

N° Ordre. /DGM/FT/UMBB/2024

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES**



Faculté de Technologie Département Génie Mécanique

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en : **Filière : ELECTROMECHANIQUE**

Spécialité : MECATRONIQUE

THEME :

**PROGRAMME d'INTEGRATION DE NOUVEAUX
DEPLACEMENTS D'UN ROBOT INDUSTRIEL A 6 DDL DE
MARQUE FANUC**

Présenté par :

NDZANGA ONDOA Luc Claver

Promoteur :

PR Djamel BENAZZOUZ

Promotion 2022-2024

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche n'aurait pas été réalisé sans l'accompagnement de certaines institutions et personnes que nous tenons à remercier.

Nos remerciements s'adressent tout d'abord à l'université de Boumerdès qui n'a ménagé aucun effort pour que nous recevions une formation de pointe, grâce à d'éminents professeur(e)s.

Nous remercions ensuite notre superviseur Pr Djamel BENAZZOUZ qui, malgré son agenda chargé, a consacré du temps pour le suivi de ce travail.

Nous remercions particulièrement notre encadreur de l'entreprise Alliance Glass Mr TAIBAOUI Omar, pour sa disponibilité, ses encouragements, ses orientations et sa rigueur dans le travail bien fait. En effet, sans votre apport ce travail n'aurait pas été une réalité.

À l'ensemble du corps enseignant de la faculté des technologies en particulier ceux du département génie mécanique. Par la qualité de vos enseignements, vous avez fait de nous des personnes éclairées et avisées dans le domaine de la mécatronique.

Nous remercions nos parents et ami(e)s : NGAH ONANA Fidèlia, NKOUMOU ONANA Dalhine, MBALA Cathérine, NDZANGA MINLA'A Xavérie Winny, ETOUNA Elsa Marguerite-Bourgeois, GUIATHEU TAGNO Christiane Laurelle, NOCHI MAGOUO, NDONGO Danielle Laetitia, ABAH NDONGO Robert Stéphane, GAYE Cheikh Ibrahima, GNING Issa, pour leur amour, leur soutien moral, matériel et financier.

À toutes ceux et celles qui, de prêt ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail, qu'ils reçoivent ici l'expression de notre profonde gratitude.

DÉDICACE

A ma défunte maman NGAH ONANA Fidèlia

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements.....	1
Dédicace.....	2
Introduction générale.....	7
Chapitre I : Présentation de l'organe d'accueil.....	11
I.1-Introduction.....	12
I.2-Historique et fondation.....	12
I.3-Activité et de la société produit/service.....	13
I.4-Processus de fabrication des feuilles de verre plate « Float »	14
I.4.1-Atelier de composition.....	15
I.4.2-Bout-chaud.....	16
I.4.3-Bout-froid.....	20
I.4.4-Recyclage du verre.....	21
I.5-Les étapes de processus de transformation des feuilles de verres au sein de l'unité de production d'Alliance Glass.....	21
I.6-Structure de façonnage de verre robotisée.....	22
I.6.1-Composition de l'installation de la structure de façonnage.....	23
I.6.2-Principe de fonctionnement de la cellule robotisé.....	26
I.7-Conclusion.....	27
Chapitre II : Présentation du robot et technologie des robots-série.....	28
II.1-Introduction.....	29
II.2-Présentation du robot Fnuc de la cellule robotisée.....	29
II.2.1-Robot Fanuc M-710Ic.....	30
II.2.2-Contrôleur R-30Ib (poste de commande)	30
II.2.3-Boitier d'apprentissage (Teach pendant)	34
II.2.3.1-Caractéristiques.....	34
II.2.3.2-Avantages.....	34
II.3-Capteurs intelligents du robot.....	35
II.3.1-Capteur de position et déplacement.....	36
II.3.2-Capteur de force.....	38
II.3.3-Capteur de vibration.....	38
II.3.4-Capteur de détection de collision.....	38

II.4-Technologie des robots sériels industriels.....	39
II.4.1-Composition des robots en série.....	40
II.4.2-Les espaces et articulations opérationnels.....	40
II.4.3-Composition singulière.....	40
II.5-Modélisation des robots industriels.....	41
II.5.1-Théories et notions de base.....	43
II.5.2-Description de la situation d'un objet et transformation homogène.....	44
II.5.3-Description de la méthode de Denavit-Hartenberg modifiée.....	45
II.6-Modélisation géométriques.....	46
II.6.1-Modélisation géométrique direct.....	47
II.6.2-Modélisation géométrique inverse.....	47
II.7-Modélisation cinématique.....	47
II.7.1-Modélisation cinématique direct.....	48
II.7.2-Modélisation cinématique inverse.....	48
II.8-Modélisation dynamique.....	48
II.8.1-Modélisation dynamique direct & inverse.....	48
II.9-conclusion.....	50
Chapitre III : Programme d'intégration des nouvelles trajectoires du robot Fanuc M-710iC /45.....	52
III.1-Introduction.....	53
III.2-Langage de programmation.....	53
III.3-Programmation.....	54
III.4-Etalonnage d'un robot industriel.....	54
III.4.1-Etalonnage géométrique direct.....	55
III.4.2-Etalonnage géométrique inverse.....	57
III.5-Description du robot Fanuc M-710iC/45.....	59
III.5.1-Modélisation géométrique du robot Fanuc M-710iC/45.....	58
III.6-Algorithme du programme de la cellule robotisée et algorithme ajouté.....	61
III.7-Conclusion.....	64
Conclusion générale.....	65
Références bibliographie.....	66
Annexe.....	68

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Différents zones de four de fusion

Figure I.2 : Zone de fusion

Figure I.3 : Bain d'étain

Figure I.4 : Zone de refroidissement

Figure I.5 : Schéma de découpe

Figure I.6 : Zone découpe

Figure I.7 : Zone de stockage

Figure I.8 : Structure de la cellule robotisée

Figure I.9 : Machine CNC master 30-32

Figure I.10 : Plateforme tournante

Figure I.11 : Robot bras manipulateur M-710iC/45

Figure I.12 : Convoyeurs à rouleaux motorisés

Figure I.13 : Protection sur le périmètre et panneaux en grille métallique

Figure II.1 : Schéma de description du robot

Figure II.2 : Contrôleur R-30iB

Figure II.3 : Intérieur de l'armoire A du R-30iB (vue de face)

Figure II.4 : Carte principale

Figure II.5 : Diagramme des alimentations

Figure II.6 : Boitier de programmation i Pendant

Figure II.7 : Capteur de position et de déplacement

Figure II.8 : Capteur de force

Figure II.9 : Capteur de vibration

Figure II.10 : Capteur de détection de collision

Figure II.11 : Les éléments de base d'un robot bras manipulateur

Figure II.12 : description de la position et l'orientation d'un objet dans l'espace

Figure II.13 : Composition des transformations

Figure III.1 : Programmation hors-ligne

Figure III.2 : La méthodologie de la programmation hors-ligne

Figure III.3 : Structure de l'erreur d'articulation

Figure III.4 : La position commandé et la position réel

Figure III.5 : Représentation symbolique du robot Fanuc

Figure III.6 : Représentation symbolique du robot Fanuc avec les concourants

Liste des abréviations

CNC - Computer Numerical Control

CAD - Computer-Aided Design

CAM - Computer-Aided Manufacturing

PLC - Programmable Logic Controller

DOF - Degrees of Freedom

R&D - Research and Development

AI - Artificial Intelligence

ML - Machine Learning

ROS - Robot Operating System

PID - Proportional-Integral-Derivative (controller)

FANUC - Factory Automation Numerical Control (a robotics company)

Introduction générale

Le concept de robotique évoque une multitude de pensées et d'idées. Il évoque des images de machines humanoïdes accomplissant des tâches qui dépassent les capacités humaines. Cela stimule même l'imagination pour envisager des possibilités qui s'étendent au-delà des domaines jugés possibles. Cependant, cette notion n'est pas sans fondement, car la fusion de la science et de la science-fiction sert de catalyseur à la création d'avancées technologiques révolutionnaires.

Le domaine des études en robotique a connu un essor considérable ces dernières années, motivé par le besoin pressant des industries de maximiser les avantages des projets d'automatisation et d'assurer leur succès à la fois économique et pratique. Ces études englobent un large éventail d'activités qui sont cruciales pour maintenir une production ininterrompue, renforcer les prouesses économiques et favoriser le développement global. En intégrant des robots dans les environnements industriels, non seulement la capacité de production peut être considérablement améliorée, mais la qualité des produits peut également être grandement améliorée en termes de précision, de vitesse, de complexité et de cohérence. Les robots modernes sont capables d'exécuter des mouvements à des vitesses étonnamment élevées, en suivant des trajectoires méticuleusement calculées dans un environnement contrôlé et structuré, tout en fonctionnant indépendamment de l'intervention humaine. Ces robots sont méticuleusement conçus pour répondre aux exigences spécifiques de l'industrie, notamment le besoin de répétabilité, d'exécution précise des tâches et le strict respect des modèles ou des processus de production établis.

Ce mémoire porte sur l'intégration des nouvelles trajectoires des robots FANUC, en particulier le modèle M-710iC/45, dans le processus industriel de l'entreprise Alliance Glass. L'objectif principal est d'améliorer l'efficacité et la précision des opérations robotiques tout en optimisant les processus de production du verre plat. La problématique posée concerne les défis et les solutions liés à l'intégration des robots avancés dans des environnements industriels complexes, et comment cette intégration peut améliorer la compétitivité de l'entreprise. Pour répondre à cette problématique, le mémoire est structuré en trois chapitres principaux :

Dans un premier un temps présentation de l'organe d'accueil - Ce chapitre introduit Alliance Glass, son historique, ses activités, et ses processus de fabrication du verre plat.

Et ensuite la présentation du robot et technologie des robots-série - Ce chapitre détaille le robot FANUC M-710iC et les technologies associées, incluant les capteurs intelligents et la modélisation géométrique et cinématique.

Et enfin, le programme d'intégration des nouvelles trajectoires du robot FANUC - Ce chapitre se concentre sur les techniques de programmation des robots, les méthodes d'étalonnage, et l'importance de la simulation virtuelle dans l'optimisation des opérations.

Chapitre I Présentation de l'organe d'accueil

I.1-Introduction

Le premier chapitre de ce mémoire présente l'entreprise Alliance Glass, une coentreprise entre Mediterranean Float Glass (MFG) d'Algérie et IVAGLASS d'Italie. L'objectif principal de ce chapitre est de fournir un aperçu historique de l'entreprise, de décrire ses activités principales et ses produits, ainsi que d'expliquer les processus de fabrication et de transformation du verre plat. Alliance Glass, située à Larbâa dans la wilaya de Blida, est reconnue pour sa production de panneaux de verre de haute qualité destinés à diverses applications industrielles et commerciales. L'entreprise adopte une approche axée sur l'innovation et l'amélioration continue de ses produits pour répondre aux besoins évolutifs de ses clients.

I.2- Historique et Fondation

Alliance Glass n'est pas vieille ; il s'agit d'une jeune coentreprise entre Mediterranean Float Glass (MFG), spécialisée dans la production de panneaux de verre, et IVAGLASS, d'Italie, spécialisée dans la transformation du verre ainsi que dans les appareils électroménagers et l'immobilier. Le siège d'Alliance Glass est à Larbâa dans la wilaya de Blida, en Algérie, travaillant dans l'industrie du verre plat dans les locaux de MFG sous la direction compétente de leur directeur général, M. Maurizio Molinelli. Bien que le nombre précis d'employés n'ait pas été fourni, ils contribuent de manière significative au domaine de la fabrication du verre. Autre acteur majeur de l'industrie du verre plat en Afrique, Mediterranean Float Glass (MFG spa), créé en 2007 avec une usine de production de 30 hectares située à Larbâa. Leurs efforts combinés ont fait de l'Algérie un exportateur de verre sur la scène mondiale.

Récemment fondée, Alliance Glass se distingue par son expertise et son engagement à fournir des produits et services de premier ordre dans ces trois domaines. Grâce à son expertise technique et à ses professionnels qualifiés, l'entreprise est leader sur le marché. Alliance adopte une approche axée sur le produit, essayant toujours d'améliorer ses produits et de satisfaire les demandes en constante évolution de ses clients. Dans cette description, nous vous inviterons à explorer plus en détail les différents domaines d'intervention de cette entreprise complexe et compétitive.

I.3-Activité de la Société Produits/Services

L'entreprise est impliquée dans la production de différents types de verre, notamment du verre plat généralement utilisé pour les fenêtres, les portes et les miroirs, ainsi que d'autres applications.

- Production de Verre Plat

Alliance Glass fabrique des feuilles de verre plates variant en épaisseur et en taille. Ces articles trouvent des applications dans l'industrie de la construction, tant dans les secteurs résidentiels que commerciaux.

Ils produisent des vitres teintées ainsi que du verre isolant et du verre de sécurité. Variétés de production pour répondre aux différentes demandes des clients.

- Clients et Marchés

L'entreprise fournit ses produits à des entrepreneurs, des architectes, des propriétaires d'immeubles et d'autres professionnels du secteur de la construction.

Leurs produits sont utilisés dans des projets de construction, des rénovations et des aménagements intérieurs.

- Produit en verre

Parmi les produits en verre personnalisés créés par l'entreprise figurent des miroirs, ainsi que des étagères, des tables et des portes en verre.

Ils sont capables de fabriquer des produits personnalisés en fonction des besoins spécifiques des clients, pour une utilisation à la maison ou dans le cadre de projets commerciaux.

- Créativité et excellence

Dans son innovation, Alliance Glass essaie d'utiliser les méthodes les plus récentes de fabrication de matériaux de haute qualité.

Une attention particulière est portée aux normes de sécurité et de qualité pour satisfaire au mieux leurs clients.

- Objectifs à long terme

Les objectifs à long terme sont malheureusement difficiles à connaître. Cela fait partie de la stratégie de l'entreprise. Cependant il est clair que Alliance Glass Algérie cherche toujours à améliorer ses produits tout en étant dans les transformations des nouvelles technologies en utilisant des produits innovants qui assurent la pérennité de l'entreprise.

Alliance Glass pourrait notamment atteindre ces objectifs en recherchant de nouvelles opportunités. Cela peut inclure, sans s'y limiter, des investissements en recherche et développement (R&D), des expansions géographiques, l'amélioration de la qualité des produits qu'ils lancent ou sont déjà sur le marché et des pratiques durables.

- Investissement en recherche et développement (R&D)

La société pourrait consacrer des ressources à la recherche de nouveaux produits en verre.

Le département R&D améliore la qualité des produits existants et explore de nouvelles méthodes technologiques pour rester pertinent sur le marché.

- Expansion géographique

Alliance Glass pourrait chercher à accroître le rayonnement de son territoire en créant de nouvelles installations de fabrication ou en s'associant à d'autres organisations.

Tenter de nouveaux marchés pourrait accroître la croissance et augmenter la part de marché.

- Amélioration de la qualité des produits

En investissant dans des processus de fabrication plus efficaces et en utilisant des matériaux de haute qualité, l'entreprise peut améliorer ses produits pour être plus compétitive sur le marché et répondre au mieux à la satisfaction des besoins des clients.

La qualité des produits est essentielle pour fidéliser les clients et gagner leur confiance.

- Pratiques durables

Alliance Glass pourrait adopter des pratiques respectueuses de l'environnement, telles que le recyclage du verre et la réduction de la consommation d'énergie.

Les entreprises qui se soucient de la durabilité attirent souvent l'attention des consommateurs et des investisseurs.

- Collaboration avec d'autres acteurs de l'industrie

Alliance Glass pourrait collaborer avec d'autres entreprises du secteur du verre pour partager des connaissances, des ressources et des meilleures pratiques.

Les partenariats stratégiques peuvent renforcer la position de l'entreprise sur le marché. Pour cela il faudrait une stratégie commune et de confiance mutuelle pour renforcer pareillement les partenaires et jouant le challenge gagnant-gagnant.

I.4- Processus de fabrication et transformation de feuilles de verre plat « Flaot »

La transformation du verre plat est possible après la fabrication ce qui lui permet de jouer un rôle dans l'isolation thermique ou dans l'absorption de phénomènes acoustiques. Le verre est

unique car il apporte lumière et confort à une maison et peut être obtenu en cas de besoin lors d'une nouvelle construction ou d'une rénovation.

Le matériau du verre est unique car il apporte à la fois lumière et confort à un espace de vie. Il est souvent nécessaire dans le cas de constructions neuves ou de rénovations. Le verre plat a la possibilité d'être transformé pour jouer des fonctions supplémentaires – thermiques ou acoustiques ou esthétiques – ou assurer la sécurité des occupants du lieu où il est utilisé.

Le mélange est placé au four et chauffé à une température proche de 1500°C où il se transforme en verre liquide.

Encore chaud et malléable, le verre peut être façonné selon différentes techniques, par exemple en le soufflant ou en le coulant dans un moule.

Le verre nécessite généralement un traitement thermique afin de le renforcer car des points de tension se développent lors du refroidissement qui fragiliseraient le verre. Un procédé de recuit qui consiste à chauffer le verre jusqu'à des températures autour de 600°C peut être utilisé.

La production de verre plat « Float » est réalisée par trois grands départements. Ils comprennent :

- Atelier de composition
- Bout-chaude
- Bout-froide

I.4.1-Atelier de composition

Les composants verriers sont principalement :

- De la silice (présentée sous forme de sable) comme corps vitrifiant (70 à 72%),
- De la soude (sous forme de fondant sous forme de carbonate et de sulfate) environ 14%,
- De la chaux (comme stabilisant sous forme de calcaire) environ 10%,
- D'autres oxydes comme l'alumine, la magnésie, qui améliorent les propriétés physiques du verre, notamment sa résistance aux agents atmosphériques.

Un type de déchets de verre est appelé « calcin » (environ 30 %). Il aide les matières premières à fondre facilement et possède également la propriété d'économiser de l'énergie et de réduire les émissions de CO₂.

Après avoir été soigneusement pesées, différentes matières premières doivent être très bien mélanger pour que l'on obtienne un mélange parfaitement homogène ; on profite de cette opération pour ajuster le taux d'humidité à la valeur maximale permis pour une fusion facile.

Le calcin de verre usagé constitue environ 30 % des matières premières. Ils aident à la fusion des matières premières et contribuent à économiser de l'énergie ainsi qu'à réduire les émissions de CO₂.

Une fois minutieusement pesées, les différentes matières premières doivent être parfaitement mélangé de manière à obtenir un mélange très homogène ; c'est également lors de cette opération que l'on ajuste le taux d'humidité au taux le plus élevé possible pour faciliter la fusion.

Les composants sont ensuite mesurés en quantités très précises et mélangés avec les morceaux de verre recyclés appelés calcin. C'est également au cours de cette étape que certains additifs sont introduits en fonction de l'utilisation prévue du matériau verrier ; de l'oxyde de magnésium, par exemple, est ajouté pour rendre le verre plus résistant tandis que de l'oxyde de fer peut être ajouté pour lui donner une couleur verdâtre.

Le processus est facilité par l'ajout de fondants tels que la soude, la potasse ou la chaux et l'eau. Déchets de verre recyclés appelés calcin. Le tout dans des proportions très précises.

