

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA -1-



Institut d'Aéronautique et des Sciences Spatiales



MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme

De Master en Aéronautique

Option : Construction Aéronautique

Spécialité : Structure Avions

PROPOSITION D'UNE CELLULE FLEXIBLE DE SOUDAGE D'UNE STRUCTURE D'AVION.

➤ **Présenté par :** Mr. BEDDIAF Nadjib
Mr. REKRAK Omar

➤ **Dirigé par:** M.C.B. / Mme. BENACHENHOU Sari el-kahina
Mag. / Mr. BENMISRA Abdelkader

Promotion : 2020/2021

DÉDICACE

Je remercie Dieu qui m'a donné le courage et la volonté d'achever ce travail que je dédie :

*A mes très chers parents qui ont toujours prié pour moi et qui n'ont pas cessé de m'encourager
et de me soutenir depuis le début de ma scolarité.*

A mes chères sœurs et ma future femme pour leur soutien dans mes études.

A ma famille REKRAK et ZEMOULI grands et petits.

*A la mémoire de deux personnes chères à mon cœur, mes oncles qui n'ont cessé de leur vivant
de me conseiller et m'encourager.*

*A la mémoire de mon grand-père Boudjadi et mon grand-père le lieutenant de de l'ALN
ZEMOULI Kadour dit si Rabah ainsi que mes grands-mères.*

*A la mémoire de toutes les personnes chères à mon cœur que j'ai perdu durant ces 02 dernières
années, Ma chère tante, mon très cher cousin parti si jeune et dernièrement mon beau père qu'Allah
les accueille dans son propre paradis*

*A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin et que j'ai oublié trouvent l'expression de ma
profonde considérations.*

REKRAK Omar

DÉDICACE

Avec Ces sentiments d'amour et de gratitude les plus sincères je dédie ce Modeste travail :

*A mes chers parents, que nulle dédicace ne puisse exprimer mes sincères
sentiments, pour leur patience illimitée, leur encouragement contenu,
leur aide, en témoignage de mon profond amour et respect pour leurs
grands sacrifices.*

*A mes chers enfants mouadh, nihal et mes chers frères et sœurs pour Cœur grand
amour qu'ils trouvent ici l'expression de ma haute gratitude*

A ma chère femme qui m'a aidé et supporte dans Ces moments

difficiles

*A mon cher binôme : Rekrak omar, un remerciement
particulier et sincère pour tous vos efforts fournis. Que ce travail soit un témoignage de ma gratitude
et mon profond respect.*

Beddiaf nadjib

Remerciements

Que dieu soit loué pour l'accomplissement de ce travail.

Nous remercions :

Notre encadreur Mme BENACHENHOU Sari el-kahina pour sa patience et ses conseils prodigués.

Ainsi que notre co-encadreur Mr BENMISRA Abdelkader pour ses encouragements, sa disponibilité et pour sa précieuse aide qui nous ont permis d'aboutir aux résultats escomptés.

Nous exprimons notre reconnaissance à la directrice de l'institut d'Aéronautique et des Sciences Spatiales Mme BENKHEDDA Amina pour sa collaboration et son aide durant cette année.

Qu'il nous soit permis à cette occasion pour exprimer nos vifs remerciements à toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce modeste travail, et plus particulièrement à l'ensemble des enseignants qui n'ont pas failli à nous transmettre leurs précieuses connaissances.

Que tous trouvent ici l'expression de notre profond respect et l'assurance de nos plus vifs remerciements.

TABLES DES MATIERES.

DEDICACES.....	i
REMERCIEMENTS.....	ii
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
NOMENCLATURES.....	x

INTRODUCTION GENERALE.....	xi
-----------------------------------	-----------

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ATELIERS FLEXIBLES

I.1 Introduction :.....	3
I. 2 Généralités sur les cellules flexibles.....	3
I.2.1. Définition.....	3
I. 2. 2. Historique.....	4
I. 2. 3. Notion de flexibilité et de cellule flexible.....	5
I.2.3.1. Flexibilité.....	5
I.2.3.2. Types de la flexibilité.....	5
I. 2. 3. 3. Nécessité de la production flexible.....	6
I. 2. 3. 4. Objectif de la production flexible.....	7
I. 2. 3. 5. Avantages de la production flexible.....	7
I. 2.4. Différentes configurations des cellules flexibles.....	7
I. 3. Différents types d'implantation.....	8
I. 3.1. Implantation aléatoire.....	8
I. 3.2. Implantation en sections homogènes.....	9
I. 3.3. Implantation en ligne.....	9
I. 3.4. Implantation en îlots.....	10
I.4. Couple flexibilité / productivité.....	10
I.5. Cellules flexibles.....	11
I. 5.1. Définition.....	11
I. 5.2. Structure d'une cellule flexible de production.....	12
I. 5. 3. Gestion des ressources dans un système flexible.....	13
I. 6. Le robot industriel.....	13
I.6.1. Généralités du Robot Industriel.....	13
I.6. 2. Composition d'un robot.....	15
I. 6. 3. Degrés de liberté et degrés de mobilité.....	16
I. 6. 4. Caractéristiques d'un robot.....	17
I. 6. 5. Redondance.....	18
I. 6 .6. Singularité.....	19
I. 7. Conclusion.....	19

CHAPITRE II : ETUDE THEORIQUE DES ROBOTS INDUSTRIELS

II. 1. Introduction :.....	20
II. 2. Coordonnées homogènes.....	20
II. 2. 1. Représentation d'un point.....	20

II. 2. 2. Représentation d'une direction :.....	21
II. 2. 3. Représentation d'un plan	21
II. 3. Transformations homogènes	21
II. 3. 1. Transformation des repères	21
II. 3. 2. Transformation des vecteurs:.....	22
II. 3. 3. Matrice de transformation de translation pure	23
II. 4. Matrice de transformation de rotation autour des axes principale.....	24
II. 4. 1. Rotation d'angle θ autour de l'axe X	24
II. 4. 2. Rotation d'un angle θ autour de l'axe OY.....	25
II. 4. 3. Rotation d'un angle θ autour de l'axe OZ	25
II. 5. Modèle géométrique direct (MGD)	25
II. 6. Paramètres de Denavit-Hartenberg (D & H)	26
II. 7. Modèle géométrique inverse (MGI)	27
II. 8. Méthodes de description des Orientations.....	28
II. 8. 1. Angles d'Euler.....	28
II. 8. 2. Angles de Roulis – Tangage – Lacet (RTL)	30
II. 9. Modélisation cinématique	31
II. 9. 1. Modèle cinématique direct (MCD)	31
II. 9. 2. Calcul de la matrice Jacobienne.....	32
II. 9. 3. Théorème de composition des vitesses.....	34
II. 10. Modèle cinématique inverse.....	35
II.11. Détermination des paramètres de DENAVIT-HARTENBERG du manipulateur RRRRRR.....	36
II. 12. Conclusion.....	38

CHAPITRE III : Description du procédé de soudage par friction malaxage

(FSW)

III. 1. Introduction :.....	39
III. 2. Définition.....	39
III. 3. Principe et paramètres du procédé	39
III.3.1. principe du soudage FSW	39
III.3.2. paramètres opératoires du soudage	43
III.3.3. paramètre de l'outil de soudure FSW	44
III.4. Les avantages et inconvénients du FSW	46
III.4.1. Les avantages du procédé	46
III.4.2. Les inconvénients du procédé.....	47
III.5. Caractérisation des joints soudés par FSW	48
III.5.1. Métal de base (MB)	48
III.5.2. Zone affectée thermiquement (ZAT)	49
III.5.3. Zone affectée thermo-mécaniquement (ZATM)	49
III.5.4. Noyau soudé (NS)	49
III.6. Industrialisation du procédé FSW.....	49
III.7. Les domaines d'application du soudage FSW	51
III.7.1. Le domaine automobile.....	52
III.7.2. Le domaine ferroviaire.....	52
III.7.3. Le domaine aéronautique.....	52
III.7.4. Le domaine spatial.....	53

III.7.5. Autres domaines d'application.....	53
III.8. La machine de soudage FSW.....	54
III.9. Conclusion.....	57
CHAPITRE IV : SIMULATION NUMERIQUE D'UN ROBOT INDUSTRIEL	
ET INTERPRETATION DES RESULTATS	
IV.1. introduction.....	58
IV. 2. Modélisation géométrique.....	58
IV. 2. 1. Détermination du modèle géométrique direct MGD.....	58
IV. 2. 2. Calcul du modèle géométrique inverse MGI.....	60
IV. 3. Modélisation cinématique.....	64
IV. 3. 1. Détermination du modèle cinématique direct MCD.....	65
IV. 3. 2. Détermination du modèle cinématique inverse MCI.....	66
IV. 4. Génération de trajectoire.....	66
IV. 4. 1. Génération de trajectoires dans l'espace articulaire.....	66
IV. 4. 2. Génération de trajectoires	67
IV. 5. Génération de trajectoires dans l'espace articulaire ou l'espace opérationnel....	69
IV. 5.1 Exemple d'application sur une plaque.....	70
IV. 5.2 Application sur l'empennage horizontal de l'avion Cessna 172.....	74
IV. 6. Conclusion	85
CONCLUSION GENERALE.....	86
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	88

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Mode de fabrication en fonction du volume et de la variété des produits.	6
Figure. I.2 : Cellule robotisée rotative.....	7
Figure. I.3 : Cellule robotisée linéaire.....	8
Figure. I.4 : Cellule robotisée Mobile.....	8
Figure. I. 5 : Implantation en sections homogènes.....	9
Figure. I. 6 : Implantation en ligne.....	9
Figure I. 7 : Implantation en îlots.....	10
Figure 1. 8 : Cellule flexible de soudage par friction-malaxage.....	11
Figure I. 9 : Système de production.....	12
Figure I. 10. Robots industriels de soudage.....	14
Figure I. 11 : Nombre de robots industriels installés pour 10000 employés dans l'industrie manufacturière en 2016.....	15
Figure I. 12. Composition d'un robot.....	15
Figure II.1 : Passage d'un repère R_i à un repère R_f	22
Figure II. 2 : Transformation d'un vecteur.....	22
Figure II. 3 : Transformation d'une translation pure.....	23
Figure II. 4 : Transformation de rotation pure autour de l'axe OX.....	24
Figure. II.5 : Paramètres de D-H.....	26
Figure. II.6 : modèle MGI.....	27
Figure II. 7 : Rotation successives par les angles d'Euler.....	28
Figure II.8 : Représentation des angles d'Euler.....	29
Figure II. 9 : Représentation des angles RTL.....	30
Figure II. 10 : Détermination des vitesses.....	34
Figure II. 11 : Manipulateur RRRRRR.....	37
Figure III. 1: Présentation schématique du principe de procédé FSW.....	40
Figure III. 2 : Phase d'approche.....	41
Figure III. 3 : Phase de soudage.....	42
Figure III.4 : Phase de retrait de l'outil.....	42
Figure III. 5 : Forces générées durant le procédé de FSW.....	44
Figure III. 6 : Schématisation de l'outil FSW et de quelques géométries de pions.....	45
Figure III. 7 : Contraintes géométriques locales autour du joint soudé.....	45
Figure III. 8 : Profil d'un joint soudé selon une coupe perpendiculaire à la direction...	48

Figure III. 9 : Diagramme de référence intégration Produit / Procédé / Ressources....	50
Figure III.10 : Démarche d'industrialisation d'un moyen de production FSW.....	51
Figure III. 11 : Ares 1.....	53
Figure III.12 : (a) : Des supports de lumières, (b) : Des tôles en CU-OF, (c) : Des éléments de générations.....	54
Figure III. 13 : Equipement de soudage par FSW (a) : Fraiseuse adaptée, (b) : Portique spécialisée.....	55
Figure III.14 : Robot industriel avec cellule (a) : Tricept, (b) : Polyarticulé.....	55
Figure IV. 1 : Robot effectuant l'opération de plongée.....	70
Figure IV. 2 : Robot effectuant l'opération de soudage.....	70
Figure IV. 3 : Le point de départ du soudage P1.....	71
Figure IV. 4 : Le point final du soudage P2.....	71
Figure IV. 5 : les angles de rotation des six articulations.....	72
Figure IV. 6 : les courbes des vitesses de rotation des six articulations.....	72
Figure IV. 7 : les courbes des accélérations de rotation des six articulations.....	73
Figure IV. 8 : Empennage horizontal de l'avion Cessna 172.....	74
Figure IV. 9 : Schéma de l'empennage horizontal de l'avion Cessna 172.....	74
Figure IV. 10 : les angles de rotation des six articulations pour le soudage de D1 à F1.....	75
Figure IV. 11 : les courbes des vitesses des six articulations pour le soudage de D1 à F1.....	75
Figure IV. 12 : les courbes des accélérations des six articulations pour le soudage de D1 à F1.....	76
Figure IV. 13 : les angles de rotation des six articulations pour le soudage de D2 à F2.....	76
Figure IV. 14 : les courbes des vitesses des six articulations pour le soudage de D2 à F2.....	77
Figure IV. 15 : les courbes des accélérations des six articulations pour le soudage de D2 à F2.....	77
Figure IV. 16 : les angles de rotation des six articulations pour le soudage de D3 à F3.....	78
Figure IV. 17 : les courbes des vitesses des six articulations pour le soudage de D3 à F3.....	78
Figure IV. 18 : les courbes des accélérations des six articulations pour le soudage de D3 à F3.....	79
Figure IV. 19 : les angles de rotation des six articulations pour le soudage de D'1 à F'1 pour la 2ème chaine.....	80
Figure IV. 20 : les courbes des vitesses des six articulations pour le soudage de D'1 à F'1 pour la 2ème chaine.....	80

Figure IV. 21 : les courbes des accélérations des six articulations pour le soudage de D'1 à F'1 pour la 2ème chaine.....	81
Figure IV. 22 : les angles de rotation des six articulations pour le soudage de D'2 à F'2 pour la 2ème chaine.....	81
Figure IV. 23 : les courbes des vitesses des six articulations pour le soudage de D'2 à F'2 pour la 2ème chaine.....	82
Figure IV. 24 : les courbes des accélérations des six articulations pour le soudage de D'2 à F'2 pour la 2ème chaine.....	82
Figure IV. 25 : les angles de rotation des six articulations pour le soudage de D'3 à F'3 pour la 2ème chaine.....	83
Figure IV. 26 : les courbes des vitesses des six articulations pour le soudage de D'3 à F'3 pour la 2ème chaine.....	83
Figure IV. 27 : les courbes des accélérations des six articulations pour le soudage de D'3 à F'3 pour la 2ème chaine.....	84

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Signes conventionnels des couples cinématiques.....	17
Tableau II. 1 : Paramètres de DENAVIT-HARTENBERG modifié du robot.....	37
Tableau III.1 : les caractéristiques des équipements de soudage FSW.....	56
Tableau III.2 : les avantages et les inconvénients des équipements de soudage FSW.....	56

NOMONCLATURES

AFNOR :	Association Française de Normalisation.
CEEONU :	Commission économique des Nations unies.
IFR :	Fédération internationale de robotique.
A.F :	Atelier Flexible.
ISO 9946 :	Organisation International de Normalisation concernant les caractéristiques des robots manipulateurs industriels.
NDL :	Nombre de degré de liberté.
CAO :	Conception assisté par ordinateur.
H :	Nombre de degré de liberté de la chaine cinématique.
ω	Nombre de degré de liberté par rapport à l'élément fixe.
D. H :	Variables articulaires de Denavit-Hartenberg.
(P_N) :	Vitesse du point de référence par rapport au repère fixe.
(ω_N) :	Vitesse de rotation instantanée.
$x = [x_1 \dots x_n]$:	Elément de l'espace opérationnel.
E_p :	Energie potentielle externe du système.
A_i :	Quantité d'accélération généralisée.
F_i :	Forces généralisées.
Γ_i :	Forces généralisées non conservatives.
D.D.L :	Degré de liberté.
x :	Valeur scalaire.
F.A.O :	Fabrication Assistée par Ordinateur.
C.A.O :	Commande Assistée par Ordinateur.
M.G.D :	Modèle géométrique directe.
MGI :	Modèle géométrique inverse.
Angles RTL :	Angles de Roulis – Tangage – Lacet.
MCD :	Modèle cinématique direct.
FSW :	Friction StirWelding.
TWI :	The Welding Institute.
DSO :	Domaine de soudabilité opératoire .

INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, les systèmes robotiques sont en amélioration continue suite à la demande des clients, pour réussir différentes applications industrielles avec des produits finis de meilleure qualité et à moindre coût. De nouveaux concepts sont en permanence étudiés afin d'augmenter la productivité. Parmi ces concepts, on peut citer les robots lourds, les robots de flexion vers l'arrière, les robots compacts, les robots sécurisés et les robots d'encadrement flexibles. Pour satisfaire les clients, ces concepts exigent des caractéristiques qui sont très difficiles à combiner : réduire l'inertie en utilisant des composants minces et très légers, augmenter la rigidité, la précision, la manipulabilité et l'espace de travail de l'outil tout en maintenant un coût acceptable. [11]

En robotique industrielle, l'implémentation des robots dans les cellules flexibles, les ateliers et les chaînes de production pose différents problèmes qui sont liés à l'utilisation, à la gestion des cellules flexibles et à l'adaptation du robot dans sa cellule du travail pour exécuter les différentes tâches et assurer une meilleure productivité. Ces problèmes se posent tout au long des phases de définition de la cellule flexible. La nécessité de leur maîtrise a conduit au développement de différents outils qui visent à apporter une aide à l'utilisateur ou au concepteur. Ils concernent, entre autre, le choix du robot le plus adapté à la tâche, la programmation de cette tâche dans la cellule et le déplacement du robot dans son environnement de travail. Ces différents problèmes peuvent être mieux gérés par l'utilisation d'un système C.A.O. robotique. Ce dernier offre des outils graphiques qui permettent de traiter facilement certains problèmes cités. Ils permettent en outre, de trouver un moyen graphique, pour programmer et simuler les tâches en hors ligne. Les problèmes d'accessibilités de la tâche et comment éviter les collisions peuvent être ainsi vérifiés lors de la simulation. Ceci se traduit par un gain de temps lors de la phase de vérification sur le site réel. Le domaine d'aéronautique nécessite une réflexion d'utilisation de ces genres d'atelier en vue de maîtriser la cadence de production des cellules aéronautiques.

Dans ce contenu, on développe l'idée d'introduire les robots de soudage par friction malaxage. Ce procédé récent permet de remplacer le rivetage pour l'assemblage du fuselage de la nouvelle génération des avions de transport. L'élimination des rivets permet de diminuer le temps de fabrication, la traînée et de réduire le poids des appareils, ce qui signifie une réduction des coûts et de la consommation de carburant. Des constructeurs aéronautiques

INTRODUCTION GENERALE

comme « Eclipse » détiennent un grand nombre de brevets sur l'utilisation de ce procédé pour la fabrication de leur jet d'affaires. Cependant, cette technique n'est pas très répandue à cause du manque de données sur le contrôle du procédé et les propriétés mécaniques des joints soudés. [19]

Ce mémoire commence par une introduction générale, et il est subdivisé complètement en 4 chapitres :

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES ATELIERS FLEXIBLES.

CHAPITRE 2 : ETUDE THEORIQUE DES ROBOTS INDUSTRIELS.

CHAPITRE 3 : DESCRIPTION DU PROCEDE DE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE

CHAPITRE 4 : SIMULATION NUMERIQUE D'UN ROBOT INDUSTRIEL ET INTERPRETATION DES RESULTATS.

CONCLUSION GENERALE.

CHAPITRE I GENERALITES SUR LES ATELIERS FLEXIBLES.

I. 1. Introduction :

Avec le développement des moyens de production, les industriels cherchent à être compétitifs en augmentant la qualité de leurs produits et à rentabiliser leurs investissements par l'intégration des différents moyens (matériels et logiciels) qui concourent à la réalisation d'un produit manufacturé. Cette tendance a donné naissance à de nouveaux concepts tels que les cellules et ateliers flexibles de production.

En robotique industrielle, l'implémentation des robots dans les cellules flexibles, les ateliers et les chaînes de production pose différents problèmes qui sont liés à l'utilisation, à la gestion des cellules flexibles et à l'adaptation du robot dans sa cellule du travail pour exécuter les différentes tâches et assurer une meilleure productivité [1].

Ces problèmes se posent tout au long des phases de définition de la cellule flexible. La nécessité de leur maîtrise a conduit au développement de différents outils qui visent à apporter une aide à l'utilisateur ou au concepteur. Ils concernent, entre autre, le choix du robot le plus adapté à la tâche, la programmation de cette tâche dans la cellule et le déplacement du robot dans son environnement de travail. Ces différents problèmes peuvent être mieux gérés par l'utilisation d'un système C.A.O. robotique.

Avant d'aborder la simulation informatique, il est important de présenter et de faire une analyse du système que nous cherchons à modéliser et simuler. Dans ce chapitre nous allons mettre en revue quelques notions sur les cellules flexibles.

I. 2. Généralités sur les cellules flexibles :

I.2.1. Définition [2] :

Le concept des cellules de fabrication flexibles est une application de la technologie de groupe développée au milieu du dernier siècle et elle renvoie à l'organisation physique d'un aménagement industriel en favorisant les flux de production et en minimisant la manutention.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ATELIERS FLEXIBLES.

Un atelier est dit flexible lorsqu'il peut produire des articles avec des variantes sans l'intervention de l'opérateur humain dans un processus de fabrication adaptatif, automatisé, simultané et capable de réaliser – en temps réel par un ordinateur – des pièces en quantité variable. Les nombreuses installations d'assemblages rendant cet atelier complexe, donc il n'est pas évident de prévoir les effets d'une modification sans la simuler en tenant compte des données réelles.

I. 2. 2. Historique :

Avant d'aboutir le concept de production flexible, l'homme a utilisé pour se servir une multitude de moyens de production. Il exploita d'abord des animaux pour ses besoins en production agricole. Il fabriqua ensuite des outils en pierre, puis en bois et en métal. L'Angleterre est le théâtre de la première révolution industrielle qui concentre l'émergence de nombreux secteurs industriels : machines à vapeur, chemins de fer, bateaux à vapeur, etc. Dès le milieu du XIX^e siècle, la France et l'Allemagne cherchent simultanément des moyens de rattrapage de l'essor industriel anglais. En France, les savants misent sur les développements conceptuels visant à établir une science des machines (sciences de la mécanique, cinématique, résistance des matériaux, thermique, hydraulique, etc.) et sur un enseignement de haut niveau. Le premier atelier flexible voit le jour aux États-Unis en 1967 ; d'autres réalisations suivent puis s'étendent au Japon (1970) et à l'Europe [3].

Le domaine concerné est au départ essentiellement le fraisage de pièces de type carter, pour l'aviation etc... Ce sont en effet des pièces produites en petites et moyennes séries, qui sont parfaitement adaptées à la technologie alors disponible (centres d'usinage à commande numérique, palettes et convoyeurs), et leur forte valeur ajoutée permet de contribuer à la productivité, la cadence et la rentabilité de l'installation [3].

Le développement est ensuite rapide dans les années 80, quoique dans le même temps la notion de cellule remplace peu à peu celle d'atelier : en effet, l'atelier demeure une installation très onéreuse et nécessite une étroite adéquation entre une production identifiée et stable dans le temps, bien que diverse, et les moyens mis en œuvre. Par ailleurs, d'autres évolutions se manifestent :

Les progrès du robot industriel ouvrent la voie à de nouvelles applications :

- Usinage ;

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ATELIERS FLEXIBLES.

- Constitution de cellules flexibles pour d'autres procédés (peinture, soudage, parachèvement, assemblage, palettisation).

I. 2. 3. Notion de flexibilité et de cellule flexible :

I.2.3.1.Flexibilité : C'est une technique particulièrement adaptée à la petite ou moyenne série. Elle est définie par le passage le plus automatisé et le plus rapide possible de la production d'un produit à un autre. Elle repose sur l'utilisation de machines à commande numérique (centres de soudage). [5]

I.2.3.2. Types de la flexibilité :

Plusieurs types de flexibilité ont été mis en évidence suivant leurs incidences sur l'objectif qui est le produit fini et sur les moyens de production permettant la réalisation de ce produit [1].

- **flexibilité de produits :** offre la possibilité d'une reconfiguration du système pour la prise en compte d'un nouveau produit ou famille de produits permettant ainsi un gain de productivité ;
- **flexibilité de mélange :** c'est la possibilité de produire simultanément un ensemble de produits ayant des caractéristiques de base communes ; cette flexibilité peut être mesurée par le nombre de produits différents qui peuvent être fabriqués simultanément ;
- **flexibilité de quantité :** il s'agit de la capacité du système à faire face aux fluctuations de la quantité des produits à fabriquer en modifiant les rythmes, ainsi que les temps de passage et d'engagement des outils ;
- **flexibilité de routage :** offre au système les moyens d'un aiguillage plus souple, de façon à servir les différents segments de procédés libres ou sous - engagés ;
- **flexibilité d'ordre des opérations :** permet de changer l'ordre des opérations en cours de production (ce qui suppose l'existence d'une gamme principale et des gammes secondaires) ou de choisir la destination suivante après chaque opération ;
- **flexibilité d'expansion :** autorise une extension et une modification de l'architecture du système et elle exige une modélisation ;
- **flexibilité des ressources :** c'est la capacité des ressources à effectuer plusieurs tâches élémentaires et de permettre la reprogrammation.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ATELIERS FLEXIBLES.

I. 2. 3. 3. Nécessité de la production flexible :

Les industriels soucieux d'améliorer la productivité de leurs installations ont compris que pour faire face à la rude concurrence qui règne sur le marché, il faut adopter la production flexible (lorsque l'investissement est possible et est rentable). Elle leur permet de parer aux incertitudes de l'environnement, notamment la fluctuation de la demande, l'évolution des produits (en technologies et en durées de vie), les délais de livraison et les problèmes liés au stockage.

La figure I. 1 montre que le mode de fabrication dépend de deux (2) variables : la variété des produits manufacturés et le volume de production. Ainsi, s'il existe peu de variété pour un volume important, les lignes de transferts représentent la meilleure approche de fabrication alors qu'à l'opposé les ateliers multi gamme sont appropriés pour un faible volume de production et une variété relativement importante et on remarque que les cellules flexibles représentent le meilleur compromis entre la variété des produits et le volume de production.

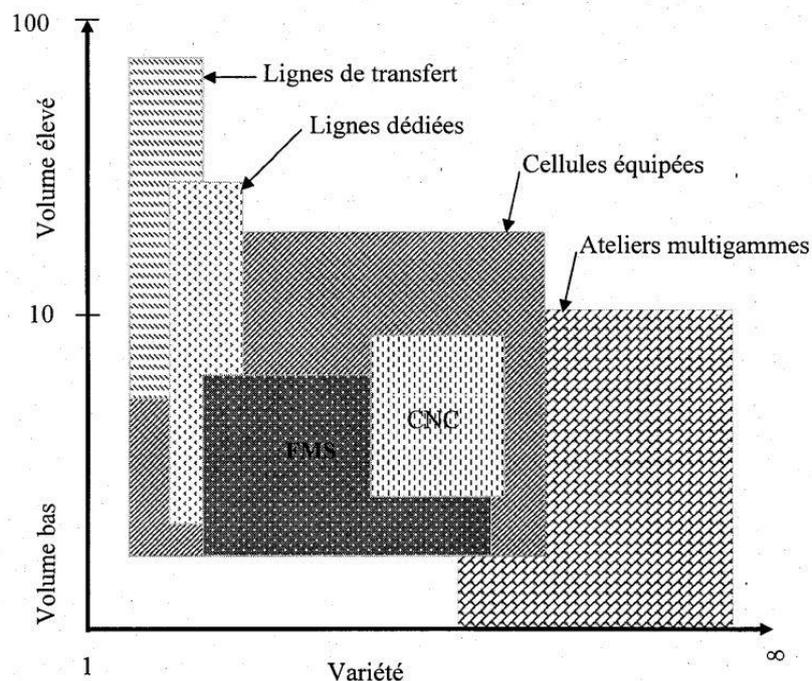


Figure I.1 : Mode de fabrication en fonction du volume et de la variété des produits [1]

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ATELIERS FLEXIBLES.

I. 2. 3. 4. Objectif de la production flexible :

Investir dans la production flexible, c'est visé au moins un des objectifs suivants [5] :

- Créer un système de production automatique, technologiquement souple et performant permettant le soudage des pièces en petites ou en moyennes séries avec des cadences aléatoires.
- Améliorer l'outil de fabrication.
- Fonctionnement automatique à plein temps.
- Réduction des cycles et des délais de fabrication.
- Réduction des couts des produits fabriqués.
- Réduction des stocks encours.

I. 2. 3. 5. Avantages de la production flexible :

- Flux physiques par automatisation des transports : stockage, matières, pièces, appareils, outils,... etc.
- Flux d'information : informatisations des réseaux de circulation de l'information.
- Enchaînement optimisé des travaux.
- Programmation évoluée.

I. 2.4. Différentes configurations des cellules flexibles

- **Cellule centrée sur le robot** : le mouvement du robot est rotatif.



Figure. I.2 : Cellule robotisée rotative [11].

- **Cellule robotiques linéaire** : le robot se déplace linéairement.



Figure. I.3 : Cellule robotisée linéaire [11].

- **Cellule robotiques mobiles** : le robot est mobile et se déplace aléatoirement.



Figure. I.4 : Cellule robotisée Mobile. [10]

I. 3. Différents types d'implantation :

I.3.1. Implantation aléatoire : Elle se retrouve parfois dans les petites industries dont le développement a été progressif, mais ce n'est pas une solution d'implantation optimum car elle génère des temps de déplacement importants des produits [7].

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ATELIERS FLEXIBLES.

I. 3.2. Implantation en sections homogènes : Les machines qui ont les mêmes fonctions ou utilisent les mêmes techniques sont regroupées dans le même atelier [7].

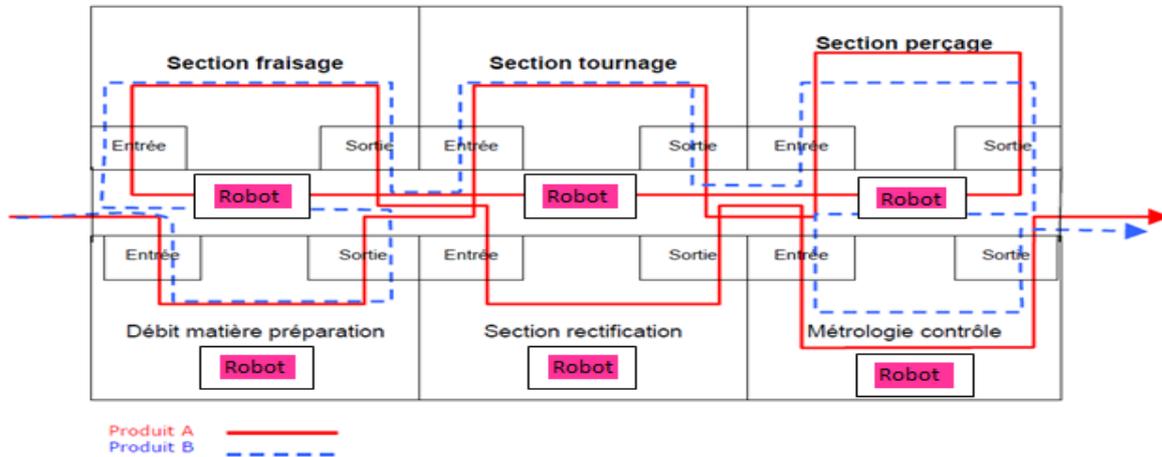


Figure. I. 5 : Implantation en sections homogènes [7] .

