



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel
Spécialité : Maintenance de l'Automatisme et de l'Instrumentation

Thème

Conception d'un système automatisé pour
l'optimisation d'un équipement industriel

Présenté et soutenu publiquement par :

REHAB Abdallah
SARI MOHAMED Youcef Sedik Boumedien

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
A. HASSINI	Professeur	IMSI-Univ. D'Oran2	Président
A. MOULAI-KHATIR	M.C.A	IMSI-Univ. D'Oran2	Encadrant
H. BENAICHA	M.C.A	IMSI-Univ. D'Oran2	Examinatrice

Année 2025/2026

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce à Dieu le Tout-Puissant, qui nous a guidés et donnés la persévérance nécessaire pour mener à bien ce projet.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadrant, Monsieur MOULAI-KHATIR, pour sa confiance, sa disponibilité constante et ses orientations précieuses.

Nos vifs remerciements s'adressent également à la direction et à toute l'équipe de la SARL Machine Process pour leur accueil chaleureux, leur expertise technique et la mise à disposition de leurs équipements, qui ont été indispensables à la réussite de ce travail.

Enfin, nous remercions sincèrement les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail, ainsi que tout le corps enseignants de l'Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle (IMSI) pour la qualité de notre formation.

REHAB Abdallah

SARI MOHAMED Youcef Sedik Boumedien

Dedicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents,

*La deuxième cause de ma réussite après Dieu le
Tout-Puissant. C'est grâce à votre soutien inébranlable,
vos encouragements continus et vos innombrables
sacrifices que j'en suis arrivé là aujourd'hui.*

À ma soeur,

*Pour son aide précieuse et sa motivation constante lors
des épreuves les plus difficiles. Je t'en serai éternellement
reconnaissant.*

À ma famille paternelle et maternelle,

Pour leur présence et leur bienveillance.

*Enfin, je dédie ce travail à toutes les personnes qui m'ont
soutenu, de près ou de loin, tout au long de ces 17
années d'études : amis, professeurs et personnel
encadrant.*

Merci à toutes et à tous.

REHAB Abdallah

Dedicace

Je dédie ce modeste travail :

*À mes très chers parents, ma source d'inspiration
première après Dieu. Merci pour vos sacrifices, votre
soutien inébranlable et la confiance que vous m'avez
toujours témoignée. Vous êtes le pilier de ma réussite.
À mon frère et mes soeurs, pour votre présence précieuse.*

*Merci d'avoir été mes alliés et mes confidents, en
partageant mes joies et en apaisant mes doutes tout au
long de ce parcours.*

*À toute ma famille, pour votre bienveillance constante
et vos encouragements qui m'ont accompagné à chaque
étape.*

*Enfin, ma reconnaissance va vers mes professeurs et le
personnel encadrant qui, par leur savoir et leur
exigence, ont forgé ma compétence, ainsi qu'à mes amis,
pour les moments de solidarité qui ont rendu cette
aventure humaine si enrichissante.*

SARI MOHAMED Youcef Sedik Boumedien

Résumé

Ce mémoire présente la conception et la réalisation d'un système automatisé destiné à moderniser une rectifieuse plane conventionnelle (Monoprécis N° 11) en intégrant une commande basée sur un Raspberry Pi, des moteurs pas à pas et une interface Homme-Machine (IHM). L'objectif est d'améliorer la précision, la productivité, la sécurité et la fiabilité de l'équipement tout en réduisant les interventions manuelles. Le projet prend également en considération la possibilité d'intégrer des fonctionnalités IoT pour la supervision à distance et l'amélioration du suivi opérationnel du système.

Mots-clés : Automatisation industrielle, Rectifieuse conventionnelle, Raspberry Pi, IHM, Moteurs pas à pas, Supervision, Industrie 4.0.

Abstract

This thesis presents the design and implementation of an automated system aimed at modernizing a conventional surface grinding machine (Monoprécis N° 11) through the integration of a Raspberry Pi-based control unit, stepper motors, and a Human-Machine Interface (HMI). The main objective is to improve the machine's precision, productivity, safety, and reliability while reducing manual intervention. The project also considers the potential integration of IoT technologies to enable remote monitoring and enhance operational system supervision.

Keywords : Industrial Automation, Surface Grinding Machine, Raspberry Pi, HMI, Stepper Motors, Monitoring, Industry 4.0.

الملخص

تتناول هذه المذكرة تصميم وإنجاز نظام آلي يهدف إلى تحديث آلة تجليخ سطحية تقليدية 11 °N Monoprécis من خلال دمج وحدة تحكم تعتمد على Pi Raspberry ومحركات خطوة بخطوة وواجهة إنسان-آلة. ويتمثل الهدف الرئيسي في تحسين الدقة والإنتاجية والسلامة والموثوقية مع تقليل التدخل اليدوي في تشغيل المعدة. كما يأخذ المشروع بعين الاعتبار إمكانية دمج تقنيات إنترنت الأشياء (IoT) من أجل المراقبة عن بُعد وتحسين متابعة وتشغيل النظام.

الكلمات المفتاحية: الأتمتة الصناعية، آلة التجليخ السطحي، Pi, Raspberry وواجهة الإنسان والآلة ، المحركات الخطوية، المراقبة، الصناعة 4.0.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	2
Dédicace	3
Résumé	5
Introduction Générale	1
1 Concepts généraux de l'automatisation industrielle	3
1.1 Introduction	4
1.2 Système automatisé	4
1.2.1 Définition	4
1.2.2 Organisation fonctionnelle d'un système automatisé	5
1.2.2.1 Introduction	5
1.2.2.2 La chaîne d'information	5
1.2.2.3 La chaîne d'énergie	6
1.2.2.4 Le lien entre les deux chaînes	6
1.2.3 Organisation structurelle d'un système automatisé	7
1.2.3.1 Introduction	7
1.2.3.2 La Partie Opérative (P.O)	7
1.2.3.3 La partie commande (P.C)	11
1.2.3.4 La partie relation (P.R)	14
1.3 Avantages et inconvénients de l'automatisation industrielle	15
1.4 Conclusion	16
2 Présentation et analyse de l'équipement à automatiser	17
2.1 Introduction	18
2.2 Guide de l'équipement : la machine à rectifier	18
2.2.1 Définition	18
2.2.2 Les composants clés d'une rectifieuse conventionnelle manuelle	19
2.2.3 Principes de fonctionnement de la rectifieuse	22
2.2.4 Différents types de rectifieuses industrielles	23
2.2.5 Applications des rectifieuses dans toutes les industries	25

