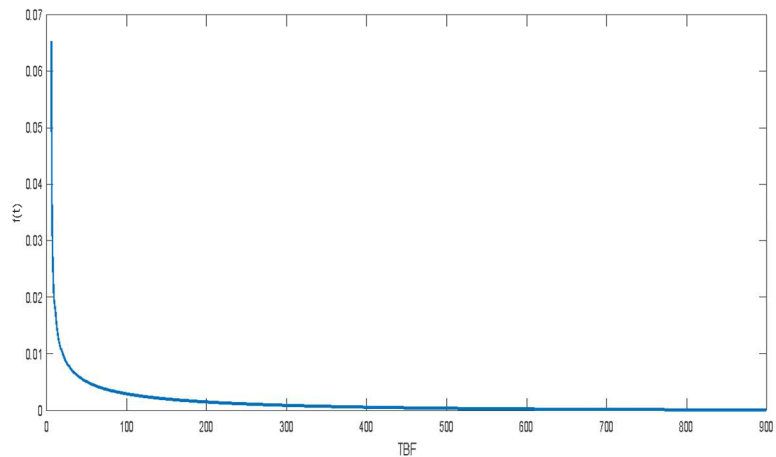


Figure 4.22. Densité de probabilité de défaillance de l'organe E du robot

IV.3.2.4. Etude de la fiabilité de l'organe F (Fin de course bras horizontal)

Le tableau (4.9) montre les TBF de cet organe calculés à partir de l'historique du robot. On introduit ensuite ces données dans le logiciel FIABOPTIM. On obtient ainsi les valeurs numériques concernant les paramètres de la loi de weibull ainsi que la moyenne des TBF (MTBF).

Tableau 4.9. TBF de l'organe F calculés à partir de l'historique du robot

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9
TBF (h)	1568	72	48	17	10	16	40	184	120

VI.3.2.4.1. Paramètres du modèle

Après application du modèle de Weibull via le logiciel, nous avons obtenu les paramètres suivants (figure 4.23):

Beta = 0.6809

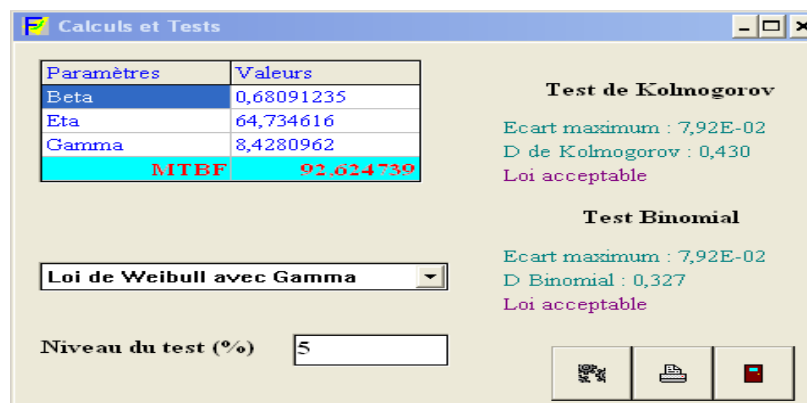
Eta=64.73 heures

Gamma=8.4280962

MTBF=92.624 heures

Plusieurs remarques sont à signaler :

1. Le fait que le paramètre β est inférieur à 1 indique que l'organe F est en période de jeunesse, la politique de maintenance à appliquer doit se faire sur cette base.
2. Le paramètre Gamma indique qu'aucune défaillance ne se produit avant 8.42 heures de fonctionnement.
3. L'organe F travaille en moyenne 92.62 heures avant de subir une panne. La détermination de la MTBF est très indispensable pour la mise à jour du plan de maintenance préventive de l'organe.

**Figure 4.23. Paramètres du modèle de Weibull de l'organe F du robot****IV.3.2.4.2. Interprétation graphique des résultats**

La figure (4.24) montre la représentation des TBF sur le papier de Weibull ainsi que l'ajustement fait par le logiciel et qui a conduit à l'obtention des résultats.