I.3.3. Implantation en ligne : Les machines sont positionnées dans l'ordre de la gamme de fabrication, mais la flexibilité est quasiment nulle parce que certains produits peuvent ne pas utiliser tous les postes de travail, donc ils seront obligés de suivre le sens de la circulation sans possibilité de rebroussement [7] .

Par exemple, le produit C dans la figure I. 6 n'utilise pas le poste F1, mais respecte l'ordre de la ligne de production.

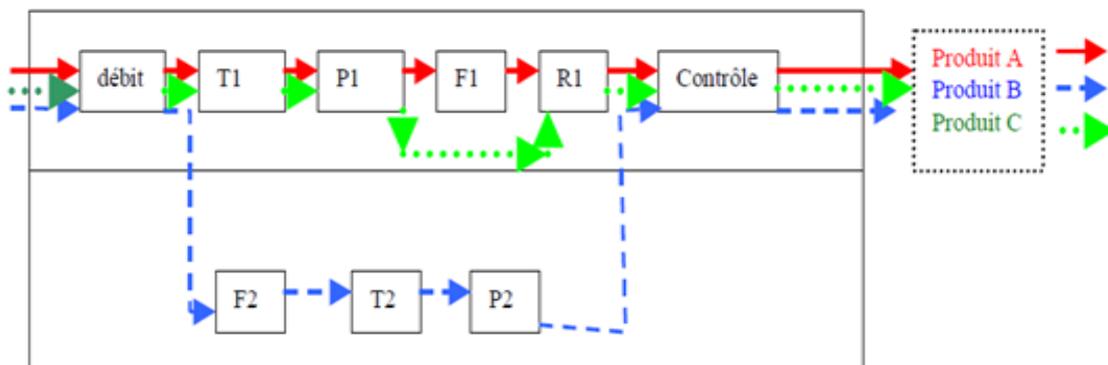


Figure. I. 6 : Implantation en ligne [7].

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ATELIERS FLEXIBLES.

I. 3.4. Implantation en îlots : Les machines sont regroupées en ensembles d'îlots ou petits ateliers spécialisés pour réaliser entièrement un ensemble de pièces [7] .

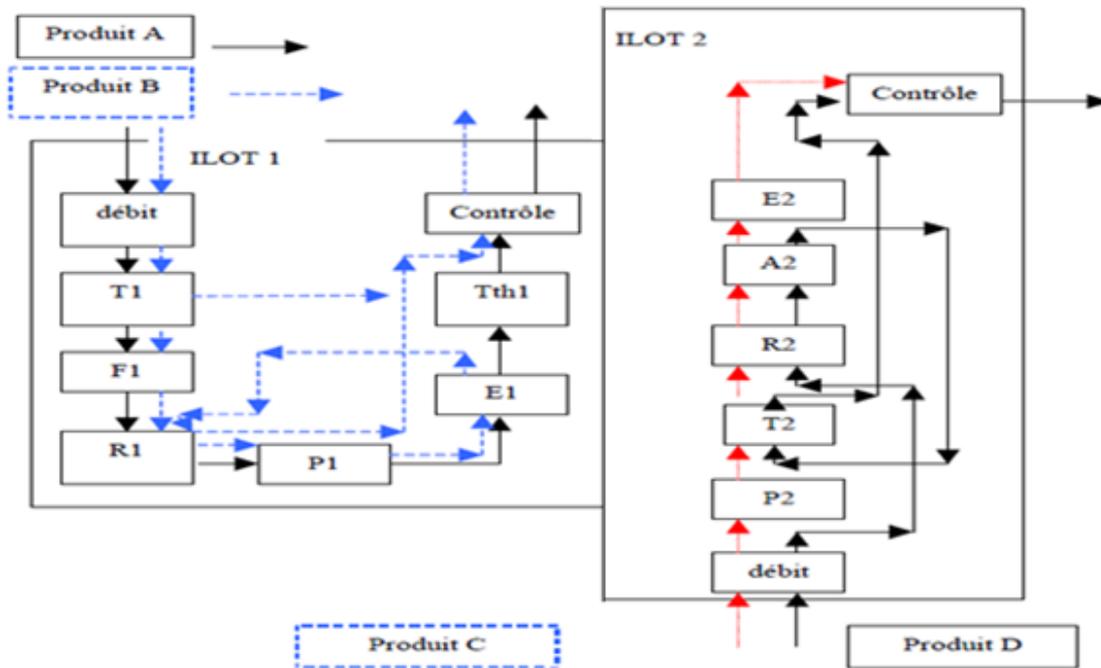


Figure I. 7 : Implantation en îlots [7].

I.4. Couple flexibilité / productivité :

La flexibilité et la productivité d'une production sont liées au choix d'une organisation de production (implantation par technologies en sections homogènes, implantations par produits en ligne ou par îlots) [7].

Dans le cas d'une implantation par technologies en sections homogènes, la flexibilité est bonne car l'on peut passer très facilement d'un produit à l'autre avec des machines universelles. Par contre, étant universelles, elles sont moins productives et la circulation des produits n'est pas optimum ; la production se fait généralement par lots ce qui multiplie encore les en-cours et diminue la productivité [7].

Dans le cas d'une implantation par produits en ligne, les machines sont beaucoup plus spécialisées (machines transfert) et donc très peu flexibles mais la productivité est très correcte.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ATELIERS FLEXIBLES.

L'implantation par produits en îlots ou cellules flexibles peut se définir comme un compromis entre flexibilité et productivité : la flexibilité est améliorée car on peut réaliser des familles de pièces ainsi que la productivité car l'îlot est organisé en fonction de la circulation même des pièces [7].

I.5. Cellules flexibles :

I. 5.1. Définition :

Une cellule flexible de soudage est un système composé d'un groupe de robots de soudage, servi par des moyens de soudé automatiques [9]. La notion de flexibilité est ici liée à la capacité de la cellule à être reprogrammée avec toutes les ressources qu'elle utilise pour s'adapter à différentes soudage (désigne ici les différents produits).



Figure 1. 8 : Cellule flexible de soudage par friction-malaxage. [9].

Remarque : une cellule flexible est caractérisée par le type d'opération qu'elle réalise (peinture, soudage, emballage etc.). Un ensemble de cellules constitue un atelier flexible, ce dernier est caractérisé par le ou le soudage par point (carrosserie, tôles etc.).

I. 5.2. Structure d'une cellule flexible de production :

Comme pour tout système de production, une cellule flexible comprend un système de conduite de production et un système physique de production. Ces systèmes sont également appelés, respectivement, partie commande et partie opérative.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ATELIERS FLEXIBLES.

Pour une cellule flexible de production, la souplesse d'adaptation est une priorité [10]. Le but recherché, lorsqu'on définit une nouvelle cellule flexible, c'est l'engagement au maximum des opérations machines et la réduction au minimum des interventions humaines afin d'aboutir à une productivité optimale. L'implantation d'une cellule flexible de la production passe par cinq étapes :

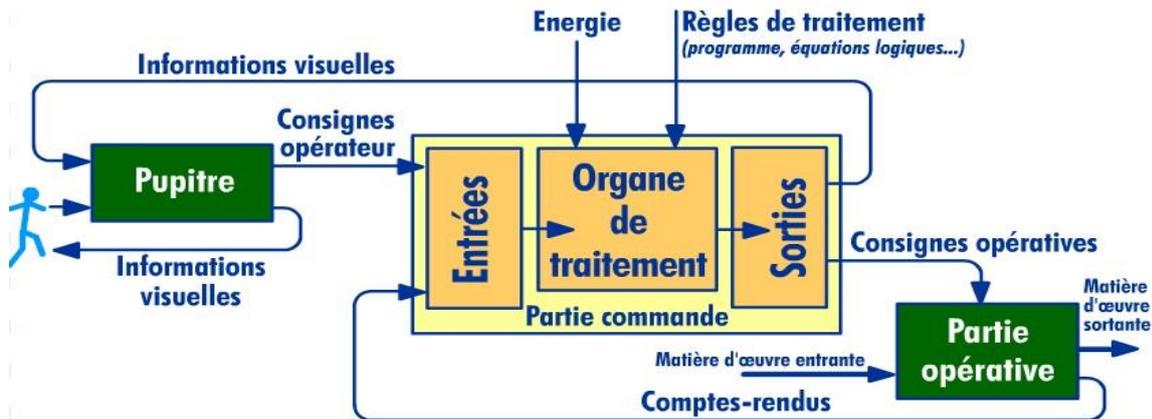


Figure I. 9 : Système de production.

I. 5. 2. 1. Système de conduite de production :

C'est un ensemble de programmes permettant de piloter le système physique. Ce système est lui-même composé de deux sous-systèmes un système décisionnel et un système informationnel. Le premier élabore les décisions et fixe les ordres à transmettre au système physique. Le second s'occupe des informations traitées (transmises ou mémorisées). La réussite du système de conduite dépend en grande partie de la synchronisation de ces deux systèmes.

I. 5. 2. 2. Système physique de production :

Le système physique de production a pour rôle de réaliser la commande. Il est souvent organisé suivant un critère d'ordre technique, telle que la technologie de groupe par exemple. Il comprend généralement :

- Groupe de machines de fabrication et assemblage (robot de soudage, convoyeur,...etc.)
- Systèmes de manutention automatisés.
- Système d'approvisionnement en outils affutés...

I. 5. 3. Gestion des ressources dans un système flexible :

I. 5. 3. 1. Construction du fichier commande :

À la confirmation de la commande par le client, un fichier commande regroupant les produits à fabriquer, leurs désignations et leurs quantités respectives sont construites. Ce fichier servira de référence pour prévoir et organiser toutes les ressources utiles et nécessaires pour lancer la production.

I. 5. 3. 2. Organisations des ressources :

Lorsque la cellule est composée de plusieurs machines, il est très recommandé d'organiser la cellule de telle sorte à avoir un minimum de déplacements. Ces derniers sont très coûteux, nécessitent des moyens et leurs délais de fabrication augmentent. L'agencement des ressources peut se faire de manière fixe ou flottante, les deux tiennent compte de plusieurs variantes (conception et dimension des ressources, organisation des sites etc.).

I. 5. 3. 3. Contrôle des opérations suivi :

Contrôler l'activité de production du système de production est essentiel. Une meilleure programmation, une meilleure affectation et un meilleur suivi augmentent considérablement la productivité. Les chances de réaliser une production entière en une seule fois sont faibles, des interventions sont donc nécessaires. Différents aléas et différentes sources de difficultés peuvent survenir pendant la production entraînant malheureusement l'arrêt de la production, ce qui justifiera la fonction contrôle.

I. 6. Le robot industriel :

1.6.1. Généralités du Robot Industriel :

L'Association Française de Normalisation (AFNOR) définit un robot industriel (voir figure 1.10) comme étant un manipulateur polyvalent, à plusieurs degrés de liberté, commandé en position. Il est programmable, capable de manipuler des matériaux, des pièces, des outils et des dispositifs spécialisés, au cours de mouvements variables et programmé aussi pour l'exécution d'une variété de tâches. Il a souvent l'apparence d'un ou plusieurs bras se terminant

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ATELIERS FLEXIBLES.

par un poignet (organe terminal). Son unité de commande utilise, notamment, un dispositif de mémoire et éventuellement de perception et d'adaptation à l'environnement et aux circonstances. Ces machines polyvalentes sont généralement étudiées pour effectuer la même fonction de façon cyclique et peuvent être adaptées à d'autres fonctions sans modification permanente du matériel.

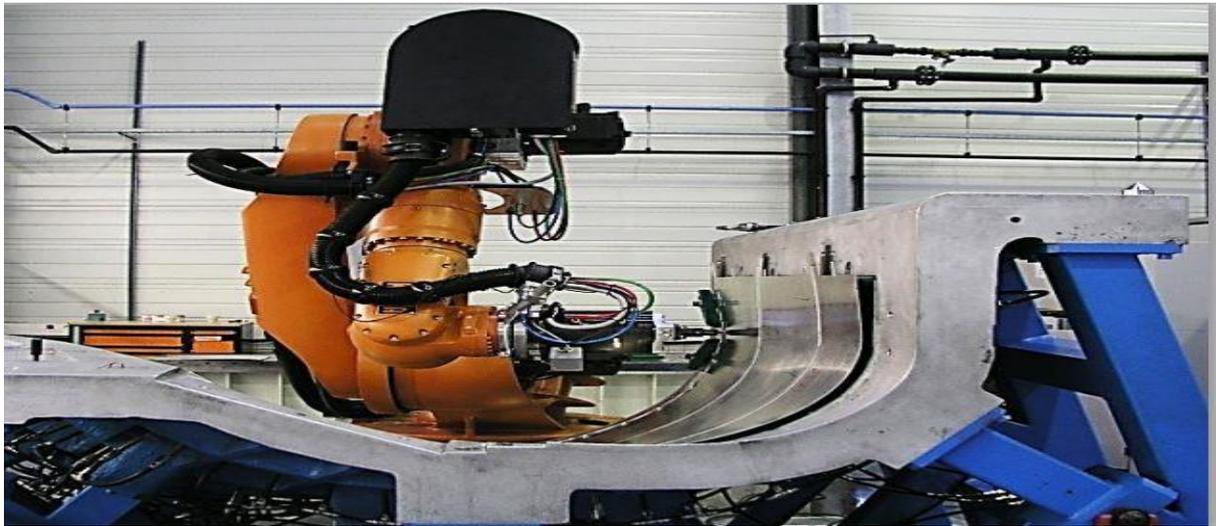


Figure I. 10 : Robots industriels de soudage [11].

Les années 1940 et 1950 étaient marquées par une avancée significative en électronique avec l'invention des transistors et des circuits intégrés. Ces progrès technologiques ont permis aux chercheurs de créer des systèmes robotisés de plus en plus demandés dans l'industrie. La figure 1 illustre une étude faite par la commission économique des Nations unies (CEEONU) et la fédération internationale de robotique (IFR) en 2017 sur l'utilisation de la robotique dans le monde. Cette étude a aussi montré que le taux d'utilisation des robots industriels entre 2010 et 2016 était de 9% en Asie, 7% en Amérique et 5% en Europe. Cependant, il ressort de l'étude que cet outil du développement économique, social et environnemental n'est pas beaucoup utilisé dans nos industries africaines. Cette absence des robots dans nos industries est un vrai handicap dans la transformation des matières premières et cela influence l'économie et partant, l'espérance de vie en Afrique. [8]

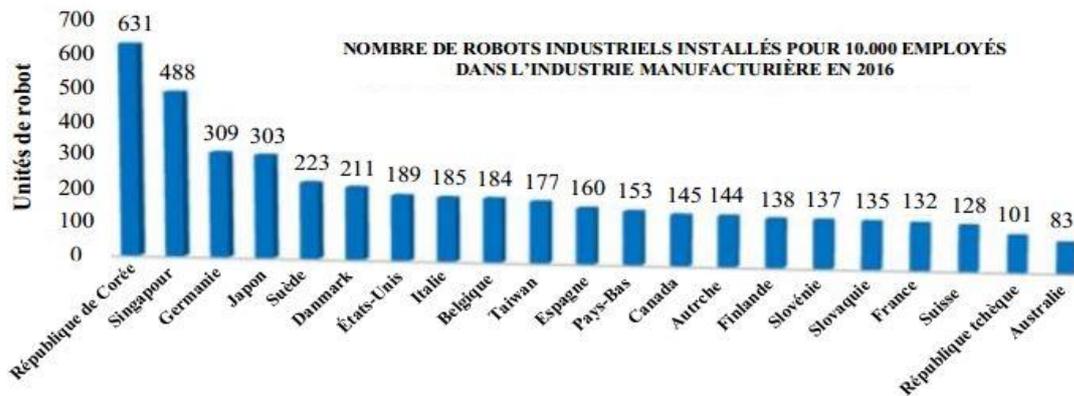


Figure I. 11 : Nombre de robots industriels installés pour 10000 employés dans l'industrie manufacturière en 2016. [8]

I.6.2. Composition d'un robot :

Un robot est constitué des éléments suivants :

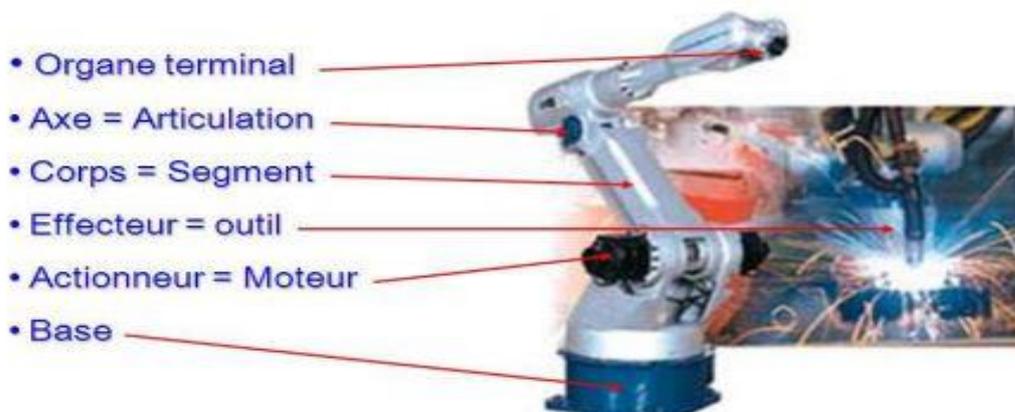


Figure I. 12. Composition d'un robot.

I. 6. 2. Degrés de liberté et degrés de mobilité :

Si aucune condition de liaison n'est imposée au mouvement d'un élément dans l'espace, cet élément possède 6 degrés de liberté. Alors, si la chaîne cinématique compte k éléments, le nombre total de degrés de liberté des éléments avant leur réunion en couples cinématiques est égale à $6k$. La formation des couples cinématiques impose au moment relatif des éléments un certain nombre de liaisons, selon la classe de couple. Si les éléments de la chaîne cinématique

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ATELIERS FLEXIBLES.

considérée forment p_1 couples de classe I, p_2 couples de classe II, p_3 couples de classe III, p_4 couples de classe IV, p_5 couples de classe V, alors des $6k$ de degrés de liberté que ces éléments possédaient avant leur réunion en couple cinématique il faut exclure ceux qui s'éliminent au moment de formation des couple cinématique. Le nombre de degrés de liberté H de la chaine cinématique sera alors [9] :

$$H = 6k - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1 \quad (I. 1)$$

Généralement, on utilise dans les mécanismes les chaines cinématique fermées ou non fermées qui comportent un élément fixe, dit bâti. Si un des éléments ω de la chaine cinématique est fixe, le nombre totale de degrés de liberté de la chaine diminue de 6, et le nombre de degrés de liberté ω par rapport à l'élément fixe sera égal à :

$$\omega = H - 6 \quad (I.2)$$

Le nombre ω de degrés de liberté de la chaine cinématique par rapport à l'élément considéré comme fixe s'appelle le nombre de degrés de mobilité de la chaine cinématique, ou plus brièvement, le degrés de mobilité. En substituant 6 à H dans (I. 2) son expression tirée de (I.1) on a :

$$\omega = 6(k-1) - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1 \quad (I.3)$$

Posons dans (I.3) $k - 1 = n$; il vient

$$\omega = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1 \quad (I.4)$$

Ou n le nombre des éléments mobile de la chaine cinématique. L'égalité (I.4) est dite formule de mobilité ou formule de structure de la chaine cinématique de forme générale.

La forme (I.4) a été donnée, sous forme légèrement différente, en 1887 par P. Smove et développée en 1923 par A. Malychev; on l'appelle formule de Somove-Malychev.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ATELIERS FLEXIBLES.

Si la chaîne cinématique ne comporte que des couples de classe V, la formule (I.4) devient :

$$\omega = 6n - 5p_5 \quad (I.5)$$

Tableau I.1 : Signes conventionnels des couples cinématiques :

LIAISONS ELEMENTAIRES	exemple	Exemples	Représentation plane	Représentation en perspective	Degrés de mobilité	Degrés de liaison	Tableau des mobilités								
Liaison encastrement					0	6	<table border="1"> <tr><td>T</td><td>R</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> </table>	T	R	0	0	0	0	0	0
T	R														
0	0														
0	0														
0	0														
Liaison glissière					1	5	<table border="1"> <tr><td>T</td><td>R</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> </table>	T	R	1	0	0	0	0	0
T	R														
1	0														
0	0														
0	0														
Liaison pivot					1	5	<table border="1"> <tr><td>T</td><td>R</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> </table>	T	R	0	1	0	0	0	0
T	R														
0	1														
0	0														
0	0														
Liaison pivot glissant					2	4	<table border="1"> <tr><td>T</td><td>R</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> </table>	T	R	1	1	0	0	0	0
T	R														
1	1														
0	0														
0	0														
Liaison glissière hélicoïdale					2 configurées	4	<table border="1"> <tr><td>T</td><td>R</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> </table>	T	R	1	1	0	0	0	0
T	R														
1	1														
0	0														
0	0														
Liaison plane					3	3	<table border="1"> <tr><td>T</td><td>R</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td></tr> </table>	T	R	1	0	1	0	0	1
T	R														
1	0														
1	0														
0	1														
Liaison rotule					3	3	<table border="1"> <tr><td>T</td><td>R</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td></tr> </table>	T	R	0	1	0	1	0	1
T	R														
0	1														
0	1														
0	1														
Liaison linéaire annulaire					4	2	<table border="1"> <tr><td>T</td><td>R</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td></tr> </table>	T	R	1	1	0	1	0	1
T	R														
1	1														
0	1														
0	1														
Liaison ponctuelle					5	1	<table border="1"> <tr><td>T</td><td>R</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td></tr> </table>	T	R	1	1	1	1	0	1
T	R														
1	1														
1	1														
0	1														
Liaison linéaire rectiligne					4	2	<table border="1"> <tr><td>T</td><td>R</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td></tr> </table>	T	R	1	1	1	0	0	1
T	R														
1	1														
1	0														
0	1														

I. 6. 3. caractéristiques d'un robot :

La norme ISO 9946 spécifie les caractéristiques que le fabricant des robots doit fournir. Parmi ces caractéristiques, on peut mentionner quelques-unes qui permettent de choisir un robot en fonction de l'application envisagée.

- Espace de travail.
- Charge utile ou charge maximale transportable par le robot.
- Vitesses et accélérations maximales, qui conditionnent les temps de cycle.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ATELIERS FLEXIBLES.

- Exactitude : l'écart entre une situation commandée et la moyenne des situations à atteindre.
- Répétabilité : la dispersion des situations atteintes lorsque l'on commande successivement la même situation.
- Résolution : la plus petite modification de la configuration du robot à la fois observable et contrôlable par le système de commande.

D'autres caractéristiques doivent être prises en compte techniques (énergie, commande, programmation ...) et commerciales (coût, maintenance...).

I. 6. 4. Redondance :

Il s'agit d'une situation dans laquelle le nombre de degrés de l'organe terminal est inférieur au nombre d'articulations motorisées. La redondance présente plusieurs avantages, entre autres :

- Augmentation du domaine accessible.
- Déplacement en présence d'obstacles.

Les situations d'une structure redondante dans le cas des chaînes ouvertes simples sont :

- Nombre d'articulations motorisées > 6 .
- Nombre d'articulations rotoïdes d'axes concourants > 3 .
- Nombre d'articulations rotoïdes d'axes parallèles > 3 .
- Nombre d'axes d'articulations prismatiques > 3 .
- Nombre d'axes d'articulations prismatiques parallèles = 2.
- Nombre d'axes d'articulations rotoïdes confondus = 2.

I. 6 .5. Singularité :

Il s'agit d'une situation dans laquelle le nombre de degrés de liberté (NDL) de l'organe terminal est inférieur à la dimension de l'espace opérationnel. C'est une situation de redondance locale.

Exemples :

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ATELIERS FLEXIBLES.

- Deux axes d'articulations prismatiques se trouvent parallèles.
- Deux axes d'articulations rotoïde se trouvent confondus en fonction de la robot/tâche est : (NDL) organe terminal \geq (NDL) tâche.

I. 7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un état de l'art sur les cellules flexibles, et par la suite nous avons introduit les robots industriels.

Les robots sont conçus pour dynamiser l'industrie. Ils augmentent la qualité du produit, la sécurité du processus de production et optimisent la transformation des matières premières.

CHAPITRE 2

ETUDE THEORIQUE DES ROBOTS INDUSTRIELS.

II. 1. Introduction :

L'étude de la robotique nécessite des connaissances de base en géométrie en vue de situer ses différentes parties mobiles du robot les unes par rapport aux autres. Pour ce faire, on a associé un repère à chaque partie (effecteurs, articulations). Ainsi le passage d'un repère à un autre (positions, orientations) s'exprime sous la forme d'une matrice de passage.

La géométrie et le plus particulièrement les coordonnées et transformation homogènes sont des outils indispensables et très utilisés en robotique.

Pour commander ou simuler le comportement d'un système mécanique articulé (robots), on doit disposer d'un modèle. Plusieurs niveaux de modélisation sont possibles selon les objectifs, les contraintes de la tâche et les performances recherchées.

II. 2. Coordonnées homogènes :

La présence conjointe de produits et de sommes dans l'équation vectorielle permettant le passage d'un repère à un autre est peu commode pour effectuer des calculs systématiques, dus entre autre à des changements successifs de repères.

On lui préfère une représentation matricielle de dimension 4, basée sur les coordonnées homogènes.

II. 2. 1. Représentation d'un point :

La représentation des points en coordonnées homogènes consiste à doter toute notation vectorielle d'un facteur d'échelle en introduisant une coordonnée supplémentaire.

Donc la représentation du point P à l'aide de coordonnées homogènes est donnée par :

$$\vec{OP} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{pmatrix} \text{ avec : } \mathbf{a} = \frac{x}{w}, \mathbf{b} = \frac{y}{w}, \mathbf{c} = \frac{z}{w} \quad (\text{II.1})$$

En robotique : $w=1$

II. 2. 2. Représentation d'une direction :

La représentation d'une direction se fait aussi par quatre composantes, la quatrième composante est nulle. Si l'on note U_x , U_y et U_z , les coordonnées cartésiennes d'un vecteur unitaire u , en coordonnées homogènes on écrit :

$$\vec{U} = \begin{pmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{II.2})$$

II. 2. 3. Représentation d'un plan :

Le plan d'équation $\alpha x + \beta y + \gamma z + \delta = 0$ est représenté par un vecteur ligne Q tel que :

$$Q = [\alpha, \beta, \gamma \text{ et } \delta] \quad (\text{II.3})$$

Pour tout point P appartenant au plan Q , le produit matriciel $Q.P$ est nul :

$$\vec{Q.P} = [\alpha \ \beta \ \gamma \ \delta] \cdot \begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{pmatrix} = 0 \quad (\text{II.4})$$

II. 3. Transformations homogènes [01] :

2. 3. 1. Transformation des repères :

Dans le cas d'une transformation homogène, le type de représentation est matriciel. Le passage d'un repère \mathbf{R}_i à un repère final \mathbf{R}_f s'exprime par l'intermédiaire d'une matrice M ou T , appelée matrice de changement de repère, matrice de passage ou matrice de transformation homogène.

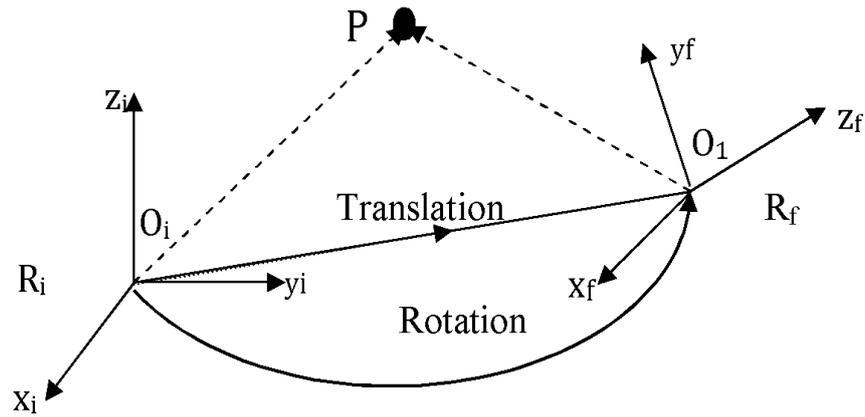


Figure II.1 : Passage d'un repère Ri à un repère Rf. [12]

En robotique, cette matrice de dimension (4×4) s'exprime sous la forme :

$${}^i T_j = {}^i M_f [{}^i S_j \quad {}^i n_j \quad {}^i a_j \quad {}^i p_j] \begin{pmatrix} s_x & n_x & a_x & p_x \\ s_y & n_y & a_y & p_y \\ s_z & n_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (II.5)$$

Où les termes ${}^i s_j$, ${}^i n_j$, ${}^i a_j$, ${}^i p_j$ représentent les vecteurs unitaires des axes x_j , y_j et z_j du repère R_j exprimés dans le repère R_i , tandis que ${}^i P_j$ est le vecteur exprimant l'origine de R_j dans R_i . La matrice ${}^i T_j$ qui définit le repère R_j dans le repère R_i est souvent partitionnée en faisant apparaître une matrice (3×3) d'orientation du repère R_j dans R_i et un vecteur de translation caractérisant la position de l'origine de R_j dans R_i . On note :

$${}^i T_j = \begin{pmatrix} {}^i A_j & {}^i P_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^i s_j & {}^i n_j & {}^i a_j & {}^i p_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (II.6)$$

2. 3. 2. Transformation des vecteurs [13]:

Soit un vecteur ${}^j P_1$ définissant le point P_1 dans le repère R_j (Voir figure II.2). Le calcul des coordonnées du point P_1 dans le repère R_i est obtenu simplement par la relation :

$${}^i p_1 = {}^i(o_i p_i) = {}^i s_j \cdot {}^j p_{1x} + {}^i n_j \cdot {}^j p_{1y} + {}^i a_j \cdot {}^j p_{1z} + {}^i p_j = {}^i T_j {}^j p_1 \quad (II.7)$$

CHAPITRE II : ETUDE THEORIQUE DES ROBOTS INDUSTRIELS.

La matrice permet donc d'exprimer dans le repère R_i les coordonnées d'un point donné dans le repère R_j .