2.3	Comment les limites de l'équipement conventionnel freinent-elles la performance actuelle?	26
2.3.1	Problématique	26
2.3.2	Analyse des contraintes et faiblesses de la machine à rectifier	26
2.4	La transition vers les machines-outils à commande numérique	27
2.4.1	La machine-outil à commande numérique	27
2.4.2	Qu'est-ce que la rectification CNC?	27
2.4.3	Fonctionnement des rectifieuses à commande numérique	28
2.4.4	Principales différences entre la rectification CNC et la rectification conventionnelle	29
2.4.5	Évaluation économique des machines à commande numérique	30
2.5	La machine moderne : notre vision contre l'épuisement technique actuel . . .	31
2.5.1	Les Objectifs de notre recherche	32
2.6	Conclusion	33
3	Architecture Matérielle et Méthode d'Automatisation	34
3.1	Introduction	35
3.2	Architecture générale du système	35
3.2.1	Analyse hiérarchique	35
3.2.2	Principe de fonctionnement global	36
3.3	Unité de Commande : Raspberry Pi 4	36
3.3.1	Définition et présentation du Raspberry Pi 4	37
3.3.2	Architecture et ports du Raspberry Pi 4	38
3.3.3	Guide du port GPIO sur Raspberry Pi 4	39
3.3.4	Le système d'exploitation Raspbian	41
3.4	L'ensemble puissance : Architecture du système de motorisation	42
3.4.1	Qu'est-ce qu'un moteur pas à pas?	42
3.4.1.1	Définition	42
3.4.1.2	Construction de moteurs pas à pas	43
3.4.1.3	Types de moteurs pas à pas	43
3.4.2	Qu'est-ce qu'un pilote de moteur pas à pas?	45
3.4.2.1	Définition	45
3.4.2.2	Principe de fonctionnement d'un pilote de moteur pas à pas . .	45
3.5	Systèmes de protection contre les erreurs de positionnement	46
3.5.1	Interrupteurs de fin de course	46
3.5.2	Fonctionnement d'un interrupteur de fin de course	47
3.6	Validation expérimentale et essais préliminaires sur banc d'étude	47
3.7	Conclusion	49

4 Programmation, installation et supervision du système	50
4.1 Introduction	51
4.2 Périmètre industriel du projet	51
4.2.1 Présentation de l'entreprise	51
4.2.2 La rectifieuse plane MONOPRECIS N° 11	51
4.3 Développement de la logique de commande	53
4.3.1 Principes de la programmation industrielle	53
4.3.2 Python : Le choix évident pour ce projet	53
4.3.3 De la logique algorithmique à l'implémentation	54
4.3.3.1 Modélisation logique de l'algorithme	54
4.3.3.2 Développement et syntaxe du programme	56
4.4 Phases de transformation matérielle de l'équipement	61
4.4.1 Cinématique et transmission par vis à bille	61
4.4.2 Antégration des motorisation et supports d'axes	62
4.4.3 Mise en place des capteurs de fin de courses	63
4.4.4 Conception et intégration de l'armoire électrique	63
4.5 Conception de l'interface utilisateur et supervision du système (IHM)	65
4.5.1 Interface principale de contrôle et d'alarme	65
4.5.2 Interface des paramètres de configuration	66
4.5.3 Interface de commande manuelle (Jog)	67
4.5.4 Interface de positionnement des axes	68
4.6 Extension IoT : Supervision mobile et alertes en temps réel	69
4.7 Conclusion	70
Validation expérimentale et analyse des résultats	71
Conclusion Générale	75

TABLE DES FIGURES

1.1	Exemple d'un système automatisé.[11]	4
1.2	La chaîne d'énergie et la chaîne d'information.	5
1.3	La chaîne d'information.	5
1.4	La chaîne d'énergie.	6
1.5	Structure d'un système automatisé.	7
1.6	Moteur électrique .[19]	8
1.7	Vérin Pneumatique.[19]	8
1.8	Vérin hydraulique.[17]	8
1.9	Les distributeurs.[26]	9
1.10	Relais électromécanique .[17]	9
1.11	Contacteur.[24]	10
1.12	Différents types de capteurs et dispositifs de mesure .[26]	10
1.13	Les effecteurs.[26]	11
1.14	Structure de la partie commande.	11
1.15	Logique câblée.[26]	12
1.16	Automate Programmable Industriel.[20]	13
1.17	Microcontrôleur STM32.[26]	13
1.18	Ordinateurs Industriels.[26]	14
1.19	Composants de signalisation.[26]	14
1.20	Pupitre de commande .[20]	14
2.1	Rectifieuse conventionnelle manuel.[1]	18
2.2	Meule de rectification.[28]	19
2.3	Les axes X et Y.[28]	20
2.4	Table de travail.[28]	20
2.5	Refroidissement et Lubrification.[14]	21
2.6	Composants clés d'une rectifieuse.[28]	21
2.7	opération de rectification.[27]	22
2.8	opération de rectification plane.[9]	23
2.9	Rectifieuse cylindrique.[28]	24
2.10	rectification cylindrique.[9]	24
2.11	Rectification sans centre.[4]	25