C'est également à ce stade que l'on insère quelques additifs qui dépendent de l'utilisation que l'on souhaite en faire. Sera en verre, en oxyde de magnésium par exemple, pour rendre le verre plus résistant ou de l'oxyde de fer pour lui donner une teinte verdâtre.

I.4.2- Bout chaud

Le secteur est composé de trois parties :

- Four de fusion
- Bain d'étain
- Zone de refroidissement

➤ Four de fusion

Le four ou bassin de fusion est construit en briques réfractaires. Une seule ligne F loat produit généralement du verre pouvant atteindre 2 000 tonnes. Ce verre est fondu à une température élevée de 1 550°C. Le four de fusion est constitué de quatre zones qui sont: zone d'enfournement qui permet de maintenir le bon fonctionnement selon la température recommandée., tel que le montre Fig.II-1. La zone de fusion permet au verre de se transformer de la phase solide à la phase fusion. La zone d'affinage permet de d'éliminer les défauts du produit. Enfin la zone de braise assure la finition du processus de transformation.

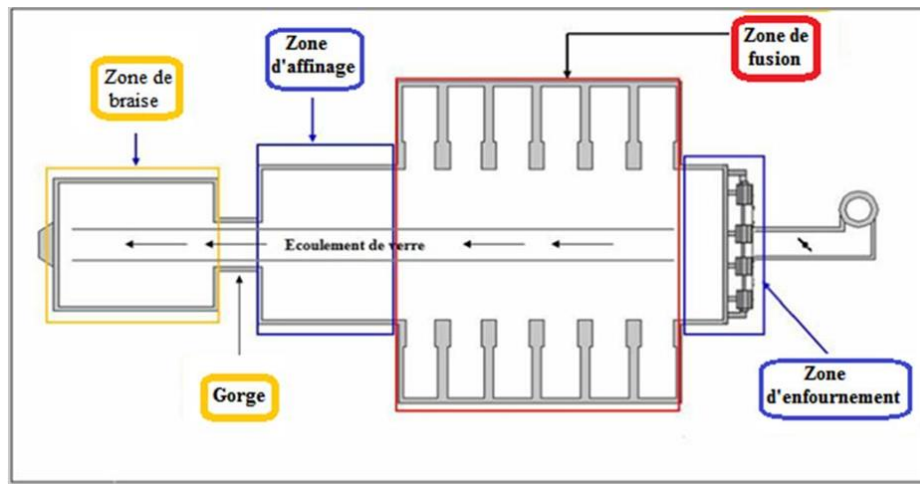


Figure I.1- Différentes zones de four de fusion

➤ Zone de fusion

La zone de fusion se compose de deux ensembles de brûleurs : un ensemble situé du côté droit et l'autre du côté gauche. Ces groupes de brûleurs fonctionnent alternativement de chaque côté, avec une durée de 20 minutes avant que le système ne passe de l'autre côté. Pour l'allumage, le gaz naturel est nécessaire comme combustible ainsi que l'air de combustion. Le débit de gaz est régulé par des vannes pneumatiques provenant d'un distributeur bistable BALDWIN. L'air de combustion est produit par deux ventilateurs de combustion, l'un fournissant activement de l'air et l'autre en réserve. Chaque ventilateur est alimenté par un moteur de marque Dutchi Motors contrôlé à l'aide d'un variateur Altivar3 à 8 vitesses. Le débit d'air est mesuré à l'aide d'un débitmètre fabriqué par EPI (Equipment de Protection Individuelle) et contrôlé par une vanne de régulation de marque Siemens. La mesure de température utilise 6 thermocouples de type B au centre de la zone et 12 thermocouples de type K situés dans les pieds de la chambre de régénération. L'atelier de la zone de fusion est donné sur la Fig. II.2



Figure I.2- Zone de fusion

➤ **Zone d'affinage**

Dans cette zone, les vides d'air sont éliminés par la haute température ; cette température est détectée par un thermocouple de type B et est d'environ 1520°C. Plus tard, après avoir atteint 1350°C, surveillé par un autre thermocouple de type B, le ruban de verre sera refroidi. Le système de refroidissement comprend deux ventilateurs alimentés par un moteur de marque Dutchi Motors et contrôlés par un variateur de vitesse de marque ALTIVAR à 38 vitesses. Le contrôle de la pression est assuré à l'aide du capteur différentiel de marque ROSEMOUNT.

➤ **Zone d'enfournement**

Stockés dans des silos en tête de four, se trouvent le mélange vitrifiable et le calcin. Les doseurs de la marque ZIPPE aideront à placer le mélange obtenu dans le bain de chargement. Chaque four comprend : Une pelle à deux bras actionnés par un moteur de marque STOBBER piloté par un variateur de vitesse Micromaster 420 pour pousser les matériaux vers le bain de chargement. A l'aide des doseurs de marque ZIPPE, le mélange vitrifiable et le calcin pris dans les silos de stockage sera versé dans le bain de chargement. Chaque four est équipé de : une pelle comportant deux bras actionnés par un moteur de marque STOBBER. Le déplacement de ces derniers est géré grâce à un variateur de vitesse (Micromaster 420) pour entraîner les matériaux jusqu'à leur destination : vers le bain d'enfournement.

➤ **Zone de Braise**

Pendant le processus de formage, la viscosité du liquide doit être plus de dix fois supérieure à celle du raffinage. Pour y parvenir, le verre doit être refroidi jusqu'à 1 100 °C, ce que nous

faisons en le laissant refroidir progressivement, garantissant un processus de refroidissement lent pour éviter de forts gradients de viscosité qui peut engendrer des anomalies dans le produit.

➤ **Bain d'étain**

A la sortie du four, le verre fondu passe dans un bain d'étain où il se refroidit et forme la feuille de verre en flottant sur cette surface plane, ce qui se fait dans un bain d'étain approprié à une température d'environ 1100°C.

Les surfaces en verre sont polies par l'étain dans un premier temps et par le feu dans le second cas (voir Figure II-3). Un contrôle de l'épaisseur est effectué en régulant la vitesse d'écoulement qui garantit que l'épaisseur du verre varie de 3 mm à 12 mm. La température à ce stade est la suivante : le verre s'est solidifié et refroidi à environ 600°C.

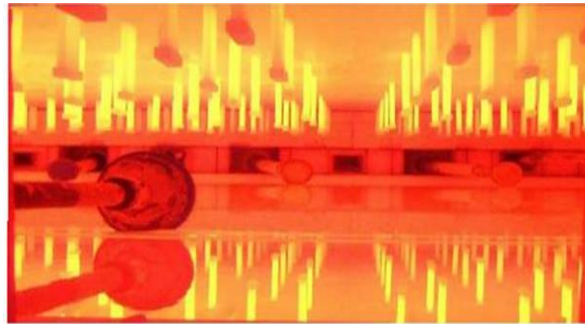


Figure I.3- Bain d'étain

➤ **Zone de refroidissement**

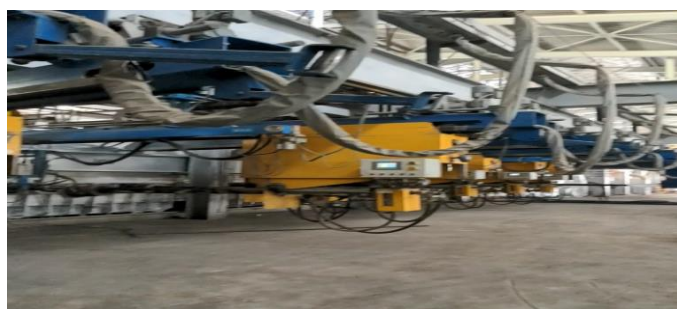


Figure I.4 -Zone de refroidissement

Le verre doit encore être refroidi, mais il est maintenant suffisamment dur pour passer sur les rouleaux d'un tunnel de refroidissement appelé « étenderie ». La température du verre descend graduellement de 600 à 60°C.

I.4.3 -Bout froid

➤ Contrôle

La dernière partie du processus est appelée la partie froide et implique le contrôle de la qualité et la découpe. Le ruban de verre est surveillé en permanence à l'aide de faisceaux laser : la détection de la moindre imperfection du verre n'est que rarement visible à l'œil nu.

➤ Découpe

Après le nettoyage et le contrôle de qualité, deux systèmes de découpe (transversal et longitudinal) sont utilisés pour découper le verre en barquettes aux dimensions standard selon les normes internationales 6 x 3,21 m. Une autre ligne de découpe séparée peut préparer directement le verre à toutes les dimensions souhaitées par les clients. Les bords, qui s'enlèvent automatiquement, sont recyclés comme calcin ; ce sont des parties de résidus de coupe.

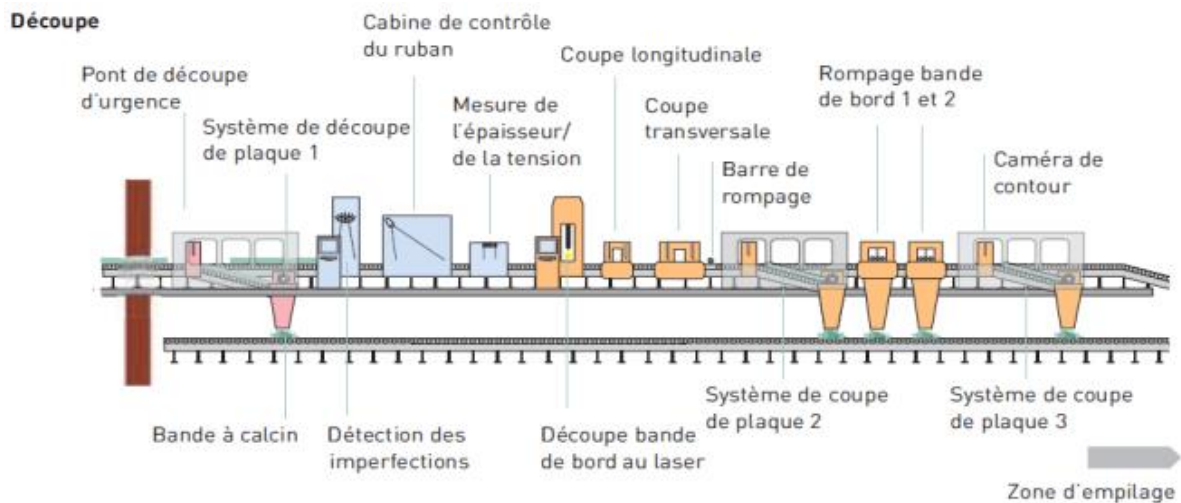


Figure I.5- Schéma de la découpe.



Figure I.6- Zone de découpe

➤ **Stockage**

Les plateaux en verre sont empilés verticalement sur des chevalets à l'aide de ventouses. Les chevalets sont ensuite transportés jusqu'à l'entrepôt où s'empile le verre il doit être stocké.



Figure I.7-Zone de stockage

I.4.4- Recyclage du verre

En réalité, le verre recyclé fond à une température bien inférieure à celle de la silice. Cela implique qu'il serait inutile d'utiliser des flux pour abaisser le point de fusion. En revanche, la production à partir de verre recyclé nécessite l'inclusion d'au moins 20 % de nouvelles matières premières. Ceci permet de maintenir la qualité du produit.

I.5- les étapes de processus de transformation du verre au sein de l'unité de production d'Alliance Glass

Les feuilles de verre plate dite « Float » fabriquées dans l'entreprise MFG à partir des matières premières sont conduites dans les locaux Alliance Glass pour être transformées pour l'usage électroménager, et immobilier. Pour ce traitement de verre l'entreprise Alliance Glass compte 3 grandes chaînes de transformations, et chaque chaîne de transformation comporte 5 étapes :

- Phase 1 : Découpe des feuilles de verre
- Phase 2 : Façonnage du verre
- Phase 3 : Sérigraphie.
- Phase 4 : Four de trompe.
- Phase 5 : Empileuses

I.6- Structure de façonnage de verre robotisée

La cellule est composée d'un bras manipulateur robotique de marque Fanuc, qui constitue le centre d'intérêt de notre travail. Cette cellule est accompagnée de deux machines CNC respectives, appelées Master 30 et Master 32 comme illustré sur Figure III.1. Le rôle de cette cellule robotisée est de façonner les verres pour des commandes spécifiques au sein de l'unité de production. Le bras manipulateur Fanuc permet une grande précision et efficacité dans le

processus de fabrication, tandis que les machines CNC assurent la découpe et le polissage des verres selon les spécifications requises. Cette combinaison de technologies permet d'optimiser la production et de répondre aux besoins variés de leurs clientèles.

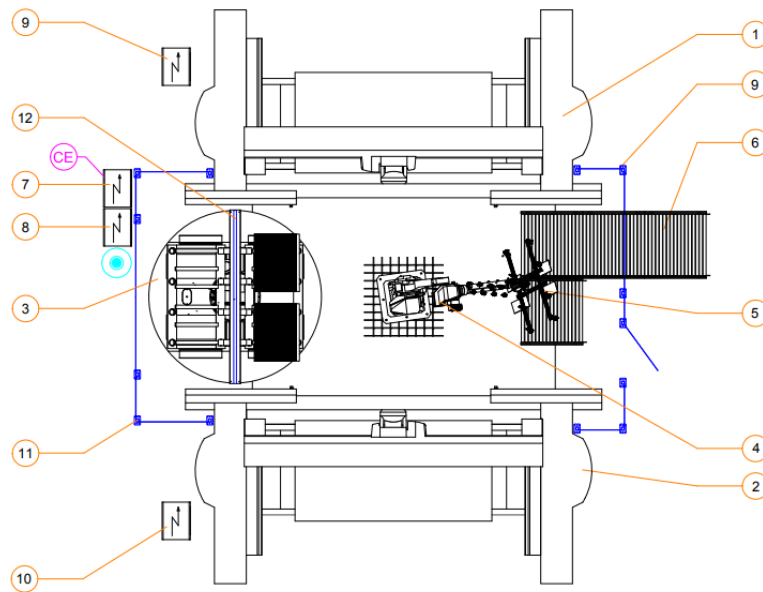


Figure I.8 : Structure de la cellule robotisée

DESCRIPTION DE LA CELLULE ROBOTISEE



- 1) Centre de travail MASTER 30 Code 1000006568
- 2) Centre de travail MASTER 32 Code 1000006569
- 3) Plateforme pivotante Code 6303F0402
- 4) Robot anthropomorphe - Code 1000006570
- 5) Organe de prise Robot - Code 7.006.0.0011
- 6) Convoyeur à rouleau motorisé - Code 1.102.0.0054

- 7) Tableau électrique Général
- 8) Tableau électrique Robot
- 9) Tableau électrique centre de travail MASTER 30
- 10) Tableau électrique centre de travail MASTER 35
- 11) Protections sur le périmètre en grille métallique H=2500 - Code 1.164.0.0201
- 12) Panneau de protection fixe sur plateforme H2500

I.6.1- Composition de l'installation de la structure de façonnage

➤ **Pos 1 et 2 :** Centres de travail MASTER 30 et MASTER 35.

Machines à contrôle numérique utilisées pour l'usinage de la plaque brute dotées des manuels spécifiques fournis en annexe par le constructeur.

Selon les options demandées, les deux machines se présentent comme suit :

- Machine à 3 axes standard (X, Y, Z).
- Machine à 4 axes (X, Y, Z, T), où « T » est l'axe tirant spécial pour les travaux de surbaissement sur marbre.

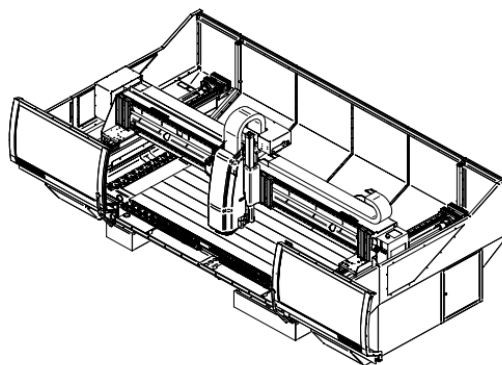


Figure I.9 : Machine CNC master 30-32

➤ **Pos3 -Plateforme tournante.**

Système de manutention de forme circulaire avec motorisation indépendante, en mesure d'accomplir des rotations de 0° à 180°. Son mouvement permet de transférer les verres par la zone de dépôt des plateformes au point de prise du robot.

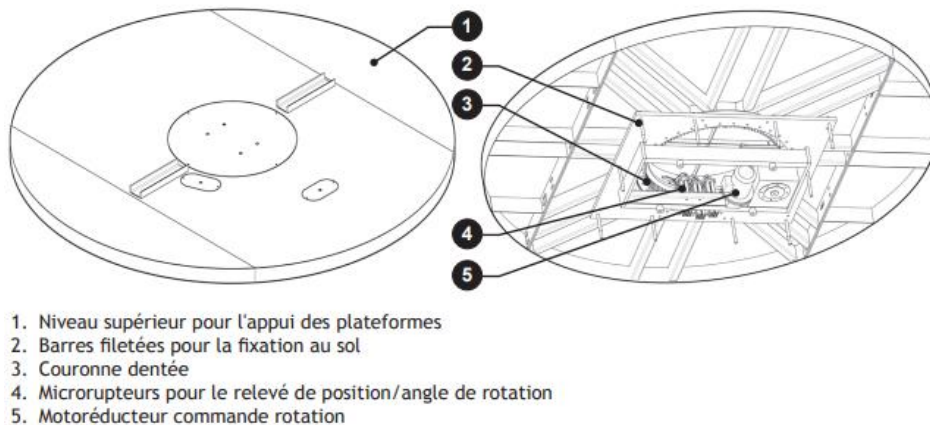


Figure I.10 : Plateforme tournante

➤ **Pos. 4- Robot bras manipulateur avec organe de prise des plaques**

Organe de prise avec ventouses pour la manutention des plaques en verre et système de détection directe pour localiser la première plaque de la file.

Prédisposition pour l'utilisation d'un système à double prise qui peut être employé aussi bien pour la manutention simultanée de deux plaques que pour l'échange produit brut/usiné sur le poste du centre de travail.



Figure I.10- Robot bras manipulateur M-710Ic

➤ **Pos. 6 - Convoyeurs à rouleaux motorisés**

Système de transport utilisé pour déplacer les plaques en verre usinées en sortie de la cellule robotisée vers la machine en aval.

Il est composé d'un convoyeur à rouleaux avec transmission du mouvement à courroies et motoréducteur à vitesse fixe et d'un déviateur orthogonal à courroies avec mouvement vertical à commande pneumatique par rapport à leur avancement. Structure de support avec pieds réglables à fixer au terrain au moyen de chevilles à expansion

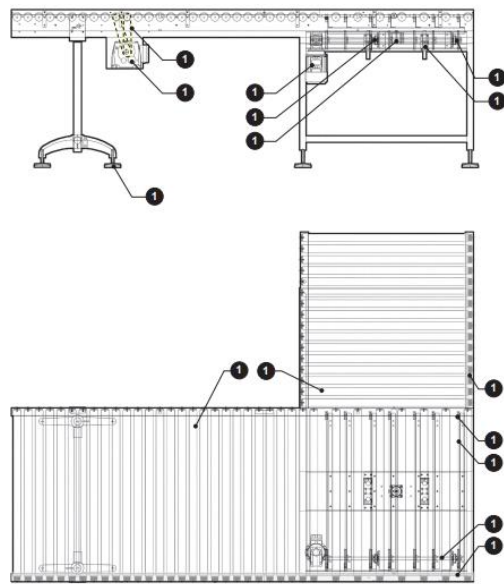


Figure I.12 : Convoyeurs à rouleaux motorisés

➤ **Pos. 9 et 10 - Protections sur le périmètre et panneaux en grille métallique**

Protections constituées de panneaux en grille métallique fixés mécaniquement aux colonnes à ancrer au terrain au moyen de chevilles à expansion et montés sur la plateforme pivotante.