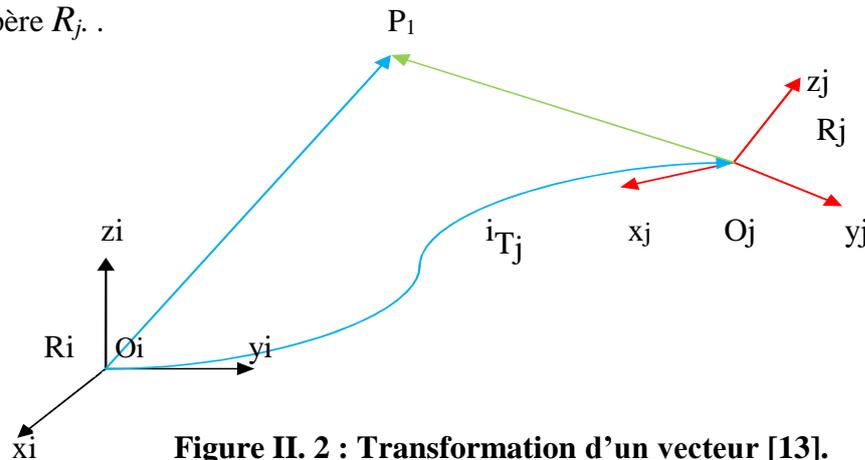


Figure II. 2 : Transformation d'un vecteur [13].

II. 3. 3. Matrice de transformation de translation pure :

Lorsque deux repères sont uniquement liés par une translation, il est possible de passer de l'un à l'autre en utilisant une matrice de transformation homogène de translation pure. Nous utiliserons les rotations suivant :

Soit $Trans(a, b, c)$ la matrice de translation, où a , b , et c désignent les composantes de la translation le long des axes x , y et z respectivement (Voir figure II. 5). L'orientation étant conservée dans cette transformation, $Trans(a,b,c)$ a pour expression :

$${}^i T_j = Trans(a,b,c) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (II.8)$$

La matrice $Trans(a, b, c)$ peut être décomposée en un produit de trois matrices, l'ordre des multiplications étant quelconque:

$$Trans(x, a).Trans(y, b).Trans(z,c). \quad (II.9)$$

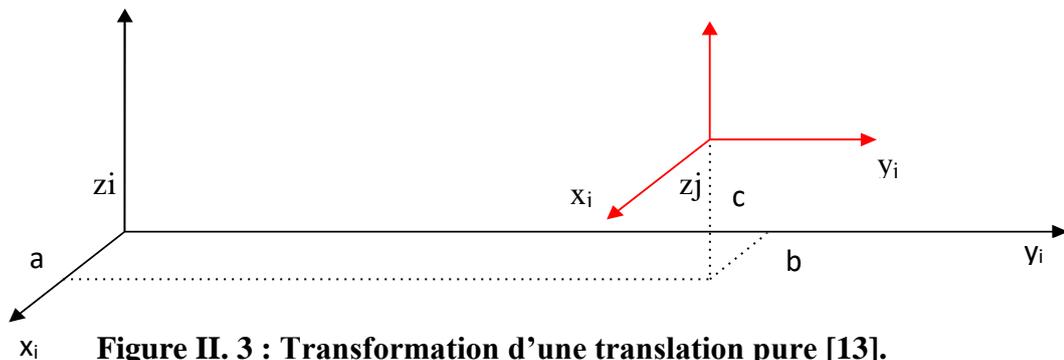


Figure II. 3 : Transformation d'une translation pure [13].

II. 4. Matrice de transformation de rotation autour des axes principale :

2. 4. 1. Rotation d'angle θ autour de l'axe X :

On déduit de la rotation ROT (x, θ) (Voir Figure II.4) les composantes des vecteurs unitaires ${}^i s_j, {}^i n_j, {}^i a_j$ portés respectivement par les axes x_j, y_j et z_j du repère R_j et exprimés dans R_i . Si l'on note $S\theta$ et $C\theta$ les sinus et cosinus de θ respectivement, elles s'écrivent [14] :

- ${}^i s_j = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$
 - ${}^i n_j = [0 \ C\theta \ S\theta \ 0]^T$
 - ${}^i a_j = [0 \ -S\theta \ C\theta \ 0]^T$
- (II.9)

Ce qui permet d'écrire la matrice de rotation de l'angle θ autour de l'axe X :

$${}^i T_j = \text{Rot}(x, \theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\theta & -S\theta & 0 \\ 0 & S\theta & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} & & & 0 \\ \text{rot}(x, \theta) & & & 0 \\ & & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{(II.10)}$$

Avec $\text{rot}(x, \theta)$ qui représente la matrice d'orientation de dimension (3x3).

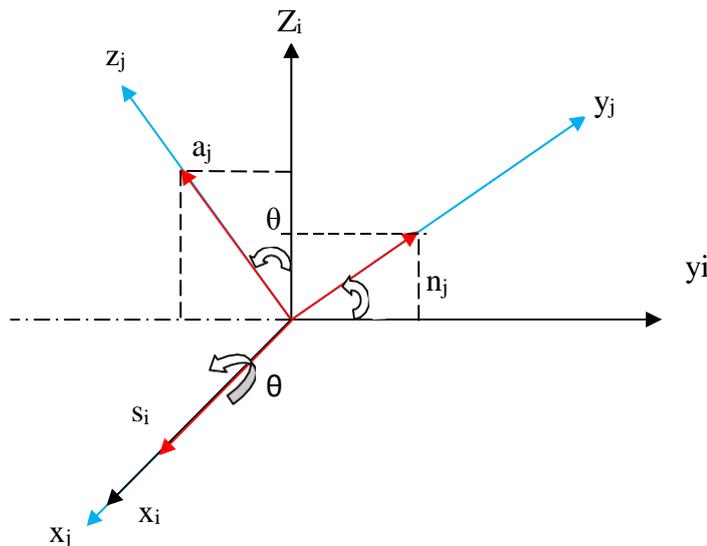


Figure II. 4 : Transformation de rotation pure autour de l'axe OX [03] .

II. 4. 2. Rotation d'un angle θ autour de l'axe OY :

Avec un raisonnement analogue, on obtient :

$${}^i T_J = \text{Rot}(y, \theta) = \begin{pmatrix} C\theta & 0 & S\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S\theta & 0 & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} & & & 0 \\ \text{rot}(y, \theta) & & & 0 \\ & & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{II.11})$$

II. 4. 3. Rotation d'un angle θ autour de l'axe OZ :

$${}^i T_J = \text{Rot}(z, \theta) = \begin{pmatrix} C\theta & -S\theta & 0 & 0 \\ S\theta & C\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} & & & 0 \\ \text{rot}(z, \theta) & & & 0 \\ & & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{II.12})$$

II. 5. Modèle géométrique direct (MGD) :

On s'intéresse à la relation liant l'espace articulaire associé aux différentes liaisons du robot avec l'espace opérationnel dans lequel est définie la situation de l'organe terminal. Cette relation s'exprime à l'aide l'équation suivante [15] :

$$X = F(\theta) \quad (\text{II.13})$$

$\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T \in R^n$: vecteur des variables articulaire.

$X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in R^m$: vecteur des variables opérationnelles, $m \leq n$.

Plusieurs possibilités existent pour la définition du vecteur X, mais la plus utilisée est celle de la matrice de transformation homogène ${}^0 T_n$ tel que :

$${}^0 T_n = {}^0 T_1 \cdot {}^1 T_2 \dots {}^{n-1} T_n \quad (\text{II.14})$$

Le modèle géométrie direct est construit partir de la modélisation de Denavit-Hartenberg modifiés qui place un repère sur chaque articulation. C'est la technique la plus répandue pour décrire la géométrie des chaines cinématique sérielles.

L'intérêt de cette méthode est qu'elle permet d'exprimer le passage entre deux repères en utilisant un nombre minimum de paramètres appelés les paramètres géométriques.

II. 6. Paramètres de Denavit-Hartenberg (D & H) :

La méthode de Denavit-Hartenberg est bien adaptée pour des structures ouvertes simples, mais présente des ambiguïtés lorsqu'elle est appliquée sur des robots à structures fermées ou arborescentes. Wisama Khalil propose une modification de cette méthode : méthode de Denavit-Hartenberg modifiée (méthode de Khalil). Cette méthode permet la description homogène en un nombre minimum de paramètres pour la représentation des différentes. [16]

Un repère de référence \mathcal{R}_j est assigné pour chaque corps C_j du robot à l'articulation j où elle rencontre le corps précédent C_{j-1} , ce repère est défini comme suit :

- L'axe z_j se dirige le long de l'axe de l'articulation j .
- L'axe x_j est aligné suivant la direction de la perpendiculaire commune aux axes z_j et z_{j+1} .
- l'axe, non représenté sur la figure, est choisi de manière à former un trièdre orthonormé direct avec x_j et z_j .

Les transformations élémentaires qui permettent d'exprimer le passage du repère \mathcal{R}_{j-1} au repère \mathcal{R}_j sont :

- une rotation d'angle α_j autour de l'axe x_{j-1} , α_j est l'angle entre z_{j-1} et z_j .
- une translation a_j suivant x_{j-1} égale à la perpendiculaire commune aux axes z_{j-1} et z_j .
- une rotation d'angle θ_j autour de l'axe, θ_j est l'angle entre l'axe x_{j-1} et x_j .
- une translation suivant l'axe, L'amplitude de cette translation, notée d_j , est donnée par la distance (signée) entre l'axe x_{j-1} et avec l'axe x_j

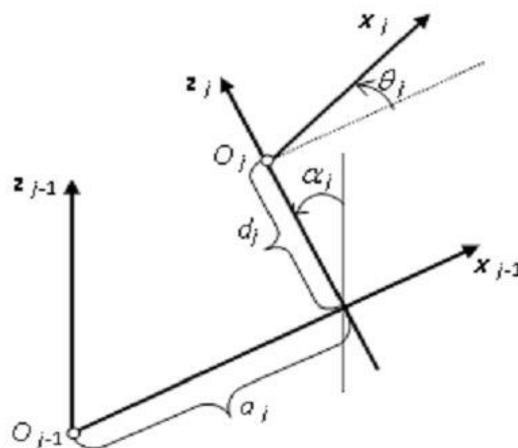


Figure. II.5 : Paramètres de D-H [16].

CHAPITRE II : ETUDE THEORIQUE DES ROBOTS INDUSTRIELS.

En termes de matrice de transformation homogène, les quatre transformations élémentaires donnent la matrice suivante :

$$T_j^{j-1} = \text{Rot}(X, \alpha_j) \text{Trans}(X, a_j) \text{Rot}(Z, \theta_j) \text{Trans}(Z, d_j) \quad (\text{II.15})$$

$$T_j^{j-1} = \begin{pmatrix} C\theta_j & -S\theta_j & 0 & a_j \\ C\alpha_{j-1} S\theta_j & C\alpha_{j-1} C\theta_j & -S\alpha_{j-1} & -d_j S\alpha_{j-1} \\ S\alpha_{j-1} S\theta_j & S\alpha_{j-1} C\theta_j & C\alpha_{j-1} & d_j C\alpha_{j-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Avec les notations : $C\theta_i = \cos(\theta_i)$ et $S\theta_i = \sin(\theta_i)$.

Ce paramétrage est largement répandu, pour ne pas dire qu'il est systématiquement adopté dans les modèles géométriques, cinématiques et dynamiques des bras manipulateurs

II. 7. Modèle géométrique inverse (MGI) [17 et 18] :

Le problème inverse consiste à calculer les coordonnées articulaires (q) qui amènent l'organe terminal dans une situation désirée, spécifiée par ses coordonnées opérationnelles (x)

$$q = F^{-1}(x) \quad (\text{II.17})$$

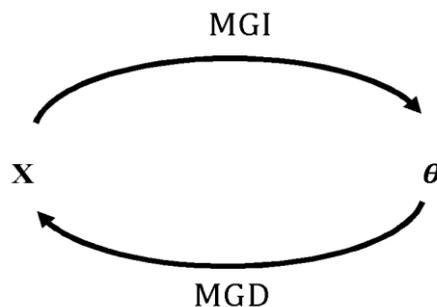


Figure. II.6 : modèle MGI [17 et 18]

$${}^0T_n = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \dots {}^{n-1}T_n \quad (\text{II.18})$$

On note :

$$U_0 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \dots {}^{n-1}T_n = \begin{pmatrix} s_x & n_x & a_x & p_x \\ s_y & n_y & a_y & p_y \\ s_z & n_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{II.19})$$

CHAPITRE II : ETUDE THEORIQUE DES ROBOTS INDUSTRIELS.

Cette matrice U_0 est la donnée du problème. Elle représente la situation de l'organe terminal dans le repère de base du robot R_0 .

En fonction des éléments articulaires s , n , a et P est très difficile. Paul a proposé une méthode qui consiste à pré multiplier successivement les 2 membres de l'équation par les matrices de transformation homogène inverse ${}^jT_{j-1}$ pour j variant de 1 à $n - 1$. Cette méthode qui traite séparément chaque cas particulier et convient pour la plupart des robots industriels. Elle permet d'isoler et d'identifier l'une après l'autre les variables articulaires que l'on recherche.

II. 8. Méthodes de description des Orientations [19] :

II. 8. 1. Angles d'Euler :

L'orientation d'un repère R_n dans le repère R_0 est déterminée par la spécification de trois angles ψ , θ et ϕ correspondant à trois rotations successives (voir Figure II.7). Le plan (X_n, Y_n) coupe le plan (X_0, Y_0) suivant une droite ON appelée ligne nodale, perpendiculaire aux axes Z_0 et Z_n . Son sens positif est donné par celui du produit vectoriel $a_0 \wedge a_n$. Les angles d'Euler sont définis de la façon suivante :

- ϕ (précession) : angle entre x_0 et ON , avec $0 \leq \phi \leq 360^\circ$
- θ (nutation) : angle entre z_0 et z_n , avec $0 \leq \theta \leq 180^\circ$
- ψ (rotation propre) : angle entre ON et x_n , avec $0 \leq \psi \leq 360^\circ$

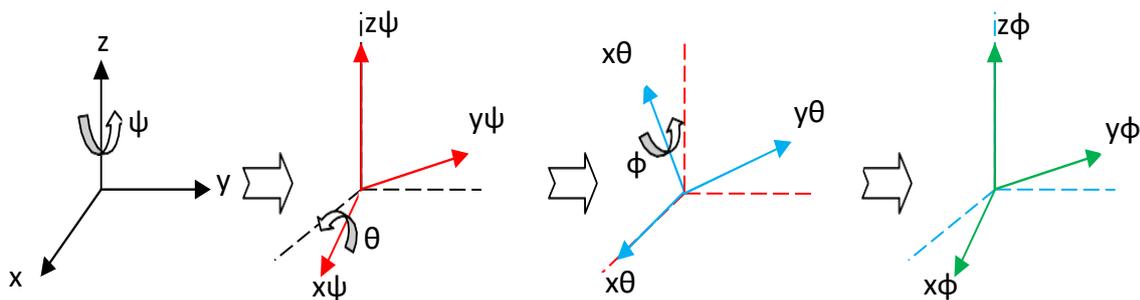


Figure II. 7 : Rotation successives par les angles d'Euler [19].

Les angles ϕ et ψ sont mesurés dans le sens donné par la règle du tire-bouchon, respectivement autour des axes Z_0 et Z_n . La composition de ces trois rotations permet de calculer la matrice d'orientation :

CHAPITRE II : ETUDE THEORIQUE DES ROBOTS INDUSTRIELS.

$${}^0A_n = \text{rot}(z, \phi) \cdot \text{rot}(x, \theta) \cdot \text{rot}(z, \psi) \quad (\text{II.20})$$

$${}^0A_n = \begin{pmatrix} C\phi \cdot C\psi - S\phi \cdot C\theta \cdot S\psi & -C\phi \cdot S\psi - S\phi \cdot C\theta \cdot C\psi & S\phi \cdot S\theta \\ S\phi \cdot C\psi + C\phi \cdot C\theta \cdot S\psi & -S\phi \cdot C\psi + C\phi \cdot C\theta \cdot C\psi & -C\phi \cdot S\theta \\ S\theta \cdot S\psi & S\theta \cdot C\psi & C\theta \end{pmatrix} \quad (\text{II.21})$$

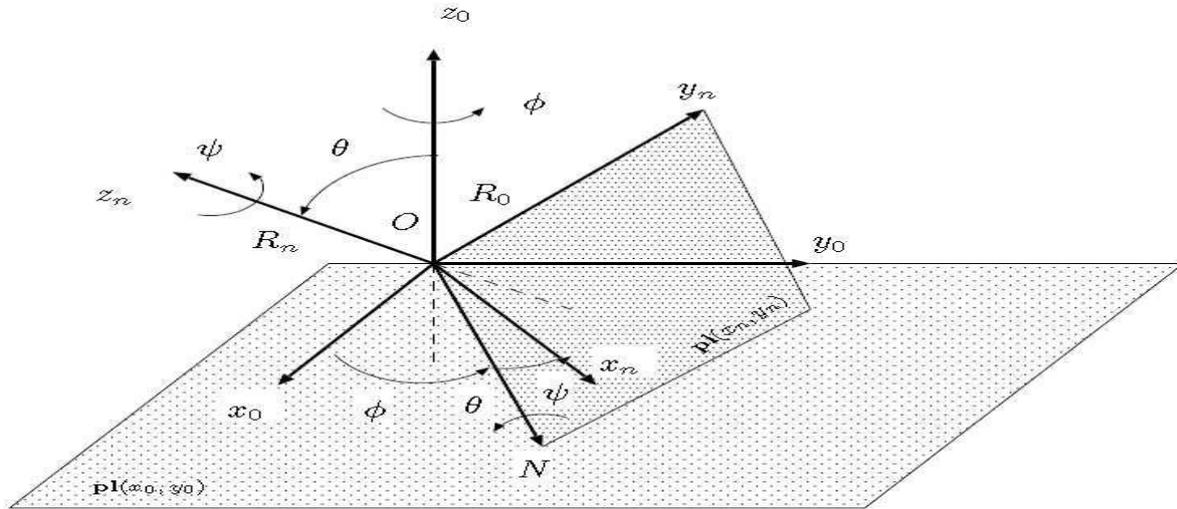


Figure II.8 : Représentation des angles d'Euler [13].

II. 8. 1. 1. Problème Inverse :

Expression des angles d'Euler en fonction des cosinus directeurs. En multipliant à gauche les deux membres de la relation (II.21) par $\text{rot}(z, -\phi)$ on obtient :

$$\text{Rot}(z, -\phi) {}^0A_n = \text{rot}(x, \theta) \cdot \text{rot}(z, \psi) \quad (\text{II.22})$$

Après développement on obtient :

$$\begin{pmatrix} C\phi \cdot s_x + S\phi \cdot s_y & -C\phi \cdot n_x + S\phi \cdot n_y & C\phi \cdot a_x + S\phi \cdot a_y \\ -S\phi \cdot s_x + C\phi \cdot s_y & -S\phi \cdot n_x + C\phi \cdot n_y & -S\phi \cdot a_x + C\phi \cdot a_y \\ S_z & n_z & a_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C\psi & -S\psi & 0 \\ C\theta \cdot S\psi & C\theta \cdot C\psi & -S\theta \\ S\theta \cdot S\psi & S\theta \cdot C\psi & C\theta \end{pmatrix} \quad (\text{II.23})$$

L'identification des éléments (1,3) de ces matrices conduit à :

$$C\phi \cdot a_x + S\phi \cdot a_y = 0 \quad (\text{II.24})$$

Ce qui donne comme solution :

$$\begin{cases} \phi = \text{ATAN2}(-a_x, a_y) \\ \phi' = \text{ATAN2}(a_x, -a_y) = \phi + 180^\circ \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

CHAPITRE II : ETUDE THEORIQUE DES ROBOTS INDUSTRIELS.

Avec ATAN2 qui est une fonction mathématique (fortran, Matlab, etc.) qui calcule l'arc tangent à partir des données des deux arguments.

φ étant connu, par identification des termes (2,3) et (3,3) de l'expression (II.24), écrire que :

$$\theta = \text{ATAN}_2(S\varphi.a_x - C\varphi.a_y, a_z) \quad (\text{II.26})$$

En procédant de façon analogue à partir des éléments (1,1) et (1,2), on obtient :

$$\psi = \text{ATAN}_2(-C\varphi.n_x - S\varphi.n_y, C\varphi.s_x + S\varphi.s_y) \quad (\text{II.27})$$

II. 8. 2. Angles de Roulis – Tangage – Lacet (RTL) [20] :

Par analogie avec la terminologie des pilotes de véhicules, des avions notamment, dont la direction du mouvement est supposée être dans le sens de l'axe z, les angles de roulis (Φ), tangage (θ) et lacet (ψ), présentent trois rotations successives définies comme suit : [12]

$${}^0A_n = \text{rot}(z, \varphi) \cdot \text{rot}(y, \theta) \cdot \text{rot}(x, \psi)$$

$${}^0A_n = \begin{pmatrix} C\varphi.C\theta & C\varphi.S\theta.S\psi - S\varphi.C\psi & C\varphi.S\theta.C\psi + S\varphi.S\psi \\ S\varphi.C\theta & S\varphi.S\theta.S\psi + C\varphi.C\psi & S\varphi.S\theta.S\psi - C\varphi.S\psi \\ -S\theta & C\theta.S\psi & C\theta.C\psi \end{pmatrix} \quad (\text{II.28})$$

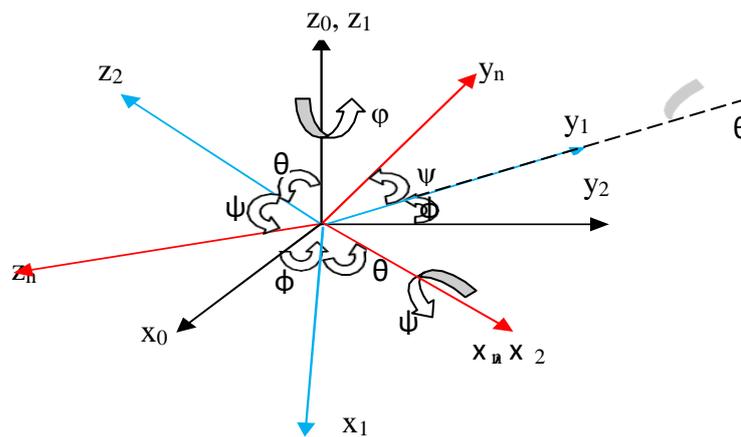


Figure II. 9 : Représentation des angles RTL [20].

CHAPITRE II : ETUDE THEORIQUE DES ROBOTS INDUSTRIELS.

II. 8. 3. 1. Problème Inverse :

Expression des angles de Roulis-Tangage-Lacet en fonction des cosinus directeurs.

On utilise la même méthode que dans le paragraphe précédent. En multipliant l'expression (II.25) à gauche par $rot(z, -\varphi)$, on obtient :

$$rot(z, -\varphi) \cdot A_n = rot(y, \theta) \cdot rot(x, \psi) \quad (II.29)$$

Après développement on obtient:

$$\begin{pmatrix} C\varphi \cdot s_x + S\varphi \cdot s_y & C\varphi \cdot n_x + S\varphi \cdot n_y & C\varphi \cdot a_x + S\varphi \cdot a_y \\ -S\varphi \cdot s_x + C\varphi \cdot s_y & -S\varphi \cdot n_x + C\varphi \cdot n_y & -S\varphi \cdot a_x + C\varphi \cdot a_y \\ S_z & n_z & a_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C\theta & S\theta \cdot S\psi & S\theta \cdot C\psi \\ 0 & C\psi & -S\psi \\ -S\theta & C\theta \cdot S\psi & C\theta \cdot C\psi \end{pmatrix} \quad (II.30)$$

$$\text{On obtient : } -S\varphi \cdot s_x + C\varphi \cdot s_y = 0 \quad (II.31)$$

On en déduit les solutions :

$$\varphi = \text{ATAN}_2(s_y, s_x) \quad (II.32)$$

$$\varphi' = \text{ATAN}_2(-s_y, -s_x) = \varphi + \pi$$

Il y a singularité si s_x et s_y sont nuls ($\theta = \pm \frac{\pi}{2}$)

De même, à partir des éléments (1,1) et (1,3), puis (2,2) et (2,3), on calcul :

$$\begin{cases} \theta = \text{ATAN}_2(-s_z, C\varphi \cdot s_x + S\varphi \cdot s_y) & (2.34) \\ \psi = \text{ATAN}_2(S\varphi \cdot a_x - C\varphi \cdot a_y, -S\varphi \cdot n_x + C\varphi \cdot n_y) \end{cases} \quad (II.33)$$

II. 9. Modélisation cinématique :

La modélisation cinématique est celle qui permet d'exprimer la vitesse de l'organe terminal en fonction de la vitesse de la configuration articulaire du bras manipulateur et inversement [05].

II. 9. 1. Modèle cinématique direct (MCD) :

Le Modèle cinématique direct d'un robot manipulateur est le modèle qui permet de calculer la vitesse de déplacement du point (**P**) en fonction des variables articulaires (\dot{q}), il s'agit de

CHAPITRE II : ETUDE THEORIQUE DES ROBOTS INDUSTRIELS.

déterminer le vecteur (\dot{X}) défini par la vitesse de rotation (\dot{w}) du repère R_j par rapport au repère R_i et la vitesse de déplacement V_j du point p. il est noté :

$$\dot{X} = J(q) * \dot{q} \tag{II.34}$$

Avec : $\dot{X} = [v, w]^T$, $\dot{q} = [\dot{q}_1 \dot{q}_2 \dot{q}_3 \dots \dots \dots \dot{q}_n]$ (II.35)

Où $J(q)$ désigne la matrice Jacobienne de dimension ($m * n$) du bras manipulateur, égale à $\frac{\partial X}{\partial q}$ et fonction des variables articulaires q .

L'intérêt du calcul de la matrice Jacobienne est multiple :

- En cinématique, on utilise la matrice Jacobienne pour établir les relations liant les vitesses opérationnelles aux vitesses articulaires.
- Elle facilite le calcul des singularités et de dimension de l'espace opérationnel accessible au robot.

II. 9. 2. Calcul de la matrice Jacobienne :

La matrice Jacobienne peut être calculée de plusieurs façons :

II. 9. 2. 1. Par dérivation du modèle géométrique direct :

Une première méthode consiste à calculer les éléments du vecteur vitesse opérationnel \dot{X} , par dérivation par rapport au temps des éléments du vecteur des coordonnées opérationnelles X , obtenus par le modèle géométrique direct :

$$X = F(q) \tag{II.36}$$

Avec : $F(q) = [F_1(q) F_2(q) \dots \dots \dots F_m(q)]$ (II.37)

$$\frac{dX}{dt} = \left[\frac{\partial F_1(q)}{\partial q_1} \frac{dq_1}{dt} + \frac{\partial F_1(q)}{\partial q_2} \frac{dq_2}{dt} + \dots + \frac{\partial F_1(q)}{\partial q_n} \frac{dq_n}{dt} ; \dots \dots \dots \right. \\ \left. \frac{\partial F_m(q)}{\partial q_1} \frac{dq_1}{dt} + \frac{\partial F_m(q)}{\partial q_2} \frac{dq_2}{dt} + \dots + \frac{\partial F_m(q)}{\partial q_n} \frac{dq_n}{dt} \right] \tag{II.38}$$

En mettant ce système sous forme matricielle et en l'identifiant à la relation (II.39) on obtient l'expression suivante :

$$\frac{dX}{dt} = \dot{X} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1(q)}{\partial q_1} & \frac{\partial F_1(q)}{\partial q_2} & \dots & \dots & \frac{\partial F_1(q)}{\partial q_n} \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ \frac{\partial F_m(q)}{\partial q_1} & \frac{\partial F_m(q)}{\partial q_2} & \dots & \dots & \frac{\partial F_m(q)}{\partial q_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{pmatrix} \quad (\text{II.39})$$

$$\implies \dot{X} = [J_n] \cdot [\dot{q}_n] \quad \text{avec} \quad J_{ij} = \frac{\partial F_i}{\partial q_j} \begin{cases} i = 1 \text{Lm} \\ j = 1 \text{Ln} \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

Cette méthode est facile à mettre en œuvre pour des robots à deux ou trois degrés de liberté. Cependant, pour des robots ayant plus de trois degrés de liberté, il est plus pratique d'utiliser la méthode de composition des vitesses.

II. 9. 2. 2. En utilisant les lois de composition des vitesses :

Dans une seconde méthode, celle qui nous intéresse, le calcul de vecteur vitesse (\dot{X}) de l'organe terminal s'effectue en utilisant une formulation récurrente (minimisation du temps de calcul et génération automatique des équations nécessaires) basée sur le théorème de composition des vitesses, ensuite on déduit le Jacobien de la relation matricielle suivante :

$$\dot{X} = \begin{pmatrix} V_n \\ W_n \end{pmatrix} \quad (\text{II.41})$$

\vec{V}_n : Vecteur vitesse de translation de l'organe terminal relativement au repère $\{R_0\}$.

\vec{W}_n : Vecteur vitesse de rotation instantanée de l'organe terminal relativement au repère $\{R_0\}$.

On exprime en général \vec{V}_n et \vec{w}_n , soit dans le repère $\{R_n\}$, ou dans le repère $\{R_0\}$.

La matrice Jacobienne correspondante est notée ${}^n[J_n]$ ou ${}^0[J_n]$ respectivement.

II. 9. 3. Théorème de composition des vitesses :

Etant donnés trois repères $\{R_A\}$, $\{R_B\}$ et $\{R_0\}$ ($\{R_0\}$ un repère fixe), et un point (P) dans l'espace.

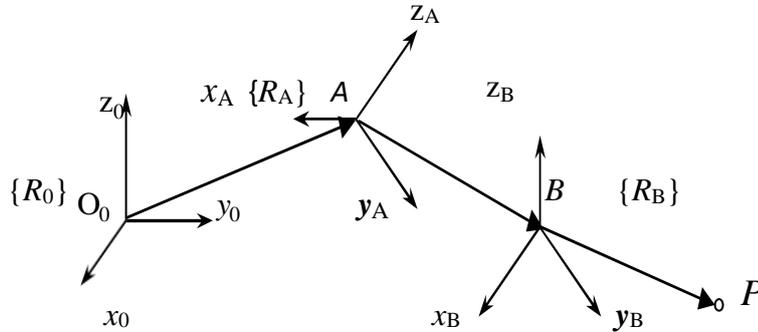


Figure II. 10 : Détermination des vitesses.

La position de P dans $\{R_0\}$:

$$\vec{O_0P} = \vec{OA} + \vec{AB} + \vec{BP} \quad (\text{II.42})$$

La vitesse absolue du point P :

$$\vec{V}_p = \frac{d^0 O_0P}{dt} = \frac{d^0 O_0A}{dt} + \frac{d^0 O_0AB}{dt} + \frac{d^0 O_0BP}{dt} \quad (\text{II.43})$$

Soit :

$\vec{\Omega}_{R_A / R_0}$: Vitesse de rotation instantanée du repère $\{R_A\}$ relativement au repère $\{R_0\}$.