2.12 Rectification par commande numérique.[21]	28
2.13 Comparaison de temps de rectification sur une machine conventionnelle et une machine CN.[2]	30
2.14 Domaine d'utilisation des machines-outils à commande numérique.[2]	31
3.1 Architecture Générale du Système.	35
3.2 Raspberry Pi 4 Model B (vue de face).[8]	37
3.3 Raspberry Pi 4 Model B (vue de derrière).[8]	38
3.4 Guide des éléments clés du Raspberry Pi 4.[18]	39
3.5 Schéma des broches du Raspberry Pi 4.[18]	39
3.6 Le système d'exploitation Raspbian.[8]	41
3.7 carte mémoire.[8]	41
3.8 Moteur pas à pas (Nema 23).[7]	42
3.9 Constitution interne d'un moteur pas à pas.[7]	43
3.10 Moteurs pas à pas hybrides.[16]	44
3.11 Pilote de moteurs pas à pas hybrides.[13]	45
3.12 Interrupteur de fin de course.[12]	47
3.13 Schéma de câblage	48
3.14 Banc d'essai expérimental pour la validation préliminaire de la chaîne de mo- torisation.	48
4.1 Logo de l'entreprise Machine Process.[23]	51
4.2 Rectifieuse plane MONOPRECIS N° 11. [23]	52
4.3 Organigramme du fonctionnement automatique de la machine.	55
4.4 Repérage des axes de déplacement sur le brut en acier plat.	56
4.5 Transmission par vis à bille	61
4.6 Dispositif de motorisation pas-à-pas et réduction par courroie crantée	62
4.7 mise en place des capteurs de fin de courses	63
4.8 De la conception au montage de l'armoire électrique	64
4.9 L'architecture du câblage.	64
4.10 Interface Homme-Machine (IHM).	65
4.11 Interface principale de contrôle et d'alarme.	66
4.12 Interface des paramètres de configuration.	67
4.13 Interface de commande manuelle (Jog).	68
4.14 Interface de positionnement des axes.	69
4.15 Interface de supervision mobile et réception des alertes.	70
4.16 Opération de rectification réelle	71
4.17 Comparatif des temps de cycle : mode manuel vs mode automatique	72

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Avantages et inconvénients de l'automatisation. [22]	16
2.1	Segmentation du marché des machines à meuler par secteurs critiques.[15] . .	25
2.2	Différences majeures entre la rectification CNC et la rectification traditionnel [4]	29
2.3	Répartition stratégique de nos objectifs	33
3.1	Spécifications des ports d'extension. [3]	40
4.1	caractéristiques techniques de la rectifieuse	53
4.2	Critères de choix du langage Python pour le projet	54
4.3	Comparaison structurée : mode manuel vs mode automatique	72
4.4	Évaluation de l'atteinte des objectifs du projet	73

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

API	<i>Automate Programmable Industriel</i>
CNC	<i>Computer Numerical Control (Commande Numérique par Calculateur)</i>
CN	<i>Commande Numérique</i>
IHM	<i>Interface Homme-Machine</i>
IoT	<i>Internet of Things (Internet des Objets)</i>
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
PC	<i>Partie Commande</i>
PO	<i>Partie Opérative</i>
PR	<i>Partie Relation</i>
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
GPIO	<i>General Purpose Input Output</i>

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Au cours des dernières décennies, l'industrie mondiale a connu une transformation profonde sous l'impulsion de **l'automatisation industrielle**. Cette évolution répond à des impératifs croissants de qualité, de flexibilité et de productivité, touchant tous les domaines de l'activité, de la production à la maintenance. Dans ce paysage technologique en mutation, la **précision** est passée du statut d'avantage compétitif à celui de nécessité absolue, particulièrement dans la fabrication de composants critiques pour les secteurs de l'aérospatiale ou de l'automobile.

La **rectification**, étape ultime de l'usinage de précision, joue un rôle fondamental en permettant d'atteindre des tolérances dimensionnelles extrêmement fines et des états de surface parfaits. Cependant, de nombreux ateliers exploitent encore des équipements conventionnels, tels que la **rectifieuse plane Monoprécis N° 11**. Bien que robuste et fiable sur le plan mécanique, cet équipement à commande manuelle présente aujourd'hui des limites majeures, sa précision dépend étroitement de l'expérience de l'opérateur, sa productivité reste faible en raison des réglages manuels constants et elle manque de dispositifs de sécurité active.

Le présent mémoire s'inscrit dans cette problématique de **modernisation industrielle**. L'enjeu est de transformer une machine-outil conventionnelle en un système intelligent et automatisé, capable de répondre aux exigences de **l'Industrie 4.0**. L'**objectif principal** de notre recherche est de concevoir et de réaliser un système de commande permettant d'automatiser les trois axes de mouvement de la rectifieuse. Ce projet vise non seulement à améliorer la **précision dimensionnelle** et la **répétabilité** des opérations, mais aussi à renforcer la sécurité des opérateurs par l'intégration de capteurs de fin de course et d'un système d'arrêt d'urgence. Enfin, nous introduisons une dimension de supervision moderne via l'intégration de technologies **IoT** (Internet des Objets) pour un suivi opérationnel à distance.

Pour structurer cette démarche, notre travail s'organise en quatre chapitres principaux. Le **premier chapitre** pose les bases théoriques en explorant les concepts généraux de l'automatisation industrielle et l'organisation fonctionnelle des systèmes automatisés. Le **deuxième**

chapitre est consacré à la présentation détaillée de la rectifieuse plane Monoprécis N° 11 et à l'analyse de ses limites opérationnelles qui justifient sa modernisation. Le **troisième chapitre** détaille l'architecture matérielle retenue, notamment le choix de l'unité de commande Raspberry Pi 4 et du système de motorisation pas à pas. Enfin, le **quatrième chapitre** décrit le développement de la logique de commande en Python, l'installation physique des composants et la mise en oeuvre de la supervision via le protocole MQTT. Ce mémoire se conclut par une **validation expérimentale** comparant les performances du mode automatique par rapport au mode manuel.

Déclaration sur l'usage de l'Intelligence Artificielle :

Conformément aux directives d'intégrité académique, nous déclarons avoir utilisé des outils d'IA générative (tels que ChatGPT / Claude) pour la reformulation stylistique de certains paragraphes, la correction orthographique, ainsi que l'optimisation du code LaTeX pour la mise en page. Le contenu intellectuel, la structure logique, l'analyse des données et les conclusions de ce mémoire restent entièrement l'oeuvre originale des auteurs.

Chapitre 1

Concepts généraux de l'automatisation industrielle

1.1 Introduction

Au cours des dernières décennies, l'automatisation industrielle a subi une évolution majeure due à l'augmentation des demandes de qualité, de flexibilité et de disponibilité dans les processus industriels. L'automatisation de ces derniers englobe tous les domaines de l'activité industrielle : production, assemblage, montage, contrôle, conditionnement, manutention, stockage et bien d'autres. Son but est de mettre en oeuvre automatiquement des fonctionnalités spécifiques pour répondre à des exigences particulières.[11]

Ce chapitre offre une compréhension de la structure d'un système automatisé et spécifie les différentes parties de ce système.