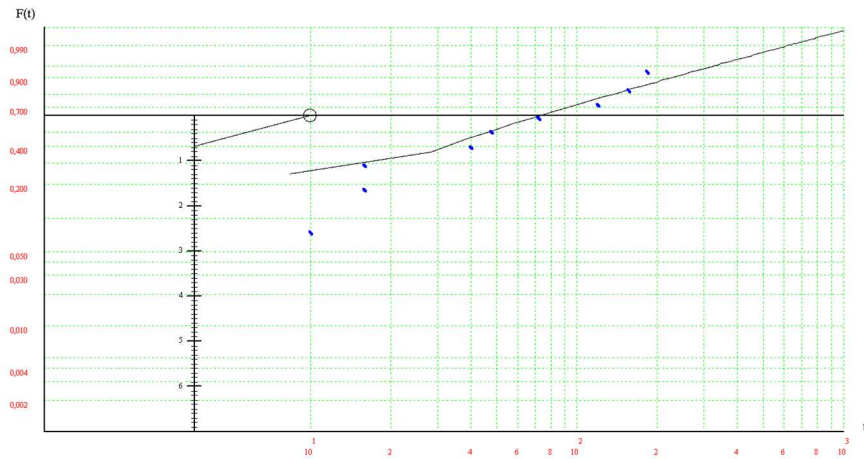


Figure 4.24. Représentation des TBF sur le papier de Weibull

➤ Fonction de fiabilité de l'organe F

L'équation de fiabilité $R(t)$ de l'organe D est donnée par :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} = e^{-\left(\frac{t-8,42}{64,73}\right)^{0,68}} \quad (4.13)$$

Nous pouvons par ce fait calculer la fiabilité de l'organe F à n'importe quel instant. La représentation graphique de la fiabilité est donnée par la figure (4.25). Celle-ci est décroissante avec le temps ce qui implique que la probabilité de bon fonctionnement de l'organe F décroît avec le temps.

➤ Probabilité de défaillance de l'organe F

La fonction de défaillance $F(t)$ est donnée par :

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} = 1 - e^{-\left(\frac{t-8,42}{64,73}\right)^{0,68}} \quad (4.14)$$

Comme elle est l'inverse de la fonction de fiabilité, la fonction de défaillance est croissante avec le temps, ceci indique que la probabilité d'avoir une panne augmente avec le temps. Rappelons que cette probabilité peut être calculée à n'importe quel instant grâce à la formule (4.14) ou à partir de la courbe de la figure (4.26).