Les ouvertures sur les protections du périmètre, pour le passage du personnel et des engins utilisés pour la manutention des plateformes, sont constituées de portes mobiles contrôlées par des micro-rupteurs à retenue magnétique.

L'ouverture est obtenue uniquement suite à la demande d'accès à effectuer par logiciel et détermine l'arrêt des machines en conditions de sécurité.

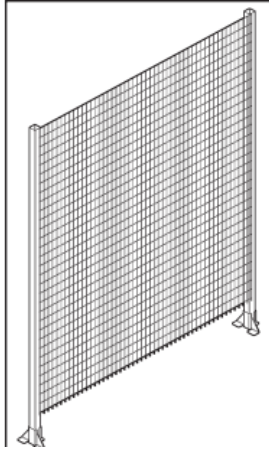


Figure I.13 : Protections sur le périmètre et panneaux en grille métallique

I.6.2- Principe de fonctionnement de la cellule robotisé

1. Placement des verres sur le plateau tournant

- Un opérateur place manuellement les verres sur le plateau tournant.
- Le plateau peut tourner de 0 à 180 degrés pour transférer les verres vers le point de prise du robot.

2. Calibrage initial du robot

- Le robot se positionne initialement pour calibrer sa position.

3. Première trajectoire du robot

- Le robot se déplace depuis sa position initiale vers le plateau tournant.
- Il charge le verre à l'aide de ventouses (l'outil du robot).

4. Transfert vers la machine CNC vide

- Le robot effectue une deuxième trajectoire pour transférer le verre vers l'une des machines CNC vides.
- Une fois le verre déposé sur la machine CNC, le robot retourne vers la position du plateau.

5. Façonnage du verre par la machine CNC

- La machine CNC façonne le verre.
- Le robot effectue une autre trajectoire pour décharger le verre de la CNC vers le convoyeur d'évacuation.
-

I.7- Conclusion

En conclusion, Alliance Glass se distingue comme un leader dans l'industrie du verre plat grâce à sa capacité à produire des produits de verre variés et de haute qualité. Le chapitre a détaillé les processus complexes de fabrication et de transformation du verre plat, mettant en évidence l'expertise technique et les installations avancées de l'entreprise. En outre, les efforts constants en recherche et développement, ainsi que l'engagement envers des pratiques durables, renforcent la position d'Alliance Glass sur le marché mondial. L'entreprise continue de se développer et d'innover, assurant ainsi sa pérennité et sa compétitivité dans l'industrie du verre.

Chapitre II Présentation du robot et technologie des robots-série

II.1 –Introduction

Le deuxième chapitre de ce mémoire porte sur la présentation du robot Fanuc M-710iC et la technologie des robots série. Ce chapitre détaille les composants clés du robot, y compris le contrôleur R-30iB et le dispositif de programmation teach pendant, et explique comment ces éléments travaillent ensemble pour offrir une performance optimale dans divers environnements industriels. Il décrit également les caractéristiques et les avantages du robot, soulignant sa polyvalence et sa capacité à manipuler des charges dans un espace de travail étendu. Enfin, ce chapitre aborde les capteurs intelligents utilisés par le robot pour mesurer les positions, les déplacements, les niveaux de charge et les vibrations, garantissant ainsi une précision élevée et une sécurité renforcée dans les opérations.

II.2-Présentation du robot Funuc de la cellule robotisée

Le robot Fanuc M-710iC/45 est composé de plusieurs éléments essentiels pour son fonctionnement optimal : le robot lui-même, un contrôleur R-30iB et un dispositif de programmation teach pendant. Le M-710iC/45 est un bras manipulateur sophistiqué conçu pour des opérations précises et rapides dans divers environnements industriels. Le contrôleur R-30iB, une unité de commande avancée, offre une interface utilisateur intuitive et des capacités de traitement robustes, permettant une gestion efficace des mouvements et des tâches du robot. Le teach pendant, un outil de programmation portable, facilite la création et la modification des trajectoires et des opérations du robot en permettant aux ingénieurs de programmer directement les mouvements souhaités. Ensemble, ces composants garantissent une performance élevée, une flexibilité opérationnelle et une facilité d'utilisation, faisant du M-710iC/45 une solution idéale pour l'automatisation industrielle.

II.2.1- Robot Fanuc M-710iC

Le robot industriel FANUC M-710iC/45M est un bras robotisé à 6 axes conçu pour des opérations de transfert haute vitesse. C'est un modèle polyvalent capable de manipuler jusqu'à 45 kg. Il possède un bras de 2 606 mm, ce qui lui permet de manipuler des verres dans un espace de travail plus large.



Figure II.1 Schéma de description du robot

II.2.2- Contrôleurs R-30iB-A (poste de commande)

Le contrôleur de robot R-30iB Plus de FANUC est la nouvelle norme pour une productivité plus intelligente dans l'industrie manufacturière. Le R-30iB Plus intègre une nouvelle génération de matériel intégré et plus de 250 fonctions logicielles. Il améliore les performances du robot en termes de temps de cycle, de vitesse, de précision et de sécurité¹.

Grâce à son réseau Ethernet, le R-30iB permet une connexion facile avec d'autres robots, des ordinateurs distants et d'autres matériels. Le contrôleur standard A-Cabinet FANUC est une solution compacte et empilable parfaitement adapté aux environnements industriels, il est conçu pour deux axes auxiliaires. Le contrôleur optimise intelligemment l'énergie, ce qui se traduit par des économies d'énergie maximales pour votre entreprise.

Contrairement aux contrôleurs fonctionnant sous Windows, le R-30iB Plus utilise un logiciel propriétaire FANUC, éliminant les soucis liés aux virus, aux pirates informatiques et à la stabilité.



Figure II.2 : Contrôleur R-30iB

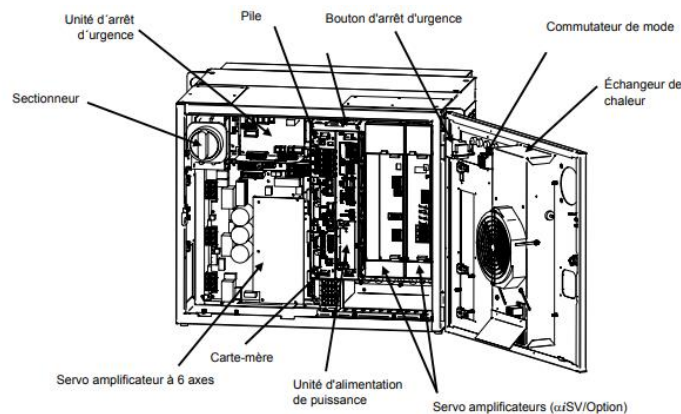


Figure II.3 : Intérieur de l'armoire A du R-30iB (vue de face)

- **CPU** (Unité Centrale de Traitement) est l'un des éléments essentiels du Contrôleur R30iB.

Le CPU du contrôleur est souvent appelé “le cerveau” du contrôleur R30iB. C’est une puce électronique qui exécute les instructions des programmes et traite les données.

Il est composé d’une unité de contrôle, d’une unité de calcul, d’une horloge et de différents registres. Le CPU reçoit des instructions stockées dans la mémoire et les exécute en quatre étapes :

- Recherche de l’instruction ;
- Décodage ;
- Exécution ;

- Et écriture du résultat ;

Sa puissance se mesure en Flops (nombre de calculs à virgule flottante effectués en une seconde).

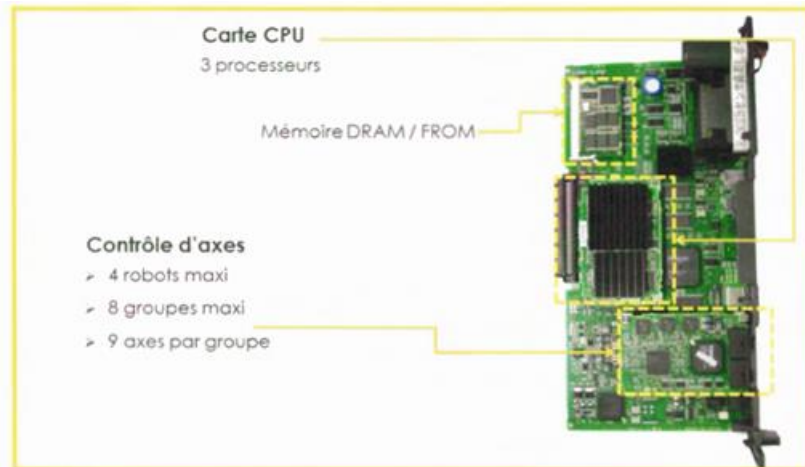


Figure II.4 : carte principale (CPU)

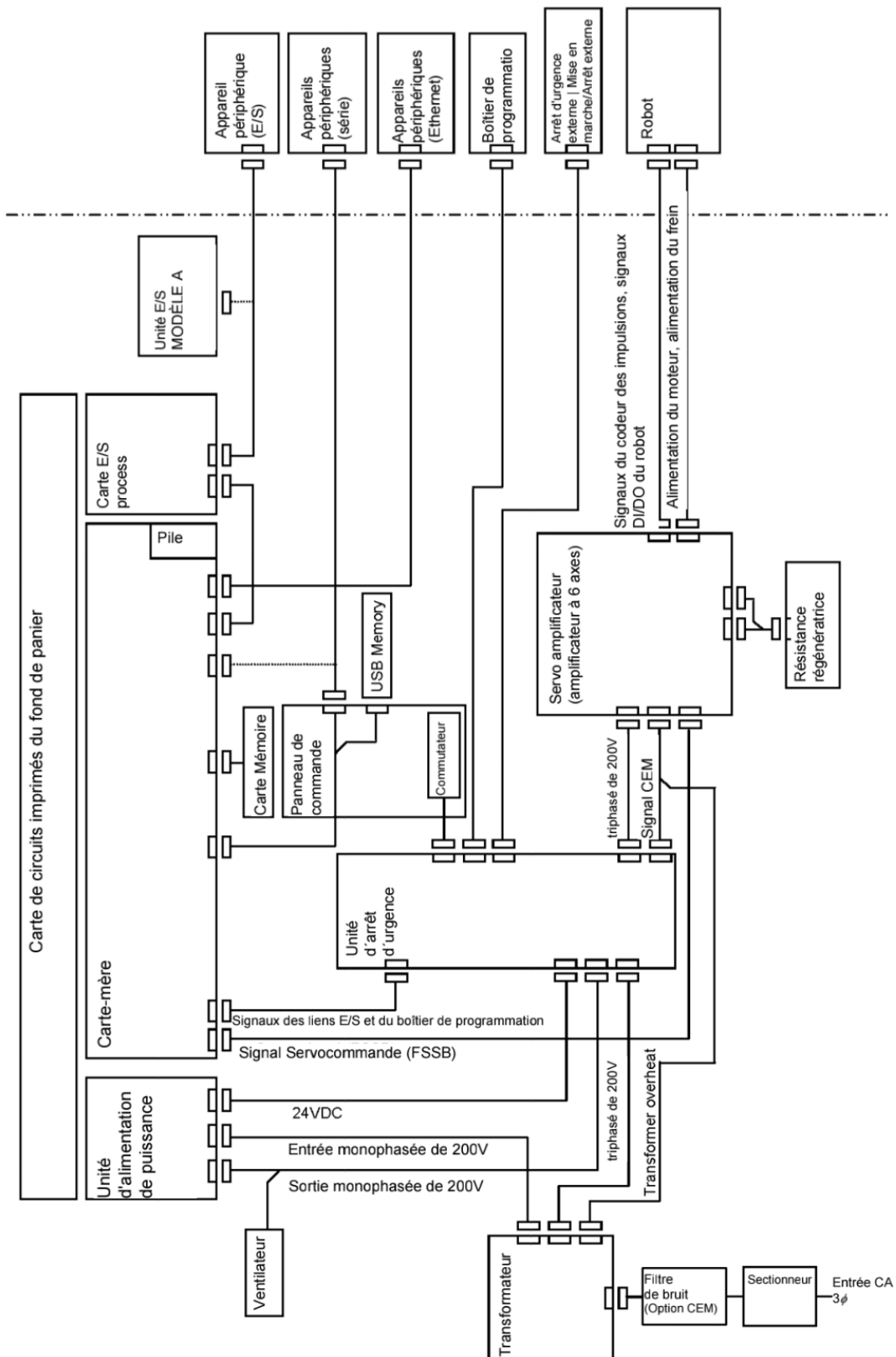


Figure II.5 : Diagramme des alimentations du R-30iB

II.2.3-Boitier d'apprentissage (teach pendant)

Le teach pendant est un outil qui permet de programmer et de contrôler les mouvements des robots industriels. Il s'agit d'un dispositif ergonomique et léger qui permet aux opérateurs de donner des ordres aux robots pour les aider à accomplir des tâches spécifiques. Le teach pendant FANUC est un outil essentiel pour la programmation, la configuration et le contrôle des robots, offrant une interface conviviale et efficace.

L'iPendant touch R-30iB FANUC combine convivialité, vitesse et économies d'énergie. Il dispose d'un grand écran tactile couleur, d'une conception ergonomique et de touches de fonction pour contrôler les septième et huitième axes. L'affichage multifenêtres facilite le mode multitâche, et les vues isométriques en 3D simplifient la programmation. L'iPendant touch est léger, ergonomique et offre une interface utilisateur intuitive pour les programmeurs et les opérateurs. Pour programmer les points ou le parcours d'un robot, il suffit de montrer les mouvements à reproduire à l'aide des manettes montées sur le poignet du robot, tout en appuyant sur la commande d'apprentissage pour valider la requête.

II.2.3.1- Caractéristiques du teach pendant

- Il est équipé d'un interrupteur à trois points intégrés servant de commande d'assentiment.
- Il peut être utilisé avec tous les robots de la série e.
- La commande d'assentiment est entièrement intégrée dans le nouveau Pendant d'apprentissage séries et peut être utilisée facilement par plug-and-play.
- Il est en outre entièrement intégré dans le logiciel Polyscope.
- Il permet de contrôler les mouvements du robot et le Free-Drive en mode manuel.

II.2.3.2- Avantages du teach pendant

- Il réduit les efforts nécessaires pour les opérateurs.
- Il est conçu pour être ergonomique et pratique.
- Il permet de programmer les robots de manière facile et rapide.
- Il est compatible avec tous les robots de la série.



Figure II.6 : Boîtier de programmation iPendant

II.3- Capteur intelligents du robot

II.3.1-Capteur de position et déplacement

Les capteurs de position et de déplacement jouent un rôle crucial dans les robots industriels, permettant de mesurer avec précision la position, l'orientation et parfois la vitesse des différents composants mobiles du robot.

Les capteurs de position et de déplacement dans les robots industriels peuvent être de divers types, incluant les encodeurs rotatifs, les capteurs de fin de course, les capteurs de proximité, les capteurs laser, les capteurs optiques, etc. Chaque type de capteur est choisi en fonction des besoins spécifiques de mesure et de contrôle des mouvements du robot.

Les encodeurs rotatifs sont parmi les capteurs les plus couramment utilisés pour mesurer la position angulaire des articulations des robots. Ils fonctionnent en convertissant le mouvement rotatif en signaux électriques ou numériques qui peuvent être interprétés par le contrôleur du robot. Il existe deux principaux types d'encodeurs : absolu et incrémental. Les encodeurs absolus fournissent la position exacte de l'articulation, tandis que les encodeurs incrémentaux mesurent le déplacement par rapport à une position de référence.

Les capteurs de position et de déplacement permettent au contrôleur du robot de connaître en temps réel la position de chaque articulation et parfois même la force exercée par le robot. Cela est essentiel pour assurer la précision des mouvements, éviter les collisions, optimiser les trajectoires et maintenir la sécurité des opérateurs et des équipements environnants.

Les signaux des capteurs sont généralement intégrés dans le système de contrôle du robot, tel que le contrôleur R-30iB de FANUC. Le contrôleur utilise ces informations pour ajuster en temps réel les mouvements du robot en fonction des tâches programmées, des conditions de l'environnement et des interactions avec les objets à manipuler.

Les capteurs de position et de déplacement permettent aux robots industriels d'effectuer des tâches complexes avec une grande précision et une fiabilité élevée. Ils sont utilisés dans divers secteurs tels que l'automobile, l'électronique, la logistique, etc., où la précision et la répétabilité sont essentielles pour maximiser l'efficacité et la productivité.



Figure II.7 : Capteur de position et de déplacement

II.3.2- Capteur de niveau de charge force

Les capteurs de niveau de charge force, également connus sous le nom de capteurs de force, sont des dispositifs électroniques qui convertissent une force physique en un signal électrique mesurable. Ces capteurs mesurent la charge du robot pour contrôler la charge et la sécurité.

Principe de fonctionnement

Les capteurs de force fonctionnent en utilisant des jauges de contrainte, des piezorésistiveurs ou des capteurs de force à fibre optique. Les jauges de contrainte sont des éléments métalliques qui se déforment en réponse à une force appliquée, tandis que les piezorésistiveurs sont des matériaux qui changent de résistance en réponse à une force appliquée. Les capteurs de force à fibre optique utilisent des fibres optiques qui se déforment en réponse à une force appliquée.



Figure II.8 : Capteur de force

II.3.3-Capteur des vibrations

L'objectif principal de ces capteurs est de détecter les vibrations anormales pouvant indiquer une défaillance potentielle ou une usure prématurée des composants du robot. Il existe plusieurs types de capteur de vibration mais dans notre cas le robot utilise les capteurs de vibrations MEMS (Micro-Electro-Mechanical System).

Principes de fonctionnement

Les capteurs de vibrations mesurent les déplacements, les vitesses ou les accélérations des parties mobiles du robot, tels que les bras (comme dans notre cas), les articulations ou les moteurs. Ils convertissent ces mouvements en signaux électriques qui peuvent être analysés.



Figure II.9 : Capteur de vibration

II.3.4- Capteurs de détection de collision

Ces capteurs détectent les collisions en surveillant la force exercée sur le robot. La sensibilité de déclenchement peut être ajustée en fonction des besoins de l'application. Par exemple, on peut régler la sensibilité en fonction de la pression d'air ou d'autres paramètres.

Lorsqu'une collision est détectée (par exemple, lorsque le robot entre en contact avec un obstacle), le capteur intégré envoie un signal à la commande du robot. Ce signal déclenche un arrêt d'urgence pour éviter tout dommage au robot ou à son environnement.

Contrairement au retour automatique, où le robot revient automatiquement à sa position initiale après une collision, le retour manuel nécessite l'intervention de l'opérateur. L'ouvrier évalue la

situation et décide si le robot peut reprendre son mouvement ou s'il doit être réinitialisé manuellement (voir la figure II.25).



Figure II.10 : Capteurs de détection de collision

II.4- Technologie des robots série industriels

Les robots sériels sont les plus utilisés dans l'industrie en raison de leur grande surface de travail, ainsi que de la simplicité de leur conception et de leur commande. Cette architecture de robots se caractérise par sa chaîne cinématique simple ouverte, composée d'une série de corps reliés entre eux par des articulations motorisées qui permettent le déplacement d'un effecteur final. Pour cette catégorie, un seul chemin est possible entre le bâti à l'organe terminal du robot.