1.2 Système automatisé

Afin de mieux comprendre le fonctionnement des systèmes automatisés, il est essentiel de commencer par en définir clairement les principes fondamentaux.

1.2.1 Définition

Un système automatisé est une collection d'éléments interconnectés, organisés dans un objectif spécifique : intervenir sur un matériau de travail pour lui conférer une valeur additionnelle. Le système automatisé doit répondre à des critères : énergétiques, de configuration, de réglage et d'exploitation qui s'appliquent à tous les modes de fonctionnement et d'arrêt du système.[19]

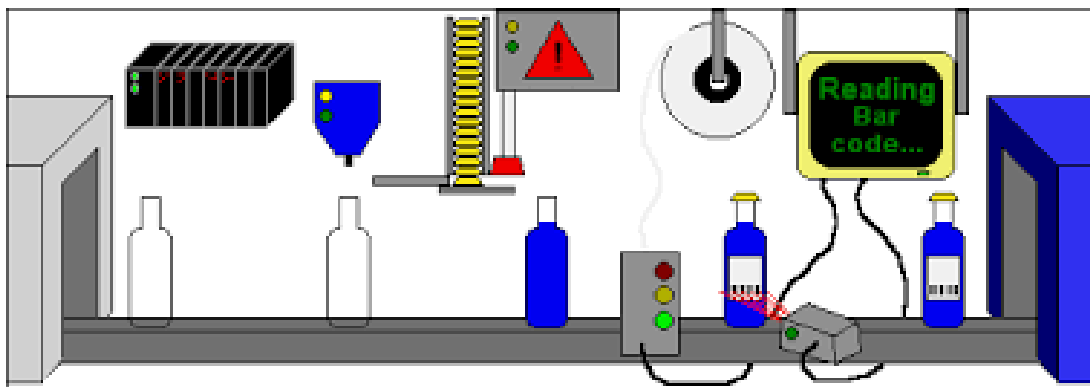


FIGURE 1.1. Exemple d'un système automatisé.[11]

Un système automatisé peut être examiné selon deux perspectives :

- Approche fonctionnelle : Elle consiste à analyser les fonctions et les tâches que le système doit accomplir.
- Approche structurelle : Elle se concentre sur l'organisation et les composants physiques ou logiques qui composent le système.

1.2.2 Organisation fonctionnelle d'un système automatisé

Après avoir défini le système automatisé, il est désormais pertinent d'examiner son organisation fonctionnelle afin de mieux comprendre la répartition de ses différentes composantes.

1.2.2.1 Introduction

Le rôle principal de tout système automatisé est d'ajouter de la valeur à un processus impliquant des matières, des données et/ou des énergies. Pour chacun de ces trois flux, une série de processus fondamentaux de stockage, de déplacement et de transformation est déployée pour ajouter de la valeur au flux entrant. Il est donc possible de distinguer deux composantes au sein des systèmes : l'une intervenant sur les flux de données, désignée sous le nom de chaîne d'information, et l'autre intervenant sur les flux de matières et d'énergies, désignée sous le nom de chaîne d'énergie.[5]

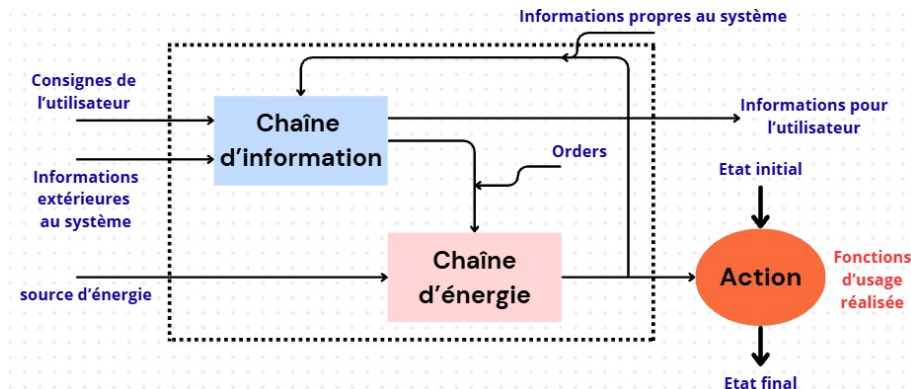


FIGURE 1.2. La chaîne d'énergie et la chaîne d'information.

1.2.2.2 La chaîne d'information

Il s'agit de la totalité des composantes du système automatisé qui collectent et traitent l'information. Elle comprend des composants comme les capteurs et détecteurs (pour l'acquisition), une carte programmable (pour le traitement) ainsi que les moyens de transmission et de communication de l'information (câbles, fibre optique, wi-fi, bluetooth, etc.).[10]

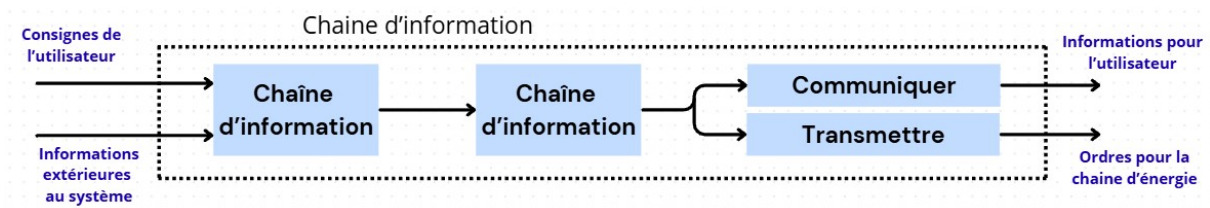


FIGURE 1.3. La chaîne d'information.

Il est possible de segmenter cette chaîne en divers blocs fonctionnels[25] :

- Acquérir : recueillir des données par le biais de capteurs.
- Traiter : diriger à l'aide d'un automate ou d'un microcontrôleur.
- Communiquer : assurer la liaison entre l'utilisateur et/ou d'autres systèmes.
- Transmettre : garantir l'interface avec l'environnement de la section commande.