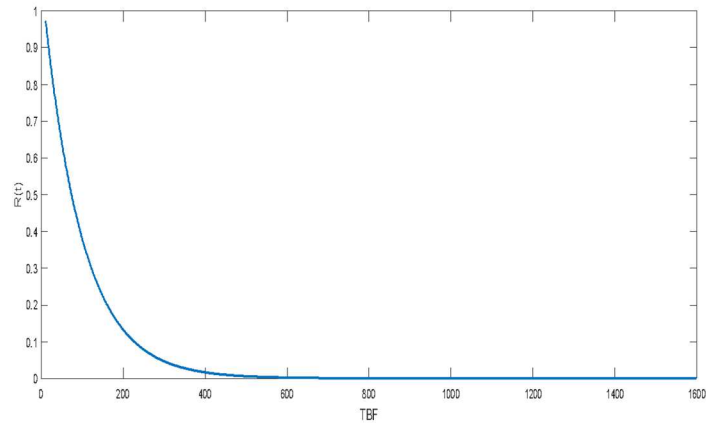


Figure 4.25. Fonction de fiabilité $R(t)$ de l'organe F du robot

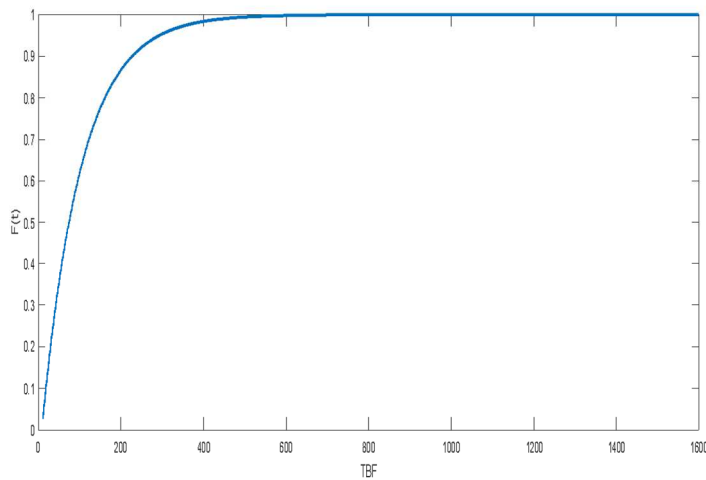


Figure 4.26. Fonction de fiabilité $F(t)$ de l'organe E du robot

➤ Taux de défaillance de l'organe F

Le taux de défaillance est donné par l'expression suivante :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} = \frac{0.68}{92.62} \left(\frac{t-8.42}{92.62} \right)^{-0.32} \quad (4.15)$$

La figure (4.27) montre que le taux de défaillance est décroissant, ce qui signifie que l'organe F est en période de jeunesse, ceci est confirmé par la valeur de β inférieure à 1. Dans cette période les défaillances peuvent être dues à des défauts de conception, fabrication, montage ou exploitation. Une maintenance préventive avec une surveillance accrue du robot sont à envisager.

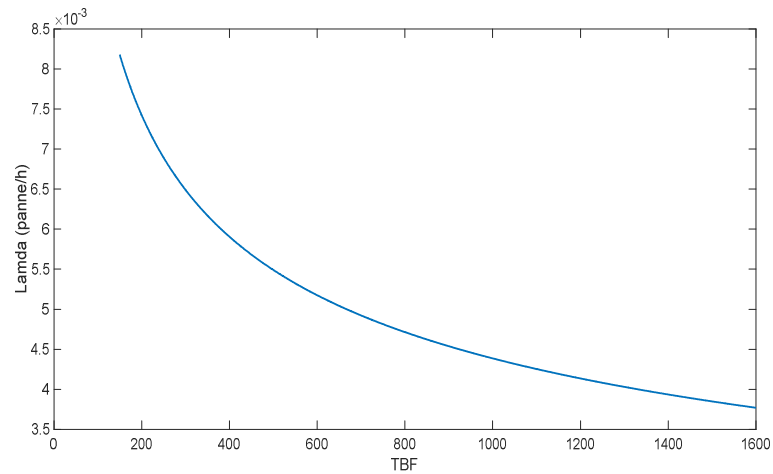


Figure 4.27. Taux de défaillance de l'organe F

➤ **Densité de probabilité de défaillance f(t) de l'organe F**

Elle permet d'estimer à n'importe quel instant la densité d'avoir une panne, elle est égale au produit entre le taux de défaillance et la fonction de fiabilité, soit :

$$f(t) = \lambda(t) * R(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta}} = \frac{0.68}{92.62} \left(\frac{t-8.42}{92.62} \right)^{-0.32} e^{-\left(\frac{t-8.42}{92.62} \right)^{0.68}} \quad (4.16)$$