$\vec{\Omega}_{R_B / R_A}$: Vitesse de rotation instantanée du repère $\{R_B\}$ relativement au repère $\{R_0\}$.

En appliquant la loi de composition des vitesses :

$$\vec{w}_A = \vec{\Omega}_{R_A / R_0} \quad \frac{d^0 AB}{dt} = \frac{d^A AB}{dt} + \vec{w}_A \wedge AB \quad (\text{II.44})$$

$$\vec{w}_B = \vec{\Omega}_{R_B / R_A} + \vec{\Omega}_{R_A / R_0} \quad \frac{d^0 AB}{dt} = \frac{d^B AB}{dt} + \vec{w}_B \wedge AB \quad (\text{II.45})$$

Où: \vec{w}_A et \vec{w}_B sont les vitesses de rotation instantanée des repères $\{R_A\}$ et $\{R_B\}$ relativement au repère $\{R_0\}$.

On s'intéresse uniquement aux origines des repères :

CHAPITRE II : ETUDE THEORIQUE DES ROBOTS INDUSTRIELS.

$$\text{Repère } \{R_0\}: \quad \vec{W}_0 = \vec{\Omega}_{R_0/R_0} = \vec{0} \quad \vec{V}_0 = \frac{d^0 O_0 O_0}{dt} = 0 \quad (\text{II.46})$$

$$\text{Repère } \{R_A\}: \quad \vec{W}_0 = \vec{\Omega}_{R_A/R_0} \quad \vec{V}_A = \frac{d^0 O_0 A}{dt} \quad (\text{II.47})$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Repère } \{R_B\}: \quad \vec{W}_B &= \vec{\Omega}_{R_A/R_0} + \vec{\Omega}_{R_B/R_A} = \vec{W}_A + \vec{\Omega}_{R_B/R_A} \\ \vec{V}_B &= \frac{d^0 O_0 A}{dt} + \frac{d^A AB}{dt} + \vec{W}_A \wedge \vec{AB} = \vec{V}_A + \frac{d^A AB}{dt} + \vec{W}_A \wedge \vec{AB} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.48})$$

Soit :

$$\left. \begin{aligned} \vec{\Omega}_{R_B/R_A} &= \dot{\theta}_B \cdot \vec{Z}_B \\ \vec{AB} &= {}^A \vec{P}_B \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} \frac{d^A AB}{dt} &= {}^A \dot{\vec{P}}_B \end{aligned} \right\}$$

$$\left\{ \begin{aligned} \vec{W}_B &= \vec{W}_A + \dot{\theta}_B \cdot \vec{Z}_B \\ \vec{V}_B &= \vec{V}_A + {}^A \dot{\vec{P}}_B + \vec{W}_A \wedge {}^A \vec{P}_B \end{aligned} \right. \quad (\text{II.49})$$

$$\left\{ \begin{aligned} {}^B \vec{W}_B &= {}^B \vec{R}_A \cdot {}^A \vec{W}_A + \dot{\theta}_B \cdot \vec{Z}_B \\ {}^B \vec{V}_B &= {}^B \vec{R}_A ({}^A \vec{V}_A + {}^A \dot{\vec{P}}_B + {}^A \vec{W}_A \wedge {}^A \vec{P}_B) \end{aligned} \right. \quad (\text{II.50})$$

II. 10. Modèle cinématique inverse :

Le modèle cinématique inverse d'un bras manipulateur est celui qui permet de déterminer les vitesses articulaires (\dot{q}) qui assurent au repère terminal une vitesse opérationnelle (\dot{X}) désirée à partir d'une configuration q donnée. Il s'écrit :

$$\dot{q} = J^{-1}(q) * \dot{X} \quad (\text{II.51})$$

Le modèle cinématique inverse présente un grand intérêt en phase d'exploitation notamment lorsque le bras manipulateur travaille au cours du déplacement, avec des contraintes de vitesses de l'effecteur relativement à la pièce (opérations de soudage, de découpage, etc.).

CHAPITRE II : ETUDE THEORIQUE DES ROBOTS INDUSTRIELS.

Deux classes de méthodes peuvent être mises en œuvre pour obtenir le modèle cinématique inverse :

- Celles qui procèdent par dérivation des modèles géométriques inverses. Il s'agit de méthodes analytiques qui ont pour avantage de donner tous les modèles cinématiques inverses associés aux différents modèles géométriques inverses. Ces méthodes exigent cependant que le robot soit résoluble, c'est-à-dire qu'il soit possible de calculer toutes les configurations permettant d'atteindre une situation donnée.
- Celles, plus générales, qui consistent à inverser le modèle cinématique direct en résolvant le système d'équations linéaires suivant :

$$\dot{q}=J^{-1} \cdot \dot{X} \quad (\text{II.52})$$

La mise en œuvre de ce type de méthodes peut être menée de façon analytique ou numérique :

- La solution analytique a pour avantage de diminuer considérablement le nombre d'opérations, mais on doit traiter séparément tous les cas singuliers.
- Les méthodes numériques sont plus générales ; la plus répandue est basée sur la notion de pseudo-inverse : Les algorithmes traitent de façon unifiée les cas réguliers, singuliers et redondants. Cette méthode est retenue en raison de son caractère général.

La résolution du problème se ramène donc à l'inversion, il est facile de trouver la matrice J^{-1} lorsque le robot possède six degrés de liberté et un poignet de type rotule, puisque la matrice J est inversible.

II.11 Détermination des paramètres de DENAVIT-HARTENBERG du manipulateur RRRRRR :

Dans notre cas la structure du manipulateur à modéliser est une chaîne ouverte simple composée de trois corps $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ et six (06) articulations rotoides (RRRRRR). Le schéma de la représentation géométrique et le placement des repères est illustré par la figure (II.11).

Pour déterminer les paramètres de Denavit-hartenberg, il faut procéder par étape comme suit :

1. disposer les axes Z_j sur les axes articulaires.
2. disposer les axes X_j en prenant la convention $X_j = Z_j \wedge Z_{j+1}$ (trièdre direct). Il se peut que pour des raisons de simplicité, qu'il soit préférable de prendre la convention trièdre indirecte.

CHAPITRE II : ETUDE THEORIQUE DES ROBOTS INDUSTRIELS.

3. disposer les axes Y_j en prenant la convention $Y_j = Z_j \wedge X_j$ (trièdre direct) .

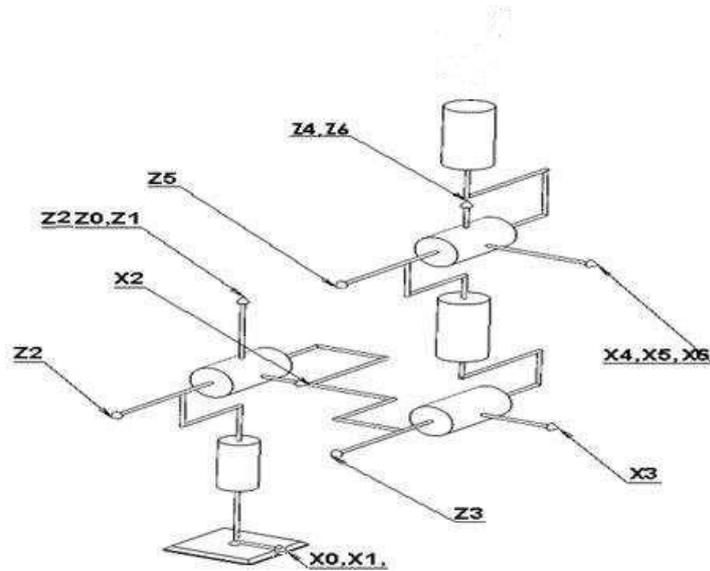


Figure II. 11 : Manipulateur RRRRRR.

Tableau N° II.1 : Paramètres de Denavit-Hartenberg pour le robot 6 articulations

Articulations	$(\theta_j) (q_j) \text{ (deg)}$	$r_j \text{ (mm)}$	$\alpha_j \text{ (deg)}$	$d_j \text{ (mm)}$
1	θ_1	0	0	0
2	θ_2	0	90	0
3	θ_3	0	0	430
4	θ_4	250	-90	0
5	θ_5	0	90	0
6	θ_6	0	-90	0

II. 12. Conclusion :

On a exposé dans ce chapitre la procédure de calcul du modèle géométrique direct et inverse des robots à structures ouverte simple. Cette procédure repose sur l'utilisation des matrices de transformation homogène et la méthode de Denavit et Hartenberg. Par ailleurs le modèle géométrique direct (MGD) du notre manipulateur a été établi, ce qui a permis de trouver le modèle géométrique inverse (MGI), en utilisant la méthode de Paul.

CHAPITRE 3

Description du procédé de soudage par friction malaxage (FSW)

III. 1. Introduction :

Pour l'industrie aéronautique, le FSW présente un réel intérêt car il peut venir en remplacement de la technique d'assemblage par rivetage. La suppression des rivets sur les sous-ensembles aéronautiques pourrait permettre un possible allègement de la masse, de réduire le temps de cycle et de facto de réduire les coûts d'assemblage. Dans ce chapitre nous allons présenter une description générale de ce procédé et ses applications dans l'industrie et spécialement l'industrie aéronautique.

III. 2. Définition

Le procédé de soudage par friction malaxage ou FSW (Friction Stir Welding en anglais) repose sur une invention dont le premier brevet a été déposé en 1991 par le TWI (The Welding Institute) [21]. Contrairement aux procédés de soudage par fusion, le FSW permet un soudage à l'état solide car lors du soudage, la température de fusion des matériaux à souder n'est pas atteinte. Ceci favorise le soudage de matériaux réputés difficilement soudables à l'instar de l'aluminium, du cuivre, du magnésium [22], des matériaux composites à matrice métallique [23]. L'absence de matériau d'apport pour le soudage, les propriétés du joint soudé en dureté, en tenue mécanique et en fatigue sont quelques avantages qui ont permis le développement du FSW pour diverses applications [4]. Ainsi, depuis son invention, le procédé n'a cessé de trouver des applications dans les domaines de l'aérospatial, de l'aéronautique, de l'automobile.

III. 3. Principe et paramètres du procédé :

III.3.1. Le principe du soudage FSW :

Le soudage par friction malaxage utilise le principe de la conversion de l'énergie mécanique, produite par la pression et la rotation de l'outil, en énergie thermique par frottement de ce dernier avec les pièces à assembler. Ces dernières sont mises en contact et solidement bridées, puis, l'outil en rotation constitué principalement d'un épaulement et d'un pion en rotation pénètre dans la matière. Le frottement du pion sur les pièces provoque

CHAPITRE IV : DESCRIPTION DU PROCÉDE DE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE (FSW)

un échauffement qui entraîne un ramollissement de la matière. Cela permet d'insérer le pion à l'interface entre les pièces à assembler jusqu'à amener l'épaulement au contact de ces dernières. L'outil se déplace le long du joint à souder à une vitesse d'avance bien déterminée. Une fois l'épaulement en contact avec les pièces à souder, un effort est maintenu sur l'outil pour empêcher la matière de fluer vers le haut et permettre le forgeage de celle-ci. Le rôle de l'épaulement est de générer la chaleur par frottement sur les pièces à assembler [25].

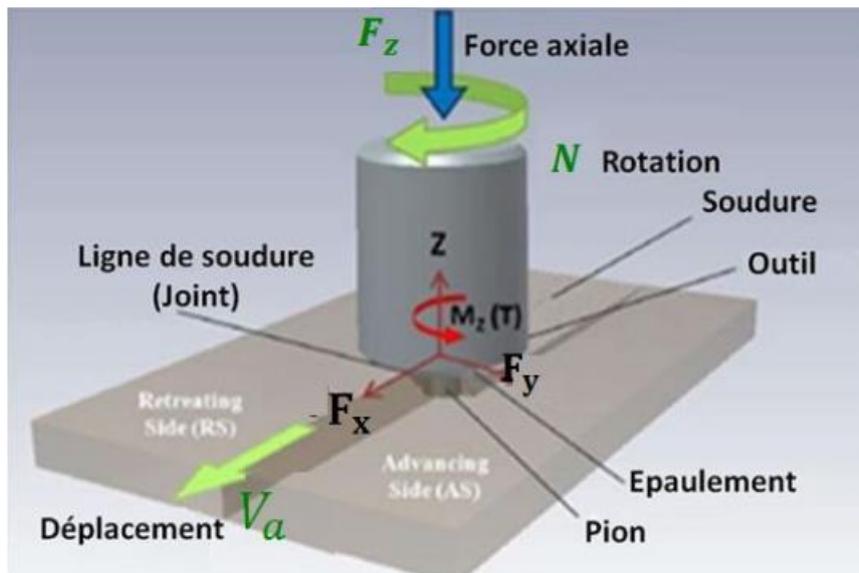


Figure III. : 1 Présentation schématique du principe de procédé FSW [11].

Le frottement entre l'outil (l'épaulement et le pion) et les parties à souder engendre une élévation locale de la température, mais n'atteignant pas la température de fusion. Le matériau se ramollit et passe dans un état pâteux facilitant le déplacement de l'outil le long du joint à souder.

Le mouvement de rotation du pion permet le malaxage, c'est-à-dire le mélange de la matière des deux pièces à assembler. La combinaison des mouvements de translation et de rotation de l'outil entraîne la matière de l'avant vers l'arrière du pion en déformant plastiquement la matière se situant devant le pion. Cette matière malaxée, composée des différents matériaux soudés, se retrouve à l'arrière de l'outil et forme le cordon de soudure. Ainsi, le joint formé est constitué uniquement des métaux de base des pièces assemblées et ne nécessite pas de métal d'apport [26].

CHAPITRE IV : DESCRIPTION DU PROCÉDE DE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE (FSW)

Un côté avançant « advancing side » et un côté reculant « retreating side » peuvent être observés au joint de soudure dû à la rotation et la translation de l'outil. En effet, du côté avançant, la vitesse tangentielle induite par la rotation de l'outil est dans le même sens que la vitesse de translation de ce dernier, on parle alors de travail en avalant tandis que pour le côté reculant, les deux vitesses (tangentielle et longitudinale) sont opposées, on parle alors de travail en opposition. Cela provoque une asymétrie dans l'écoulement du matériau qui influence la microstructure et généralement les propriétés mécaniques de ce dernier [27].

La réalisation d'une soudure peut être décomposée en quatre 4 phases [25] :

- **Phase d'approche** : l'outil est animé d'un mouvement de rotation et perce la zone de départ de la soudure sous l'effet d'un mouvement de translation verticale jusqu'au contact entre l'épaulement et la partie supérieure de la zone à souder.

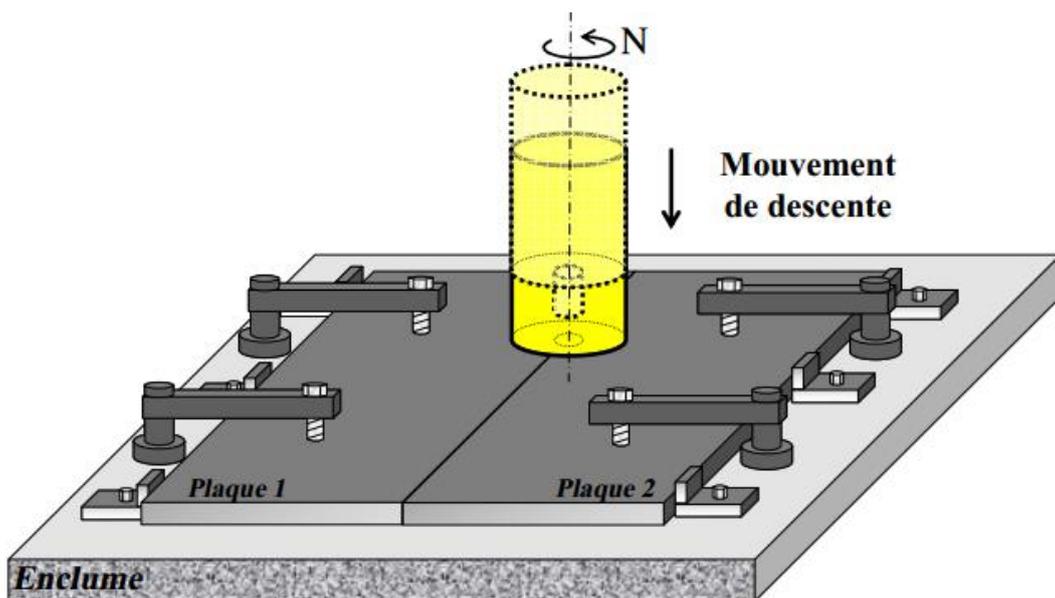


Figure III. 2 : Phase d'approche [25].

- **Phase de chauffe** : l'outil est toujours animé du mouvement de rotation et ne subit plus de mouvement vertical ; cette période dure une à deux secondes et le frottement à l'interface entre la tôle et l'épaulement entraîne une génération de chaleur qui permet de ramollir le matériau à souder.
- **Phase de soudage** : en plus du mouvement de rotation, un mouvement d'avance est

CHAPITRE IV : DESCRIPTION DU PROCEDE DE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE (FSW)

imposée à l'outil afin de réaliser la soudure ; lors de ce mouvement, la matière est malaxée par le pion et vient de déposer à l'arrière de ce dernier afin de réaliser le joint.

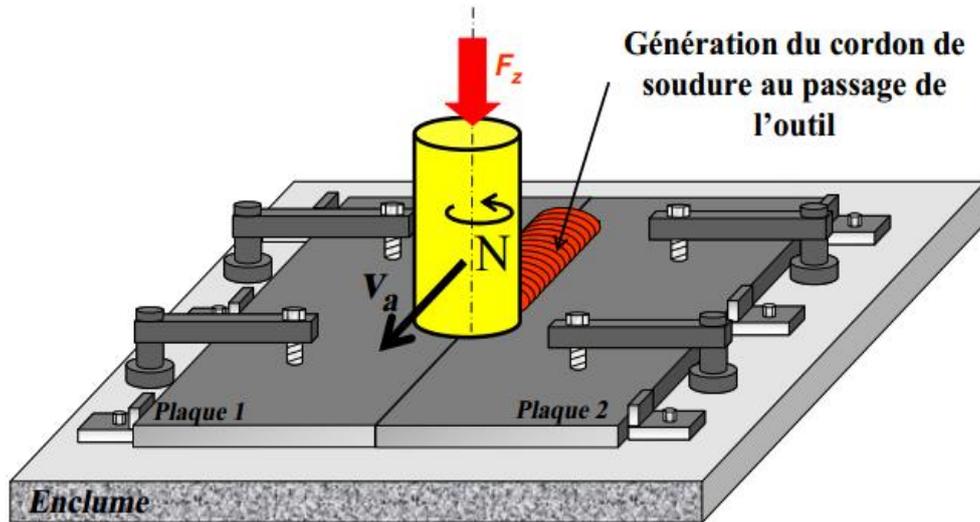


Figure III. 3 : Phase de soudage [25].

- **Phase de retrait** : à la fin du soudage, l'outil est à nouveau animé d'un mouvement de translation verticale, mais cette fois afin de le retirer de la zone de soudure ; à l'issue de ce retrait, un trou reste présent dans le cas d'un type d'outil conventionnel (à pion fixe).

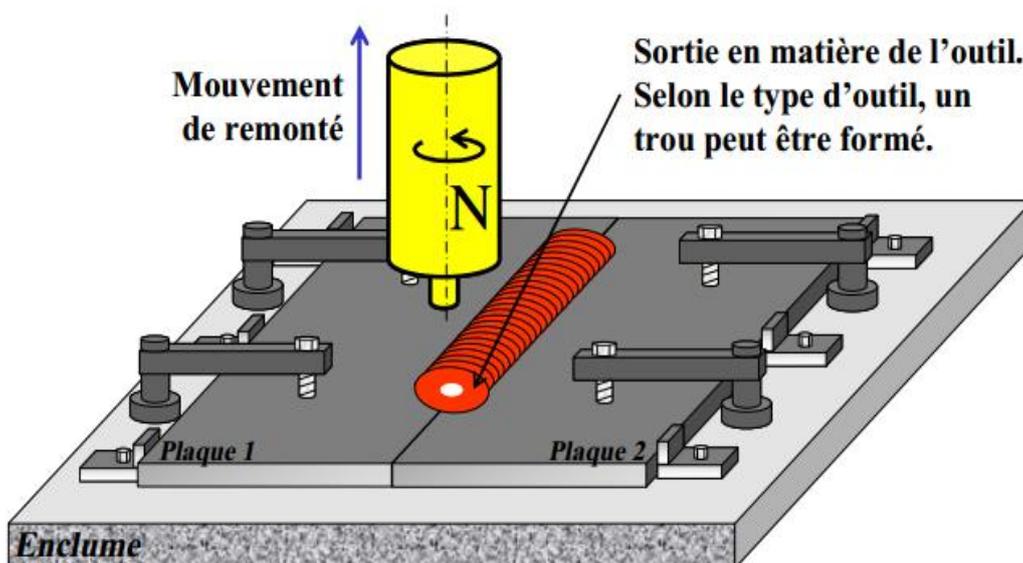


Figure III. 4 : Phase de retrait de l'outil [25].

CHAPITRE IV : DESCRIPTION DU PROCÉDE DE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE (FSW)

III.3.2. Les paramètres opératoires du soudage FSW :

Dans ce paragraphe, on cite quelques facteurs majeurs dans le procédé FSW à savoir : la vitesse de rotation de l'outil (tr/min), la vitesse d'avance de l'outil (mm/min) le long de la ligne de joint, l'angle d'inclinaison de l'outil et l'effort de plongée de l'outil dans la matière à souder.

- **Vitesse de rotation et vitesse d'avance :**

Les vitesses de translation (vitesse de soudage) et de rotation de l'outil sont les paramètres les plus importants quant à la qualité de la soudure produite. Chaque matériau possède une fenêtre de soudabilité, c'est-à-dire un ensemble de jeux de paramètres (vitesse de rotation, vitesse de translation) permettant de réaliser une soudure saine.

Les deux vitesses sont liées par le rapport (Vitesse d'avance / Vitesse de rotation) pour qualifier le soudage. Si ce rapport est faible, on dit que le soudage est chaud, car le malaxage et la chaleur dissipée par frottement seront élevés et engendreront de fortes températures. Par contre, si ce rapport est grand, on dit que le soudage est froid, car la chaleur dissipée par frottement entre l'outil et les plaques ainsi que le malaxage de la matière n'induisant pas des températures très élevées dans les pièces. [28]

- **Angle d'inclinaison de l'outil :**

L'angle d'inclinaison de l'outil par rapport à la surface des plaques à souder est un paramètre important à prendre en considération dans l'optimisation du procédé, car son choix approprié permet à la matière de passer efficacement de l'avant vers l'arrière du pion. [28]

- **Effort appliqué :**

Lors du soudage par friction-malaxage, la rotation de l'outil force le déplacement du métal plastifié vers la surface du joint. Le métal ainsi poussé sous l'épaule de l'outil exerce une pression qui cherche à éloigner l'outil du joint. Il est par conséquent nécessaire d'appliquer une force verticale sur l'outil pour maintenir le contact entre l'outil et les pièces à souder. [29]

Le frottement entre l'outil en rotation et la pièce génère un apport calorifique. La quantité de chaleur dépend de la force appliquée, du coefficient de frottement à

CHAPITRE IV : DESCRIPTION DU PROCÉDE DE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE (FSW)

l'interface outil-pièce, de la géométrie de l'outil, de la vitesse de rotation et de la vitesse d'avance. Ainsi, le contrôle de cette force est nécessaire pour réunir toutes les conditions essentielles au soudage afin d'obtenir un joint sans défaut. Cette force doit être considérée conjointement aux paramètres du procédé pour assurer une bonne liaison entre les deux parties du joint. [30]

Les différentes forces générées autour de l'outil et les pièces à souder durant le procédé de soudage FSW sont schématisées dans la figure suivante. Il est important de caractériser ces forces dont le but de réduire la complexité, la puissance de la machine de soudage et aussi réduire le coût de l'opération de soudage. [31]

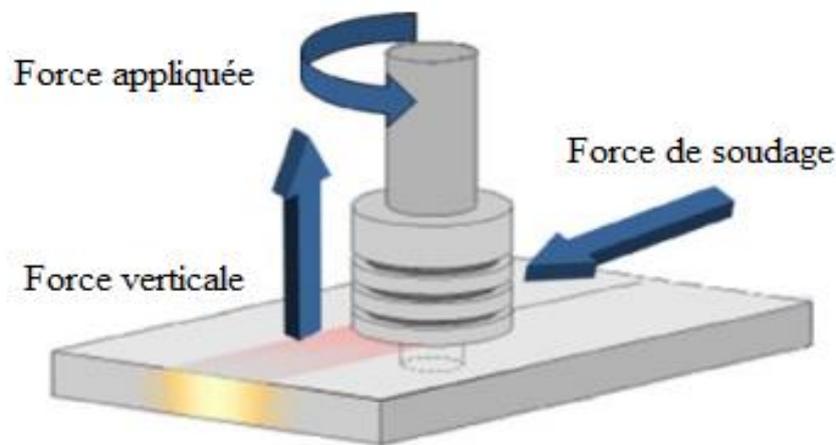


Figure III. 5 : Forces générées durant le procédé de FSW [31].

III.3.3. Les paramètres de l'outil de soudure FSW :

- **Géométrie de l'outil :**

La géométrie de l'outil est un facteur déterminant dans la distribution de la chaleur et la quantité de métal entraîné par l'outil. L'épaulement et le pion de l'outil ont chacun une fonction différente. L'épaulement génère la majeure partie de la chaleur lors de soudure de joints minces et empêche le métal ramolli de s'échapper sur les côtés. L'épaulement et le pion conjointement contrôlent l'écoulement du métal [32]. Le pion génère la majorité de la chaleur lors du soudage de joints épais. La forme du pion influence la quantité et

CHAPITRE IV : DESCRIPTION DU PROCEDE DE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE (FSW)

l'écoulement du métal déplacé ainsi que le taux du mélange dans les deux directions horizontales et verticale du joint. [9]

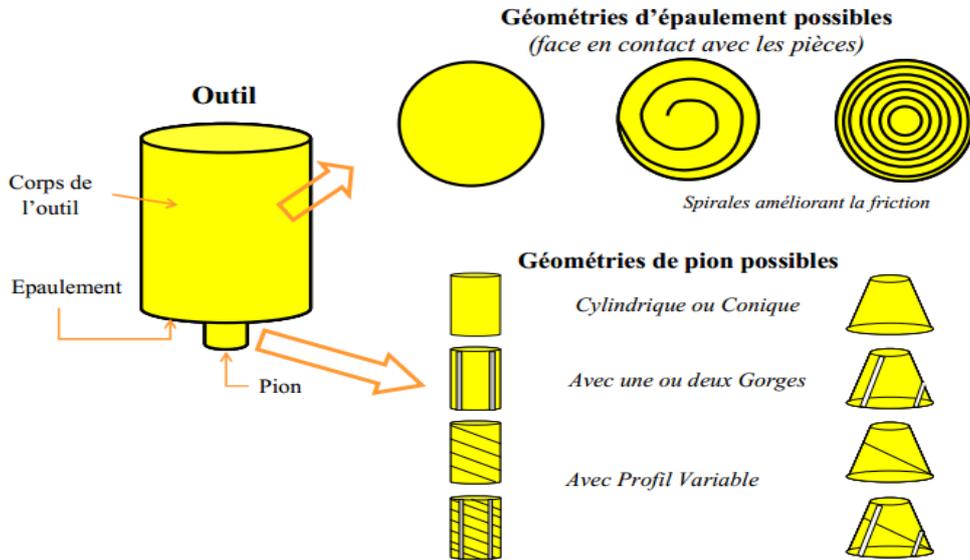


Figure III. 6 : Schématisation de l'outil FSW et de quelques géométries de pions. [29]

Les relations reliant les dimensions de la géométrie enveloppe à l'épaisseur (e) à souder sont :

$$\begin{aligned}
 D &\geq 2.5 * e \\
 L_{enclume} &\geq D + 2 * e \\
 R &\geq 2 * e
 \end{aligned}$$

Où D est le diamètre extérieur de l'épaulement, $L_{enclume}$ est la largeur minimale de l'enclume et R : l'épaisseur minimum des pièces autour de la zone malaxée. [33]

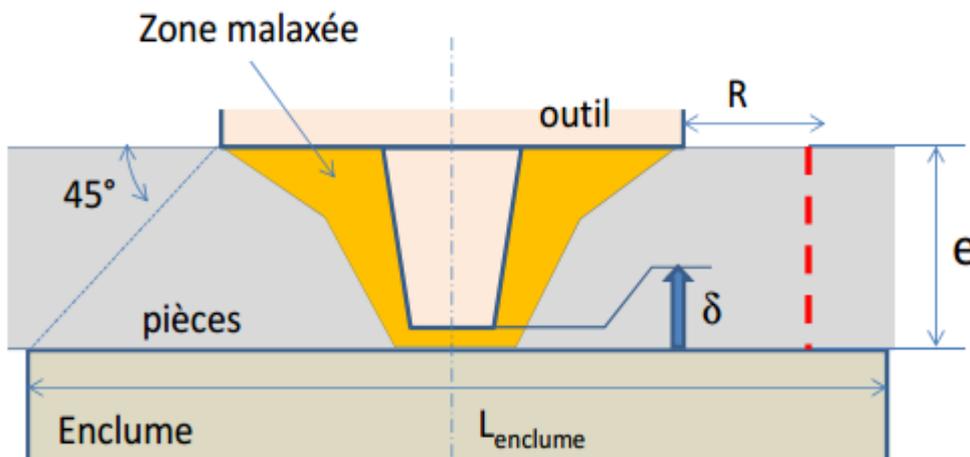


Figure III. 7 : Contraintes géométriques locales autour du joint soudé. [34]

CHAPITRE IV : DESCRIPTION DU PROCÉDE DE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE (FSW)

- **Matériau de l'outil :**

Le choix du matériau de l'outil dépendra de la nature de l'alliage soudé, du type d'outil (opérations d'usinage plus ou moins importantes) et de la durée de vie souhaitée. Cette dernière est directement liée à la température de soudage et aux efforts engendrés au niveau du pion.

La durabilité de l'outil dépend de son matériau. Il est important d'utiliser des matériaux qui possèdent des propriétés mécaniques élevées à haute température.

Généralement le matériau d'outil a besoin de six caractéristiques de base [22] :

- Résistance à la température de soudage ;
- Bonne durée de vie en fatigue à la température de soudage ;
- Résistance contre l'usure ;
- Stabilité thermique à long terme ;
- Stabilité chimique (pas de réaction avec le matériau à souder).