1.2.2.3 La chaîne d'énergie

Il s'agit de l'ensemble des éléments du système automatisé qui vont accomplir une tâche. Elle comprend des composants tels que les sources d'énergie électrique (batteries, connexion au réseau : fournir), les relais, les transistors (répartir), les moteurs (transformer) ainsi que des pignons, des courroies et des bielles (transmettre).[10]

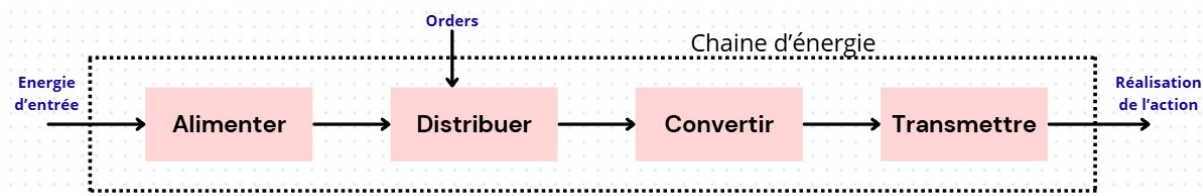


FIGURE 1.4. La chaîne d'énergie.

Il est possible de segmenter cette chaîne en divers blocs fonctionnels [25] :

- Stocker : emmagasiner l'énergie au sein du système.
- Alimenter : transformer l'énergie en une forme exploitable par le système.
- Distribution : un distributeur ou un contacteur fournit l'énergie à l'actionneur.
- Convertir : modification de l'énergie (actionneur : un vérin, un moteur, une résistance).
- Transmettre : cette tâche est assurée par tous les composants mécaniques qui transmettent mouvement et effort : engrenages, courroies, accouplements, embrayages

1.2.2.4 Le lien entre les deux chaînes

La chaîne d'information et la chaîne d'énergie sont étroitement liées parce que l'information décide de quand et comment l'énergie est utilisée. Les capteurs mesurent des grandeurs (position, température, présence d'un objet) et transmettent ces données au processeur (ou carte électronique). Celui-ci traite l'information et envoie des ordres aux organes de la chaîne d'énergie, comme un contacteur ou un variateur, qui distribuent l'énergie au moteur ou à l'actionneur.[5]

Ensuite, la chaîne d'information peut aussi contrôler la transmission du mouvement : par exemple, le moteur ne surchauffe pas ou que le système s'arrête en cas d'obstacle. Ainsi, l'information pilote l'énergie et surveille le fonctionnement, ce qui rend le système automatisé plus sûr, précis et adapté au besoin.[5]

1.2.3 Organisation structurelle d'un système automatisé

Après l'étude de l'organisation fonctionnelle, il est nécessaire de s'intéresser à l'organisation structurelle du système automatisé afin d'identifier ses principaux composants physiques.

1.2.3.1 Introduction

Chaque système automatisé possède une structure générale unifiée, centrée sur trois éléments clés : la partie commande, la partie opérative et la partie relation (supervision). La figure [20] représente cette configuration globale d'un système automatisé.[19]

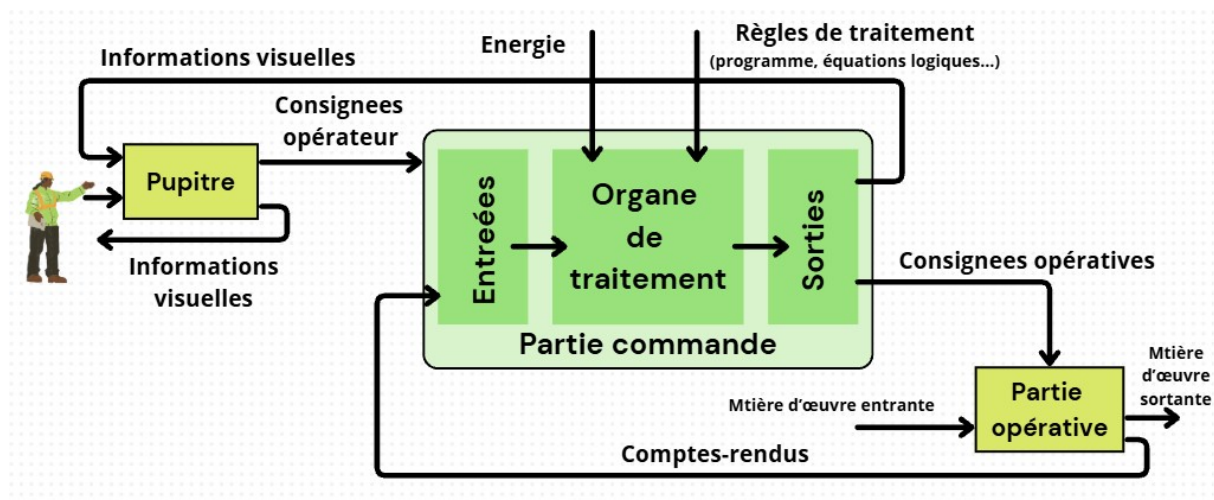


FIGURE 1.5. Structure d'un système automatisé.

1.2.3.2 La Partie Opérative (P.O)

C'est la partie qui autorise l'exécution des mouvements et des actions sur le produit. Elle rassemble les effecteurs, les actionneurs et leurs pré-actionneurs, ainsi que les capteurs de machines indispensables pour superviser le mouvement des actionneurs et la présence des objets ou des individus.[20]

Les actionneurs

Les actionneurs convertissent une énergie d'entrée (électrique, hydraulique ou pneumatique) en une énergie de sortie (mécanique) pour mettre en mouvement les organes de machines.[17] Les actionneurs les plus utilisés sont :

- **Actionneurs électriques** : Sont principalement les moteurs électriques. Ils transforment l'énergie électrique en énergie mécanique. Leur fonctionnement repose sur les principes de l'électromagnétisme. [17]



FIGURE 1.6. Moteur électrique .[19]

- **Actionneurs pneumatiques** : Ils utilisent de l'air comprimé à 6 bar qui est fourni par un compresseur. Ils sont alimentés par des distributeurs, suite à une commande électrique. Ils sont utilisés principalement pour des mouvements exigeant une force faible et une grande vitesse. [17]