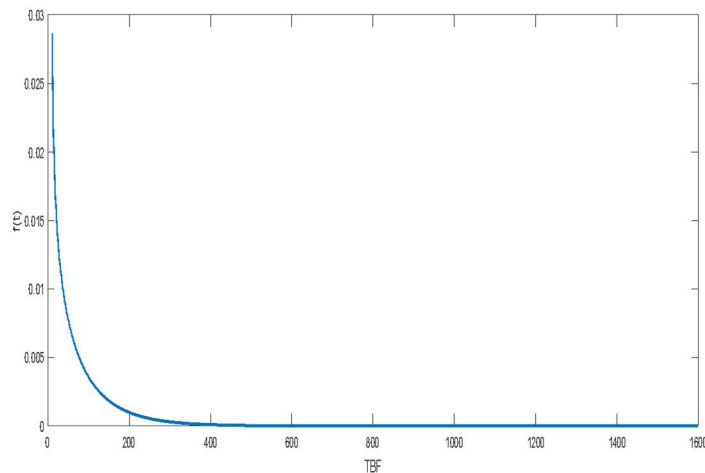


Figure 4.28. Densité de probabilité de défaillance de l'organe F

IV. 4. Analyse qualitative des pannes du robot par la méthode AMDEC

Comme nous l'avons expliqué au chapitre 2, nous avons entamé une analyse AMDEC de tous les modes de défaillances affectant le robot. Cette analyse nous permettra de faire un bilan détaillé de toutes les défaillances du robot et de les quantifier pour en déduire les plus critiques. Des actions de maintenance ciblées des pannes les plus critiques seront donc programmées. Le tableau (4.10) montre les résultats de l'analyse AMDEC du robot Roby 6 x.

IV.4.1. Tableau AMDEC

Tableau 4.10. Application de l'analyse AMDEC au robot Roby 6x

ETUDE : Analyse des modes de défaillances, de leur Effets et de leurs Criticité							
Organe du robot	Caractéristique de défaillance			Criticité			
	Fonction	Mode de défaillance	Cause de défaillance	F	D	G	C
Pistolet	Peindre des surfaces	Pas de peinture	Câble arraché	1	2	2	4
			Electrovanne défaillante	1	3	2	6
			Mauvais contact	1	2	4	8
Vérin	Permet de produire un mouvement rectiligne	Mauvais trajectoire	Problème carte	1	3	2	6
Poignées de programmation	Offrir une interface entre homme machine pour programmer	Arrêt pendant le cycle	Contact de poignée de programmation collé par peinture	1	3	2	6
		Cycle trop long pas fin	Pas de cause	1	3	4	12
		Mauvais enregistrem-ent	Prise d'enregistrement pleine de peinture	1	2	2	4
Carte servo (s)	Recevoir les instructions d'un microcontrôleur	Avance par saccade	Réglage gain du servo 1 carte N°4	1	2	2	4
Carte DH	Décrire la position et l'orientation du robot	Mauvaise trajectoire après	Réglage du temps d'amortissement	1	3	4	12

		l'enregistre- ment					
Disquette	Sauvegarder les programmes de peinture	Mauvaise trajectoire	Echange disquette	2	2	2	8
Manque de pression	Surveillance de la pression	Plus de reproduction de l'enregistrem- -ent	Fin de couse coincée par la peinture	1	2	2	4
Fin de course du support bras	Envoyer un signal à l'automate et arrêt du mouvement	Pas de départ cycle	Refixer tôle support	1	2	2	4
		Pas d'arrêt rotation bras mandrin	Bras de robot coincé	1	2	2	4
			Contact bloqué par protection plastique	1	2	2	4
			Fin de course non libérée	1	2	2	4
		Pas de rotation	Contact support bras reste collé	1	2	2	4
			Bras support	1	2	2	4
		Arrêt en cours la reproduction	Plastique	1	2	2	4
Nez de robot	Projeter avec précision la peinture sur une surface	Mauvaise trajectoire en cours de travail	Réglage vitesse pistolet, arrêt de peinture	1	2	2	4
		Départ cycle défaillant	Difficulté programmation	1	2	3	6
		Avance du bras saccadée	Changement disquette du lecteur	1	2	2	4
		Plus rotation rampe	Pollution (nettoyage)	1	3	4	12
		Mauvaise reproduction de cycle	Jeu important dans la tête et vibration Contrôle servo	1	3	3	9