II.4.1- La composition des robots en série

Un robot est un système mécanique composé de corps articulés disposés en chaîne cinématique ouverte. Le premier corps, noté C_0 , sert de point d'ancrage au robot, tandis que le corps final, C_n , est l'endroit où l'organe terminal ou l'outil effecteur est fixé. Les corps du robot sont reliés par des articulations, qui peuvent être de nature rotoïde ou prismatique. Une articulation révolutionnaire permet un mouvement de rotation entre deux corps consécutifs le long de l'axe de l'articulation, tandis qu'une articulation prismatique permet un mouvement de translation le long de l'axe de l'articulation. Dans les robots à chaîne ouverte, chaque type d'articulation possède un seul degré de liberté (ddl), ce qui fait que le nombre total de ddl est égal au nombre d'articulations.

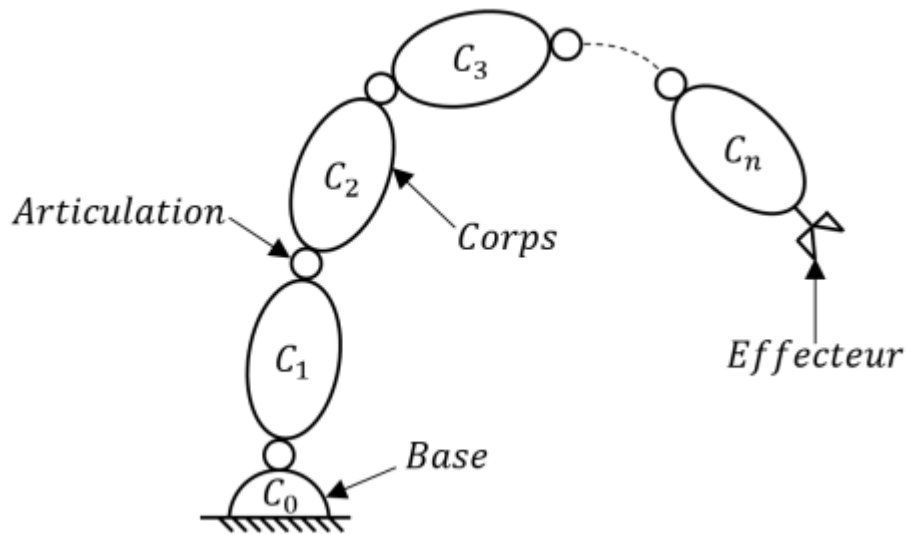


Figure II.11 : Les éléments de bases d'un robot bras manipulateur

II.4.2-Les espaces articulaire et opérationnel

L'espace articulaire fait référence à l'espace où les corps du robot sont positionnés ou situés, chaque articulation étant affectée d'une ou plusieurs variables ou coordonnées d'articulation. À l'inverse, l'espace opérationnel est l'endroit où est définie la situation du robot effecteur, englobant à la fois sa position et son orientation.

II.4.3-Positions singulières

Des problèmes de contrôle peuvent survenir dans les robots en raison de ce que l'on appelle des configurations singulières. Ces configurations se produisent lorsque certaines conditions sont remplies, comme avoir des axes de charnière prismatiques parallèles ou des axes de charnière rotoïde coïncidents.

II.5- Conception des robots industriels

II.5.1-Théories et notions de base

II.5.1.1-Description de la situation d'un objet et transformations homogènes

La description est utilisée généralement pour spécifier les propriétés des objets, notamment les pièces, les outils et le robot lui-même, ou encore pour décrire la relation entre certains objets. La description de la situation d'un objet signifie la définition de sa position et de son orientation. La position d'un point quelconque dans l'espace peut être représentée par un vecteur, une fois

qu'un système de coordonnées est établi. Ce vecteur de position (II-1) doit également être étiqueté avec une information qui précise le repère dans lequel il est défini, car plusieurs systèmes de coordonnées peuvent être utilisés outre celui de l'espace.

$$P^i = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad (\text{II-1})$$

Où : p_x , p_y et p_z sont les composantes des coordonnées du point P dans le repère R_i .

Pour décrire l'orientation d'un objet dans l'espace, une matrice peut être utilisée, en particulier lorsqu'un système de coordonnées est appliqué à l'objet (voir Figure II.12). Les éléments de cette matrice de rotation (II-2) peuvent être exprimés comme le produit scalaire entre les vecteurs unitaires du repère de référence R_i et le repère R_j qui est attribué à l'objet.

$$A_j^i = \begin{bmatrix} X_j \cdot X_i & Y_j \cdot X_i & Z_j \cdot X_i \\ X_j \cdot Y_i & Y_j \cdot Y_i & Z_j \cdot Y_i \\ X_j \cdot Z_i & Y_j \cdot Z_i & Z_j \cdot Z_i \end{bmatrix} \quad (\text{II-2})$$

Selon cette définition donnée, les matrices de rotation pour le système de coordonnées R_j , qui tournent autour des axes X_i , Y_i et Z_i d'un angle θ , peuvent être exprimées de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \text{Rot}(X_i, \theta) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} ; & \text{Rot}(Y_i, \theta) &= \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \\ \text{Rot}(Z_i, \theta) &= \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{II-3})$$

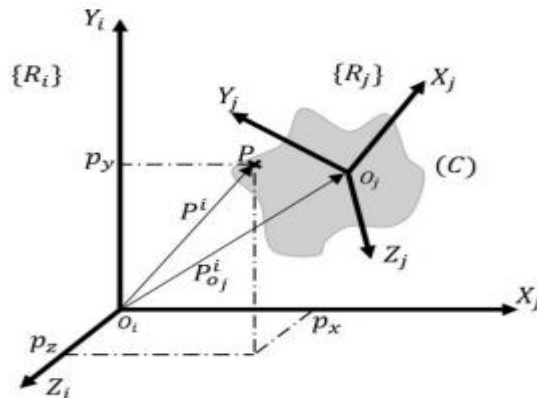


Figure II.12: Description de la position et de l'orientation d'un objet dans l'espace

Dans le domaine de la robotique, il est courant de rencontrer le besoin de transition entre différents systèmes de coordonnées. Afin de décrire efficacement les relations entre ces systèmes, il devient nécessaire de définir les liens qui existent entre eux. Le processus de transformation, de translation et/ou de rotation d'un système de coordonnées, noté R_i , à un autre, noté R_j (comme illustré sur la figure II.13), peut être réalisé grâce à l'utilisation d'une représentation matricielle, comme le montre la figure II.13 équation (II-4). Cette représentation matricielle simplifie la formulation des équations et peut être caractérisée par une combinaison d'un vecteur position et d'une matrice de rotation, qui forment ensemble la matrice de transformation homogène T_j^i .

$$T_j^i = \begin{bmatrix} (A_j^i)_{(3 \times 3)} & (P_{o_j}^i)_{(3 \times 1)} \\ 0_{(1 \times 3)} & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II-4})$$

Où :

- A_j^i est la matrice de rotation du repère R_j par rapport à R_i .
- $P_{o_j}^i$ est le vecteur de position qui localise l'origine O_j du repère R_j par rapport à R_i .

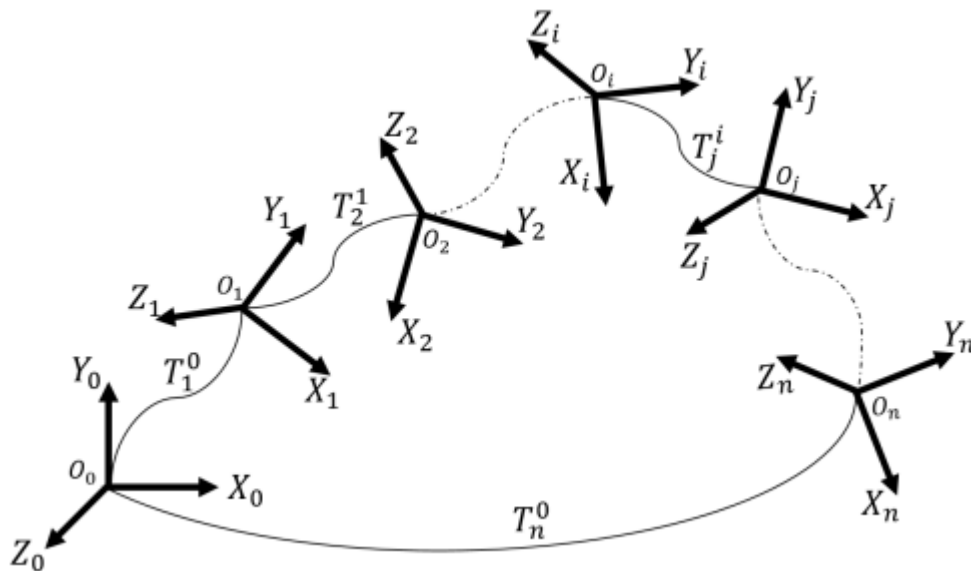


Figure II.13: Composition des transformations

La composition des robots est constituée de plusieurs corps, ce qui signifie que décrire la relation entre un corps et un autre nécessite une série complexe de rotations et de traductions. En conséquence, la matrice de transformation homogène pour une séquence de transformations

(comme le montre la figure II.28) peut être obtenue par la multiplication de matrices de transformation élémentaires.

$$T_n^0 = T_1^0 \cdot T_2^1 \cdot T_3^2 \dots T_n^{n-1} = \prod_{i=1}^n T_i^{i-1} \quad (\text{II-5})$$

II.5.1.2-Description de la méthode Denavit-Hartenberg modifiée

En robotique, une étape cruciale consiste à définir les repères associés aux différents composants du robot et à décrire le passage d'un repère à l'autre. Dans le domaine de la robotique, de multiples conventions et notations ont été établies pour faciliter ce processus, notamment pour décrire la structure des robots à conception ouverte simple. La convention la plus largement adoptée et la plus appropriée pour de tels robots est la méthode modifiée Denavit-Hartenberg (DHM). Cependant, cette approche peut s'avérer problématique lorsqu'il s'agit de robots dotés de structures fermées ou arborescentes, car elle introduit des ambiguïtés. Néanmoins, la méthode DHM est avantageuse de par sa capacité à représenter la transition entre deux cas-tests en utilisant un nombre limité de paramètres géométriques. Cette méthode repose sur l'ensemble de règles suivantes.

- Le robot est constitué d'une chaîne de « $n + 1$ » corps supposés parfaitement rigides et qui sont reliés par « n » articulations rotoïdes ou prismatiques.
- Les repères sont numérotés de « 0 » à « n » et le repère R_j est associé au corps C_j .
- L'axe Z_j est porté par l'axe de la j ième articulation du robot.
- L'axe X_j est porté par la normale commune aux axes Z_j et Z_{j+1} , et s'ils sont parallèles ou colinéaires, alors le choix de X_j n'est pas unique.
- L'axe Y_j est choisi de façon à avoir un repère orthonormé direct avec les axes X_j et Z_j .
- Le passage entre les repères R_{j-1} et R_j est exprimée en fonction des quatre paramètres géométriques α_j , r_j , θ_j et d_j qui sont illustrés dans le Tableau 3.1.
- La variable articulaire q_j associée à la j ième articulation est égale à θ_j si l'articulation est de type rotoïde, sinon elle est égale à r_j si l'articulation est de type prismatique.

$$q_j = \bar{\sigma}_j \cdot \theta_j + \sigma_j r_j \quad (\text{II-6})$$

Tableau II.1 : Les paramètres géométriques de DHM

Symboles	Description
α_j	Angle entre les axes Z_{j-1} et Z_j autour de l'axe X_{j-1}
r_j	Distance entre les axes Z_{j-1} et Z_j le long de X_{j-1}
θ_j	Angle entre les axes X_{j-1} et X_j autour de l'axe Z_j
d_j	Distance entre les axes X_{j-1} et X_j le long de Z_j
σ_j	Définit le type de la j ième articulation ($\sigma_j = 0$: si articulation rotoïde ; $\sigma_j = 1$: si articulation prismatique)

Comme mentionné précédemment, cette méthodologie nous permet d'illustrer efficacement la relation entre un indice de référence et un autre. Ceci est rendu possible en utilisant la matrice de transformation homogène T_j^{j-1} (II-7), qui facilite la transition d'un repère au suivant, ainsi qu'en définissant le repère R_j dans R_{j-1} .

$$\begin{aligned}
 T_j^{j-1} &= Rot(X, \alpha_j) \cdot Trans(X, d_j) \cdot Rot(Z, \theta_j) \cdot Trans(Z, r_j) \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_j & -\sin \theta_j & 0 & r_j \\ \cos \alpha_j \cdot \sin \theta_j & \cos \alpha_j \cdot \cos \theta_j & -\sin \alpha_j & -d_j \cdot \sin \alpha_j \\ \sin \alpha_j \cdot \sin \theta_j & \sin \alpha_j \cdot \cos \theta_j & \cos \alpha_j & d_j \cdot \cos \alpha_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} (A_j^{j-1})_{(3 \times 3)} & (P_{o_j}^{j-1})_{(3 \times 1)} \\ 0_{(1 \times 3)} & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{II-7}$$

Où : $Trans(X, d_j)$ et $Trans(Z, r_j)$ sont respectivement les matrices de translation suivant X et Z , et qui peuvent être exprimés comme suit :

$$Trans(X, d_j) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_j \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} ; \quad Trans(Z, r_j) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{II-8}$$

L'équation (II-9) fournit la méthode la plus générale et la plus utile pour calculer la matrice de transformation qui définit le repère R_{j-1} par rapport au repère R_j , également connue sous le nom d'inverse de la matrice de transformation homogène.

$$T_{j-1}^j = (T_j^{j-1})^{-1} = \begin{bmatrix} (A_j^{j-1})_{(3 \times 3)}^T & -\left((A_j^{j-1})_{(3 \times 3)}^T \cdot (P_j^{j-1})_{(3 \times 1)}\right) \\ 0_{(1 \times 3)} & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II-9})$$

II.6-Modélisation géométrique

L'objectif de la conception géométrique est d'établir une connexion entre les variables articulaires du robot et la configuration, qui inclut la position et l'orientation, de l'effecteur final. Le processus de modélisation géométrique directe (MGD) consiste à déterminer l'emplacement de l'organe terminal du robot en fonction des variables articulaires. D'autre part, la modélisation géométrique inverse (IGM) fait référence au calcul des positions articulaires à partir de la position donnée de l'effecteur.

II.6.1- Modèle géométrique direct

Le MGD (Manipulator Geometry Description) consiste en un ensemble d'équations qui décrivent l'état de l'effecteur du robot, noté « X », par rapport aux positions des articulations, notées « q ». Différentes approches existent dans la littérature pour obtenir ce modèle, mais la plus adaptée consiste à utiliser les éléments de la matrice de transformation homogène. Dans le cas d'un robot sériel, le modèle peut être facilement dérivé en multipliant séquentiellement les différentes matrices de transformation homogènes, ce qui donne une matrice globale qui établit la connexion entre le marqueur attaché à l'effecteur du robot et la base, telle que définie dans l'équation (II -5).

$$X = f(q) = [P_{xn} \ P_{yn} \ P_{zn} \ A_{xn} \ A_{yn} \ A_{zn}]^T \quad (\text{II-10})$$

Où : P_{xn} , P_{yn} et P_{zn} représentent les coordonnées cartésiennes de la position de l'effecteur. A_{xn} , A_{yn} et A_{zn} représentent l'orientation, qui peut être décrite par plusieurs représentations telles que les cosinus directeurs, les angles d'Euler, les angles de Roulis-Tangage-Lacet ou les quaternions.

II.6.2-Modèle géométrique inverse

Le MGI est l'ensemble des relations qui servent à déterminer les différentes positions articulaires à partir d'une configuration prédéfinie de l'effecteur du robot. Mathématiquement et contrairement au MGD, dans ce modèle, plusieurs solutions peuvent être obtenues pour

chaque situation envisagée de l'organe terminal. Par ailleurs, et de manière générale, avant de procéder à cette modélisation inverse, une vérification de deux conditions sur la configuration de l'effecteur est requise. Premièrement, la confirmation qu'elle appartient à la zone de travail ou plutôt à la zone accessible du robot. Et deuxièmement, la confirmation qu'elle ne correspond pas aux situations singulières, qui peuvent conduire à des problèmes de solutions infinies. La littérature distingue deux principales catégories de procédés pour calculer les problèmes inverses : les procédés numériques ainsi que les méthodes analytiques, qui sont fréquemment exploitées du fait de leur rapidité et de leur capacité à identifier aisément toutes les solutions possibles. Néanmoins, leur utilisation dépend de la structure du robot. La méthode de Pieper peut être utilisée dans le cas des robots à six degrés de liberté ayant trois axes d'articulation consécutifs qui se croisent en un point commun, comme dans le cas d'un poignet sphérique, ou ayant trois axes d'articulation consécutifs parallèles. La méthode de Paul qui traite chaque robot séparément et convient à la plupart des robots industriels. La méthode générale de Raghavan et Roth, qui permet d'obtenir la solution générale des robots à six articulations en utilisant au maximum un polynôme de 16 degrés.

II.7-modélisation cinématique

Avoir une compréhension précise de la durée des tâches est crucial dans le domaine de la robotique. Par conséquent, la gestion de la vitesse devient un élément essentiel, car elle affecte directement le temps nécessaire à l'exécution de ces tâches. Cela a nécessité la mise en œuvre d'une modélisation cinématique, le modèle géométrique s'étant révélé inadapté au contrôle de la vitesse. Pour établir un parallèle entre la conception géométrique et la conception cinématique, cette dernière se concentre sur les vitesses opérationnelles et articulaires plutôt que sur les positions, ce qui est l'objectif principal de la modélisation géométrique.

II.7.1-Modèle cinématique direct

Le modèle cinématique direct (DCM) définit la relation entre les vitesses opérationnelles de l'effecteur terminal du robot, notées « $\dot{X}$ », et les vitesses angulaires conjointes « $\dot{q}$ ». Cette relation s'exprime à travers l'expression suivante :

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} V_n \\ \omega_n \end{bmatrix} = f(\dot{q}) = J_n(q) \cdot \dot{q} = \begin{bmatrix} J_v \\ J_\omega \end{bmatrix} \cdot \dot{q} \quad (\text{II-11})$$

Où :

- V_n et ω_n sont respectivement les vitesses linéaires et angulaires de l'effecteur.
- $J_n(q)$ est la matrice jacobienne du robot manipulateur.

Il existe deux méthodes pour calculer la matrice jacobienne : l'une consiste à dériver le MGD par rapport aux variables conjointes " q ", mais cette approche n'est pas recommandée en raison de son calcul complexe. L'autre méthode est un calcul direct (II-12). Lors de l'utilisation de la première approche, la composante de vitesse linéaire Jv de la matrice jacobienne, qui définit les vitesses linéaires, est obtenue en différenciant les coordonnées cartésiennes de la position X par rapport au temps (comme indiqué dans l'équation (II-10)). Cependant, il est important de noter que la composante $J\omega$, qui représente les vitesses angulaires, ne correspond pas aux dérivées des composantes d'orientation.

$$\dot{X} = J_n(q) \cdot \dot{q} = \sum_{j=1}^n \begin{bmatrix} V_{j,n} \\ \omega_{j,n} \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^n \begin{bmatrix} \bar{\sigma}_j \cdot (a_j \wedge P_n^j) + \sigma_j \cdot a_j \\ \bar{\sigma}_j \cdot a_j \end{bmatrix} \cdot \dot{q}_j \quad (\text{II-12})$$

Où : a_j est un vecteur unitaire porté par l'axe Z_j de la j ième articulation.