FIGURE 1.7. Vérin Pneumatique.[19]

- **Actionneurs hydrauliques** : Les actionneurs hydrauliques sont utilisés pour des mouvements requérant des forces très élevées, à faible vitesse. Utilisant de l'huile sous des pressions atteignant 400 bar, ils permettent d'obtenir une force prodigieuse (jusqu'à 300 tonnes force). L'huile est fournie par une pompe hydraulique qui fait généralement partie de la machine. [17]



FIGURE 1.8. Vérin hydraulique.[17]

Les préactionneurs

Le préactionneur s'occupe de distribuer l'énergie nécessaire à l'actionneur (pneumatique, hydraulique ou électrique) en fonction de la commande (signal faible) venant de la partie commande.[17]

- **Les distributeurs (pneumatiques ou hydrauliques)** : Un distributeur est constitué d'une partie fixe et d'une partie mobile (le tiroir) :

La partie fixe : dotée d'orifices connectés à la source d'énergie, à l'actionneur et à l'échappement.

Le tiroir mobile : couissant dans la partie fixe, il est doté de conduites permettant le passage de fluide entre les différents orifices et la partie fixe. [17]



(a) Distributeur pneumatique.



(b) Distributeur hydraulique.

FIGURE 1.9. Les distributeurs.[26]

- **Relais et Contacteurs (préactionneurs électriques)** :

Un **relais électromécanique** est un organe électrique permettant l'ouverture et la fermeture d'un circuit électrique à tension élevée par un second circuit à tension faible et complètement isolé. Son fonctionnement est comme suit :

- En l'absence d'ordre de la P.C., les contacts sont au repos.
- Quand l'automate envoie l'ordre de commande, le courant électrique crée un champ magnétique dans la bobine, qui pousse la barre de commande. [17]



FIGURE 1.10. Relais électromécanique .[17]

Le **contacteur** a la même fonction qu'un relais, sauf que ses contacts sont prévus pour supporter un courant beaucoup plus important. Par exemple pour des moteurs industriels de grande puissance (plus de 50 kW). [17]



FIGURE 1.11. Contacteur.[24]

Les capteurs

Enregistrant les mouvements des actionneurs ou l'issue de leurs interventions, les capteurs transmettent les données essentielles pour la gestion du processus. Ils sont capables de détecter des positions, des températures, des débits, des forces, des vitesses, des accélérations, et ainsi de suite.[11] On les classe généralement selon leur mode d'utilisation (avec ou sans contact) et selon la nature des informations qu'ils produisent :

- **Logique** : la donnée de sortie est binaire, elle n'admet donc que les valeurs 0 ou 1.
- **Analogique** : l'information est acquise sous la forme d'une tension ou d'un courant qui est proportionnel à la mesure de la grandeur.
- **Numérique** : l'information est codée sur un mot composé de plusieurs bits.
- **Digital** : l'information est numérique mais elle est exprimée à l'aide de la période ou la fréquence d'un signal qui est lui-même binaire. [19]

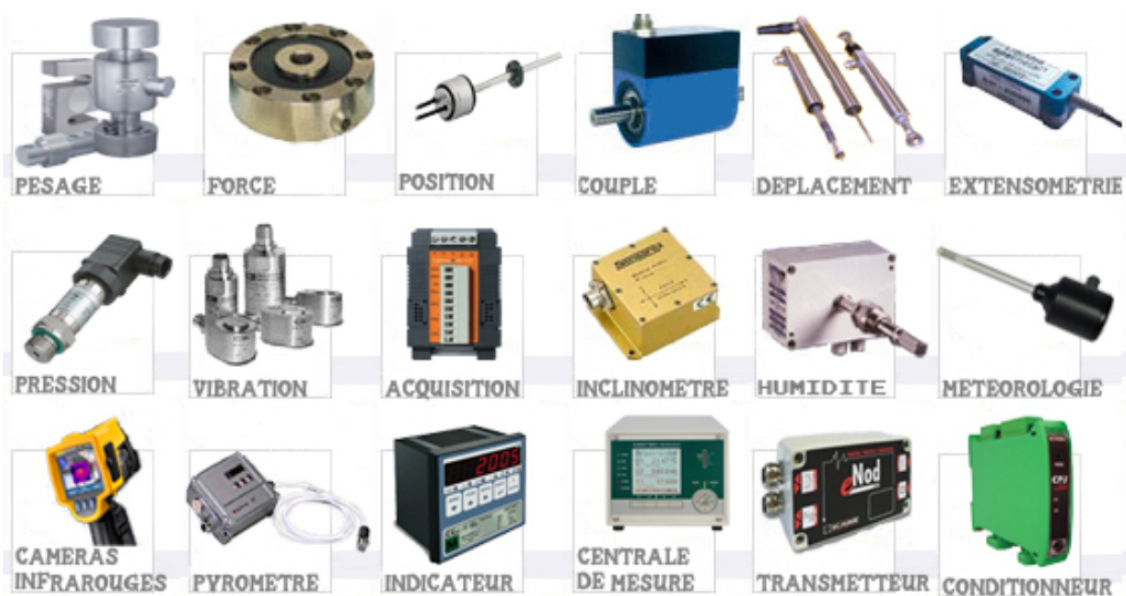
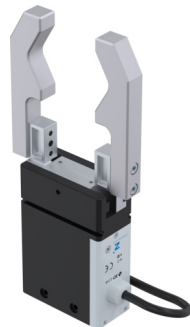


FIGURE 1.12. Différents types de capteurs et dispositifs de mesure .[26]

Les capteurs de position sont les plus utilisés sur les systèmes automatisés. Ils prennent des formes variées : interrupteurs de position avec contact ou détecteurs de proximité sans contact (signal tout ou rien) et capteurs de déplacement (signal analogique ou numérique). [26]

Effecteurs

Ce sont les éléments terminaux, ils agissent directement sur la matière d'oeuvre en vue de lui apporter une valeur ajoutée. Ils transforment l'énergie reçue de l'adaptateur en une action ou un effet appliqué à la matière d'oeuvre. [26]



(a) Pinces de préhension mécaniques.



(b) Broche pour rectification.