		Décalage de la reproduction du cycle	Rotule cassée	2	3	3	18
		Jeu dans la tête	Servo bloqué	1	3	4	12
		Arrêt de cycle	Pas de cause	1	2	2	4
		Bruit et vibration	Jeu sur rotule	1	2	2	4

IV.4.2. Evaluation de la criticité

A partir du tableau (4.10) on a hiérarchisé les défaillances selon le seuil de criticité selon la grille d'évaluation décrite dans le chapitre 2. Les résultats sont mentionnés dans le tableau (4.11). L'analyse de cette évaluation permet de dégager cinq causes de défaillance dont la criticité est interdite (en rouge):

- Trois causes touchent le nez robot : Pollution, rotule cassée, servo bloqué ;
- Une cause touche la carte DH : Réglage du temps d'amortissement ;
- Une cause touche la poignée de programmation : Cycle trop long.

On distingue également trois causes de défaillance dont la criticité est élevée (en orange):

- Nez robot : Jeu important dans la tête et vibration ;
- Disquette : Echange disquette ;
- Pistolet : Mauvais contact

Les autres causes sont moyennes et ne sont pas alarmantes (en vert).

IV.4.3. Analyse des résultats et actions à entreprendre

Une fois les défaillances les plus critiques ciblées, on donne dans le tableau (4.12) quelques recommandation relatives à ces défaillances afin d'optimiser les actions de maintenance et améliorer le fonctionnement du robot.

Tableau 4.11. Evaluation de la criticité du robot de peinture

Composant	Criticité	Hierarchisation
Nez de robot	4	4 criticités moyennes
	4	
	4	
	4	
	9	Une criticité élevée
	12	3 criticités interdites
	12	
	18	
Fin de course du support bras	4	4 criticités moyennes
	4	
	4	
	4	
Manque de pression	4	Criticité moyenne
Disquette	8	Criticité élevée
Carte DH	12	Criticité interdite
Carte servo (s)	4	Criticité moyenne
Poignées de programmation	4	2 criticités moyennes et une criticité élevée
	6	
	12	
Vérin	6	Criticité moyenne
Pistolet	4	2 criticités moyennes et criticité élevée
	6	
	8	

Remarques importantes

- Trois des cinq causes interdites de défaillance sont affectées au nez robot (organe E). Ce résultat concorde parfaitement avec les deux analyses de Pareto qui ont classées cet organe en tant qu'organe le plus prioritaire du robot. Une surveillance accrue de cet organe est donc indispensable ;
- Une cause interdite touche la poignée de programmation (organe D), classée elle aussi en tant qu'organe prioritaire par l'analyse de Pareto ;

- Même si quantitativement l'analyse de Pareto montre que la carte DH (organe I) est d'une importance moyenne, qualitativement la criticité de sa cause de défaillance est très élevée. Ce résultat montre l'intérêt à associer des approches quantitatives et qualitatives.
- La majorité des criticités élevées sont dues au critère G (gravité) élevé. Ce critère est lié au temps d'arrêt relatif à ces défaillances.
- Nous avons agencé les actions de maintenance de manière à entamer plusieurs actions sur le robot en même temps. De ce fait et en respectant la MTBF de chaque organe déterminé par l'étude de fiabilité, des périodicités de maintenance de 200 heures, 250 heures et 300 heures sont proposées.