En général, V_n et ω_n sont exprimés dans les repères R_0 et R_n . Ainsi, en les projetant dans le repère R_i , la j ième colonne de la matrice jacobienne sera écrite comme suit :

$${}^i J_{n,j} = \begin{bmatrix} \bar{\sigma}_j \cdot A_j^i \cdot \left[\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \wedge P_n^j \right] + \sigma_j \cdot A_j^i \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \\ \bar{\sigma}_j \cdot A_j^i \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \end{bmatrix} \quad (\text{II-13})$$

II.7.2-Modèle cinématique inverse

L'ensemble d'équations qui définit les vitesses angulaires des articulations du robot par rapport aux vitesses angulaires et linéaires de l'effecteur est connu sous le nom de modèle cinématique inverse (ICM). Afin d'obtenir l'indice de contrôle du manipulateur (MCI), il faut calculer l'inverse de la matrice jacobienne, qui doit être mathématiquement inversible. Cette traduction peut être réalisée à l'aide de l'équation (II-14).

$$\dot{q} = (J_n(q))^{-1} \cdot \dot{X} \quad (\text{II-14})$$

II.8- Modélisation dynamique

Pour manipuler un robot ou imiter ses actions, il est nécessaire de disposer d'une représentation mathématique prenant en compte les forces responsables de son mouvement. Cela peut être considéré comme un défi par rapport aux explications géométriques et cinématiques traditionnelles. En conséquence, la modélisation dynamique est apparue comme une solution, impliquant la formulation d'équations décrivant le lien entre le mouvement du robot et les forces exercées sur ses articulations pour produire ce mouvement.

II.8.1 Modèle dynamique direct & inverse

L'existence de deux catégories distinctes de modélisation dynamique peut être attribuée à l'objectif derrière son utilisation (II-15). Par exemple, lorsque l'objectif est d'obtenir une commande ou un contrôle en temps réel d'un robot, un modèle dynamique inverse (MDI) doit être résolu. Ce modèle consiste à dériver des équations qui décrivent les couples exercés par les actionneurs en fonction des positions des articulations du robot, des vitesses, des accélérations et des forces externes appliquées (appelées « F_{ext} »). En revanche, lors de la simulation du comportement du robot, les équations du modèle dynamique direct (DDM) doivent être résolues. Ces équations expriment les accélérations articulaires en fonction des positions, des vitesses, des couples des actionneurs et des forces extérieures.

$$\ddot{q} = f_{MDD}(q, \dot{q}, \Gamma, F_{ext}) ; \quad \Gamma = f_{MDI}(q, \dot{q}, \ddot{q}, F_{ext}) \quad (II-15)$$

Le développement d'un modèle dynamique s'appuie sur les principes énoncés dans divers travaux sur la dynamique. Cependant, les deux méthodologies prédominantes employées sont la méthode de Newton-Euler, idéale pour calculer un MDI, et la méthode d'Euler-Lagrange, optimale pour déterminer un MDD. Les équations régissant le mouvement des robots peuvent être décrites à l'aide de l'approche d'Euler-Lagrange, qui prend en compte le travail effectué par les forces et les énergies totales impliquées, dont l'énergie cinétique « E_c » et l'énergie potentielle « E_p ». Généralement, les équations de Lagrange sont exprimées de la manière suivante

$$\Gamma = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial \theta} \right) \quad (\text{II-16})$$

Où :

- $L = Ec - Ep$ est le Lagrangien du robot.
- θ est le vecteur de coordonnées généralisées définit par les ddls.

II.9-Conclusion

En conclusion, ce chapitre met en évidence l'importance des technologies avancées et des composants sophistiqués du robot Fanuc M-710iC dans l'amélioration de l'efficacité et de la précision des opérations industrielles. Les contrôleurs, les dispositifs de programmation et les capteurs intelligents intégrés permettent de répondre aux exigences des tâches complexes tout en assurant la sécurité et l'optimisation énergétique. La compréhension de ces technologies et de leur fonctionnement intégré est cruciale pour maximiser l'utilisation des robots industriels dans divers secteurs. Le robot Fanuc M-710iC se distingue par sa capacité à offrir des solutions d'automatisation fiables et performantes, contribuant ainsi de manière significative à l'évolution de l'industrie manufacturière.

Chapitre III Programme d'intégration des nouvelles trajectoires du robot Fanuc M-710iC /45

III.1-Introduction

Le troisième chapitre de ce mémoire est consacré au programme d'intégration des nouvelles trajectoires du robot Fanuc M-710iC/45. Il aborde les méthodes de programmation des robots manipulateurs, en se focalisant sur deux principales approches : la programmation en ligne et hors-ligne. La programmation en ligne, souvent appelée teach-in, permet de montrer manuellement au robot les tâches à accomplir. La programmation hors-ligne, quant à elle, utilise des logiciels de CAO pour simuler les trajectoires du robot, ce qui permet de minimiser les interruptions de production. Ce chapitre explore également les différents langages de programmation utilisés dans le système FANUC, ainsi que les méthodes d'étalonnage des robots pour améliorer leur précision. Enfin, il fournit une description détaillée du robot FANUC M-710iC, utilisé dans l'industrie pour diverses applications, et explique la modélisation géométrique nécessaire pour optimiser son fonctionnement.

III.2. Langage de programmation

La programmation du robot peut se faire par apprentissage ou hors-ligne sur le logiciel de simulation virtuelle. Il existe différents logiciels d'applications dédiés, par exemple, la peinture, la soudure, etc. prenant en compte les spécificités du procédé métier qui lui est associé. Le système FANUC, propose trois types de langages, pour répondre à tous les niveaux de programmation :

- **KAREL** : est un langage créé pour la programmation des robots FANUC et est essentiellement utilisé pour les applications complexes. Il est semblable au langage PASCAL et inclut la catégorie qui se réalise avec le logiciel Roboguide.
- **Ladder** : L'automate programmable ou le PMC (Programmable Machine Control) intégré de FANUC sont compatibles au langage de programmation ladder, ce qui permet de développer les applications directement sur le PLC. De plus, cela autorise le contrôle asynchrone d'équipements externes tels que les convoyeurs ou les portes et par conséquent exécuter de petites tâches d'automatisation en parallèle du robot, sans avoir recours à des équipements supplémentaires.

• **Teach Pendant Editor** « TPE » : est le moyen le plus rapide et efficace. Dans ce langage, les trajectoires du robot sont appréhendées manuellement au moyen du boîtier d'apprentissage. L'opérateur dirige le robot jusqu'au point souhaité et enregistre sa position, puis il va générer tous les points de la trajectoire en précisant la vitesse de déplacement et le type de trajectoire désiré (linéaire, en courbure, etc...). Au cours du cycle, le développeur incorpore des commandes liées aux différents process métiers (Ouverture ou fermeture d'une pince ou d'un pistolet peinture, allumage d'arc en soudure, etc.).

III.3-Programmation

Il y a deux méthodes de programmation des robots manipulateurs : programmation en ligne et programmation hors-ligne, cela dépend de l'application à laquelle le robot est destiné.

III.3.1 Programmation en ligne

Cette méthode, appelée communément teach-in, est en fait la programmation par apprentissage. Elle consiste à montrer manuellement au robot ce qu'il doit faire à l'aide de l'opérateur. Plus précisément, l'opérateur va déplacer l'effecteur du robot sur plusieurs poses et les enregistrer au fur et à mesure, et cette opération continue jusqu'à ce que la trajectoire couvre toute la surface à revêtir. Cette série de points est ensuite enregistrée selon l'ordre d'exécution dans la mémoire du contrôleur de robot. Cette méthode, qui s'avère la plus utilisée dans les applications industrielles, est très pratique, car elle permet de réaliser la programmation rapidement et facilement pour un personnel non qualifié [Joubair, 2012].

Il y a des inconvénients dans la programmation en ligne :

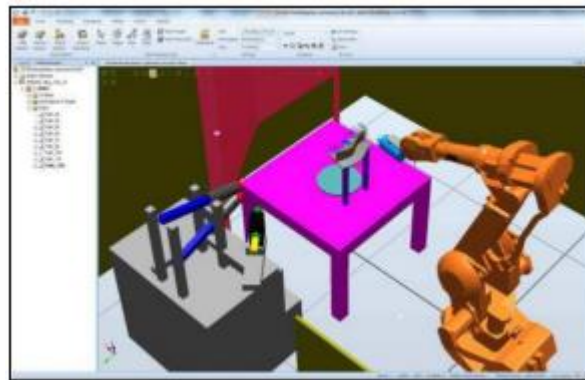
- Il faut arrêter la tâche en cours au moment de la programmation ;
- Dans des pièces ou des trajectoires compliquées, il est difficile d'acquérir précisément les points des trajectoires manuellement dans un espace 3D ou avec des distances ou des angles de projection constants. Même dans une pièce très simple, dès qu'il y a une trajectoire de courbe et d'angle droit, il est très difficile ou même impossible de paramétrer manuellement la trajectoire de façon précise [Joubair 2012].

III.3.2- Programmation hors-ligne

Dans la programmation hors-ligne, le robot n'est pas physiquement utilisé comme la programmation en ligne, ce qui ne cause donc aucun arrêt de production. Cette méthode consiste

à programmer le robot et simuler les trajectoires en utilisant des logiciels de CAO générés avec un logiciel sur ordinateur, notamment le logiciel virtuel comme Robot Studio, RoboDK (Figure III.1). Ce type de programmation est de plus en plus populaire pour de nombreuses applications robotiques [CAI 2014].

Le principe de la programmation hors ligne est de produire un modèle de la pièce compliquée en 3D avec un logiciel CAO. Par la suite, on importe ce modèle dans le logiciel de programmation hors ligne. Ensuite, on crée une trajectoire à partir du modèle 3D et enregistre en format du code pour qu'elle puisse être exécutée par le robot ou on peut l'exécuter directement via un logiciel comme RoboDK [Joubair 2012].



FigureIII.1 : Programmation hors ligne tiré de CAI 2014

On peut décrire la méthodologie de la programmation hors-ligne (Figure III.2).

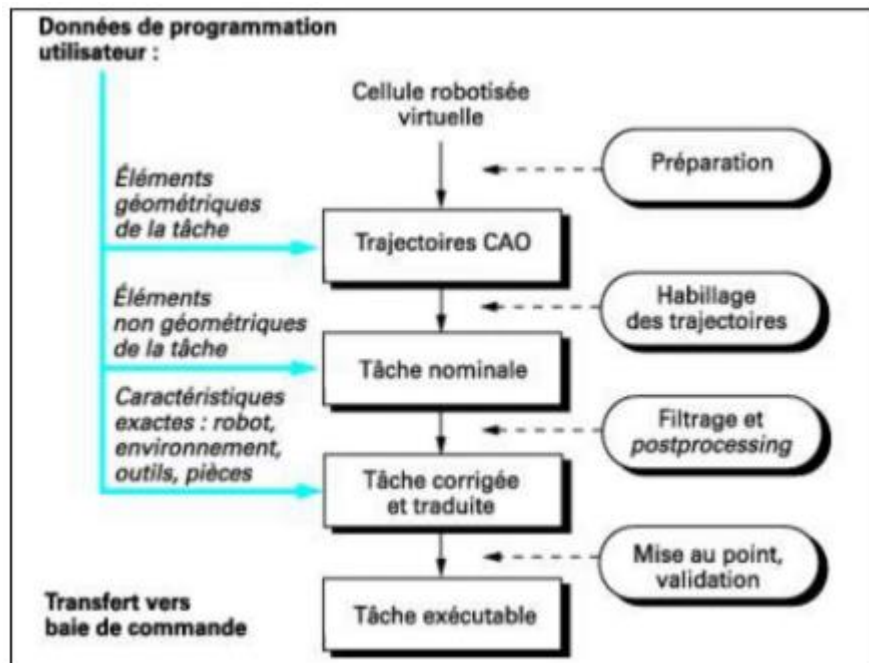


Figure III.2 : La méthodologie de la Programmation hors-ligne tiré de CAI (2014)

Il y a beaucoup d'avantages dans la programmation hors-ligne :

- Assurer la sécurité humaine, matérielle et environnementale ;
- Réduire le temps de préparation, car on peut préparer la programmation du robot malgré l'indisponibilité du robot et on peut continuer la production sans arrêter le robot durant la programmation ;
- Rapprocher le modèle mathématique du modèle réel du robot et améliorer ainsi sa précision absolue utilisant ÉG (étalonnage géométrique) ;
- Diminuer le choc entre la pièce et les outils.

III.4- L'étalonnage d'un robot

Les robots industriels sont hautement reproductibles (petite erreur aléatoire), mais non précis (erreur systématique). Par conséquent, la précision d'un robot peut être améliorée grâce à son étalonnage. L'étalonnage d'un robot est le processus d'identification des valeurs réelles de certains paramètres dans la structure cinématique d'un robot industriel, tels que la position relative des liaisons du robot. En fonction du type d'erreur modélisé, l'étalonnage peut être classé de trois manières différentes.

L'étalonnage de **niveau 1** modélise seulement les différences entre les valeurs fournies par les encodeurs des actionneurs (θ_d) et les mouvements articulaires réels (θ_r) (voir Figure III.3)

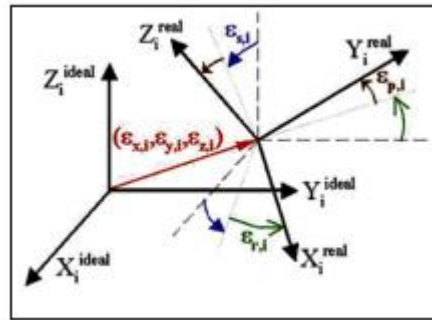


Figure III.3 : Illustration de l'erreur de l'articulation tiré de Meggiolaro (2000)

Dans un modèle nominal on considère que $\theta_r = \theta_d$, mais réellement, nous avons une relation complexe $\theta_r = f(\theta_d)$. Cette relation est difficile à trouver, mais nous pouvons obtenir de bonnes approximations avec des fonctions linéaires comme :

$$\theta_r = k_1 \theta_d + k_0 \quad (\text{III.1})$$

L'étalonnage de **niveau 2**, aussi connu sous le nom étalonnage géométrique, concerne l'ensemble des paramètres géométriques du robot, ce qui inclut les décalages d'angle, les longueurs et excentricités des joints cinématiques en tant que paramètres d'erreur à la conception nominale du robot. En même temps, on peut utiliser le modèle niveau 1 dans le modèle niveau 2 pour étalonner les articulations.

L'étalonnage de **niveau 3**, également appelé étalonnage non géométrique, il modélise les erreurs autres que les valeurs géométriques comme la rigidité, le frottement, le jeu, les paramètres dynamiques, etc. L'étalonnage de niveau 3 est généralement associé à un étalonnage de niveau 2 et 1. Les étalonnages de robot les plus courants incluent la cinématique complet (niveau 2) et parfois l'inclusion de quelques paramètres décrivant la rigidité du bras du robot (niveau 3).

III.4.1- Méthodes d'étalonnage géométrique

III.4.1.1- Étalonnage par la méthode directe

Cette méthode appelée méthode en boucle ouverte, elle est généralement utilisée pour identifier les paramètres du robot en utilisant les équations du MGD. Le principe de cette méthode est basé sur la mesure de la position et l'orientation de l'effecteur terminal (pose mesurée X^M) après déplacement de l'effecteur à une pose commandée X^C en commandant des mouvements articulaires aux actionneurs du robot. En principe, X^C (Nominal position) et X^M (Actual position) doivent être identiques pour avoir un robot idéal (Figure III.4).

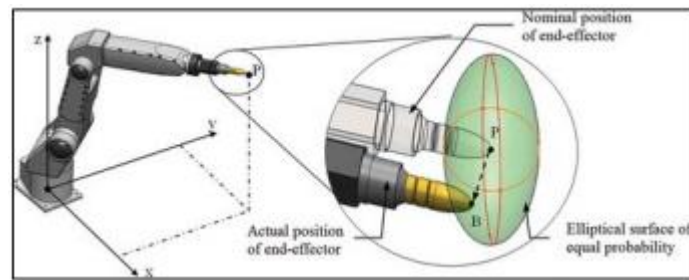


Figure III .4 : La position commande et la position réelle tirée de Hafezi (2015)

L'objectif de cette méthode est de trouver le vecteur réel ***vreal*** qui minimise les erreurs de pose.

$$\text{Erreur de pose} = X^M - X^C \quad (\text{III.2})$$

Avec X^C qui est exprimée en fonction des ρ_i (valeurs connues).

$$X^C = f(\mathbf{vreal}, \rho_i) \quad (\text{III.3})$$

III.4.1.2- Étalonnage par la méthode inverse

La deuxième méthode est plus compliquée. Elle utilise les équations MGI au lieu de MGD. Le but de cette méthode est de minimiser les erreurs des mouvements des articulations en utilisant une pose de référence connue X^R . Les coordonnées articulaires ρ_i^C sont calculées en fonction de X^R (valeurs connues) et des paramètres ***vreal*** (valeurs inconnues, à identifier) en utilisant les équations du MGI :

$$\rho_i^C = fct(\mathbf{vreal}, X^R) \quad (\text{III.4})$$

III.5-Description du robot FANUC M-710iC

D'ores et déjà, il faut préciser ici que nous utilisons des données des paramètres dans notre travail. Le robot manipulateur M-710iC (voir annexe), fabriqué par la société FANUC Robotics et qui est utilisé dans la chaîne de façonnage de verre de l'entreprise Alliance Glass. Il s'agit d'un robot manipulateur série à chaîne ouverte et simple, conçu pour être utilisé dans des applications industrielles. Ce manipulateur est constitué de :

- Sept corps supposés rigides notés ($C0 \dots C6$) et qui sont : le pied, l'épaule, le bras, le coude, l'avant-bras, le doigt et le porte-outil.
- Six articulations rotoïdes notées ($J1 \dots J6$) chacune étant actionnée par un servomoteur.

Ainsi, il dispose de six ddl ce qui fait que son fonctionnement est similaire à celui d'un bras humain. Le positionnement de l'organe terminal est réalisé grâce aux coordonnées des trois premières articulations « $J1, J2$ » et « $J3$ », qui permettent au robot de le déplacer dans n'importe quelle position. En revanche, son orientation est réalisée par les trois articulations à axes concourants « $J4, J5$ » et « $J6$ » qui forment un poignet rotule (voir Figure III.5), et avec lesquelles l'effecteur peut être manœuvré indépendamment.