III.4. Les avantages et inconvénients du FSW :

III.4.1. Avantages du procédé :

Le soudage par FSW présente plusieurs avantages par rapport aux autres techniques de soudage. C'est un soudage sans fusion de matière, donc sans soufflure, ni fissuration à chaud, ni inclusion. Il n'y a également pas de métal d'apport, ni de dégagement de fumée ou de gaz lors de l'assemblage. De plus, il possède des caractéristiques mécaniques très élevées :

- Il permet d'améliorer la robustesse du processus et la durée de vie des pièces soudées,
- Les joints soudés par FSW se caractérisent par une grande résistance,
- Les contraintes résiduelles au niveau de pièces soudées sont faibles,
- la ligne soudée reste chimiquement homogène ce qui diminue la corrosion.

De plus, l'équipement utilisé pour ce procédé est simple, ce qui nécessite peu de qualification et peu de maintenance pour assurer son fonctionnement. Le procédé est propre, peut être facilement automatisé, moins dangereux que d'autres procédés de

CHAPITRE IV : DESCRIPTION DU PROCÉDE DE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE (FSW)

soudage, et ne nécessite pas une préparation complexe avant le soudage. L'absence de fusion du matériau de base apporte des avantages métallurgiques et mécaniques en comparaison avec le soudage conventionnel : le risque de craquage de solidification, qui est généralement un problème rencontré lors du soudage habituel de certains alliages d'aluminium, est totalement évité. Un autre avantage peut aussi être cité : une faible distorsion liée à un faible échauffement pendant le procédé de soudage. Grâce à tous ces avantages, FSW possède un potentiel industriel très important. Cette technique d'assemblage a trouvé des applications dans une grande variété d'industries, notamment l'automobile, les transports et surtout l'aérospatiale.

III.4.2. Inconvénients du procédé :

Les soudures possibles en utilisant ce procédé restent aujourd'hui limitées à des types de soudage simples : une pièce sur une autre, bord à bord ou soudage en T. D'autre part, les vitesses de soudage par ce procédé sont très faibles. En outre, une des limitations du procédé FSW est le comportement mécanique de l'outil utilisé lors du soudage. En effet, pendant le soudage par FSW, l'outil permet non seulement de chauffer localement le matériau des pièces aux températures d'assemblage, mais aussi d'appliquer une action mécanique du forgeage. Pour cette raison, sa matière doit être capable de supporter, sans déformation ou usure excessive, à la fois les hautes températures ainsi que les fortes charges de forgeage. Par conséquent, la majorité des applications industrielles utilisant le soudage FSW est limité au soudage des matériaux à faible température d'assemblage. Parmi ceux-ci, le matériau le plus soudé en utilisant cette technologie est l'aluminium. Presque toutes les gammes d'alliages d'aluminium ont été soudées avec succès en obtenant des joints à haute qualité, par exemple 1xxx, 7xxx, Al-Li, etc. Bien évidemment, puisque chaque type d'aluminium est métallurgiquement distinct, ces différents alliages présentent différentes caractéristiques d'assemblage et de forgeage. Ainsi, le traitement pour chaque type peut varier. Cependant, des assemblages à haute intégrité ont été obtenus dans toutes les classes. Au vu de ces résultats, FSW a connu un succès dans les secteurs d'application travaillant avec ce métal, contrairement aux autres types de matériaux. Par conséquent, plusieurs recherches ont été réalisées sur la qualité des matériaux et la géométrie de l'outil utilisé pour le soudage, afin de résoudre ces problèmes et améliorer la qualité de soudage pour d'autres types de matériaux.

III.5. Caractérisation des joints soudés par FSW

La soudure se compose de quatre zones principales présentant des microstructures et des propriétés différentes (Figure III.8). En effet, le gradient thermique et le gradient de déformation impliquent un gradient des microstructures à travers la soudure. De nombreuses études ont été menées sur l'évolution microstructurale, principalement sur les alliages de la série 2000, 6000 et 7000 qui sont les meilleurs candidats à ce type de soudage.[17]

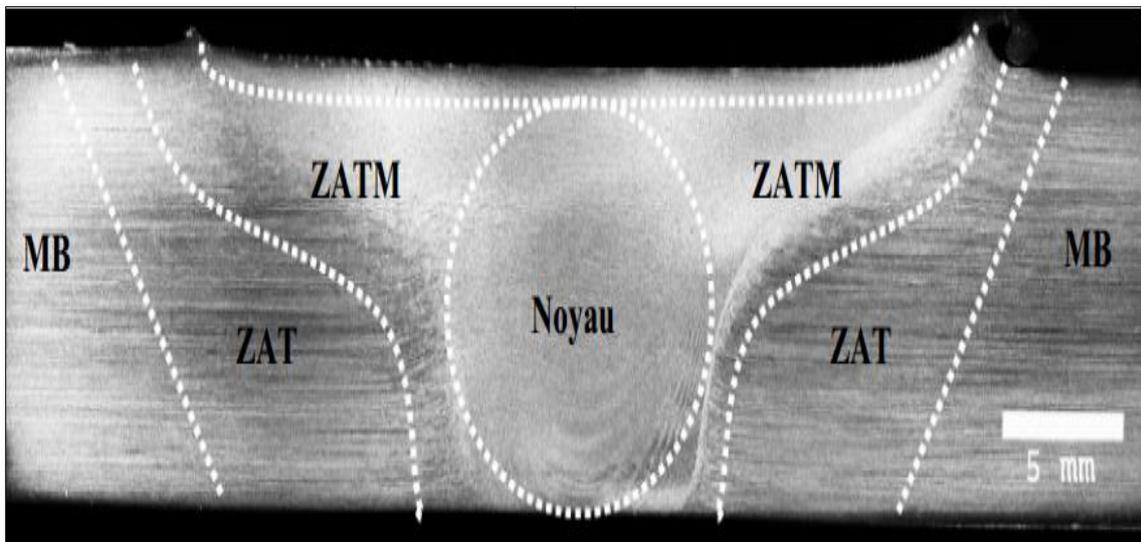


Figure III. 8 : Profil d'un joint soudé selon une coupe perpendiculaire à la direction.
[37]

III.5.1. Métal de base (MB) :

Se trouve loin de la zone soudée, ne subit ni déformation ni échauffement important. Par conséquent il conserve ses propriétés et microstructures d'origine. [37]

III.5.2. Zone affectée thermiquement (ZAT) :

Subit un échauffement compris entre 150°C et 350°C sans déformation notable [H.J.Y.C]. La texture granulaire est identique à celle du métal de base, cependant la population de dislocations et l'état de précipitation peuvent changer. Dans les alliages à l'état T6 ou T7, la précipitation durcissant initiale devient plus grossière, entraînant une chute de la dureté. Pour les alliages à l'état T4, il y a d'abord un pic de dureté lié à la précipitation de la phase durcissant, puis en se rapprochant du centre de la soudure la précipitation grossit et la dureté diminue.

CHAPITRE IV : DESCRIPTION DU PROCÉDE DE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE (FSW)

Cette zone est similaire à la zone affectée thermiquement que l'on observe lors du soudage par fusion. Sa taille dépend du profil temps – température et donc de la vitesse de soudage et de la perte de chaleur à travers les fixations. [38]

III.5.3. Zone affectée thermo-mécaniquement (ZATM) :

Se trouve autour du noyau soudé. Elle connaît une histoire thermique et plastique complexe, ce qui peut induire un début de recristallisation et des phénomènes de précipitation. Les grains initiaux subissent une rotation pouvant atteindre 90°. Les pics de températures dans cette zone sont compris entre 350°C et 450°C. [38]

III.5.4. Noyau soudé (NS) :

Subit la plus grande déformation plastique et la température peut atteindre les 500°C. A cette température les précipités présents peuvent se dissoudre et les intermétalliques sont broyés et redistribués par la grande déformation plastique. La taille du noyau est un peu plus grande que la taille du pion. Il est entièrement recristallisé de façon dynamique, les grains sont fins et de mêmes tailles avec un diamètre compris entre 1 et 10 µm suivant les cas. [38]

III.6. Industrialisation du procédé FSW :

Une des étapes de l'industrialisation d'un produit concerne les choix des moyens de production et les conditions de mises en œuvre. Le schéma d'intégration produit / procédé/ ressources est présenté à la Figure III- 8. Il sera utilisé comme support pour identifier les paramètres caractéristiques nécessaires à la qualification de machine FSW à partir des interactions entre ces trois entités. Cette démarche générique consiste à étudier le procédé et à analyser les interactions procédé / ressources pour qualifier ou concevoir un moyen de production FSW. Cette étude se fera à travers la mise en place du domaine de soudabilité opératoire.

CHAPITRE IV : DESCRIPTION DU PROCÉDE DE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE (FSW)

La démarche mise en place pour déterminer un domaine de soudabilité s'apparente à une démarche basée sur l'étude du Couple Outil Matière utilisée en usinage. Le principe est de définir un domaine de fonctionnement d'un outil pour une application donnée à l'aide de critères. En usinage, on va retrouver des critères de qualité, de durée de vie de l'outil, etc. Dans notre cas d'étude, ils seront relatifs aux cordons de soudure obtenus.

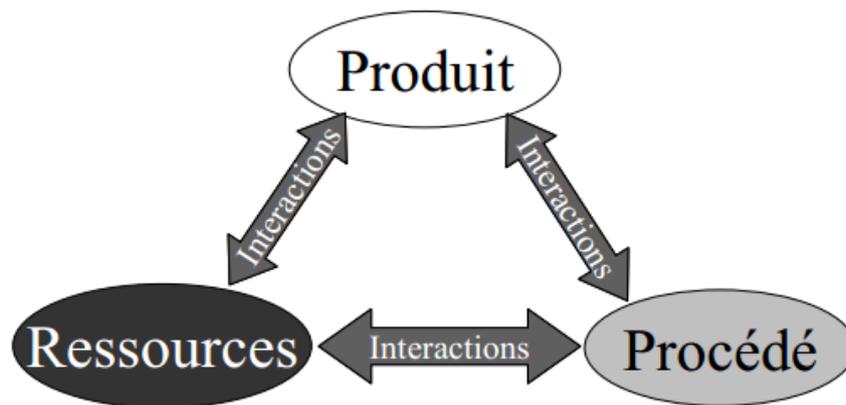
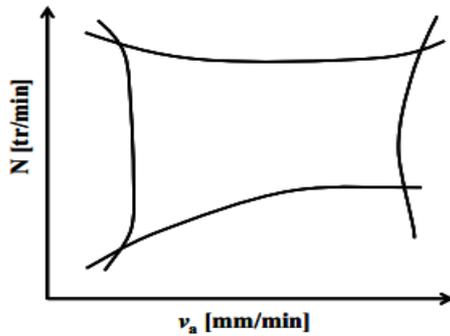


Figure III. 9 : Diagramme de référence intégration Produit / Procédé/ Ressources. [36]

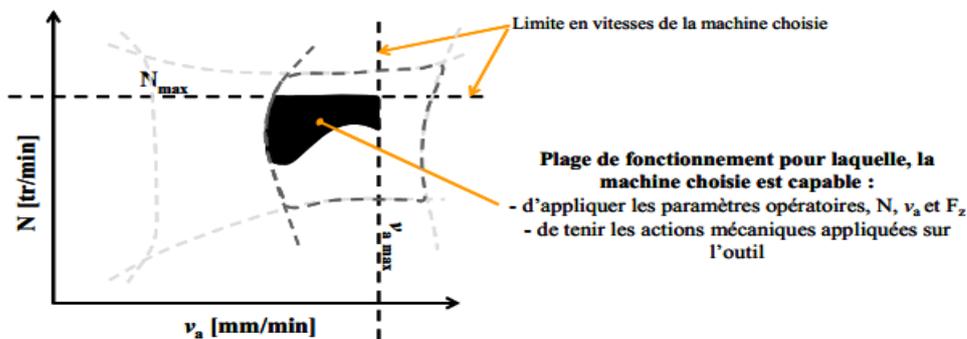
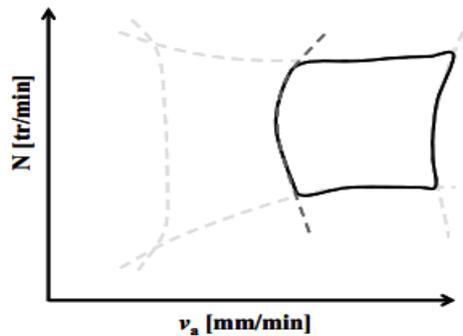
Le domaine de soudabilité opératoire (DSO) correspond à l'ensemble des conditions opératoires conduisant à une soudure respectant le cahier des charges. Le DSO est borné par les limites physiques du procédé. En dehors de ces limites, divers défauts de soudage sont générés. Pour le définir, deux étapes sont nécessaires (étapes 1 et 2 de la Figure III-10) : la définition du domaine de l'ensemble des soudures compactes et l'identification des soudures respectant le cahier des charges. Ces essais de soudage sont généralement menés sur une machine instrumentée de forte capacité. Une troisième étape, (étape 3 de la Figure III-10), consiste à déterminer la partie du DSO atteignable par le robot FSW choisi. Les actions mécaniques générées en soudage dépendent des paramètres de conduite et sont transmises à la machine. Ainsi, on ajoute au DSO une considération technologique liée aux capacités du moyen choisi. D'autres limites peuvent être ajoutées, comme par exemple l'aptitude de la machine à suivre la trajectoire définie. Ces informations définissent les critères que doit avoir la machine pour atteindre le DSO et permettre l'écriture du cahier des charges technique du moyen de production requis. [36]

CHAPITRE IV : DESCRIPTION DU PROCÉDE DE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE (FSW)

Etape 1 : Identification du domaine de soudabilité opératoire aboutissant à des soudures compactes



Etape 2 : Identification du domaine de soudabilité opératoire aboutissant à des soudures compactes



Etape 2 : Identification de la plage du domaine soudable par le moyen FSW choisi.

Figure III. 10 : Démarche d'industrialisation d'un moyen de production FSW. [36]

III.7. Les domaines d'application du soudage FSW :

Le processus de soudage FSW est évalué pour être correctement utilisé dans les secteurs de l'automobile, de l'aéronautique, de l'aéronef, du véhicule militaire, du matériel roulant ferroviaire, de la construction navale et probablement d'autres.

III.7.1. Le domaine automobile

Mercedes fait partie des sociétés qui ont utilisé le procédé FSW pour joindre les pièces du panneau de chaussée de sa nouvelle voiture SL-Class en 2013. Mazda a également utilisé le FSW pour souder des éléments de suspension ainsi que le capot et les portes de ses voitures. De même, Audi a utilisé des feuilles d'aluminium de différentes épaisseurs soudées par FSW pour sa voiture R8. Idem pour Honda qui a utilisé FSW pour assembler

CHAPITRE IV : DESCRIPTION DU PROCÉDE DE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE (FSW)

deux matériaux différents constitués de pièces en acier et en aluminium. FSW a aussi été utilisé pour le soudage de fond bombé pour un camion-citerne. [35]

III.7.2. Le domaine ferroviaire

FSW a été largement utilisé dans le domaine ferroviaire puisqu'il a été appliqué par des fabricants européens pour les toits des rames du tramway à Munich et également par les Japonais pour profiler un train Hitachi. FSW assure le soudage le long des rames, ceci permettant d'améliorer leur tenue au choc.

III.7.3. Le domaine aéronautique

FSW a été utilisé pour assembler des éléments aéronautiques par Boeing pour souder des raidisseurs et pour souder des panneaux sur l'avion Eclipse 500. [11]

Le soudage par friction-malaxage est utilisé dans le secteur aéronautique pour l'assemblage des tôles d'aluminium, en alternative au rivetage automatisé. Il permet des gains de masse sur les structures complètes, redonnant dans certains cas à l'aluminium un avantage concurrentiel par rapport aux matériaux composites. [36]

L'avènement des composites a probablement freiné le développement du soudage par friction-malaxage (Friction Stir Welding - FSW), mais aujourd'hui, la maturité technique du procédé est telle que les principaux avionneurs commencent à l'utiliser en production. C'est le cas notamment du fuselage et des ailes de l'Eclipse 500 soudés par FSW (alliage 20/24). 70% des rivets ont été supprimés et la durée de vie initiale de cet appareil a été doublée. De même, la robotisation des assemblages se poursuit chez Dassault, tant sur les voilures que sur les fuselages, avec notamment la mise en œuvre de ce procédé sur les revêtements du Falcon 5X. Idem pour le plancher de l'avion militaire A400M réalisé par Pfalz Flugzeugwerke (PFW) ou les panneaux de fuselage réalisés par Embraer ou Airbus. Quant à Boeing, il met en œuvre cette technologie pour la version cargo du 747 et le C-17 Globemaster II.[36]

D'autres applications apparaissent comme la possibilité de créer des ébauches parfaitement « adaptées » aux sollicitations de la pièce en service. La réduction des temps et des coûts de fabrication qui en découle, ouvre la porte à une utilisation importante du procédé dans les années futures.

D'autre part, les progrès réalisés en matière de contrôles non destructifs des cordons obtenus, combinés à la répétabilité possible du procédé FSW, facilitent l'industrialisation de ce dernier. De la même manière, il est aujourd'hui possible d'envisager le monitoring pendant l'opération

CHAPITRE IV : DESCRIPTION DU PROCÉDE DE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE (FSW)

de soudage à l'aide de capteurs externes, afin d'identifier, pendant le soudage, les zones qu'il convient de contrôler après.

Enfin, le procédé FSW est aujourd'hui disponible en version robotisée pour des applications mettant en jeu de faibles épaisseurs (type fuselage). Le FSW robotisé permet la réalisation d'assemblages de formes complexes tout en limitant les investissements nécessaires pour son industrialisation.

III.7.4. Le domaine spatial :

Soudages circonférentiels et longitudinaux des réservoirs contenant de l'oxygène liquide pour les fusées Boeing. Le soudage des panneaux incurvés de la partie supérieure du réservoir d'hydrogène liquide utilisé sur la constellation Ares I de la NASA.

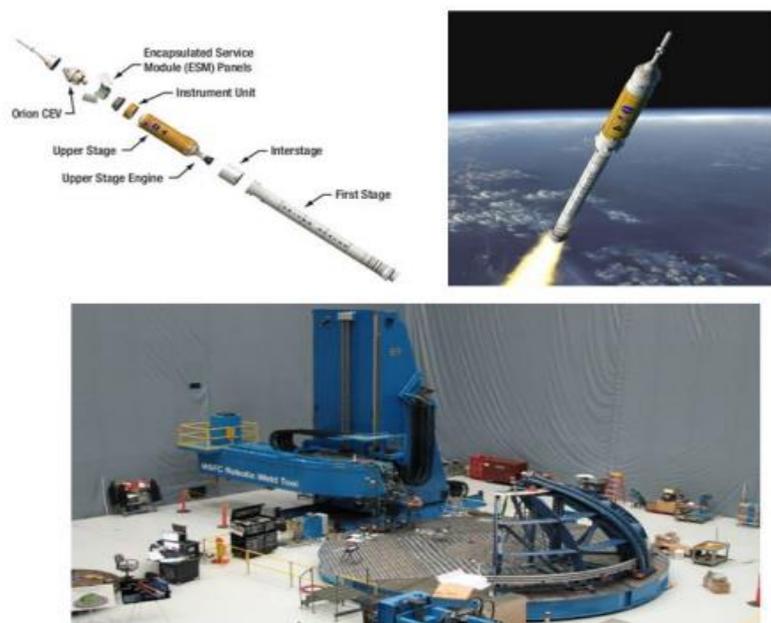


Figure III. 11 : Ares 1. [11]

III.7.5. Autres domaines d'application :

Il y a plusieurs autres domaines d'application de FSW tel que : le soudage des supports de lumières, voir figure III- 9 (a), l'assemblage de tôles en CU-OF en génie électrique, voir figure 1.3 (b) ainsi que des éléments de générations comme illustré en figure 1.3 (c).

CHAPITRE IV : DESCRIPTION DU PROCÉDE DE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE (FSW)

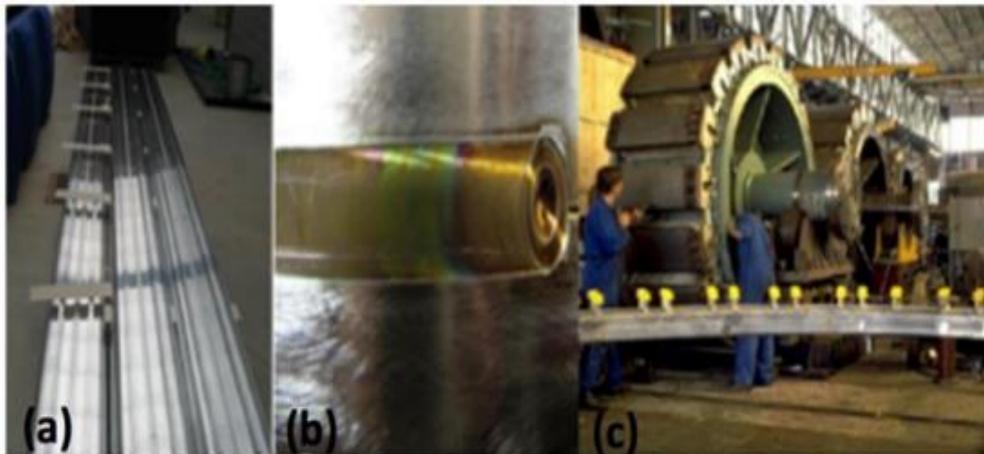


Figure III. 12 : – (a) : Des supports de lumières, (b) : Des tôles en CU-OF, (c) : Des éléments de générations. [11]

En 2012, Apple a développé une nouvelle version d'ordinateur iMac. Fait intéressant, cette société a déclaré que cet iMac était d'un genre nouveau, beaucoup plus mince que les versions précédentes et plus élégant, ce qui ne peut pas être réalisé en utilisant les anciennes méthodes d'assemblage. Le procédé FSW a ainsi été appliqué en utilisant des robots pour souder efficacement la section métallique sous l'écran au panneau arrière de ces ordinateurs. L'écran a été laminé directement sur le verre.

III.8. La machine de soudage FSW :

Pour fabriquer une soudure par friction malaxage, il faut se doter d'équipements dont une unité de soudage ainsi que d'un outil non consommable. L'unité est constituée d'une structure très rigide, d'un mandrin rotatif et d'un système de maintien des pièces, qui peut être assez imposant. En ajout, tout appareil muni d'un mandrin rotatif et capable d'exercer une force axiale suffisante pourrait être en mesure de réaliser de telles soudures.

Il existe différents modèles d'équipements spécialisés ou non. Chaque modèle possède une rigidité distincte en fonction de leur structure et leur fonctionnement. À titre d'exemple, la structure d'un équipement de type portique a une rigidité estimée à 38 N/ μm alors que celle d'un robot articulé est de l'ordre de 2 N/ μm . Quatre types de machines, illustrées aux figures III.13 et III.14 sont aujourd'hui utilisés dans le domaine soit une fraiseuse adaptée, une machine

CHAPITRE IV : DESCRIPTION DU PROCEDE DE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE (FSW)

spécialisée SFM, un robot industriel à architecture parallèle (tricept) et un robot industriel polyarticulé. [16]

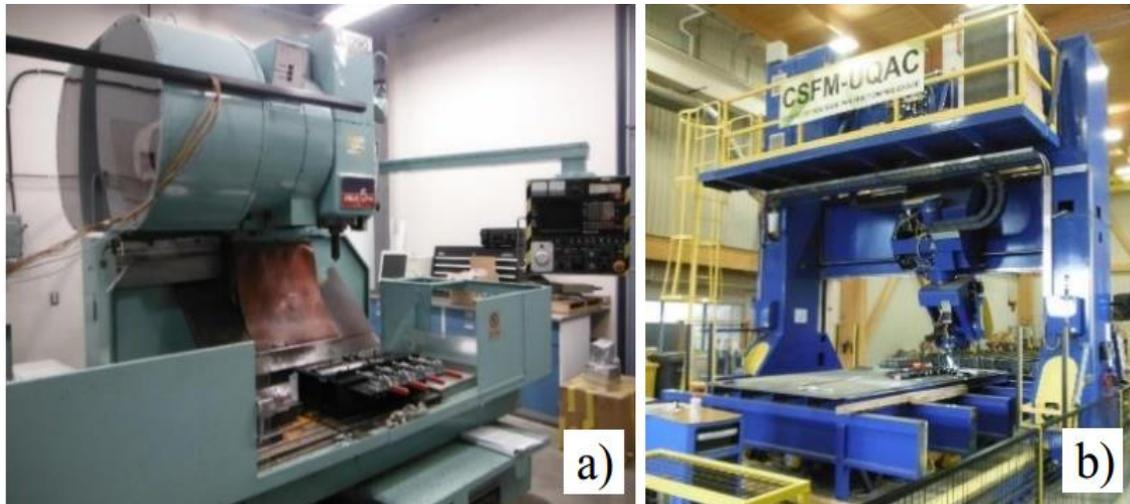


Figure III. 13 : Equipement de soudage par FSW (a) : Fraiseuse adaptée, (b) : Portique spécialisée. [36]

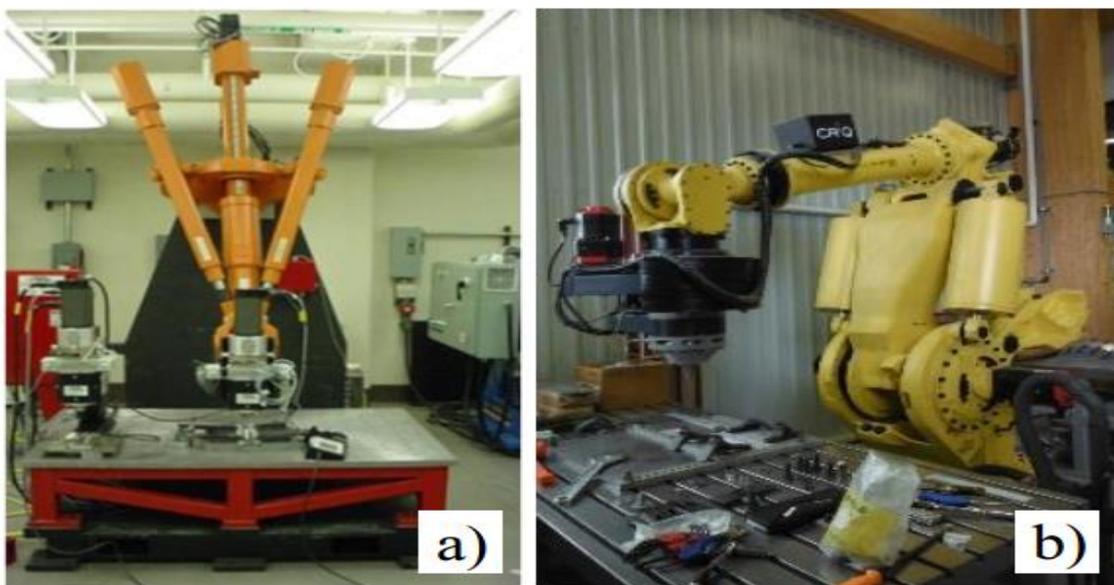


Figure III.14 : Robot industriel avec cellule (a) : Tricept, (b) : Polyarticulé. [36]

Nous allons résumer les caractéristiques des équipements précédemment cités et leurs avantages et inconvénients dans les tableaux III-1 et III-2 respectivement

CHAPITRE IV : DESCRIPTION DU PROCEDE DE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE (FSW)

Tableau III-1 les caractéristiques des équipements de soudage FSW. [36]

Machines	Fraiseuse adaptée	Portique spécialisée	Robot tricept	Robot industriel
Axes	2 à 5	2 à 5	2 à 5	2 à 5
Dimensions	2 à 3	2 à 3	2 à 3	2 à 3
Effort axial	20 KN	90 KN	45 KN	13 à 15 KN
Ossature	Rigide	Rigide	Rigide	Flexible
Précision de soudage	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne
Epaisseur soudable d'alliage d'aluminium	15 mm max	Large gamme	Large gamme	5 à 8 mm max

Tableau III-2 les avantages et les inconvénients des équipements de soudage FSW. [36]

Machines	Avantages	inconvénients
Fraiseuse adaptée	Machine standard Outil conventionnel	Contrôle de position uniquement Faible productivité
Portique spécialisée	Large espace de travail Contrôle de force et position	Investissement élevé Accessibilité limitée de l'outil au plan de joint
Robot tricept	Rigidité offrant une excellente précision Contrôle de force et position Bonne productivité	Volume de travail restreint Investissement élevé
Robot industriel	Investissement relativement faible Bonne productivité Forme complexe possiblement soudable Volume de travail vaste	Force applicable restreinte Faible rigidité Déformations élevées durant le soudage Souder idéalement en contrôle de force

CHAPITRE IV : DESCRIPTION DU PROCÉDE DE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE (FSW)

III.9. Conclusion

Le procédé de soudage par friction malaxage a été grandement étudié depuis son apparition au début des années 90. Cela lui a permis de prendre lentement sa place au niveau des procédés de soudage si bien qu'aujourd'hui on le retrouve dans plusieurs domaines d'applications notamment pour le soudage de l'aluminium difficilement soudable avec les techniques conventionnelles.

Cette description a donc permis de prendre conscience de tous les phénomènes régissant le soudage par friction malaxage. Elle a servi de guide avant d'entamer la simulation du robot de soudage polyarticulé que nous avons choisi dans notre étude.

CHAPITRE IV

**SIMULATION NUMERIQUE D'UN ROBOT INDUSTRIEL ET
INTERPRETATION DES RESULTATS**

IV.1 introduction :

Pour effectuer une tache dans l'espace opérationnel, il est nécessaire d'effectuer une trajectoire a intérieur de l'espace de travail.

du point de vue de manipulateur, ceci revient a définir l'évolution temporelle de la matrice de transformation homogène qui repère le poignet par rapport a la base du robot.

IV. 2. Modélisation géométrique :

Les paramètres de DENAVIT-HARTENBERG ont été déterminés dans le 2^{ème} chapitre

IV. 2. 1. Détermination du modèle géométrique direct MGD :

Obtenir le modèle géométrique direct consiste à déterminer les relations de la forme :

$$X=F(q)$$

Le MGD répond à la question suivante : où va se trouver l'outil du robot si chaque articulation possède tel angle ?