Tableau 4.12. Actions à entreprendre et périodicités de maintenance du robot

Composant	Criticité	Cause de la défaillance	Action de maintenance	Périodicité proposée
Nez robot	9	Jeu important dans la tête et vibration	Contrôle et analyse vibratoire si possible	≈300 heures (MTBF*0.8=372*0.8)
	12	Pollution	Nettoyage permanent du nez robot	≈250 heures (MTBF*0.7=372*0.7)
	12	Servo bloqué	Inspection régulière du servo	≈250 heures (MTBF*0.7=372*0.7)
	18	Rotule cassée	Inspection régulière de la rotule du nez robot	≈200 heures (MTBF*0.5=372*0.5)
Disquette	8	Changement disquette	Prévoir disponibilité de disquettes	≈300 heures MTBF non disponible
Carte DH	12	Réglage temps d'amortissement	Contrôle régulier de la carte DH	≈250 heures MTBF non disponible
Poignée de programmation	12	Cycle trop long	Inspection, étalonnage et contrôle régulier de la poignée de programmation	≈300 heures (MTBF*0.7=404*0.7)
Pistolet	8	Mauvais contact	Inspection et nettoyage régulier du câble de contact	≈300 heures (MTBF*0.8=406*0.8)

IV.5. Conclusion du chapitre

Ce chapitre a été consacré à l'étude de la maintenance du robot Roby 6 x afin d'en optimiser les actions. Pour ce faire une étude quantitative a été entamée à partir d'un historique de pannes et d'interventions fourni par le service maintenance. L'analyse est faite, en premier lieu, en utilisant la méthode ABC et les graphes de PARETO nous a permis de distinguer les organes critiques, majeures et mineures en les séparant en différentes zones. Le nez robot et la poignée de programmation sont désormais les organes les plus critiques du robot nécessitant une surveillance accrue et des actions de maintenance adéquates.

La deuxième partie de ce chapitre a été réservée à l'étude de fiabilité de quatre organes du robot classés prioritaires par les études de Pareto. Un logiciel de fiabilité a été utilisé avec le modèle de Weibull comme modèle d'évaluation. Cette étude a permis la détermination des paramètres de Weibull afin de reconnaître la phase de vie des organes et de déterminer les lois de fiabilité de chacun d'eux. L'étude de fiabilité a également permis de définir la Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement de chaque organe, ce qui constitue une donnée très importante pour programmer les actions de maintenance et les visites préventives.

Enfin une analyse AMDEC a été entamée pour faire un bilan des différents modes de défaillances affectant le robot. Ce bilan nous a permis de cibler les défaillances les plus critiques et de proposer des actions de maintenance ciblées ainsi que les périodicités correspondantes en se référant à la MTBF préalablement déterminée par l'étude de fiabilité.

Conclusion générale

Ce projet de fin d'étude a exploré en profondeur la modélisation mathématique (géométrie et cinématique) et la maintenance d'un robot de peinture à 6 axes de la marque Roby. Nous avons commencé par des généralités sur la robotique et établi une base théorique solide en explorant les concepts de modélisation géométrique et cinématique des robots. Ces modèles permettent de programmer et de contrôler le robot. La phase suivante du travail s'est concentrée sur la modélisation géométrique et cinématique du robot Roby à 6 axes, en appliquant ces théories à travers la modélisation et en développant un programme de simulation sous MATLAB en utilisant Peter Corke toolbox pour décrire le modèle géométrique direct du robot. Cette simulation permet de définir en temps réel la position de l'organe terminal sans avoir recourt aux longs calculs du modèle géométrique. Une modélisation cinématique directe a également été réalisée afin de définir les vitesses linéaires et angulaires de l'organe terminal.

A partir de l'historique des pannes du robot de peinture à 6 axes de la marque Roby, nous avons entamé une étude complète de sa maintenance par association de deux approches distinctes : l'une quantitative et l'autre qualitative. En premier lieu une étude ABC de Pareto a été appliquée pour déterminer les organes prioritaires du robot. Cette étude est complétée par les trois graphes de Pareto qui ont finalement permis sans ambiguïté de définir les organes du robot dont des actions de maintenance préventives sont à entreprendre en priorité. Une étude de fiabilité ciblée par le modèle de Weibull a ensuite été réalisée par le logiciel FIABOPTIM. Cette étude concerne quatre organes du robot classés prioritaires par l'étude de Pareto. Les résultats ont permis de définir toutes les lois de fiabilité de chaque organe ainsi que sa Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement. Des politiques de maintenance adéquates et des actions pratiques sont alors proposées. Enfin une analyse AMDEC visant le bilan détaillé des défaillances du robot a été réalisée. Cette analyse a permis de quantifier les défaillances du robot et définir plusieurs criticités qui ont finalement abouti à la localisation des défaillances les plus critiques et dont des actions de maintenance spéciales et adéquates seront envisagées.