FIGURE 1.13. Les effecteurs. [26]

1.2.3.3 La partie commande (P.C)

C'est la partie qui permet de gérer et d'organiser l'ordre des actions et des mouvements du système. Elle compile les éléments et les composants nécessaires pour le traitement des données (signaux) générées par les capteurs de machines de la (P.O) ainsi que les capteurs opérateurs de la (P.R). [20]

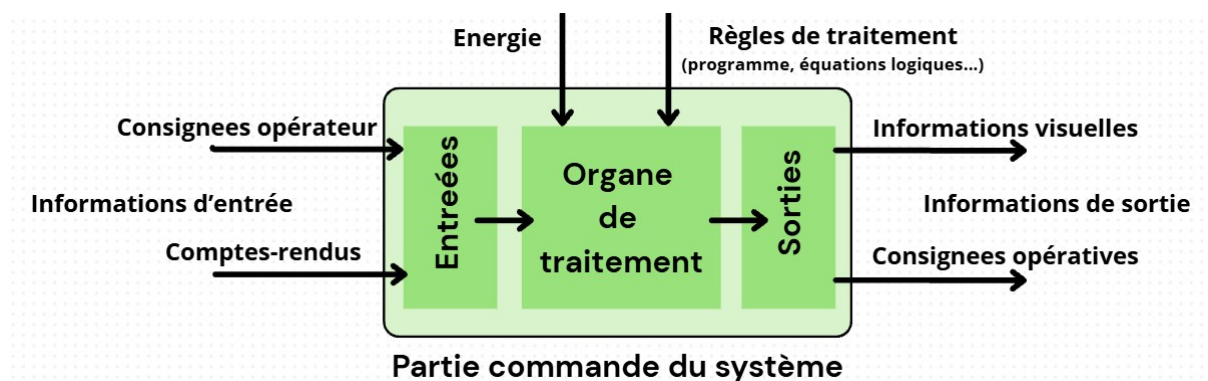


FIGURE 1.14. Structure de la partie commande.

La partie de commande comporte les ensembles suivants :

- **Les interfaces d'entrée** qui convertissent les données provenant des capteurs installés sur la partie opérative ou dans la partie relation en informations de nature et d'ampleur compatibles avec les spécificités technologiques du système.
- **Les interfaces de sortie** qui convertissent les données traitées par l'unité de traitement en informations adaptées à la nature et à l'envergure des préactionneurs d'une part, et des visualisations et avertisseurs d'autre part.
- **L'unité de traitement** (automates programmables industriels API, ordinateur, micro-processeurs) qui génère les instructions destinées aux actionneurs en fonction des données collectées auprès des divers capteurs et du fonctionnement à effectuer.[17]

Les modes de traitement

La réalisation matérielle de la partie commande (PC) d'un système automatisé peut être effectuée selon deux grandes approches technologiques :

- **La Logique Câblée** : La mise en place de la loi de contrôle implique l'interconnexion appropriée d'opérateurs matériels (électriques, pneumatiques, hydrauliques) qui accomplissent des fonctions logiques fondamentales via les opérateurs logiques AND, OR, NOT, NAND, NOR, ainsi que les relais normalement ouverts / normalement fermés. La logique câblée se réfère à un traitement de l'information en parallèle. Il est possible de faire appel à plusieurs composants en même temps. Elle est conçue et mise en oeuvre de manière définitive selon un schéma. Elle nécessite une multitude de pièces, ce qui rend les assemblages volumineux et coûteux.[26]
 - **Composants électriques** : Relais électromagnétiques ou statiques.
 - **Composants pneumatiques** : Cellules logiques et séquenceurs pneumatiques.
 - **Cartes électroniques** : Circuits intégrés à fonctions logiques fixes.[26]

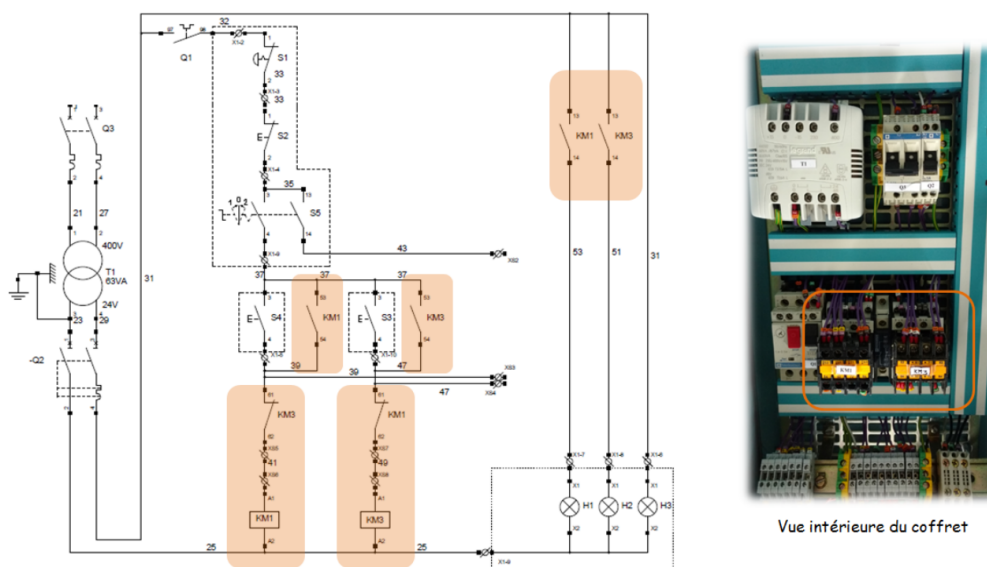


FIGURE 1.15. Logique câblée.[26]

- **La logique programmée** : C'est une approche séquentielle où chaque opération élémentaire est exécutée individuellement, c'est un traitement en série. Le circuit électrique est converti en une série d'instructions qui composent le programme. Si les équations sont modifiées tout en utilisant les mêmes accessoires, aucune modification du câblage n'est nécessaire pour l'installation, seuls les paramètres d'instructions seront ajustés. Si un circuit utilise la logique programmée, il nécessitera moins de composants, étant donné que ces derniers exécutent directement les fonctions logiques souhaitées. Un circuit qui comporte moins de composants sera généralement moins cher à concevoir, fabriquer et distribuer. La diminution du nombre de composants électroniques vise également à améliorer la fiabilité des circuits tout en diminuant la consommation d'énergie. [26] La mise en oeuvre de cette logique programmée repose principalement sur :