Le modèle géométrique direct est donné par la matrice 0T_6 . La matrice de transformation élémentaire définissant le repère R_j dans le repère R_{j-1} est donnée par :

$${}^{j-1}T_j = \begin{pmatrix} \cos\theta_j & -\sin\theta_j & 0 & d_j \\ \cos\alpha_j \sin\theta_j & \cos\alpha_j \cos\theta_j & -\sin\alpha_j & -r_j \sin\alpha_j \\ \sin\alpha_j \sin\theta_j & \sin\alpha_j \cos\theta_j & \cos\alpha_j & r_j \cos\alpha_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

IV. 2. 1. 1. Calcul des matrices élémentaires :

Les matrices élémentaires du modèle géométrique direct sont données par :

$${}^0T_1 = \begin{pmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad {}^1T_2 = \begin{pmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

**CHAPITRE IV : SIMULATION NUMERIQUE D'UN ROBOT INDUSTRIEL ET
INTERPRETATION DES RESULTATS**

$${}^2T_3 = \begin{pmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & d_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad {}^3T_4 = \begin{pmatrix} \cos\theta_4 & -\sin\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & r_4 \\ -\sin\theta_4 & -\cos\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$${}^4T_5 = \begin{pmatrix} \cos\theta_5 & -\sin\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin\theta_5 & \cos\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad {}^5T_6 = \begin{pmatrix} \cos\theta_6 & -\sin\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_6 & -\cos\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$${}^6T_E = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 200 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 300 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Avec 6T_E la matrice de transformation homogène définissant le repère de l'outil dans le repère R_6 . Dans ce qui suit on utilisera des notations abrégées afin d'alléger les opérations $C_i = \cos\theta_i$, $S_i = \sin\theta_i$, $C_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$, $S_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$.

Après multiplications, puis identification des termes, le modèle géométrique direct sera défini par la matrice U_0 :

$$U_0 = {}^0T_6 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot {}^3T_4 \cdot {}^4T_5 \cdot {}^5T_6 = \begin{pmatrix} s_x & n_x & a_x & p_x \\ s_y & n_y & a_y & p_y \\ s_z & n_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

CHAPITRE IV : SIMULATION NUMERIQUE D'UN ROBOT INDUSTRIEL ET INTERPRETATION DES RESULTATS

$$s_x = C1(C23(C4C5C6-S4S6)-S23S5C6)-S1(S4C5C6+C4S6)$$

$$s_y = S1(C23(C6C5-S4S6)-S23S5C6)+C1(S4C5C6+C4S6)$$

$$s_z = S23(C4C5C6-S4S5)+C23S5C6$$

$$n_x = C1(-C23(C4C5S6+S4C6)+S2S5S6)+S1(S4C5S6-C4C6)$$

$$n_y = S1(-C23(C4C5S6+S4C6)+S2S5S6)-C1(S4C5S6-C4C6)$$

$$n_z = -S23(C4C5S6+S4C6)-C23S5S6$$

$$a_x = -C1(C23C4S5+S23C5)+S1S4S5$$

$$a_y = -S1(C23C4S5+S23C5)-C1S4S5$$

$$a_z = -S23C4S5+C23C5$$

$$p_x = -C1(S23r4-C2d3)$$

$$p_y = -S1(S23r4-C2d3)$$

$$p_z = C23r4+S2d3$$

IV. 2. 2. Calcul du modèle géométrique inverse MGI :

La méthode de Paul est celle qui convient au calcul du MGI de notre robot, elle a été déjà présentée dans le chapitre trois.

Soit U_0 la situation désirée telle que :

$$U_0 = \begin{pmatrix} s_x & n_x & a_x & p_x \\ s_y & n_y & a_y & p_y \\ s_z & n_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Initialement, on s'intéresse à la position du centre du poignet et à l'orientation de l'organe terminal, puis avec une simple transformation, on détermine la position du point de référence de l'outil dans le repère R_0 . On ramène donc la trajectoire au centre de la rotule par le système d'équations suivant :

IV. 2. 2. 1. Equation de Position :

Calcul de $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$:

**CHAPITRE IV : SIMULATION NUMERIQUE D'UN ROBOT INDUSTRIEL ET
INTERPRETATION DES RESULTATS**

$$\begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{pmatrix} = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot {}^3T_4 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (IV. 1)$$

1. En multipliant l'équation (4.24) par 1T_0 à gauche, on obtient :

$${}^1T_0 \begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{pmatrix} = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot {}^3T_4 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} C1.P_x + S1.P_y \\ -S1.P_x + C1.P_y \\ P_z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -S23.r4 + C2.d3 + d2 \\ 0 \\ C23.r4 + S2.d3 \\ 1 \end{pmatrix}$$

On calcule θ_1 en considérant la deuxième équation :

$$-S1.P_x + C1.P_y = 0$$

$$\begin{cases} \theta_1 = \text{ATAN2}(P_y, P_x) \\ \theta'_1 = \theta_1 + 180^\circ \end{cases} \quad (IV.2)$$

2. En multipliant l'équation (4.24) par 2T_1 à gauche, on obtient :

$${}^2T_1 \cdot {}^1T_0 = \begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{pmatrix} = {}^2T_3 \cdot {}^3T_4 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} -S3.r4 + d3 \\ C3.r4 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C2.(C1.P_x + S1.P_y) + S2.P_z \\ -S2.(C1.P_x + S1.P_y) + C2.P_z \\ S1.P_x - C1.P_y \\ 1 \end{pmatrix}$$

On calcule θ_2 en considérant les deux premières équations :

$$\begin{cases} -S3.r4 + d3 \\ C3.r4 \end{cases} = \begin{cases} C2.(C1.P_x + S1.P_y) + S2.P_z \\ -S2.(C1.P_x + S1.P_y) + C2.P_z \end{cases}$$

**CHAPITRE IV : SIMULATION NUMERIQUE D'UN ROBOT INDUSTRIEL ET
INTERPRETATION DES RESULTATS**

$$\begin{cases} -S3r4 \\ -C3r4 \end{cases} = \begin{cases} C2(C1Px + S1Py) + S2Pz - d3 \\ S2(C1Px + S1Py) - C2Pz \end{cases} \quad (IV. 3)$$

En peut calculer et θ_3 en considérant les deux premières équations et en résolvant un système de type 6. On obtient tout d'abord une équation en θ_2 telle que :

$$X.S2 + Y. C2 = Z$$

$$\text{Avec: } \begin{cases} X = -2Pzd3 \\ Y = -2B1d3 \\ Z = (r4)^2 - (d3)^2 - (Pz)^2 - (B1)^2 \\ B1 = Px C1 + Py S1 \end{cases} \quad (IV. 4)$$

D'où l'on déduit que :

$$\begin{cases} C2 = \frac{Yz - \varepsilon X \sqrt{X^2 + Y^2 - Z^2}}{X^2 + Y^2} \\ S2 = \frac{Xz + \varepsilon Y \sqrt{X^2 + Y^2 - Z^2}}{X^2 + Y^2} \end{cases} \quad (IV. 5)$$

Donc Avec: $\varepsilon = \pm 1$, $\theta_2 = \text{ATAN2}(S2, C2)$.

Connaissant θ_2 , on peut calculer θ_3 à partir de :

$$\begin{cases} S3 = \frac{-PzS2 - B1C2 + d3}{r4} \\ C3 = \frac{-B1S2 + PzC2}{r4} \end{cases} \quad (IV. 6)$$

Et l'on obtient : $\theta_3 = \text{ATAN2}(S3, C3)$

IV. 2. 2. 2. Equations d'Orientation :

Calcul de $(\theta_4, \theta_5, \theta_6)$

L'orientation est donnée par : $[s \ n \ a] = {}^0A_6(\theta)$. (IV. 7)

$${}^3A_0(\theta_1, \theta_2, \theta_3). [s \ n \ a] = {}^3A_6(\theta_4, \theta_5, \theta_6)$$

CHAPITRE IV : SIMULATION NUMERIQUE D'UN ROBOT INDUSTRIEL ET INTERPRETATION DES RESULTATS

On note: $[F \ G \ H] = {}^3A_0. (\theta_1, \theta_2, \theta_3). [s \ n \ a]$
 $[F \ G \ H] = {}^3A_6 (\theta_4, \theta_5, \theta_6)$ (IV. 8)

q1, q2, q3 étant connu, on s'intéresse à l'équation d'orientation

En multiplication à gauche des deux membres par 4A_3 :

$${}^4A_3. [F \ G \ H] = {}^4A_5. {}^5A_6. (\theta_4, \theta_5, \theta_6) \quad (IV. 9)$$

$$\begin{pmatrix} C4.F_x - S4.F_z & -C4.G_x + S4.G_z & -C4.H_x + S4. \\ -S4.F_x - C4.F_z & S4.G_x + C4.G_z & S4.H_x + C4.H_z \\ F_y & G_y & H_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C5.C6 & -C5.S6 & S5 \\ S6 & C6 & 0 \\ -S5.C6 & S5.S6 & C5 \end{pmatrix}$$

L'identification terme par terme des deux matrices nous permet de calculer les paramètres articulaires $(\theta_4, \theta_5, \theta_6)$:

On obtient :

$$-C4.H_z - S4.H_x = 0 \quad (IV. 10)$$

On obtient une équation du type 2 en θ_4 , qui a pour solution :

$$\begin{cases} \theta_4 = \text{ATAN2} (H_z, -H_x) \\ \theta'_4 = \theta_4 + 180^\circ \end{cases} \quad (IV. 11)$$

La solution pour θ_5 :

$$\begin{cases} -S5 = C4H_x - S4H_z \\ C5 = H_y \end{cases} \quad (IV. 12)$$

Le système est de type 3 en θ_5 : $\theta_5 = \text{ATAN2} (S5, C5)$

Enfin la solution pour θ_6 :

$$\begin{cases} S6 = -C4F_z - S4F_x \\ C6 = -C4G_z - S4G_x \end{cases} \quad (IV. 13)$$

$$\theta_6 = \text{ATAN2} (S6, C6)$$

Les solutions obtenues par la résolution du modèle géométrique inverse. Le choix de la

configuration à partir d'une position donnée est basé sur :

- Appartenance au domaine de travail
- Optimisation de la configuration lors du déplacement lorsque le système présente plusieurs solutions possibles. Le modèle géométrique du robot est utile car il apporte une vision globale du comportement du robot, mais il reste limité pour son contrôle.

IV. 3. Modélisation cinématique :

IV. 3. 1. Détermination du modèle cinématique direct MCD [33] :

Pour notre application, nous avons besoin du modèle cinématique inverse pour le calcul des vitesses articulaires. Ces dernières sont nécessaires pour que l'organe terminal se déplace à une vitesse donnée par le procédé de soudage. Le modèle cinématique direct décrit la relation entre les vitesses articulaires, les coordonnées articulaires et les vitesses opérationnelles et est écrit sous la forme suivante :

$$\dot{X} = J(q) \cdot \dot{q} = \begin{pmatrix} V_n \\ W_n \end{pmatrix} \quad (\text{IV. 14})$$

$J(q)$: désigne la matrice jacobéenne du mécanisme de dimension $(m \times n)$, égale à $\frac{\partial X}{\partial q}$.

V_n : désigne la vitesse de translation de l'origine O_n du repère R_n , égale à est la dérivée par rapport au temps du vecteur 0P_n

W_n : désigne la vitesse de rotation du repère R_n , mais n'est pas égale à la dérivée des paramètres d'orientation.

Méthodes de calcul de la matrice jacobéenne :

- on peut calculer la matrice jacobéenne en dérivant le MGD ($X = f(q)$) :

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i(q)}{\partial q_j}$$

J_{ij} : est l'élément $(i; j)$ de la matrice jacobéenne J ; $i = 1, \dots, m$ et $j = 1, \dots, n$.

Mais cette méthode n'est praticable que pour les robots à 2 ou 3 degrés de liberté, il est possible de calculer la matrice Jacobienne par une méthode de calcul direct basée sur la relation entre les vitesses de translation \vec{V}_n et de rotation \vec{W}_n des différents solides(éléments) qui

CHAPITRE IV : SIMULATION NUMERIQUE D'UN ROBOT INDUSTRIEL ET INTERPRETATION DES RESULTATS

composent le système donc on évite cette méthode car son calcul est long et difficile à mettre en oeuvre pour le robot qui possède 6 d.d.l .

$$\dot{X} = \begin{pmatrix} V_n \\ W_n \end{pmatrix} = J_n \cdot \dot{q} = J_n \cdot \dot{\theta} \quad (\text{IV. 15})$$

Nous présentons les colonnes de la matrice jacobéenne 0J_6 :

$${}^0J_{6,1} = \begin{pmatrix} -(S23r4+d3C2)S1 \\ (S23r4+d3C2)C1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad {}^0J_{6,2} = \begin{pmatrix} C3r4(C1C2)-(S3r4+d3)(C1S1) \\ C3r4(S1C2)-(S3r4+d3)(S1S2) \\ -C3r4S23-(S3r4+d3).C2 \\ -S1 \\ C1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$${}^0J_{6,3} = \begin{pmatrix} r4(C1C2C3- C1S2S3) \\ r4(S1C2C3- S1S2S3) \\ r4(-S2C3- C2S3) \\ -S1 \\ C1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad {}^0J_{6,4} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ C1C2S3 + C1S2C3 \\ S1C2S3 + S1S2C3 \\ -S2S3 + C2C3 \end{pmatrix}$$

$${}^0J_{6,5} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -(C1C2C3- C1S2S3)S4 -S1C4 \\ -(S1C2C3- S1S2S3)S4 -C1C4 \\ -(-S2C3- C2S3)S4 \end{pmatrix} \quad {}^0J_{6,6} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ C1(C23C4S5+ S23C5) -S1S4S5 \\ S1(C23C4S5+ S23C5) +S1S4S5 \\ -S23C4S5+ C23C5 \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow {}^0J_6 = \begin{pmatrix} {}^0A_6 & 0 \\ 0 & {}^0A_6 \end{pmatrix} {}^6J_6$$

IV. 3. 2. Détermination du modèle cinématique inverse MCI :

L'idée du modèle cinématique inverse est de calculer, à partir d'une configuration \mathbf{q} donnée, les vitesses articulaires $\dot{\mathbf{q}}$ qui assurent à l'organe terminal une vitesse opérationnelle $\dot{\mathbf{X}}$ imposée. Pour obtenir le modèle cinématique inverse de notre structure, on inverse le modèle cinématique directe en résolvant un système d'équations linéaire dont la solution est donnée par la relation :

$$\dot{\mathbf{q}} = {}^0\mathbf{J}_6^{-1}(\mathbf{q}) * \dot{\mathbf{X}} \quad (\text{IV. 16})$$

$${}^j\mathbf{W}_{j-1} = {}^j\mathbf{A}_{j-1} {}^{j-1}\mathbf{W}_{j-1}$$

$${}^j\mathbf{W}_j = {}^j\mathbf{W}_{j-1} + \dot{q}_j {}^j\mathbf{a}_j$$

$${}^j\dot{\mathbf{W}}_j = {}^j\mathbf{A}_{j-1} {}^{j-1}\dot{\mathbf{W}}_{j-1} + (\ddot{q}_j {}^j\mathbf{a}_j + {}^j\mathbf{W}_{j-1} \times \dot{q}_j {}^j\mathbf{a}_j)$$

$${}^j\dot{\mathbf{v}}_j = {}^j\mathbf{A}_{j-1} ({}^{j-1}\dot{\mathbf{v}}_{j-1} + {}^{j-1}\mathbf{U}_{j-1} {}^{j-1}\mathbf{P}_j)$$

Notation :

\mathbf{a}_j : Vecteur unitaire suivant l'axe Z_j .

\mathbf{W}_j : Vitesse de rotation du corps C_j .

$\dot{\mathbf{W}}_j$: Accélération de rotation du corps C_j .

$\dot{\mathbf{v}}_j$: Accélération du point O_j .

\mathbf{A}_j : Matrice de rotation.

IV. 4. Génération de trajectoires :

IV. 4. 1. Génération de trajectoires dans l'espace articulaire [32] :

La génération de trajectoire dans l'espace articulaire permet de définir les points intermédiaires que l'organe terminal du premier robot doit suivre afin que celui-ci mène à bien l'exécution de la tâche.

CHAPITRE IV : SIMULATION NUMERIQUE D'UN ROBOT INDUSTRIEL ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Nous avons présenté au début des méthodes de génération de mouvement prenant en compte des points intermédiaires. Ces points permettent de déformer la trajectoire en vue d'éviter les collisions entre le robot et les objets de l'environnement (carrossier ; Platform ...).

Nous allons faire l'étude de la trajectoire entre deux points, en utilisant la technique de l'interpolation polynomiale de degrés trois et cela pour chaque articulation du robot.

Après ça nous calculerons les coordonnées de l'organe terminal pour chaque configuration obtenu à l'aide du modèle géométrique directe à n'importe quel instant « t » pour avoir à la fin une suite de points qui nous donnera l'allure de la trajectoire.

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$$

Conditions aux limites : t_i : temps initial ($t_i=0$)

t_f : temps final

$$q(t_i) = a_0 = q_i$$

$$q(t) = q_1 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3 = q_f \quad (\text{IV. 17})$$

$$\dot{q}(t_i) = a_1 + 2 a_2 t_i + 3 a_3 t_i^2 = a_1 = \dot{q}_i$$

$$\dot{q}(t_f) = a_1 + 2 a_2 t_f + 3 a_3 t_f^2 = a_1 = \dot{q}_f$$

$$\begin{pmatrix} q_i \\ \dot{q}_i \\ q_f \\ \dot{q}_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & t_f & t_f^2 & t_f^3 \\ 0 & 1 & 2t_f & 3t_f^2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \text{ Avec } \begin{cases} a_0 = q_i \\ a_1 = \dot{q}_i \\ a_2 = \frac{3(q_f - q_i) - t_f(2\dot{q}_i + \dot{q}_f)}{t_f^3} \\ a_3 = \frac{2(q_i - q_f) - t_f(\dot{q}_i + \dot{q}_f)}{t_f^3} \end{cases}$$

$$q(t) = q_i + \dot{q}_i t + \frac{3(q_f - q_i) - t_f(2\dot{q}_i + \dot{q}_f)}{t_f^3} \times t^2 + \frac{2(q_i - q_f) - t_f(\dot{q}_i + \dot{q}_f)}{t_f^3} \times t^3 \quad (\text{IV. 18})$$

IV. 4. 2. Génération de trajectoires :

Pour des raisons de symétrie, nous n'avons pris en considération que la moitié de la trajectoire. Le système présente une symétrie par rapport au plan ZX.

A_i : c'est la matrice d'orientation pour le point P_i .

K_a et K_v : c'est les accélérations et vitesses maximales de chaque actionneur.

t_f : c'est le temps minimum qu'il faut à une articulation pour réaliser un déplacement

IV. 4. 2. 1. Dans l'espace articulaire :

La génération de trajectoire dans l'espace articulaire permet de définir les points Intermédiaires que l'organe terminal doit suivre afin que celui-ci mène à bien l'exécution de la tâche.

Les relations qui permettent le calcul de τ , t_f , D_j sont :

$$\tau = \frac{Kv}{ka} , \quad t_f = \text{Max} \left(\frac{2|D_j|}{Kv_j} , \sqrt{\frac{|D_j|}{ka_j}} \right) , \quad D_j = q_i^f - q_j^i \quad (\text{IV. 19})$$

IV. 4. 2. 2. La loi de trapèze :

La condition d'existence du palier de vitesse est : $|D_j| > \frac{Kv_j^2}{ka}$

$$\begin{cases} q(t) = q_i + \frac{1}{2} . t^2 . Ka . \text{sign}(D) & \text{pour : } 0 \leq t \leq \tau_j \\ q(t) = q_i + (t - \frac{\tau}{2})^2 . \text{sign}(D) & \text{pour : } \tau_j \leq t \leq t_f - \tau_j \\ q(t) = q_f - \frac{1}{2} . (t_f - t)^2 . Ka . \text{sign}(D) & \text{pour : } t_f - \tau \leq t \leq t_{fj} \end{cases} \quad (\text{IV. 20})$$

IV. 4. 2. 3. La loi Bang-Bang :

$$\begin{cases} q(t) = q_i + \left(\frac{t}{t_f}\right)^2 D & \text{pour : } 0 \leq t \leq \frac{t_f}{2} \\ q(t) = q_i + \left[-1 + 4\left(\frac{t}{t_f}\right) - 2\left(\frac{t}{t_f}\right)^2\right] D & \text{pour : } \frac{t_f}{2} \leq t \leq t_f \end{cases} \quad (\text{IV. 21})$$

IV. 4. 2. 4. Dans l'espace opérationnel :

La génération de trajectoires dans l'espace de la tâche permet de définir l'orientation de l'outil à chaque point de passage, en utilisant la méthode de description des orientations angle- axe. La distance à parcourir pour le mouvement de translation entre deux points est défini par :

$$D = \sqrt{(P_x^f - P_x^i)^2 + (P_y^f - P_y^i)^2 + (P_z^f - P_z^i)^2} \quad (\text{IV. 22})$$

Après le calcul de \vec{U} et de l'amplitude α la génération de mouvement pour l'orientation est donnée par la relation suivante : $A^i \text{rot}(\vec{U}, \alpha) = A^f$

Rappelons que $\text{rot}(\vec{U}, \alpha)$ désigne la matrice (3x3) de rotation

$$\text{rot}(u, \alpha) = [A^t]^T \cdot A^f = \begin{pmatrix} s^i \\ n^i \\ a^i \end{pmatrix} [s^f \ n^f \ a^f] = \begin{pmatrix} s^i \cdot s^f & s^i \cdot n^f & s^i \cdot a^f \\ n^i \cdot s^f & n^i \cdot n^f & n^i \cdot a^f \\ a^i \cdot s^f & a^i \cdot n^f & a^i \cdot a^f \end{pmatrix} \quad (\text{IV. 23})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \cos \alpha = \frac{1}{2} [s^i \cdot s^f + s^i \cdot n^f + s^i \cdot a^f] \\ \sin \alpha = \sqrt{(a^i n^f - n^i a^f)^2 + (s^i a^f - a^i s^f)^2 + (n^i s^f - s^i n^f)^2} \\ U = \frac{1}{2s} \begin{pmatrix} a^i \cdot n^f - n^i \cdot a^f \\ s^i \cdot a^f - a^i \cdot s^f \\ n^i \cdot s^f - s^i \cdot n^f \end{pmatrix} \end{array} \right. \quad (\text{IV. 24})$$

IV. 5. Génération de trajectoires dans l'espace articulaire ou l'espace opérationnel :

Le choix de l'espace dépend fortement de l'application. Chacune des méthodes induit des contraintes exprimées soit dans l'espace articulaire (vitesse et couple maximum) soit dans l'espace opérationnel (précision, prise en compte des obstacles).

Notre étude sur la génération de trajectoire est basée sur les deux espaces, articulaire et opérationnel, respectivement l'un pour définir la position de l'outil, l'autre pour son orientation.

Nous avons commencé par une simulation de trajectoire entre 02 points p1 et p2 suivi par une application sur le revêtement de l'empennage horizontal de l'avion Cessna 172 sur 2 chaînes parallèles.

IV. 5.1 Exemple d'application sur une plaque :

Trajectoire P1 \longrightarrow P2 suivant l'axe \vec{x} pendant 10 secondes

P1 : [X, Y, Z]= [400, 200, 100] , $[\Phi, \theta, \Psi] = [1.5708, 0, 0]$

P2 : [X, Y, Z]= [800, 200, 100] , $[\Phi, \theta, \Psi] = [1.5708, 0, 0]$

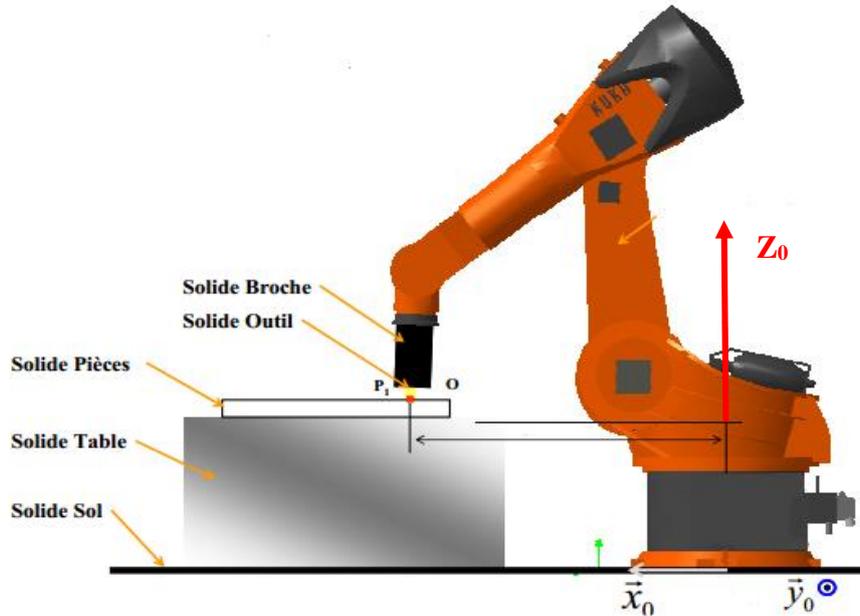


Figure IV. 1 : Robot effectuant l'opération de plongée

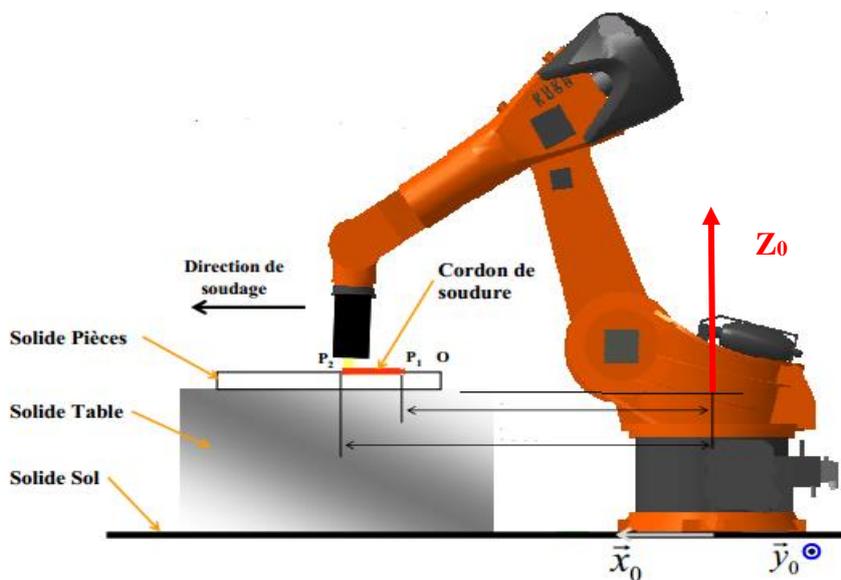


Figure IV. 2 : Robot effectuant l'opération de soudage

CHAPITRE IV : SIMULATION NUMERIQUE D'UN ROBOT INDUSTRIEL ET INTERPRETATION DES RESULTATS

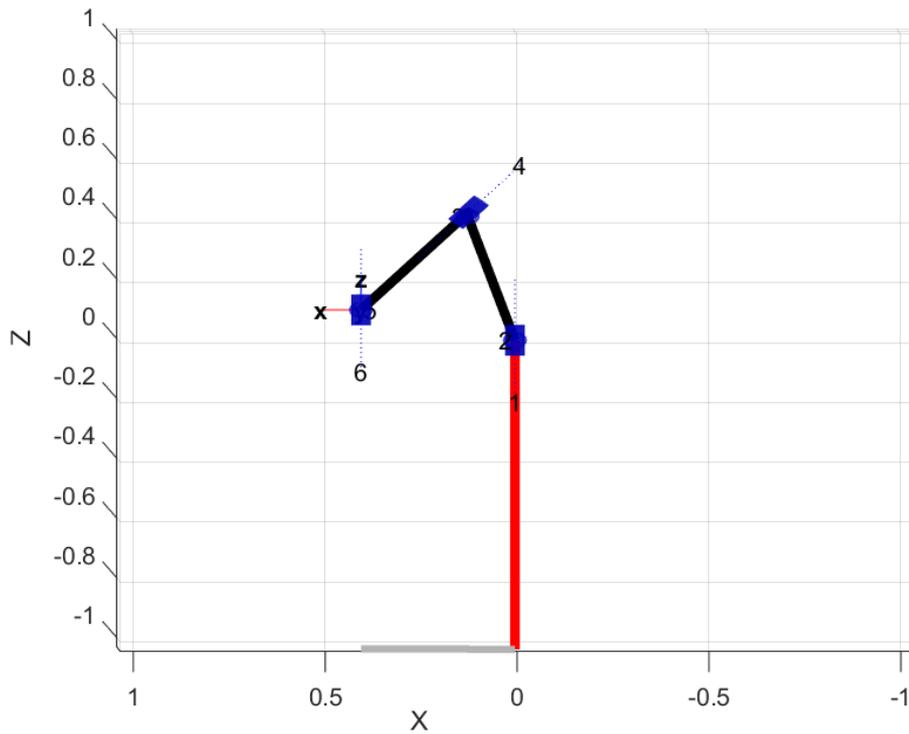


Figure IV. 3 : Le point de départ du soudage P1

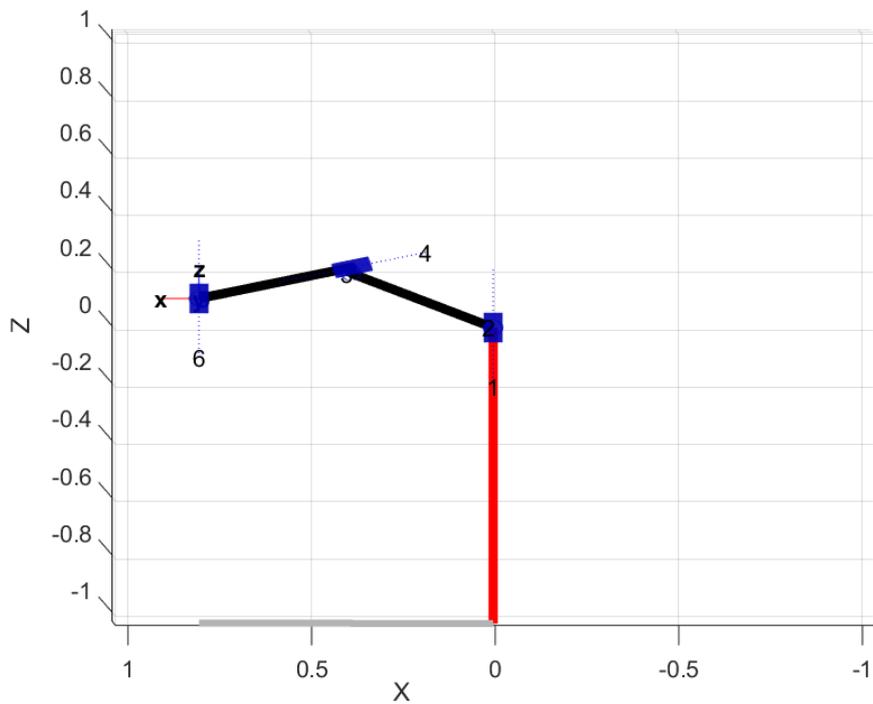


Figure IV. 4 : Le point final du soudage P2

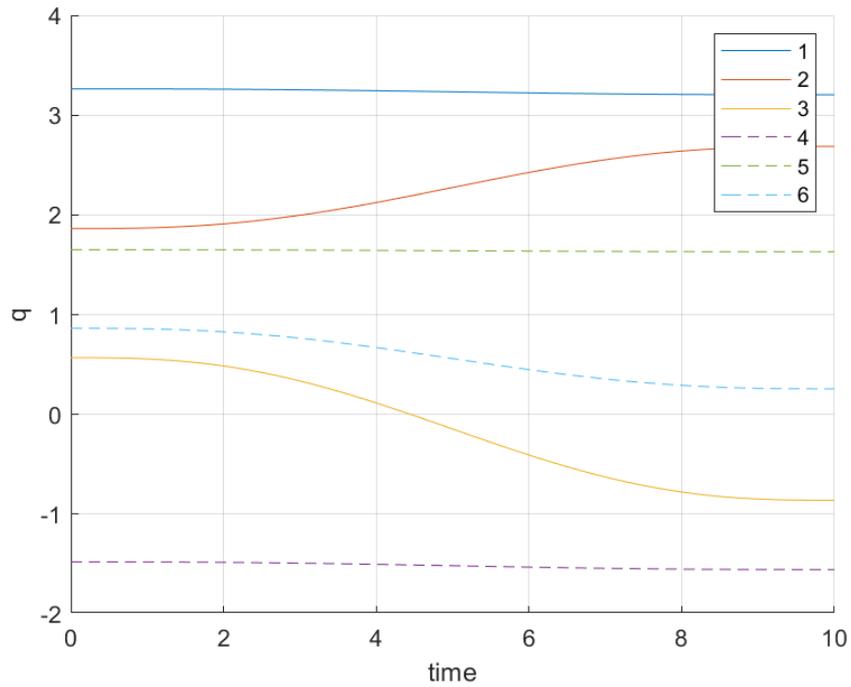


Figure IV. 5 : les angles de rotation des six articulations.