Références bibliographiques

- [1] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Robotique>
- [2] KASMI, H. et BRIK, Y. Modélisation géométrique d'un bras manipulateur de type SCARA. Mémoire de Master, Université Ibn Khaldoun-Tiaret 2016
- [3] <https://www.fanuc.eu/be/fr/robots/page-de-filtre-des-robots/s%C3%A9rie-paint/p-250ib-15>
- [4] [robotics/https://blog.universal-robots.com/fr/la-robotique-collaborative-integre-les-industries agroalimentaires](https://blog.universal-robots.com/fr/la-robotique-collaborative-integre-les-industries-agroalimentaires)
- [5] <https://biotech-spain.com/en/articles/global-r-d-trends-in-surgical>
- [6] TAPIA, J. G. Modélisation et identification géométrique de robots utilisés pour des opérations d'usinage. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2016
- [7] CHAAL, M. Modélisation cinématique d'un robot manipulateur à chaîne continue ouverte. Thèse de doctorat. Université Kasdi Merbah Ouargla, 2013
- [8] DJEBALA, A. Cours SMA & Robotique, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2024
- [9] BOUCHLAGHEM, A.M. Modélisation et commande d'un robot manipulateur à six degrés de liberté. Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2016
- [10] MONCHY, F. et VERNIER, J. P. Maintenance : méthodes et organisation (3ème édition). Dunod, 2012
- [11] SOURIS, J. P. Le guide du parfait responsable maintenance. Lexitis, 2010
- [12] KUKA, AG. Robot maintenance and servicing standards. KUKA Robotics. <https://www.kuka.com/>, 2020
- [13] ABB Robotics. Paint robot maintenance manual. ABB Group. <https://new.abb.com/products/robotics>, 2019
- [14] Union européenne. Directive 2014/34/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 février 2014 relative à l'harmonisation des législations des États membres concernant les appareils et les systèmes de protection destinés à être utilisés en atmosphères explosibles (ATEX). Journal officiel de l'Union européenne. <https://eur-lex.europa.eu/>
- [15] International Organization for Standardization. ISO 10218-2:2011 – Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Part 2: Robot systems and integration, 2011. ISO. <https://www.iso.org/standard/41571.html>
- [16] Siemens AG. Predictive maintenance for industrial robotics: White paper. Siemens Industry, 2021. <https://new.siemens.com/>

- [17] FANUC Corporation. Robot preventive maintenance guide. FANUC 2020.
<https://www.fanuc.eu/>
- [18] AUBERVILLE, J. M. Maintenance industrielle de l'entretien de base à l'optimisation de la sûreté. Ellipses édition Marketing S.A. Paris, 2004.
- [19] DJEBALA, A. Cours de maintenance et sûreté de fonctionnement, Master 2 Maintenance industrielle. Université de Guelma 2018
- [20]<https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=http://neumann.hec.ca/sites/cours/6>
- [21] OUMEDOUR, S. et BENJAMAA, D. Optimisation de la sûreté de fonctionnement et amélioration de la fiabilité des pompes centrifuges verticales Sulzer de l'entreprise SONATRASH BHP BILLITON, Ohanet, In Amenas. Mémoire de Master, Université de Guelma, 2009.
- [22] Document technique CMA robots Roby 6 axes.
- [23] LYONNET, P. La maintenance : Mathématique et méthodes. Techniques et documentation, 1992.