III.5.1-Modélisation géométrique du robot FnuC 710iC/45

Afin de faciliter ultérieurement le processus de modélisation dynamique et ses calculs, il est nécessaire de commencer par une étape de modélisation géométrique des différents composants du robot. Pour réaliser cette phase, la convention DHM a été choisie. Ce choix s'est porté sur cette méthode car comme indiqué dans le chapitre précédent, elle reste la méthodologie la plus répandue pour la modélisation géométrique des robots à structure ouverte simple. Cette approche se base sur des règles bien définies et précises. Tout d'abord, elle commence par l'attribution d'un repère orthonormé à chaque articulation comme le montre la Figure III.5, suivie par la sélection des quatre paramètres géométriques (à reformuler) α_j , d_j , θ_j et r_j comme illustré sur le Tableau III.1. Ensuite, partant de ces dernières étapes les matrices de transformation homogènes qui décrivent les différents compartiments du robot pourront être élaborées, sur la base de la matrice de transformation homogène définie par la convention DHM et mentionnée dans le chapitre précédent (voir équation (II.7)).

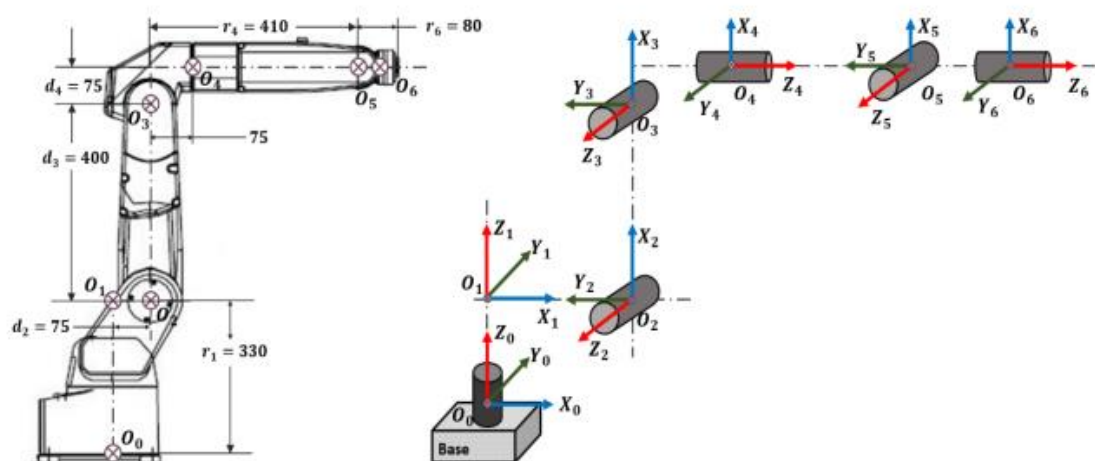


Figure III.5: Représentation symbolique du robot FANUC

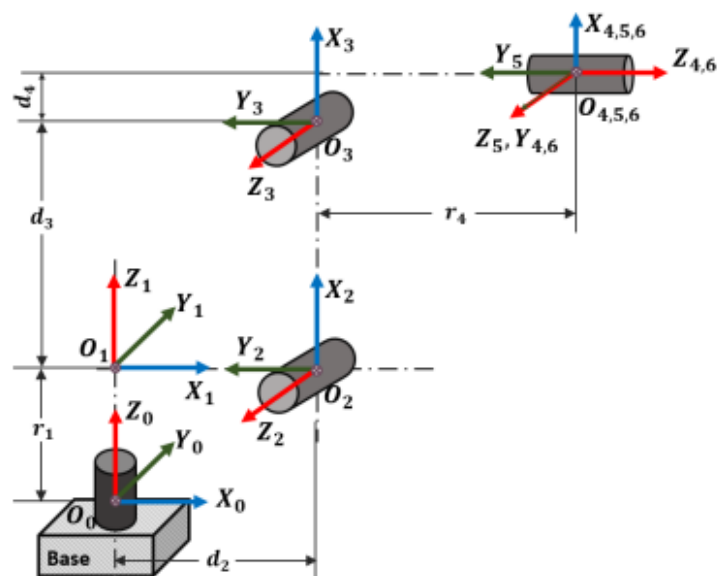


Figure III.6 : Représentation symbolique du robot FANUC avec des axes concourants

Tableau III-1 : Paramètres géométriques du robot FANUC

Articulation	α_j	d_j	θ_j	r_j
1	0	0	θ_1	0
2	$\pi/2$	75 mm	$\theta_2 + \pi/2$	0
3	0	400 mm	θ_3	0

4	$\pi/2$	75 mm	θ_4	410 mm
5	$-\pi/2$	0	θ_5	0
6	$\pi/2$	0	θ_6	0

$$\begin{aligned}
T_1^0 &= \begin{pmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & ; & T_2^1 = \begin{pmatrix} -\sin \theta_2 & -\cos \theta_2 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
T_3^2 &= \begin{pmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & d_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & ; & T_4^3 = \begin{pmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & -1 & -r_4 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
T_5^4 &= \begin{pmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_5 & -\cos \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & ; & T_6^5 = \begin{pmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{III.5}$$

En revanche, lorsque la finalité de cette modélisation géométrique est l'identification des relations qui décrivent la situation de l'effecteur en fonction des variables articulaires, il est nécessaire de calculer la matrice T_6^0 comme le montre l'équation suivante :

$$T_6^0 = T_1^0 \cdot T_2^1 \cdot T_3^2 \cdot T_4^3 \cdot T_5^4 \cdot T_6^5 = \begin{pmatrix} (A_6^0)_{3 \times 3} & (P_6^0)_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{pmatrix} \tag{III.6}$$

Dans ce cas, la matrice A_6^0 et le vecteur P_6^0 présentent respectivement par rapport au repère R_0 l'orientation de l'effecteur du robot ainsi que les trois coordonnées cartésiennes qui décrivent sa position.

III.6-ALGORITHME Cellule robotisée

1. Début

2. Initialisation des Positions et États

- PositionRobot = "Position de calibrage"
- Plateau Tournant Vide = FAUX
- CNC_Vide = [VRAI, VRAI, VRAI]

3. Boucle Principale : Tant que Plateau Tournant Vide = FAUX

- **Déplacement vers le plateau tournant**
 - Déplacer Vers (PositionRobot, "Position du plateau tournant")
- **Chargement du verre**
 - Charger Verre ()
- **Trouver une CNC vide**
 - CNC_Index = Trouver CNC Vide (CNC_Vide)
 - Si CNC_Index ≠ NIL
- **Transfert du verre vers CNC vide**
 - Déplacer Vers (PositionRobot, "Position CNC " + CNC_Index)
 - DeposerVerre()
 - CNC_Vide [CNC_Index] = FAUX
- **Retour au plateau tournant**
 - Déplacer Vers (PositionRobot, "Position du plateau tournant")
 - Sinon
 - Attendre CNC Vide ()
- **Vérifier si une CNC a terminé**
 - CNC_Terminee_Index = Verifier CNC Terminee ()
 - Si CNC_Terminee_Index ≠ NIL
 - Déchargement du verre de la CNC vers le convoyeur d'évacuation
 - Déplacer Vers (PositionRobot, "Position CNC " + CNC_Terminee_Index)
 - Charger Verre ()

- Déplacer Vers (PositionRobot, "Position du convoyeur d'évacuation")
 - Déposer Verre ()
 - CNC_Vide [CNC_Terminee_Index] = VRAI
 - **Vérifier si le plateau tournant est vide**
 - PlateauTournantVide = VerifierPlateauVide()
 - 4. **Retour à la position initiale**
 - Déplacer Vers (PositionRobot, "Position de calibrage")
 - 5. **Fin**
-

Sous-fonctions ajouté :

1. **Déplacer Vers (Position Actuelle, Nouvelle Position)**
 - Afficher "Déplacement de " + Position Actuelle + " vers " + Nouvelle Position
 - Retourner Nouvelle Position
2. **Charger Verre ()**
 - Afficher "Chargement du verre via des ventouses"
3. **Déposer Verre ()**
 - Afficher "Dépôt du verre"
4. **Trouver CNC Vide (CNC_Vide)**
 - Pour i de 0 à Taille (CNC_Vide) - 1
 - Si CNC_Vide[i] = VRAI
 - Retourner i
 - Retourner NIL
5. **Attendre CNC Vide ()**
 - Afficher "Attente d'une machine CNC vide"
 - Pause (5000) (Simuler l'attente de 5 secondes)
6. **Verifier CNC Terminee ()**
 - (Simulation de la vérification si une CNC a terminé)
 - Retourner NIL
7. **Vérifier Plateau Vide ()**

- (Simulation de la vérification si le plateau tournant est vide)
- Retourner FAUX

III.7- Conclusion

En conclusion, ce chapitre a présenté de manière exhaustive les différentes techniques de programmation des robots FANUC, ainsi que les méthodes d'étalonnage essentielles pour garantir leur précision. La distinction entre la programmation en ligne et hors-ligne montre l'évolution et l'adaptation des technologies robotiques pour répondre aux besoins industriels croissants. L'intégration de nouvelles trajectoires et l'utilisation de logiciels avancés comme RoboDK démontrent l'importance de la simulation virtuelle dans l'amélioration de l'efficacité et de la sécurité des opérations robotiques. La description détaillée du robot FANUC M-710iC et sa modélisation géométrique illustrent l'approche méthodique nécessaire pour exploiter pleinement le potentiel de ces machines dans des environnements industriels complexes.

Conclusion générale

Il est évident que la robotique joue un rôle essentiel dans la modernisation et l'efficacité des industries contemporaines. Le troisième chapitre de notre mémoire a traité en profondeur de la programmation et du choix du robot pour l'application industrielle choisie au sein de l'entreprise Alliance Glass. Nous avons focalisé notre attention sur le chargement et le déchargement des verres, une tâche effectuée par le robot cylindrique FANUC M-710iC/45, équipé d'un outil à vide pour les opérations de prise et de dépose. Cette application pratique illustre parfaitement l'importance et l'impact de la robotique industrielle dans les processus de production modernes.

Ce mémoire a exploré de manière exhaustive l'intégration des nouvelles trajectoires des robots FANUC dans les processus de production d'Alliance Glass. Les différentes techniques de programmation, tant en ligne qu'hors ligne, ainsi que l'utilisation de logiciels de simulation avancés comme RoboDK, ont été présentées comme des outils essentiels pour améliorer l'efficacité et la sécurité des opérations robotiques. La description détaillée du robot FANUC M-710iC et sa modélisation géométrique démontrent l'approche méthodique nécessaire pour maximiser le potentiel de ces machines dans des environnements industriels complexes. Grâce à cette intégration, Alliance Glass est bien positionnée pour maintenir sa compétitivité et continuer à innover dans l'industrie du verre plat, renforçant ainsi sa position sur le marché mondial.

Au demeurant, la robotique représente une opportunité majeure pour la transformation industrielle, particulièrement en Afrique. En diffusant les connaissances et en développant des compétences locales en programmation et en robotique, nous pouvons catalyser une adoption plus large et plus efficace de ces technologies. Cela non seulement optimisera les processus industriels, mais permettra également aux industries africaines de rivaliser sur le plan technologique à l'échelle mondiale. La programmation hors-ligne des robots est une étape clé vers une automatisation plus efficace et un avenir industriel prometteur, ouvrant la voie à une industrialisation avancée et à une compétitivité globale renforcée.

Reference bibliographie

- [1] Al-Mashhadani, R., & Al-Shibaany, Z. Y. (2015). "Programmation hors ligne et simulation de robots industriels pour une application de soudage". *Journal of Automation and Control Engineering*, 3(4), 305-309. DOI: 10.12720/joace.3.4.305-309.
- [2] Driels, M. R., & Pathre, U. S. (1990). "Étalonnage des robots à l'aide de systèmes de suivi laser". *Journal of Robotic Systems*, 7(2), 201-226. DOI: 10.1002/rob.4620070208.
- [3] Fanuc Robot Forum. "Aide pour la Programmation du FANUC M-710iC 50". Récupéré de Robot Forum.
- [4] Hollerbach, J. M., & Wampler, C. W. (1996). "L'indice d'étalonnage et le rôle des joints partiellement contraints dans l'étalonnage des robots". *The International Journal of Robotics Research*, 15(6), 573-591. DOI: 10.1177/027836499601500602.
- [5] Hollerbach, J. M., Khalil, W., & Gautier, M. (2008). "Identification de modèle". Dans B. Siciliano & O. Khatib (Éds.), *Manuel de Robotique Springer* (pp. 321-344). Springer. DOI: 10.1007/978-3-540-30301-5_15.
- [6] Joubair, A., & Bonev, I. A. (2012). "Étalonnage cinématique d'un robot industriel FANUC Lr Mate 200iC". *Actes de la conférence internationale ASME 2012 sur l'ingénierie du design et les ordinateurs et informations en ingénierie*, 1, 767-775. DOI: 10.1115/DETC2012-70837.
- [7] Pfeifer, M., Eberhardinger, A., & Verl, A. (2017). "Programmation hors ligne de robots dans des applications industrielles". *Procedia CIRP*, 61, 376-381. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.245.
- [8] Riesenberger, M. & Ritter, T. (1998). "The Float Glass Process". *Glass Science and Technology*, 71(8), 170-177. DOI: 10.1016/S0022-3093(99)00054-9.
- [9] Shelby, J. E. (2005). *Introduction to Glass Science and Technology*. Royal Society of Chemistry. ISBN: 978-0854046393.
- [10] Schmidt, G., & Conrad, F. (1987). "Étalonnage des robots : méthodes et expériences". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 3(3-4), 199-212. DOI: 10.1016/0736-5845(87)90043-7.

[11] Surdilovic, D., & Stengel, K. (2003). "Développement et contrôle du manipulateur à joint flexible pour robots industriels". *Control Engineering Practice*, 11(3), 259-267. DOI: 10.1016/S0967-0661(02)00118-2.

[12] Sheng, W., & Xi, N. (2006). "Modélisation et contrôle d'un robot industriel à 6 DDL avec capteurs de couple aux articulations". *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 11(4), 516-524. DOI: 10.1109/TMECH.2006.883294

[13] Shafiq, M., Zhang, Y., & Tang, D. (2016). "Planification et contrôle de trajectoire d'un robot industriel pour l'impression 3D en utilisant des logiciels open source". *Procedia CIRP*, 56, 241-246. DOI: 10.1016/j.procir.2016.10.044.

Annexe

I-Sécurité et mise en œuvre

La sécurité est primordiale lors de la programmation des robots. Des procédures strictes doivent être suivies pour éviter les accidents.

Avant de démarrer un programme, il est essentiel de vérifier les zones de sécurité, les limites de mouvement et les collisions potentielles.

Pour les robots industriels, la sécurité est une nécessité absolue.

Les robots utilisés dans l'industrie nécessitent souvent une intervention humaine. Il peut s'agir de maintenance, de programmation ou d'approvisionnement cellules.

Il est crucial de garantir que l'intervention humaine soit totalement sûre comme tout équipement de production, le système robotique doit donc répondre aux exigences

Les points de sécurité deviennent obligatoires conformément à la directive européenne 2006/42/CE.

Zone protégée par une enceinte de protection

Accès restreint (ex. : mode de marche)

- Protéger l'utilisateur du danger potentiel du robot en mouvement.
- Former chaque utilisateur aux risques et aux consignes de sécurité

L'évaluation des risques

Il faut définir quelles fonctions de sécurité sont nécessaires pour réduire les risques :

- ✚ Empêcher durablement l'accès ;
- ✚ Empêcher temporairement l'accès ;
- ✚ Retenir des pièces (matériaux/ rayonnements) ;
- ✚ Déclencher l'arrêt ;
- ✚ Empêcher le démarrage ;
- ✚ Empêcher un démarrage intempestif ;
- ✚ Déclencher l'arrêt et empêcher le démarrage ;

- ✚ Distinguer les personnes des matériaux ;
- ✚ Surveiller les paramètres de la machine ;
- ✚ Neutraliser les fonctions de sécurité manuellement et temporairement ;
- ✚ Combiner ou alterner des fonctions de sécurité.



Figure 1 : Zone protégée par une enceinte de protection

II- Mesures techniques de protection :

Tant que la machine fonctionne, il n'est pas possible d'accéder à une zone dangereuse. Une fois qu'une demande d'arrêt standard est effectuée, l'accès sera bloqué.

Après une demande d'arrêt normal, le blocage de l'accès est levé dès que la machine est en sécurité. Dans les cas où une machine est capable d'éjecter des matériaux ou d'émettre des rayonnements, l'utilisation de mesures de protection physique devient impérative afin de prévenir tout dommage potentiel.

Un exemple de mesure d'atténuation des risques est l'utilisation d'un capot de protection équipé d'une fenêtre unique qui empêche efficacement toute projection potentielle d'éléments.

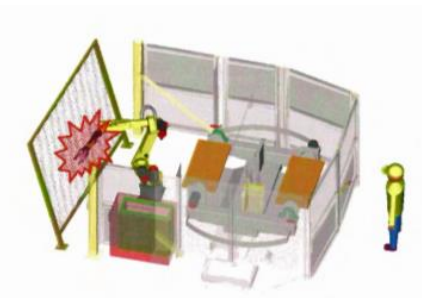


Figure2 : une zone d'accès dangereuse

Une fonction d'arrêt de sécurité met la machine dans un état sûr suite à une requête (par ex. approche d'une personne).

- Ouverture d'une porte de protection avec dispositif sans inter-verrouillage
- Coupure des faisceaux d'une barrière électronique de sécurité protégeant l'accès à la machine.



Figure3 : Mesures techniques de protection

Les dernières évolutions des normes (EN 10218-1, EN 10218-2, EN 13849) autorisent des solutions nouvelles de sécurité.

La solution logicielle intelligente intégrée en option par FANUC, DCS (Dual Check Safety), est conçue pour garantir la sécurité totale des opérateurs, des machines et des outils. Elle évite, d'investir dans des équipements de sécurité coûteux et encombrants et réduit au minimum l'espace requis pour les cellules robotisées.

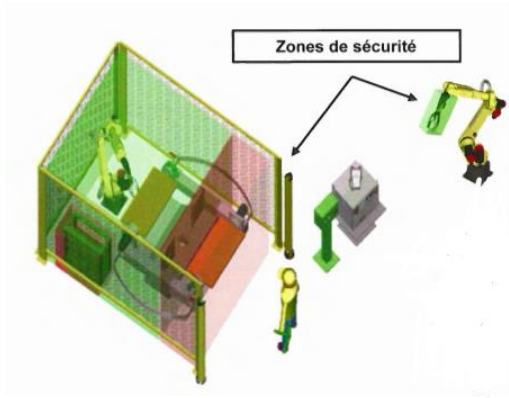


Figure 4: Zone de sécurité

III-Environnement de programmation

Le teach pendant (iPendant) est l'interface principale pour la programmation des robots FANUC (voir la figure III.18). Il permet de créer, modifier, tester et exécuter des programmes directement sur le robot.

L'iPendant offre une interface conviviale avec des menus, des icônes et des options pour gérer les mouvements, les entrées/sorties et les paramètres.



Figure 5 : Le teach pendant

III.1-Généralité sur l'affichage des Menus

Les touches MENU et FCTN permettent d'atteindre les Menus de Setup ou de Status du robot. Il n'existe pas de page de garde pour atteindre tel ou tel menu.

Tous les menus sont atteignables à partir de n'importe quel autre menu.

Les touches F1 à F5 permettent de naviguer dans les fonctionnalités associées à chaque menu.

La touche NEXT permet de naviguer d'afficher de nouvelles fonctionnalités associées aux touches F1 à F5.