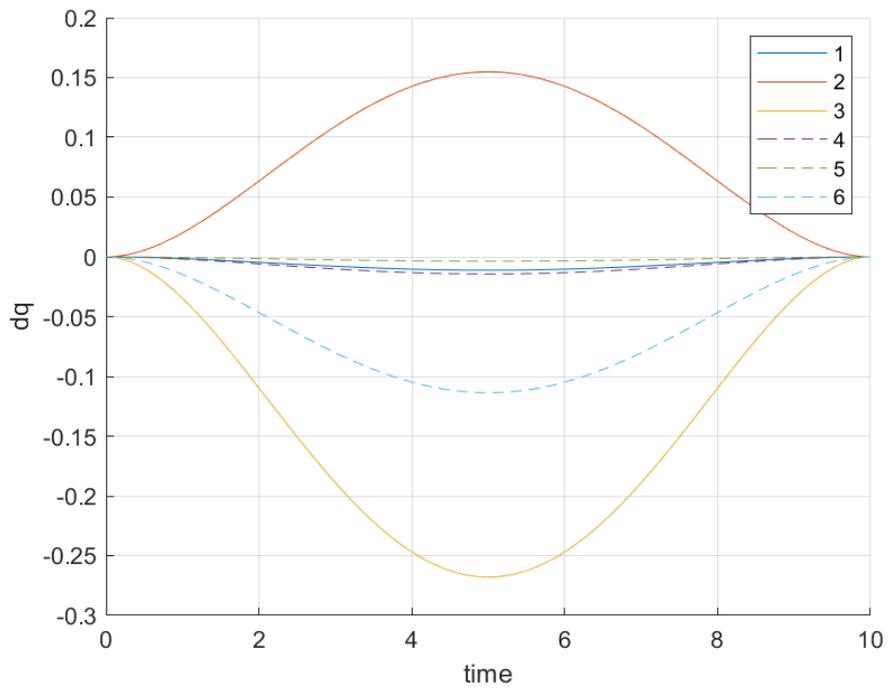


Figure IV. 6 : les courbes des vitesses de rotation des six articulations

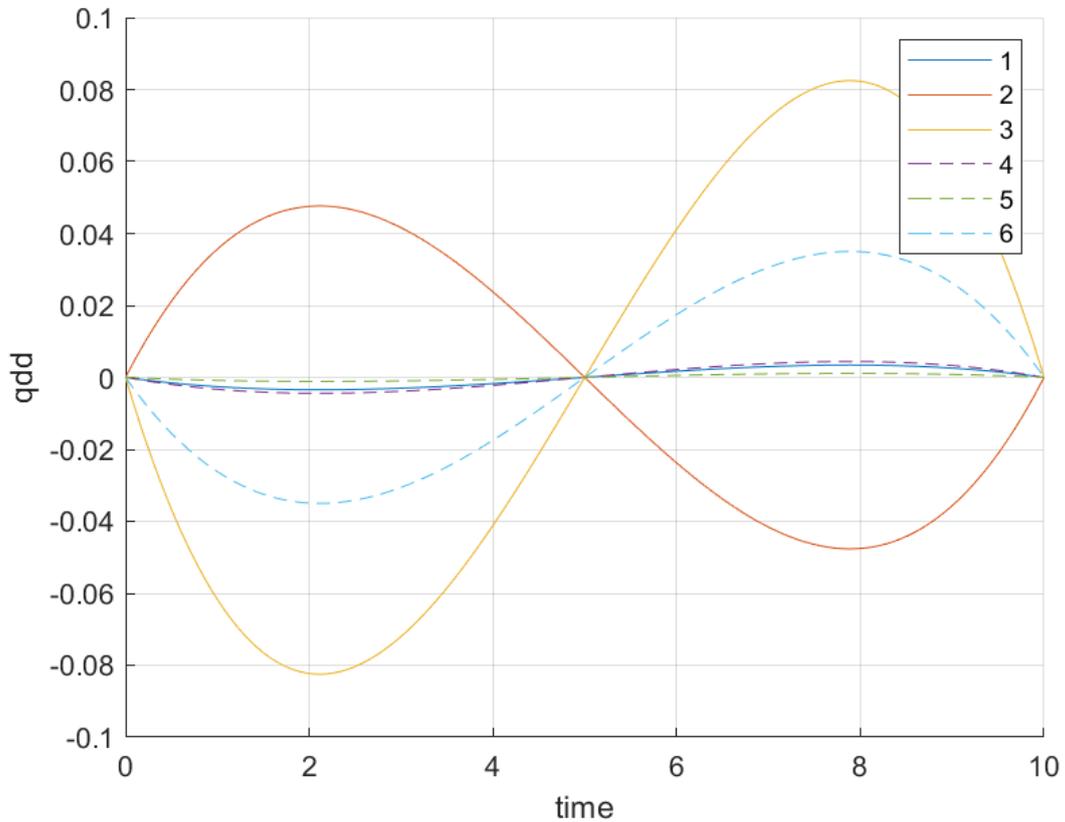


Figure IV. 7 : les courbes des accélérations de rotation des six articulations

Interprétation :

Dans un déplacement suivant l'axe \vec{x} , Nous remarquons un grand déplacement de la 2ème et la 3ème articulation par rapport aux autres articulations. Ces grands déplacements peuvent être expliqués par le fait que ces 2 articulations représentent la liaison entre la partie rotative du robot et le bras manipulateur.

Pour les vitesses de rotation, ces mêmes articulations présentent les grandes vitesses par rapport aux autres articulations négligeables.

Les accélérations des articulations sont maximales à $t = tf/4$ et $t = 3tf/4$ et s'annule à $t = tf/2$ quand les vitesses sont maximales

IV. 5.2 Application sur l'empennage horizontal de l'avion Cessna 172 :

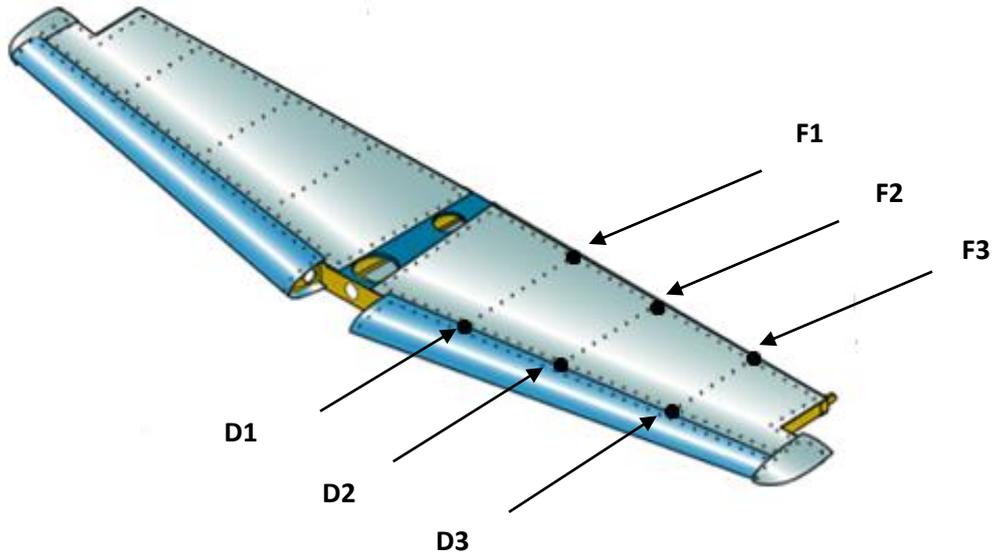


Figure IV. 8 : Empennage horizontal de l'avion Cessna 172

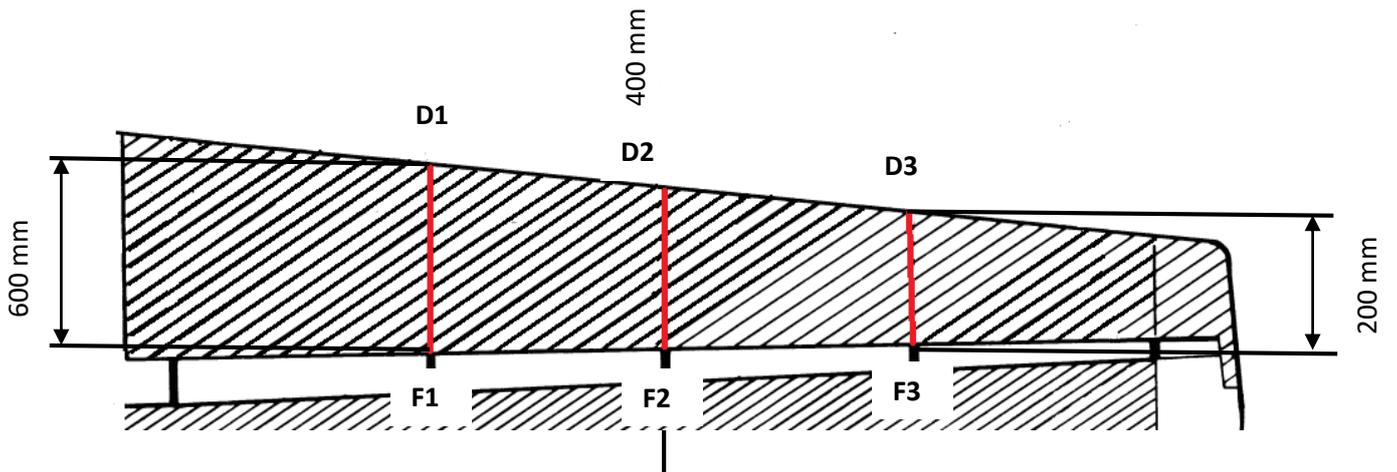


Figure IV. 9 : Schéma de l'empennage horizontal de l'avion Cessna 172

CHAPITRE IV : SIMULATION NUMERIQUE D'UN ROBOT INDUSTRIEL ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Trajectoire D1 → F1 suivant pendant 10 secondes

D1 : [X, Y, Z]= [200, 400, 100] , $[\Phi, \theta, \Psi] = [1.5708, 0, 0]$

F1 : [X, Y, Z]= [800, 400, 100] , $[\Phi, \theta, \Psi] = [1.5708, 0, 0]$

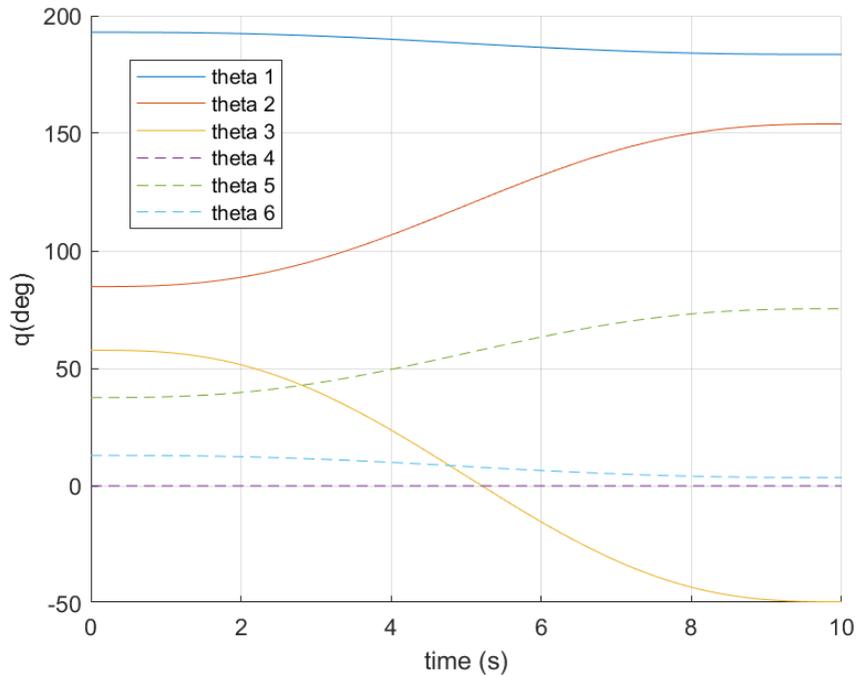


Figure IV. 10 : les angles de rotation des six articulations pour le soudage de D1 à F1

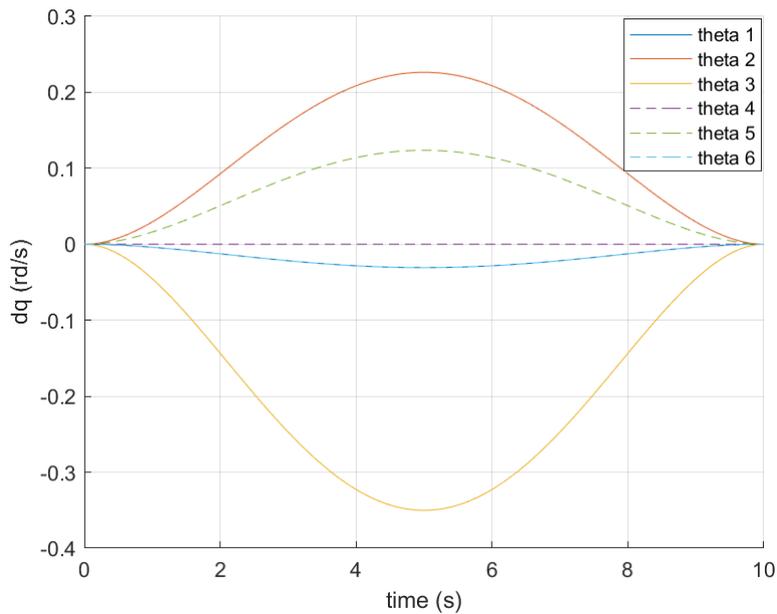


Figure IV. 11 : les courbes des vitesses des six articulations pour le soudage de D1 à F1

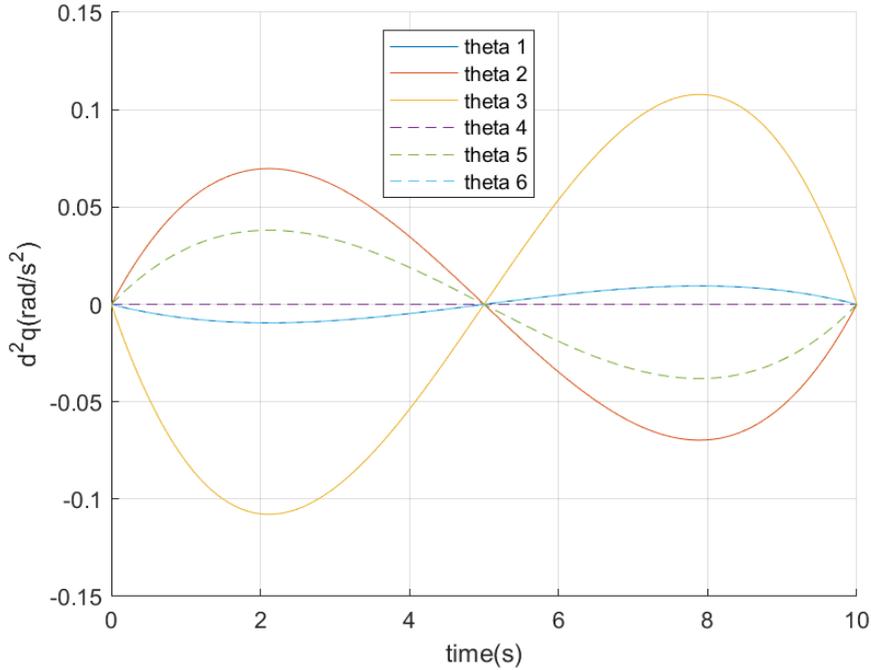


Figure IV. 12 : les courbes des accélérations des six articulations pour le soudage de D1 à F1

Trajectoire D2 → F2 suivant pendant 10 secondes

D2 : [X, Y, Z]= [400, 0, 100] , [Φ, θ, Ψ] = [1.5708, 0, 0]

F2 : [X, Y, Z]= [800, 0, 100] , [Φ, θ, Ψ] = [1.5708, 0, 0]

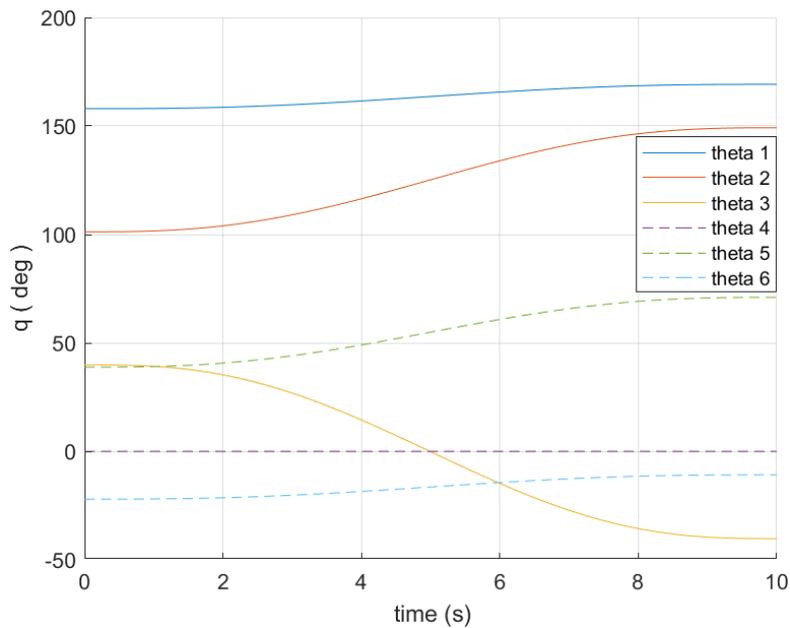


Figure IV. 13 : les angles de rotation des six articulations pour le soudage de D2 à F2

CHAPITRE IV : SIMULATION NUMERIQUE D'UN ROBOT INDUSTRIEL ET INTERPRETATION DES RESULTATS

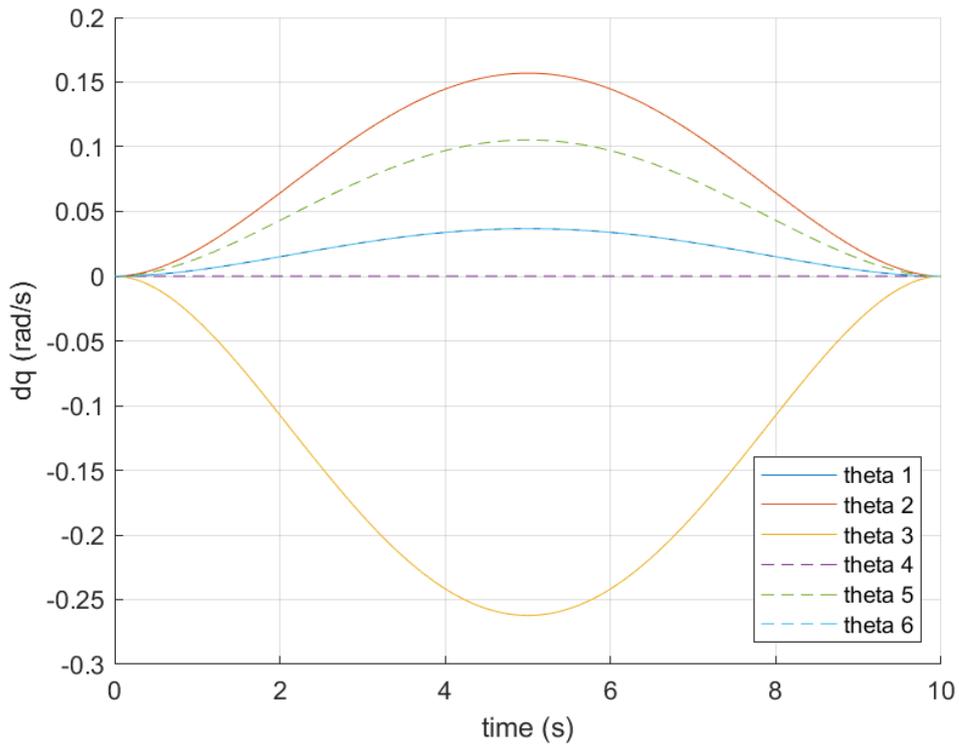


Figure IV. 14 : les courbes des vitesses des six articulations pour le soudage de D2 à F2

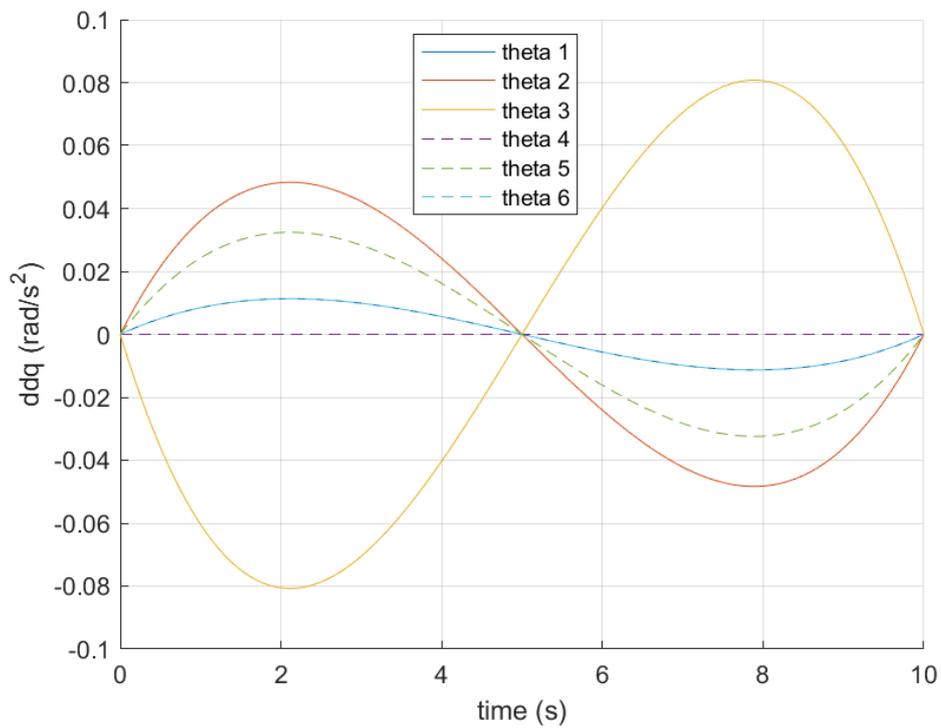


Figure IV. 15 : les courbes des accélérations des six articulations pour le soudage de D2 à F2

CHAPITRE IV : SIMULATION NUMERIQUE D'UN ROBOT INDUSTRIEL ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Trajectoire D3 → F3 suivant pendant 10 secondes

D2 : [X, Y, Z]= [600, -200, 100] , [Φ, θ, Ψ] = [1.5708, 0, 0]

F2 : [X, Y, Z]= [800,-200, 100] , [Φ, θ, Ψ] = [1.5708, 0, 0]

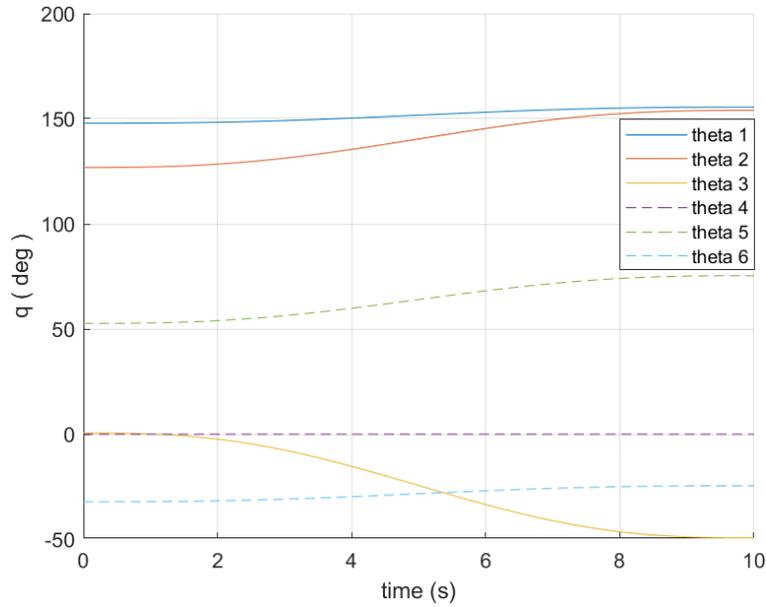


Figure IV. 16 : les angles de rotation des six articulations pour le soudage de D3 à F3

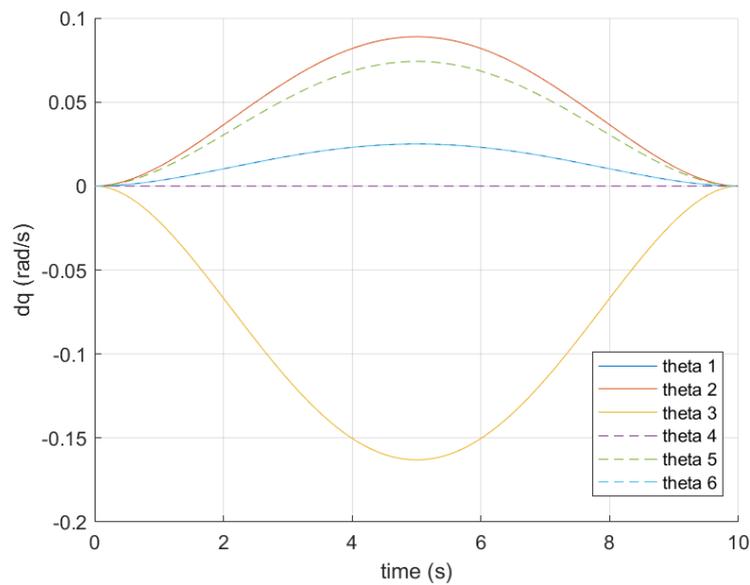


Figure IV. 17 : les courbes des vitesses des six articulations pour le soudage de D3 à F3

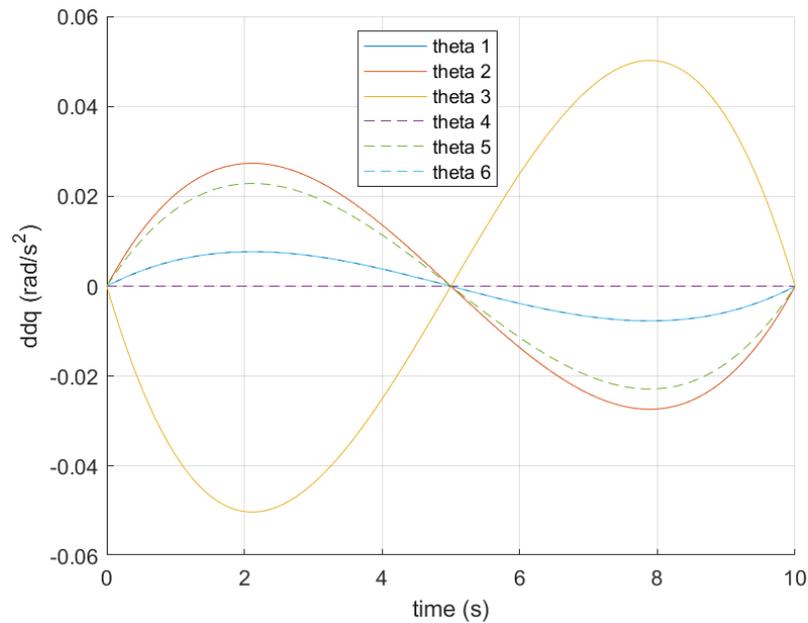


Figure IV. 18 : les courbes des accélérations des six articulations pour le soudage de D3 à F3

Interprétation :

Comme le montre les figures précédentes, le soudage a été réalisé sur 3 trajectoires parallèles suivant l'axe \vec{x} mais de dimensions différentes. On remarque dans les figures **IV. 10**, **IV. 13** et **IV. 16** que seules la 2^{ème} et la 3^{ème} articulation varient par rapport aux autres articulations qui ont subi une variation négligeable et ça est dû au fait que la 2^{ème} et la 3^{ème} articulation relie entre la partie tournant du robot et le bras manipulateur.

Si on compare la variation des angles entre les figures **IV. 10**, **IV. 13** et **IV. 16**, ($\Delta\theta_2 \approx 70^\circ$, $\Delta\theta_3 \approx 110^\circ$), ($\Delta\theta_2 \approx 50^\circ$, $\Delta\theta_3 \approx 80^\circ$), ($\Delta\theta_2 \approx 25^\circ$, $\Delta\theta_3 \approx 50^\circ$) respectivement, on remarque une diminution de la variation de l'angle de rotation des articulations fonctionnelles à cause de la diminution de la distance du soudage parcouru.

La diminution de la distance du soudage parcouru influe également sur les vitesses et les accélérations maximales de rotation atteintes par les articulations. Les figures **IV. 11**, **IV. 14** et **IV.17** montre cette diminution des vitesses maximales atteintes.