Pour accéder au menu, suivez ces étapes : 1°) Appuyez sur la touche MENU. 2°) Naviguez avec le curseur jusqu'au titre du menu souhaité et survolez-le pour faire apparaître les options du menu. Pour afficher un sous-menu, appuyez sur la touche ENTRÉE ou entrez le numéro associé à l'élément de menu souhaité. Pour accéder à un sous-menu, appuyez sur la touche F1 [TYPE] et positionnez le curseur sur le titre du sous-menu, puis appuyez sur la touche ENTER.

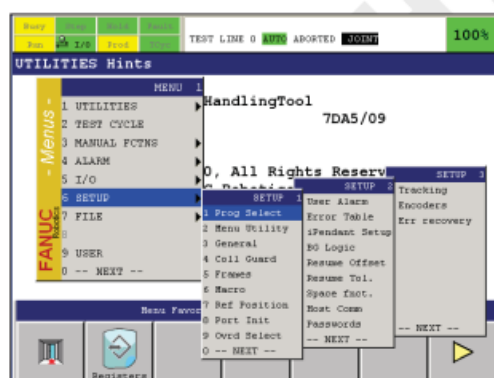


Figure 6 : Afficher un Menu

Le « Teach Pendant » est composé des touches suivantes :

➤ **Touches relatives aux menus**

F1 F2 F3 F4 F5 Les touches fonctions (F) sélectionnent le menu en bas de page de l'écran.

NEXT La touche NEXT permet d'aller à la page suivante du menu en fonction de l'écran.

MENUS FCTN La touche MENUS affiche l'écran menu & La touche FCTN affiche le menu fonction.

SELECT EDIT DATA -La touche SELECT affiche l'écran de sélection des programmes.

-La touche EDIT affiche l'écran d'édition de programme.

-La touche DATA affiche l'écran des données de programme.



- La touche DISP permet de changer la fenêtre active.

- La touche DISP + touche SHIFT permet de changer le mode d'affichage (fenêtres) - (uniquement sur iPendant).



-La touche HELP permet d'afficher une fenêtre d'aide sur la fenêtre active.

-La touche DIAG + SHIFT affiche les informations de diagnostics concernant une erreur active ou sélectionnée dans le menu Alarm (uniquement sur iPendant).



La touche STATUS affiche l'écran des statuts du robot.



La touche I/O affiche l'écran des entrées/sorties.



La touche affiche l'écran de la position courante (ou l'affichage 4D avec un contrôleur R30iB).

➤ Touches relatives aux mouvements du robot



Les touches de mouvement sont effectives tant que la touche SHIFT est pressée. Elles sont utilisées pour les mouvements robot.



Les touches override ajustent la vitesse. Chaque fois qu'une de ces touches est pressée, cela incrémente ou décrémente la vitesse robot de 5 en 5% (voir chapitre A2.3 Variables système).



La touche coordonnée permet de sélectionner le mode de déplacement.

actif. La touche COORD + touche SHIFT, le menu pour changer de repère actif apparaît.



La touche SHIFT est utilisée pour exécuter un mouvement avec le robot en manuel, apprendre une position et démarrer un programme.



La touche GROUP est utilisée pour changer le groupe de mouvement actif (robot ou axe auxiliaire associé à un group 2,3,n...)

➤ Touches relatives à l'exécution



Les touches FWD ou BWD + touche SHIFT démarrent le programme en cours à la position courante du curseur. Le relâchement de la touche SHIFT provoque un Pause programme.



La touche HOLD provoque une pause du programme.



La touche STEP permet l'exécution en mode pas à pas ou en continu du programme.

➤ Touches relatives à l'édition



Le pavé directionnel déplace le curseur dans l'écran. Les touches du pavé + touche SHIFT permet un saut de plusieurs lignes.



La touche ITEM déplace le curseur à la ligne dont le numéro est spécifié.



La touche BACK SPACE efface le caractère ou le nombre à gauche du curseur.



La touche ENTER permet de valider des valeurs numériques ou de sélectionner un menu.



La touche PREV revient à la page précédente mais ne permet pas de changer de menu.

➤ Barre de Status

La barre d'état joue un rôle important dans le fonctionnement du robot. Il donne des informations sur ce qui se passe avec le robot et son fonctionnement. Sur le côté droit, il peut inclure :

- Mode de navigation de la souris et niveau de zoom qui vous permettent d'ajuster la façon dont le robot voit son environnement.
- Les informations sur l'utilisation des commandes sont affichées via une fenêtre contextuelle et une barre d'état : informations d'utilisation à double affichage.
- Certains des ateliers disponibles incluent Std Base, Arch, Assembly, CAM, Draft, FEM, Inspection, Mesh, OpenSCAD, PartDesign, Points, Reverse Engineering, Robot, Sketcher, Spreadsheet, Surface... et plus encore..

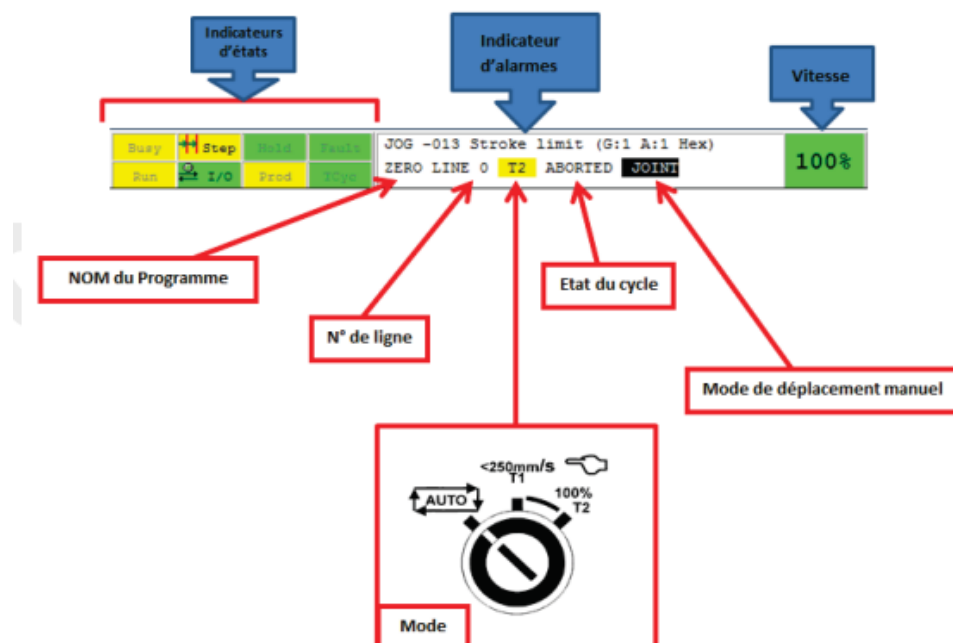


Figure 7: Barre de Status

III.1- Déplacement du robot en mode apprentissage

Le déplacement du robot consiste à déplacer les axes du robot en actionnant les touches du teach pendant. Cela signifie que le robot est contrôlé manuellement en utilisant les touches du teach pendant pour déplacer les axes du robot. Deux éléments affectent la façon dont le robot se déplace :

➤ Le mode de déplacement

Il existe différents modes de déplacement :

▪ Déplacement axe par axe JOINT

Le déplacement axe par axe JOINT est un concept qui concerne la mise en place d'un joint entre deux axes pour permettre un mouvement de rotation ou de translation.

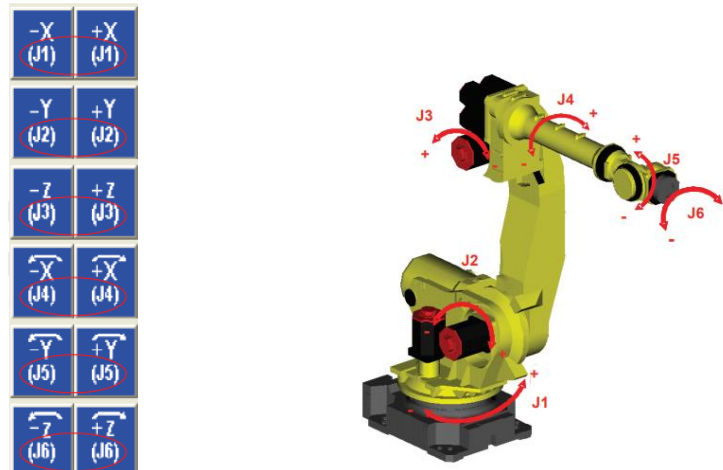


Figure 8 :Déplacement axe par axe JOINT

• Déplacement dans le repère universel WORL

Pour que l'opérateur puisse déplacer le TCP (Tools Center Point) en suivant les directions du marqueur mondial à l'aide des touches Teach Pendant, il doit suivre ces étapes :

Le processus de détermination de l'emplacement du TCP implique les opérations suivantes : Lorsque le TCP n'est pas situé directement le long de l'axe Z, obtenez des mesures de la distance entre le TCP et le centre de la flèche de l'outil le long des axes X, Y et Z (en millimètres). Enregistrez ces mesures dans leurs champs correspondants : X pour la première mesure, Y pour la deuxième et Z pour la troisième.

Le Teach Pendant est utilisé pour guider le TCP en alignement avec les indications du marqueur Monde. Diverses directions peuvent être obtenues en manipulant les touches du Teach Pendant pour déplacer le TCP. Après le déplacement, assurez-vous que la position TCP est exacte et approuvez-la comme nouvel emplacement.

Il convient de mentionner que si des points sont extraits du robot à l'aide d'un Teach Pendant, toutes les erreurs liées à l'étalonnage TCP seront transmises lors de l'étalonnage de la position du plateau tournant.

L'opérateur déplace le TCP (Tools Center Point ou Centre outils) suivant les directions du Repère WORLD, via les touches du « Teach Pendant ».

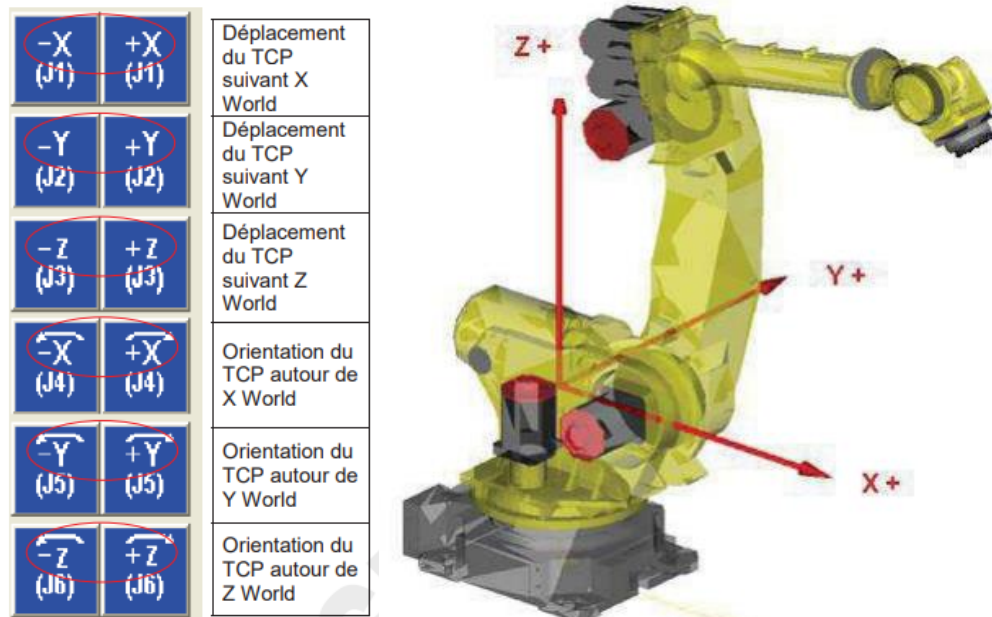


Figure 9 : Déplacement dans le repère universel WORL

- **Déplacement dans un repère utilisateur TOOL**

L'action de transférer un robot FANUC 710iC/45M vers un référentiel d'outils TOOL aide à établir les coordonnées du robot-outil (TCP) dans le référentiel TOOL. Enregistrement des outils : les robots sont enregistrés sous forme de registre dans le contrôleur FANUC (UTOOL), ce qui vous permet de créer ou de modifier des outils robot (TCP, également connu sous le nom d'UTOOL dans la programmation des robots FANUC).

Les coordonnées ont leur place dans le lexique de l'automatisation : l'emplacement et l'orientation des points de coordonnées des outils du robot sont désignés par rapport à un

référentiel appelé référentiel d'outils TOOL. Il permet de définir où se situe l'outil du robot et comment il est orienté par rapport à un point de référence.

Programmation artistique en mouvement : le mouvement du robot FANUC, défini dans les paramètres du cadre d'outils TOOL, implique une danse complexe d'actions au sein des étapes de programmation. Ces étapes comprennent la définition des coordonnées de l'outil robot, la définition des valeurs de vitesse et d'accélération pour la trajectoire de mouvement et l'établissement de stratégies de récupération d'erreur ainsi que des moyens de traiter les demandes d'interruption de tâche.

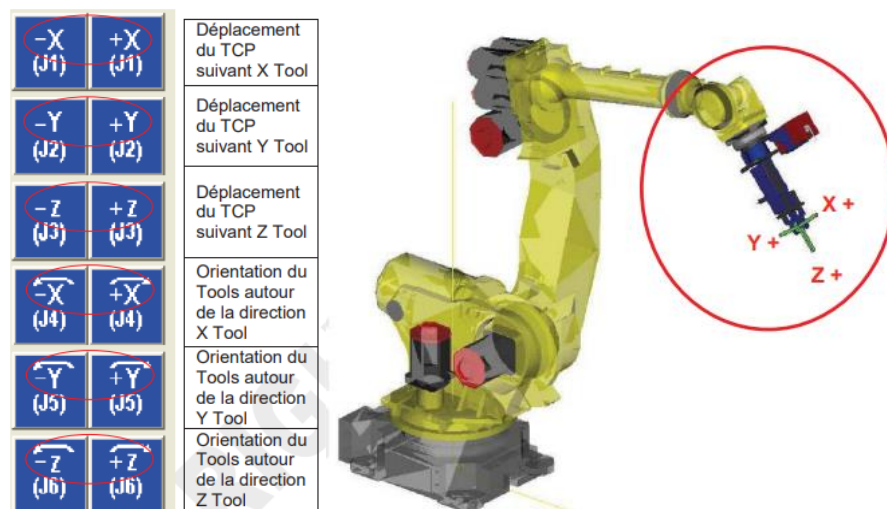


Figure 10 : Déplacement dans le repère TOOL

- **Déplacement dans un repère utilisateur USER**

Il semble que vous parliez de déplacements dans un repère utilisateur (USER) pour un robot.

Le repère utilisateur (USER) est un système de coordonnées spécifique défini par l'opérateur pour le robot. Il permet de déplacer le point central de l'outil (TCP) dans des directions personnalisées. L'opérateur peut sélectionner le repère USER via le « Teach Pendant » (le panneau de commande du robot). Chaque USER a ses propres directions, qui peuvent être différentes de celles du repère WORLD (par défaut). Lorsqu'aucun USER n'est enregistré, le robot utilise les directions du repère WORLD.

$-X$ (J1)	$+X$ (J1)	Déplacement du TCP suivant X User
$-Y$ (J2)	$+Y$ (J2)	Déplacement du TCP suivant Y User
$-Z$ (J3)	$+Z$ (J3)	Déplacement du TCP suivant Z User
$-X$ (J4)	$+X$ (J4)	Orientation du TCP autour de la direction X User
$-Y$ (J5)	$+Y$ (J5)	Orientation du TCP autour de la direction Y User
$-Z$ (J6)	$+Z$ (J6)	Orientation du TCP autour de la direction Z User

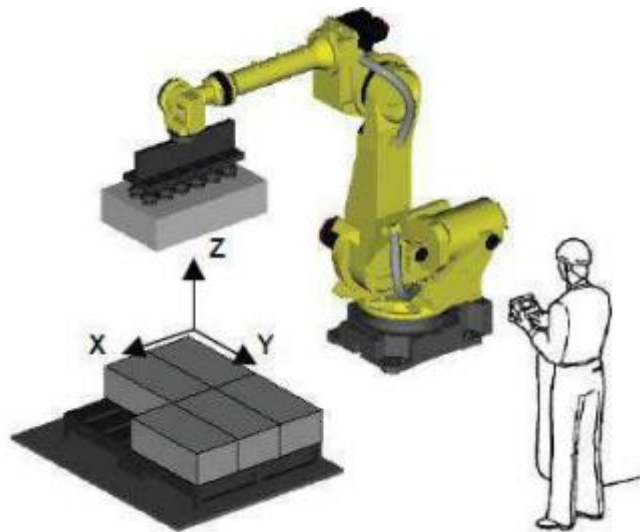


Figure 11 : Déplacement dans le repère USER

III.2-Vitesse de déplacement

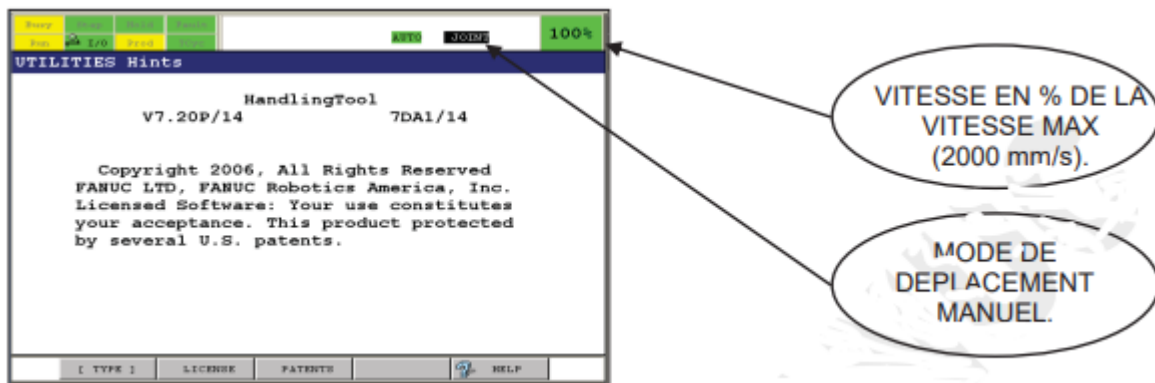
Le robot industriel FANUC M-710iC/45M est développé pour une vitesse élevée et une flexibilité, particulièrement destiné à être utilisé dans les applications de manutention.

En mode normal, le robot atteint une vitesse de déplacement de 1,5 m/s (5,5 km/h) ; en mode rapide, il peut atteindre une vitesse de 2,5 m/s (9 km/h).

De plus, démontrant une excellente flexibilité pour les opérations de manœuvrabilité, J1 a une capacité de rotation de 360 degrés avec une vitesse de rotation de 360°/s.

Une structure élancée et un petit poignet aident le robot à atteindre des vitesses élevées ; cette conception mince lui permet d'exceller dans les tâches où l'espace est limité tout en offrant une précision et des performances supérieures. De plus, le robot est doté d'un matériel de pointe parfaitement intégré à sa conception, ainsi que de plus de 250 fonctions logicielles qui fonctionnent à l'unisson pour fournir une puissance de sortie optimale tout en minimisant le gaspillage d'énergie.

Cette valeur est une valeur entière comprise entre 1 et 100%.