Trajectoire D'1 → F'1 suivant pendant 10 secondes

D'1 : [X, Y, Z]= [-200, 200, 100] , [Φ, θ, Ψ] = [1.5708, 0, 0]

F'1 : [X, Y, Z]= [-800,200, 100] , [Φ, θ, Ψ] = [1.5708, 0, 0]

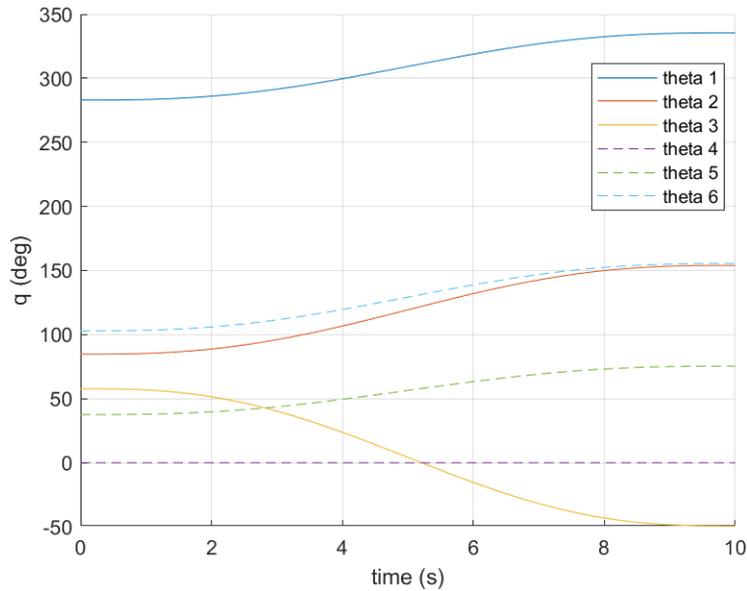


Figure IV. 19 : les angles de rotation des six articulations pour le soudage de D'1 à F'1 pour la 2^{ème} chaine

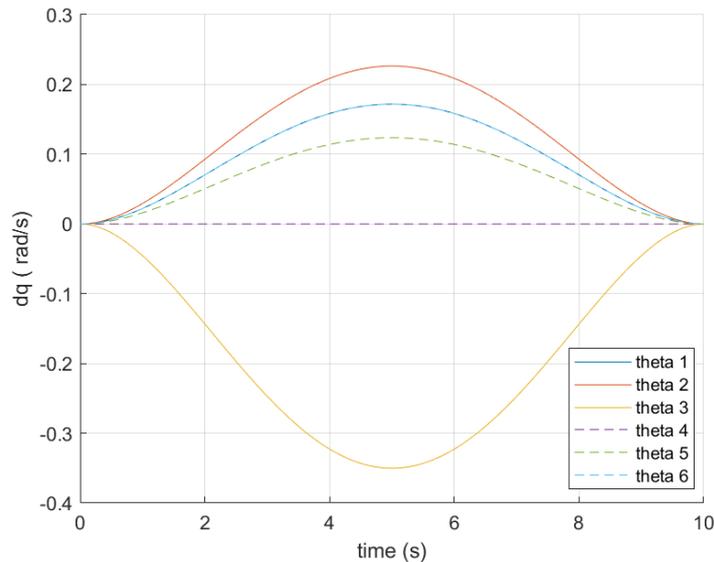


Figure IV. 20 : les courbes des vitesses des six articulations pour le soudage de D'1 à F'1 pour la 2^{ème} chaine

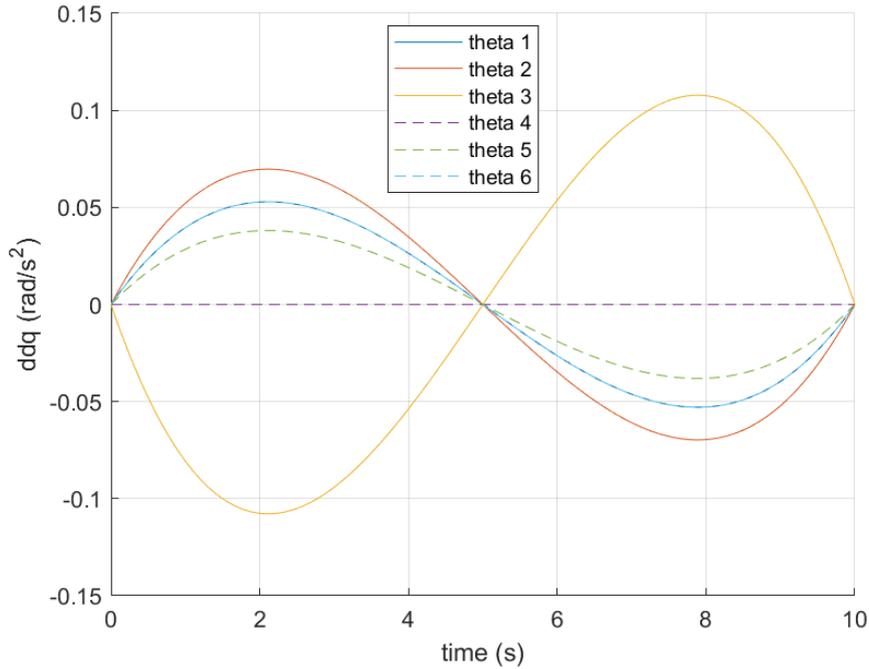


Figure IV. 21 : les courbes des accélérations des six articulations pour le soudage de D'1 à F'1 pour la 2^{ème} chaine

Trajectoire D'2 → F'2 suivant pendant 10 secondes

D'2 : $[X, Y, Z] = [-400, 0, 100]$, $[\Phi, \theta, \Psi] = [1.5708, 0, 0]$

F'2 : $[X, Y, Z] = [-800, 0, 100]$, $[\Phi, \theta, \Psi] = [1.5708, 0, 0]$

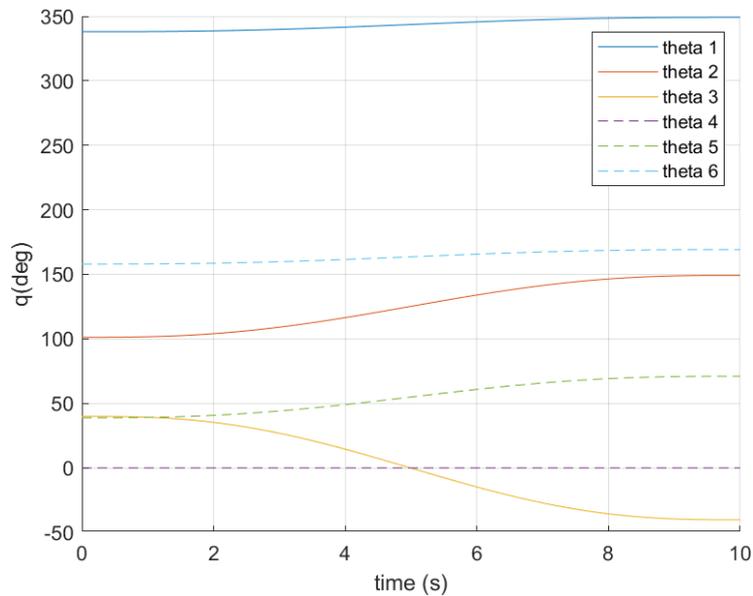


Figure IV. 22 : les angles de rotation des six articulations pour le soudage de D'2 à F'2 pour la 2^{ème} chaine

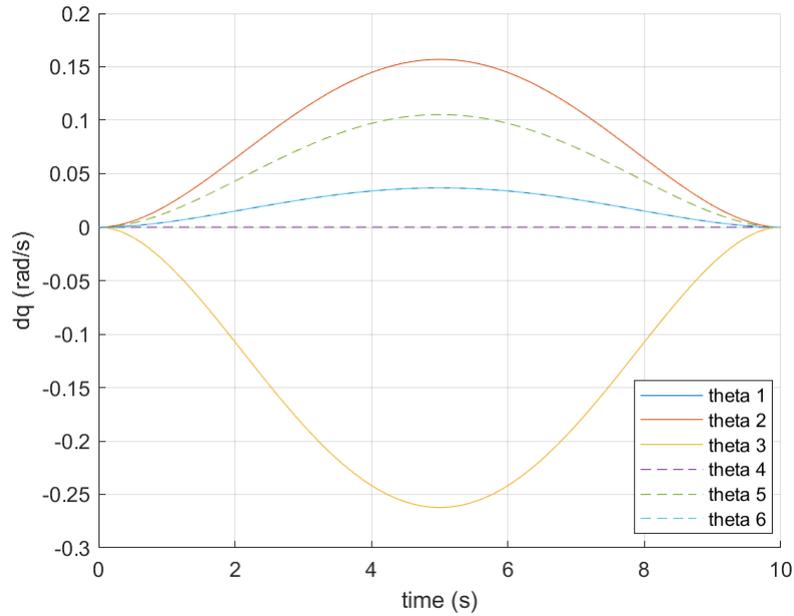


Figure IV. 23 : les courbes des vitesses des six articulations pour le soudage de D'2 à F'2 pour la 2^{ème} chaine

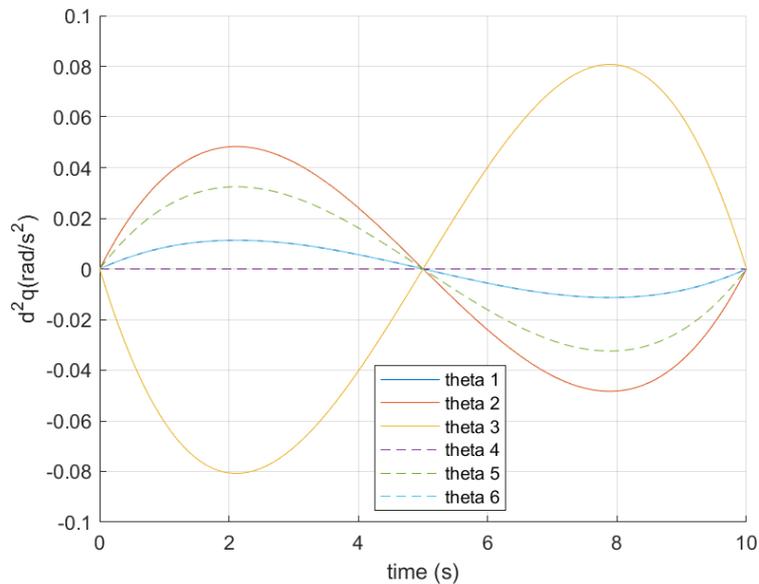


Figure IV. 24 : les courbes des accélérations des six articulations pour le soudage de D'2 à F'2 pour la 2^{ème} chaine

Trajectoire D'3 → F'3 suivant pendant 10 secondes

D'3 : $[X, Y, Z] = [-600, -200, 100]$, $[\Phi, \theta, \Psi] = [1.5708, 0, 0]$

F'3 : $[X, Y, Z] = [-800, -200, 100]$, $[\Phi, \theta, \Psi] = [1.5708, 0, 0]$

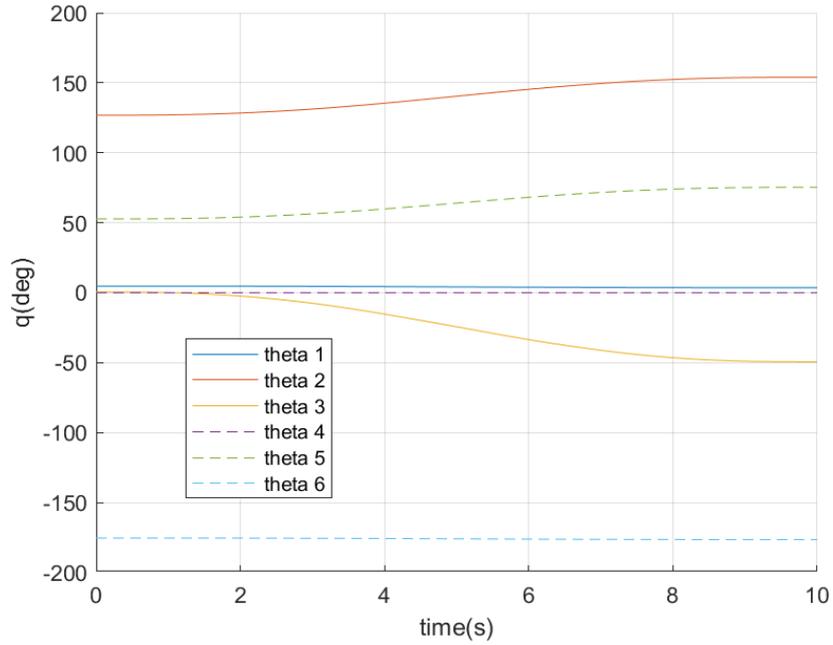


Figure IV. 25 : les angles de rotation des six articulations pour le soudage de D'3 à F'3 pour la 2^{ème} chaine

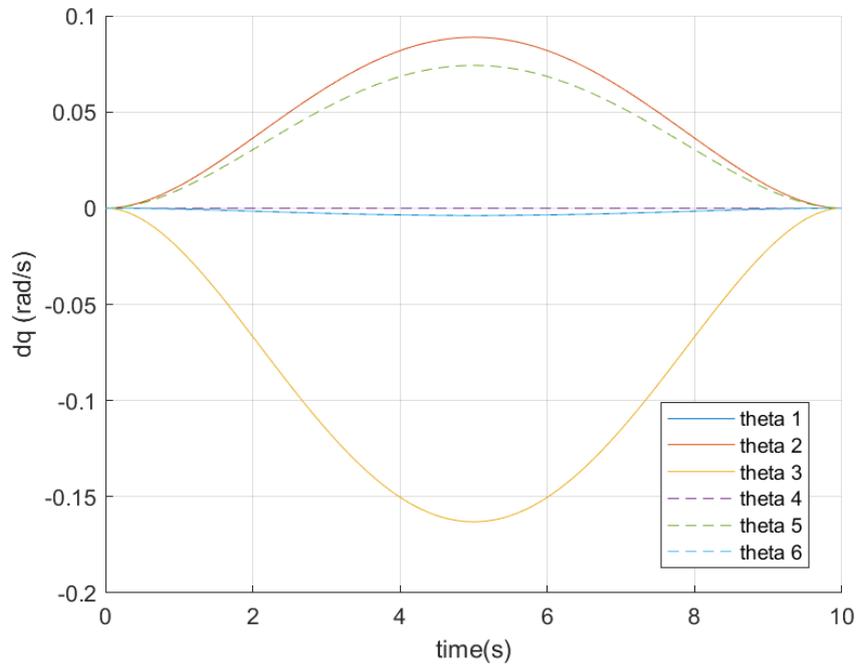


Figure IV. 26 : les courbes des vitesses des six articulations pour le soudage de D'3 à F'3 pour la 2^{ème} chaine

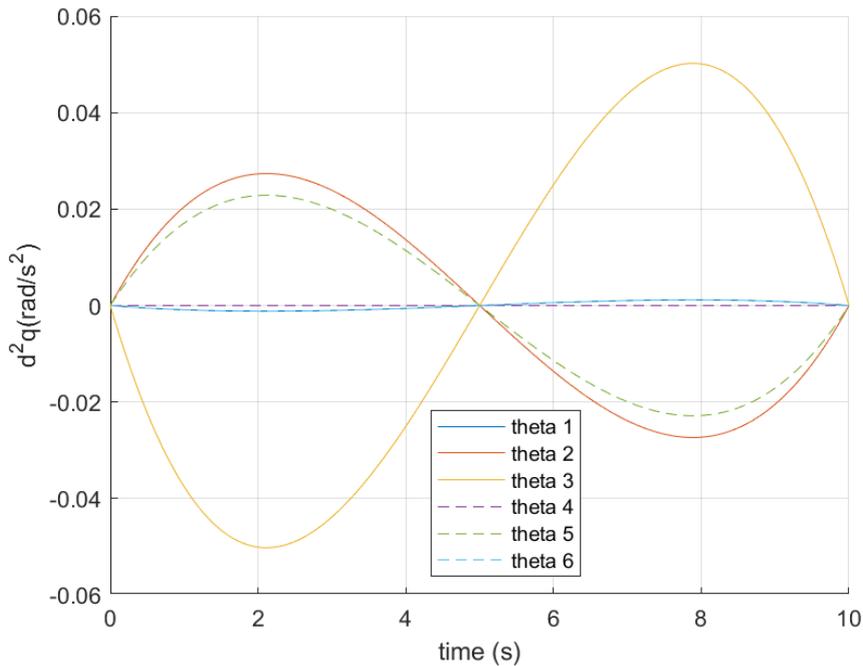


Figure IV. 27 : les courbes des accélérations des six articulations pour le soudage de D'3 à F'3 pour la 2^{ème} chaine

Interprétation :

Les figures IV. 13 et IV. 22 montrent une différence entre les angles de rotation de la 1^{ère} articulation θ_1 et θ'_1 de la 1^{ère} et la 2^{ème} chaine respectivement ($\theta_1 - \theta'_1 \approx 180^\circ$). Cette différence est due à la rotation du robot sur sa base d'un angle $\theta = 180^\circ$

La variation des angles de rotation, des vitesses de rotation et des accélérations de rotation sont similaire pour les 02 chaines de soudage sauf pour la 1^{ère} articulation qui varient dans un sens contraire.

Le robot arrive à accomplir la mission de soudage FSW du revêtement des 02 empennages de l'avion dans les 02 chaines parallèle sans singularité.

IV. 6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé une approche de modélisation et de simulation des cellules flexibles de production en passant par les étapes suivantes :

- ✓ Le calcul du modèle géométrique direct et inverse (MGD, MGI).
- ✓ Le calcul du modèle cinématique direct et inverse (MCD, MCI).
- ✓ Le choix de la tâche (soudage FSW) et la planification de la trajectoire.
- ✓ La Programmation des modèles géométriques et cinématiques avec le logiciel MATLAB.

A la fin de ce chapitre, nous sommes arrivés à simuler le comportement du robot lors du soudage FSW de 02 empennages en lui donnant des points de départ et d'arrivés et nous avons tirés les courbes des déplacements des articulations et leurs vitesses.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Le soudage par le procédé FSW nécessite pour son application des forces verticales très élevées, à la fois pour pousser et pour maintenir le pion enfoncé dans la matière. Pour industrialiser ce procédé, des machines spécifiques ont été développées. Elles sont capables de fournir ces efforts, cependant ce type de machines reste encombrant, cher et le plus contraignant, elles ne servent qu'à réaliser ce type de procédé. C'est pourquoi l'idée d'utiliser une machine plus polyvalente est née par l'utilisation des robots industriels.

Le FSW est en développement continu depuis son invention, il y a plus de 20 ans. Chaque année, il y a plusieurs publications dans ce domaine d'étude. Alors que la plupart des applications industrielles utilisent des grandes machines pour souder des joints linéaires, il existe des applications qui demandent un soudage de joints tridimensionnels complexes, nécessitant des machines avec plusieurs degrés de liberté. L'utilisation de robots industriels répond à ce besoin de difficulté d'applications. Il y a cependant un inconvénient majeur lors de l'utilisation de ce type de robot pour le soudage par FSW : le manque de rigidité du robot.

Les robots industriels sont des machines polyvalentes utilisées principalement pour l'automatisation industrielle afin d'améliorer la flexibilité, la productivité et la qualité des produits. D'autres raisons favorisant l'utilisation de robots industriels sont l'élimination des travaux désagréables et dangereux et la réduction des coûts. En effet, la commande et le contrôle du mouvement d'un système robotique sont les compétences clés pour fabriquer le robot, augmenter et développer ses performances, améliorer la sécurité lors de son utilisation, introduire de nouvelles fonctionnalités et réduire les coûts. Par conséquent, il est certainement nécessaire de développer continuellement des méthodes de contrôle et des modèles mathématiques afin de répondre aux exigences de plusieurs applications industrielles, comme par exemple améliorer les performances d'un robot industriel pour réaliser une tâche, à moindre coût et sous des contraintes plus complexes demandées par l'application.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Plusieurs étapes ont été suivies pour mener ce travail et arriver à l'objectif principal de ce travail, en occurrence l'étude et la simulation d'un robot industriel pour accomplir la mission du soudage par friction malaxage FSW. Une recherche bibliographique sur les ateliers flexibles, a fait l'objet du premier chapitre. Dans le deuxième chapitre, nous avons exposé la procédure de calcul du modèle géométrique direct et inverse des robots à structures ouverte simple. Nous avons ensuite entamé le troisième chapitre qui englobe la description générale du soudage par friction malaxage avant de terminer par la modélisation du robot et résultat de la simulation numérique dans le quatrième chapitre.

Les recherches bibliographiques que nous avons effectuées nous ont permis de bien connaître le procédé de soudage par friction malaxage. Il en ressort que ce procédé est très intéressant dans le domaine aéronautique, que ce soit pour la durée de vie des pièces soudées, et la simplicité du matériel utilisé.

Comme perspectives, il est intéressant de voir les possibilités de modélisation dynamique du robot industriel en introduisant les forces appliqués par l'outil. Des études complémentaires restent envisageables, il serait intéressant d'analyser et optimiser le soudage FSW. Minimiser les déviations de l'outil et la trajectoire désirée est très important pour ce procédé afin d'améliorer le soudage et éviter le risque d'avoir des défauts.

Nous proposons aussi le calcul exact des efforts, car le matériau des pièces à souder est en phase solide. Un effort très élevé est donc nécessaire pour maintenir le contact entre l'outil FSW et la surface de la pièce. Ces efforts sont généralement de l'ordre de quelques milliers de Newton pour assembler des pièces de quelques millimètres d'épaisseurs.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **DRAGHICI George, BRINZEI Nicolae, et FILIPA Sioana.** « Modélisation et la simulation en vue de la conduite des systèmes de production. ». Les cahiers des enseignements francophones en Roumanie, 1998, p. 110-129
- [2] **SETHI, Suresh P., SRISKANDA RAJAH, Chelliah, SORGER, Gerhard, et al.** « Sequencing of parts and robot moves in a robotic cell ». International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 1992, vol. 4, no 3, p. 331-358.
- [3] (https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives_travail-des-metaux-assemblage-tiabt/archive-1/ateliers-flexibles-d-usinage_b7030/caracteristiques-des-ateliers-flexibles-b7030niv10001.html)
- [4] **HALL Nicholas G., KAMOUN Hichem, et SRISKANDA RAJAH Chelliah.** « Scheduling in robotic cells: classification, two and three machine cells. ». Operations Research, 1997, vol. 45, no 3, p. 421-439.
- [5] **CAGGIANO Alessandra et TETI Roberto.** « Digital factory technologies for robotic automation and enhanced manufacturing cell design ». Cogent Engineering, 2018, vol. 5, no 1, p. 1426676.
- [6] **ELMI, Atabak et TOPALOGLU, Seyda.** « Scheduling multiple parts in hybrid flow shop robotic cells served by a single robot. » International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2014, vol. 27, no 12, p. 1144-1159.
- [7] http://www.cetice.universite-paris-saclay.fr/aunege/gestion_flux/co/2_7.html
- [8] **MEZUI, Jean Marie Lauhic Ndong, NGANGA-KOUYA, Donatien, MAAROUF, S. A. A. D., et al.** « Modélisation, commande et simulation d'un robot industriel. » Sciences Appliquées et de l'Ingénieur, 2021, vol. 2, no 1, p. 16-23.

[9] **KUCUK, Serdar et BINGUL, Zafer.** « Robot kinematics: Forward and inverse kinematics. » INTECH Open Access Publisher, 2006.

[10] **PARK, Frank C. ET LYNCH, Kevin M.** « Introduction to robotics: Mechanics, planning, and control. » Seoul National University, 2012, vol. 2015.

[11] **DARDOURI, Fawzia.** « *Dispositif d'assistance associé à des robots manipulateurs utilisés dans des procédés de fabrication/FSW* ». Thèse de doctorat. Paris, ENSAM. 2018.

[12] **MOURAD, CHEMOUNE.** « *Commande en position d'un bras manipulateur à trois degrés de liberté avec une carte arduino.* » 2018. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.

[13] **DJOUGGANE, FADHILA.** « *Etude et conception d'un robot manipulateur pour l'ENMTP.* » 2012. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.

[14] **MEKKIKA, MOHAMED ISMAT.** « *Etude dynamique des robots industriels.* » Thèse de doctorat. Université de Sidi Bel Abbès-Djillali Liabes. décembre 2017.

[15] **MR. KARIM ZERABIB** « étude théorique d'une cellule flexible de fabrication mécanique. » thèse de master 02 université saad dahleb blida.

[16] **LYLIA, BELAIDI.** « *Conception et réalisation d'un bras manipulateur à trois degrés de liberté.* » 2015. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.

[17] **RAFIK, MANSOURI ET ALI, KHELID.** « *Conception et réalisation d'un bras manipulateur à trois degrés de liberté commandé par la carte Arduino UNO.* » 2015. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.

[18] **SLIMANE, OUKACI ET YAHIA, OUAZAR.** « *Conception et réalisation d'un bras manipulateur à six degrés de liberté autonome assisté par la vision artificielle.* » 2011. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.

- [19] **SADDAM HOUSSEYN, OUALI.** « *Etude et réalisation d'un Bras Manipulateur.* » 2016. Thèse de doctorat. Université de Mohamed Boudiaf m'sila faculté de technologie.
- [20] **OLABI, ADEL.** « *Amélioration de la précision des robots industriels pour des applications d'usinage à grande vitesse* ». 2011. Thèse de doctorat. Arts et Métiers ParisTech.
- [21] **THOMAS, W. M., NICHOLAS, E. D., NEEDHAM, J. C., et al.** « International patent application pct/gb92/02203. *UK Patent Application* », vol. 9125978, no 8. 1991
- [22] **YAN, David, HAVANSKI, Yuri, MISHRA, Rajiv S., et al.** « Friction Stir Welding and Processing X ». 2019
- [23] **AVETTAND-FÈNOËL, Marie-Noëlle et SIMAR, Aude.** « A review about friction stir welding of metal matrix composites. *Materials Characterization* », vol. 120, p. 1-17. 2016
- [24] **BESHARATI-GIVI, M.-K. et ASADI, Parviz.** « Advances in friction-stir welding and processing. » Elsevier, 2014
- [25] **LORRAIN, Olivier.** « Analyses expérimentales et numériques du procédé de soudage par friction malaxage FSW. ». Thèse de doctorat. Arts et Métiers ParisTech. 2010
- [26] **DEMMOUCHE, Younes.** « Étude du comportement en fatigue d'assemblages soudés par FSW pour applications aéronautiques. ». Thèse de doctorat. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers-ENSAM. 2012
- [27] **KAID, Mustapha, et al.** « Simulation numérique du comportement thermomécanique du soudage par FSW. ». Thèse de doctorat. 2020
- [28] **TIMESLI, Abdelaziz.** « Simulation du soudage par friction et malaxage à l'aide de méthodes sans maillage. ». Thèse de doctorat. Université de Lorraine. 2013

[29] **FARAH, Assaf.** « Comportement en fatigue de joints d'aluminium 7075-T6 soudés par friction-malaxage et parachevés. ». Thèse de doctorat. École Polytechnique de Montréal. 2013

[30] **LE JOLU, Thomas.** « Étude de l'influence des défauts de soudage sur le comportement plastique et la durée de vie en fatigue de soudures par friction-malaxage d'un alliage Al-Cu-Li. ». Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure des Mines de Paris. 2011

[31] **BESHARATI-GIVI, M.-K. et ASADI, Parviz.** « Advances in friction-stir welding and processing. » Elsevier,. 2014

[32] **SINGH, Kulwant, SINGH, Gurbhinder, et SINGH, Harmeet.** « Review on friction stir welding of magnesium alloys. Journal of magnesium and alloys, », vol. 6, no 4, p. 399-416.. 2018

[33] **KOLEGAIN, Komlan.** « Correction de trajectoires d'un robot manipulateur utilisé pour le soudage par friction malaxage. ». Thèse de doctorat. Paris, ENSAM. 2019

[34] **LANGLOIS, Laurent, CROUÉ, Jean-Baptiste, DELAMÉZIÈRE, Arnaud, et al.** « Contraintes et potentialités du procédé innovant FSW pour la reconception de produit. » In : Démarche et innovation dans la conception et la production des systèmes intégrés. . p. 9p. 2012

[35] **BOUND AOUI, Zahir et BENFERHAT, Nouara.** « Conception et réalisation d'un outil de soudage par friction et malaxage FSW. ». Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou. 2017

[36] **ZIMMER, Sandra.** « Contribution à l'industrialisation du soudage par friction malaxage. » Thèse de doctorat. Arts et Métiers ParisTech. 2009

[37] **CHEN, Hua-Bin, YAN, Keng, LIN, Tao, et al.** « The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds. » *Materials Science and Engineering: A*, vol. 433, no 1-2, p. 64-69. 2006

[38] **LIU, H. J., CHEN, Y. C., et FENG, J. C.** « Effect of heat treatment on tensile properties of friction stir welded joints of 2219-T6 aluminium alloy. » *Materials Science and Technology*, vol. 22, no 2, p. 237-241. 2006

[39] **FARAH, Assaf.** « Comportement en fatigue de joints d'aluminium 7075-T6 soudés par friction-malaxage et parachevés. ». Thèse de doctorat. École Polytechnique de Montréal. 2013

Résumé

Le but souhaité de notre travail est de proposer une cellule flexible pour le soudage des structure d'avions en développant l'idée d'introduire les robots de soudage par friction malaxage (FSW) l'industrie aéronautique. Une modélisation optimale est proposée afin d'améliorer le comportement global des cellules flexibles de soudage par friction malaxage d'un empennage d'avion. Tout d'abord, nous avons commencé par la modélisation géométrique et cinématique direct et inverse du robot à 06 articulations. Ensuite, nous avons simulé le comportement du robot sur Matlab. Une application sur un empennage d'avion a été réalisée à la fin de ce travail.

Mots clés : Cellule flexible, Soudage par friction malaxage (FSW), Structure d'avion, Robot à 6 articulations

ملخص

الهدف المنشود من عملنا هو توفير خلية مرنة لتلحيم هياكل الطائرات من خلال تطوير فكرة إدخال روبوتات التلحيم الاحتكاكي (FSW) إلى صناعة الطيران. تم اقتراح نموذج مثالي من أجل تحسين السلوك العام لخلايا التلحيم بالاحتكاك المرن في ذيل الطائرة. أولاً، بدأنا بالنماذج الحركية الهندسية المباشرة والعكسية للروبوت متكون من 06 مفاصل. ثم قمنا بمحاكاة سلوك الروبوت على Matlab. تم تنفيذ تطبيق على وحدة ذيل الطائرة في نهاية هذا العمل.

الكلمات المفتاحية: خلية مرنة، التلحيم الاحتكاكي، هياكل الطائرات، للروبوت متكون من 06.

Abstract

The desired objective of our work is to provide a flexible cell for welding aircraft structures by developing the idea of introducing friction stir welding (FSW) robots to the aviation industry. We proposed an optimal modelling in order to improve the overall behaviour of the flexible friction stir welding cells of an aircraft tail. First, we started with geometric and kinematic modelling of the 06 joint robot. Then, we simulated the behavior of the robot on Matlab. At the end of this work, we did an application on an aircraft tail.

Key words : flexible cell, friction stir welding (FSW), aircraft structures, 06 joint robot