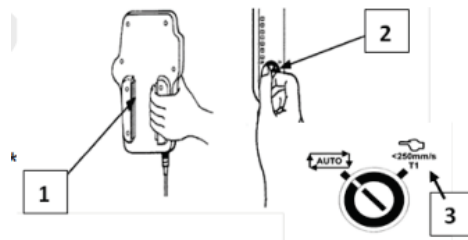
Figur12 :Sélection de la vitesse et du mode de déplacement

III.4- Processus de déplacement du robot via teach pendant

1. Maintenir « l'homme mort »
2. Activer le boîtier de programmation (Sélecteur ON/OFF sur ON)
3. Mode T1 (ou T2)
4. Acquitter les défauts (RESET)
5. Choisir un mode de déplacement par la touche COORD (JOINT – WORLD – TOOL – USER)
6. Sélectionner la vitesse appropriée en bouton vitesse
7. SHIFT + 1 touche de déplacement*

La combinaison de touches SHIFT + RESET est utilisée pour inhiber une erreur persistante.

La détection de collision n'est plus activée, il y donc un risque élevé de détérioration du matériel en cas de nouvelle collision.



La configuration du robot, autrement appelée configuration robotique, représente une notion clé dans le domaine de la robotique. Il délimite l'association qui existe entre les coordonnées cartésiennes d'un point de travail (appelé TCP ou Tool Center Point) par rapport à un utilisateur (USER) et les différentes positions angulaires du robot qui pourraient éventuellement s'aligner sur cette position cartésienne particulière.

En termes simples, les combinaisons de mouvements angulaires du robot définissent sa configuration. Ces différentes combinaisons de mouvements angulaires permettent au robot d'atteindre une position cohérente dans l'espace cartésien. Essentiellement, lorsque l'on considère une position cartésienne spécifique d'un point central d'outil (TCP) par rapport à un utilisateur, il existe plusieurs positions angulaires possibles du robot qui correspondent à ce même emplacement cartésien.

La configuration d'un robot est cruciale car elle détermine les actions que le robot entreprend pour se rendre à un certain endroit. Cette fonctionnalité est vitale pour la robotique, utilisée dans des applications telles que la manipulation, la fabrication et la maintenance de pièces.

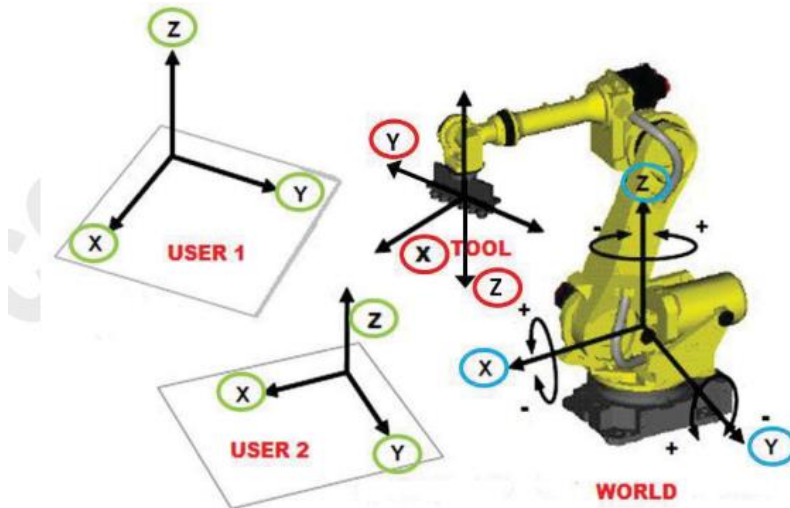


Figure 14 : Position du robot dans l'espace

III.5-Visualiser la position du robot dans l'espace

Pour visualiser la position du robot via le « Teach Pendant » en R30iA :

- 1°) Appuyer sur la Touche MENU
- 2°) Sélectionner l'item NEXT
- 3°) Sélectionner l'item POSITION

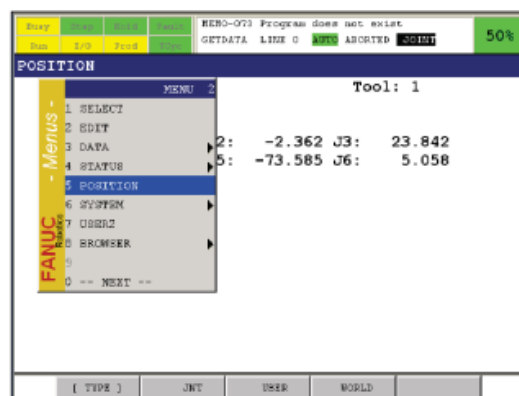


Figure 15 :Ecran de visualiser la position du robot dans l'espace

La position courante du robot peut s'afficher de manières différentes suivant le mode de représentation.

- F2 : JOINT : position axe par axe
- F3 : USER : Coordonnées cartésiennes du centre outil dans un repère utilisateur USER
- F4 : WORLD : Coordonnées cartésiennes du centre outil dans le repère universel WORLD

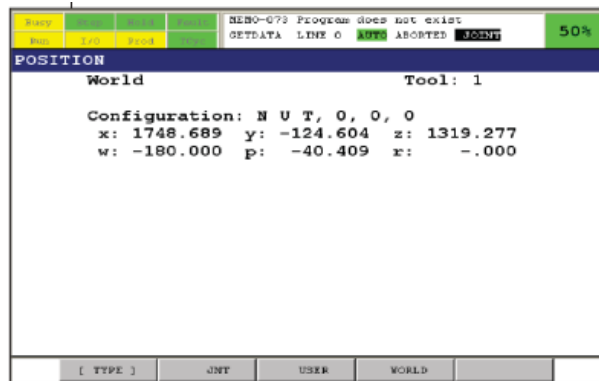


Figure 16 : Ecran d'affichage de visualisation des coordonnées cartésiennes du centre outil dans le repère universel WORLD

- en **JOINT** : Valeurs angulaires sur chaque axe (en degrés)
- en **Cartésien** : Coordonnées cartésiennes du repère outil ou Tool dans un repère USER.
 - **UT** ou **Tool** est le numéro du repère outil utilisé pour visualiser la position ou enregistrer un point
 - **UF** ou **Frame** est le numéro du repère USER utilisé pour visualiser ou enregistrer ce point.
 - **X, Y** et **Z** sont la localisation du TCP dans le repère USER
 - **W, P** et **R** sont les orientations du Tool dans le repère USER
 - **CONF** est la configuration du robot, par exemple NUT 0,0,0 :

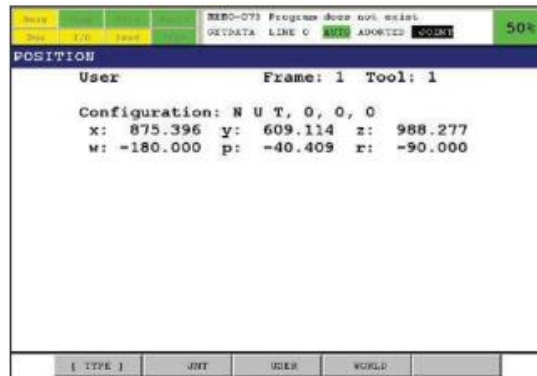


Figure 17 :Expression d'une position robot

IV.1-L'étalonnage d'un robot industriel (calibrage).

L'étalonnage d'un robot industriel est un processus critique pour garantir la précision et la fiabilité de son mouvement. Il s'agit de trouver les valeurs géométriques des éléments composant la structure d'un robot, incluant mais sans s'y limiter les décalages des codeurs et les paramètres cinématiques.

Objectifs de l'étalonnage

- Améliorer la précision du positionnement du robot
- Éliminer les erreurs de mouvement ou les vibrations qui entraînent des dommages
- Garantir la fiabilité et la durée de vie du système robotisé
- Assurer la précision opérationnelle par d'autres processus de production tels que l'alimentation des matériaux.

IV.2-Vérification de calibrage

La calibration associe les angles de chaque axe avec les valeurs des codeurs absolus qui leur sont associés. La calibration est une opération qui permet d'obtenir les valeurs codeurs correspondant à la position zéro.

La position courante du robot est déterminée par la valeur codeur renvoyée (par axe).

La calibration est effectuée en usine : les données du robot (y compris données de calibration) et les signaux codeurs sont préservés par les piles lorsque le contrôleur est éteint. Il est inutile de faire une calibration quotidiennement.

Les données peuvent être perdues si les piles sont usées et que le contrôleur est éteint.

IV.3-Les batteries de sauvegarde de la position codeur :

Les positions absolues de chaque axe du robot ainsi que la position d'initialisation sont consignées dans les codeurs absolus montés sur chaque moteur. Ces informations sont conservées grâce à l'alimentation de l'armoire de puissance ou par des piles en cas d'arrêt de celle-ci. Si les 2 sources sont coupées, l'information absolue des codeurs est perdue. Les batteries sont des piles du type alcaline 1.5V du commerce et sont à changer tous les ans. Le changement doit se faire impérativement avec l'armoire de contrôle sous tension.

Procédure :

1. mettre l'armoire sous tension,
2. appuyer sur le bouton d'arrêt d'urgence pour prévenir tous mouvements du robot,
3. enlever le couvercle du boîtier de piles,
4. enlever les piles usagées et les remplacer (attention à la polarité),
5. remettre le couvercle

Si l'alimentation est coupée, le remplacement de piles provoque une perte de la donnée de position courante. Une calibration sera donc nécessaire.

Une calibration est nécessaire après :

- un remplacement de moteur
- un remplacement de codeur
- un remplacement de réducteur
- un remplacement de câble
- si les piles de sauvegarde codeur sont usées.

Il existe 4 méthodes de calibrations différentes utilisables dans les conditions suivantes :

Perte des données de sauvegarde codeurs sans démontage de la cinématique des axes. Ex : Piles codeurs HS Changement de Faisceaux robot	CALIBRATION RAPIDE (QUICK MASTER) Attention : Cette méthode nécessite d'avoir acquis les références préalablement.
Démontage de la cinématique d'un seul axe. Ex : Changement d'un codeur Changement d'un servo moteur	CALIBRATION MONO AXE (SINGLE AXIS MASTER)
Démontage de la cinématique de plusieurs axes - Application peu précise. Ex : Démontage d'un poignet Démontage général du robot	CALIBRATION GENERALE RAPIDE (ZERO POSITION MASTER)
Démontage de la cinématique de plusieurs axes - Application précise. Ex : Démontage d'un poignet Démontage général du robot	CALIBRATION A L'OUTIL (FIXTURE POSITION MASTER)

IV.4-Procédure de vérification de la calibration d'un robot :

1. Positionner le robot (en JOINT) à 0° sur tous les axes.
2. Vérifier les repères de chacun des axes du robot (sur certains robots, ces repères sont facilement repérables, sur certains autres, plus discrets) :

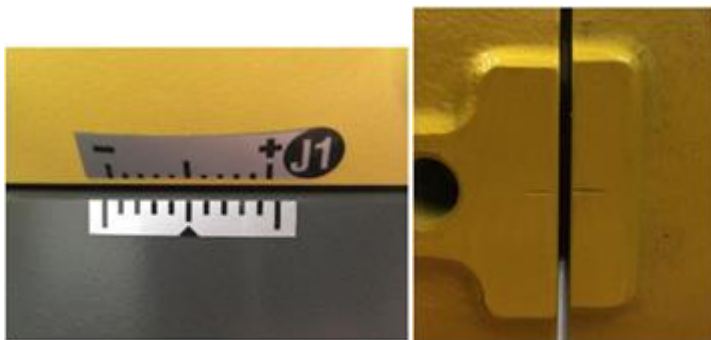


Figure 18 :vérification de la calibration d'un robot

3. S'assurer que ces derniers sont en face l'un de l'autre.

Dans le cas contraire, nous pouvons effectué d'autres étapes pour la recalibration du robot :

Accès au Menu de Calibration

1. Appuyer sur la touche MENU
2. Sélectionner l'item SYSTEM
3. Sélectionner l'item Master/cal

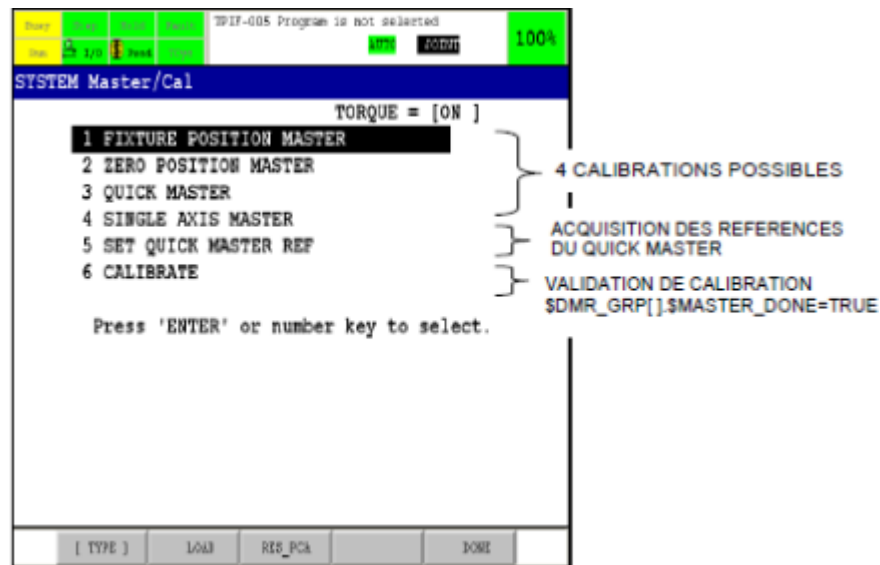


Figure19 : Description du Menu de Calibration

IV.5-Procédure générale de calibration

Quelle que soit la méthode de calibration choisie, la procédure globale reste identique, à savoir :

1. Positionner le robot à sa position de calibration
2. Sélectionner l'une des 4 calibrations et répondre « YES »
3. Faire « CALIBRATE » puis « YES »

Le robot se re-calibre au moment où l'on répond « YES » après avoir appuyé sur «CALIBRATE ».

IV.5-Position de référence de la Calibration Rapide (QUICK MASTER)

La position Quick Master Reference permet de re-calibrer rapidement le robot lors d'un défaut électrique sur un codeur ou si les piles de sauvegardes des valeurs codeurs sont H.S. La création des références du QUICK MASTER est à faire lorsque le robot est correctement calibré.

Procédure :

1. A l'aide d'un programme, amener le robot à la position de calibration souhaitée (la plupart du temps la position de référence est 0° sur tous les axes). Sinon enregistrer une position dans un programme et marquer la mécanique du robot à cette position.

Dans le menu de calibration :

2. Sélectionner « SET QUICK MASTER REF ».

3. Répondre « YES ».

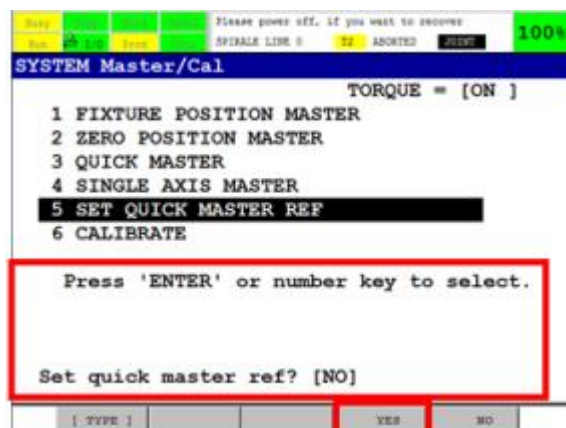


Figure 20 : Ecran de procedure de vérification de calibrage

V-Algorithmme du programme du robot

! Définition des points

P1 J1=0 J2=0 J3=90 J4=0 J5=0 J6=0 ; Position initiale du robot

P2 J1=180 J2=0 J3=90 J4=0 J5=0 J6=0 ; Position au-dessus du plateau tournant

P3 J1=180 J2=0 J3=90 J4=0 J5=0 J6=0 ; Position de charge du verre

P4 J1=180 J2=0 J3=90 J4=0 J5=0 J6=0 ; Position au-dessus de la machine CNC

P5 J1=180 J2=0 J3=90 J4=0 J5=0 J6=0 ; Position de déchargement du verre

! Déplacement vers le point P2 (au-dessus du plateau tournant)

MOVE P2

! Attente de confirmation de l'opérateur

WAIT FOR \$OPERATOR_CONFIRM

! Déplacement vers le point P3 (charge du verre)

MOVE P3

! Attente de confirmation de la charge (détection des ventouses)

WAIT FOR \$GLASS_LOADED

! Déplacement vers le point P4 (au-dessus de la machine CNC)

MOVE P4

! Déchargement du verre sur la machine CNC

ACTIVATE VACUUM ; Activer les ventouses

WAIT 2 ; Attendre 2 secondes pour la prise du verre

DEACTIVATE VACUUM ; Désactiver les ventouses

! Déplacement vers le point P5 (déchargement du verre)

MOVE P5

! Attente de confirmation de déchargement (détection de la machine CNC vide)

WAIT FOR \$CNC_EMPTY

! Retour à la position initiale

MOVE P1

! Fin du programme

END

Résumé

Ce mémoire explore l'intégration des nouvelles trajectoires du robot Fanuc M-710iC/45 dans le processus de production de feuilles de verre plate « Float » au sein de l'entreprise Alliance Glass. Il se compose de trois chapitres principaux : le premier présente l'organe d'accueil, incluant l'historique, l'activité de la société et le processus de fabrication des feuilles de verre. Le deuxième chapitre traite de la technologie des robots industriels, en particulier le robot Fanuc M-710iC et ses composants. Le dernier chapitre se concentre sur le programme d'intégration des nouvelles trajectoires du robot, décrivant le langage de programmation, la calibration et l'algorithme de fonctionnement. Le mémoire souligne l'importance de la robotisation pour améliorer la précision, la vitesse et la qualité de la production de verre, tout en offrant une analyse détaillée de la modélisation et de la programmation robotique.

Abstract

This thesis explores the integration of new trajectories for the Fanuc M-710iC/45 robot in the production process of "Float" flat glass sheets at Alliance Glass. It comprises three main chapters: the first presents the host organization, including its history, activities, and the glass sheet manufacturing process. The second chapter covers industrial robot technology, focusing on the Fanuc M-710iC robot and its components. The final chapter focuses on the integration program for the robot's new trajectories, detailing the programming language, calibration, and operating algorithm. The thesis emphasizes the importance of robotics in improving the precision, speed, and quality of glass production, providing a detailed analysis of robotic modeling and programming.

ملخص

في عملية إنتاج صفائح الزجاج المسطح Fanuc M-710iC/45 تستكشف هذه الأطروحة دمج مسارات جديدة لروبوت، تتكون الأطروحة من ثلاثة فصول رئيسية: يعرض الفصل الأول المنظمة المضيفة Alliance Glass في شركة "Float"، بما في ذلك تاريخها وأنشطتها وعملية تصنيع صفائح الزجاج. يغطي الفصل الثاني تكنولوجيا الروبوتات الصناعية، مع مكوناته. يركز الفصل الأخير على برنامج دمج المسارات الجديدة للروبوت Fanuc M-710iC التركيز على روبوت مع تفصيل لغة البرمجة والمعايرة والخوارزمية التشغيلية. تؤكد الأطروحة على أهمية الروبوتات في تحسين دقة وسرعة وجودة إنتاج الزجاج، وتقدم تحليلاً مفصلاً لنمذجة وبرمجة الروبوتات.