- **Automate Programmable Industriel (API / PLC)** : C'est la solution la plus courante en industrie. Il est conçu pour résister à des environnements sévères et communiquer directement avec les capteurs et actionneurs.[24]



FIGURE 1.16. Automate Programmable Industriel.[20]

- **Microcontrôleurs et Microprocesseurs** : Utilisés pour des systèmes embarqués ou des équipements de série (cartes Arduino, STM32).[24]

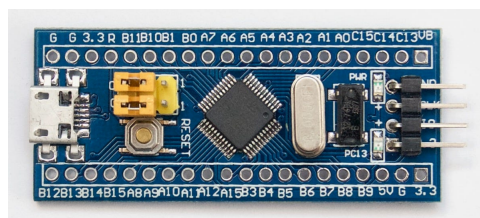


FIGURE 1.17. Microcontrôleur STM32.[26]

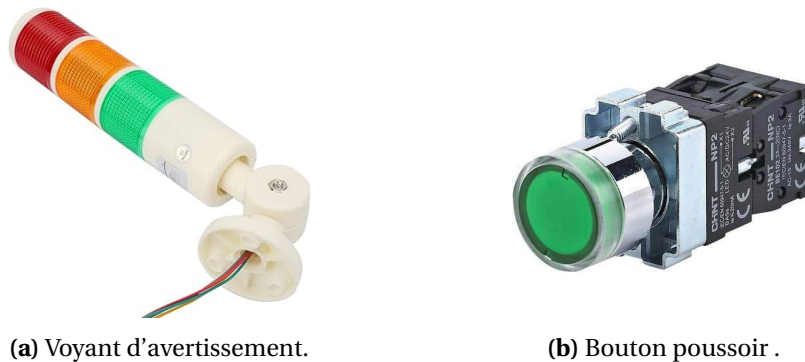
- **Ordinateurs Industriels (PC)** : Utilisés pour des commandes numériques (CNC) complexes ou de la supervision nécessitant une grande puissance de calcul. [24]



FIGURE 1.18. Ordinateurs Industriels.[26]

1.2.3.4 La partie relation (P.R)

C'est l'interface entre l'opérateur et la machine dans un système automatisé. Elle permet à l'opérateur de donner des ordres (départ, arrêt, changement de mode, etc.) et de recevoir des informations sur l'état de la machine. Elle regroupe de grands types d'éléments : (boutons poussoirs, interrupteurs, commutateurs, claviers, écrans tactiles) qui traduisent les actions de l'opérateur en signaux électriques et les composants de signalisation (voyants, écrans, alarmes sonores, gyrophares) qui informent l'opérateur sur le fonctionnement, les erreurs ou les étapes en cours. [20]



(a) Voyant d'avertissement.

(b) Bouton poussoir .

FIGURE 1.19. Composants de signalisation.[26]

Le pupitre de commande : est le support physique où sont montés tous ces éléments de la P.R, souvent placé à portée de main de l'opérateur pour un dialogue simple et sécurisé avec la machine.[19]

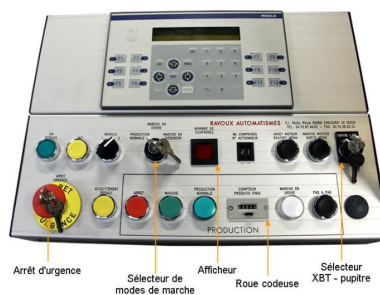


FIGURE 1.20. Pupitre de commande .[20]

1.3 Avantages et inconvénients de l'automatisation industrielle

Avantages	Inconvénients
<p>Cohérence dans les performances : Les systèmes d'automatisation sont conçus pour accomplir les tâches de façon constante, sans la fatigue associée à l'intervention humaine. Une fois programmés, les systèmes automatisés fonctionnent de façon uniforme et constante, jour après jour. Cette stabilité offre aux entreprises la possibilité de maintenir une production régulière, minimiser les variations et atteindre facilement des normes de production élevées.</p>	<p>Dépendance excessive à la technologie : Les systèmes automatisés s'appuient largement sur la technologie, ce qui les rend vulnérables aux problèmes de cybersécurité, aux défaillances matérielles ou aux erreurs logicielles. Dans ce scénario, une défaillance peut entraîner une suspension de la production, générant des arrêts onéreux. En outre, toute panne technique nécessite l'intervention de professionnels compétents pour régler les dysfonctionnements, ce qui prolonge encore les opérations.</p>
<p>Amélioration de la qualité du produit : Les systèmes d'automatisation, particulièrement ceux équipés d'un système SCADA, fournissent une supervision et un rapport approfondi. Le système fournit des données en temps réel à chaque étape de la production, assurant ainsi une qualité constante du produit. Par ailleurs, une machine automatisée offre une précision supérieure à celle d'un humain ; par conséquent, le produit final présente moins de variabilité et moins de défauts.</p>	<p>Défis liés à l'emploi : La question la plus cruciale considérée en ce qui concerne le sujet de l'automatisation industrielle est celle de l'emploi. Dans ces domaines, l'automatisation du travail par des machines entraîne une hausse du taux de chômage. Cela engendre de nouvelles fonctions pour les individus, comme technicien de maintenance et analyste de données. Globalement, cette transformation a aussi entraîné des difficultés économiques, marquées par une hausse du taux de chômage et des disparités sociales au sein des sociétés.</p>

Taux de production améliorés : L'automatisation réduit considérablement les temps d'interruption, ce qui augmente le taux de production. Tandis que les processus manuels peuvent être perturbés par l'intervention humaine, entraînant ainsi des interruptions de travail, un système automatisé fonctionne avec moins d'obstacles.	Diminution de la compétence dans la force de travail : L'automatisation des tâches habituelles pourrait conduire à une diminution graduelle des compétences classiques des travailleurs. En raison de la diminution des travaux manuels, les employés peuvent voir leurs aptitudes à réaliser des tâches pratiques se réduire, ce qui peut affecter leur compétence en matière de réparation ou de gestion de systèmes non automatisés.
--	---

TABLE 1.1. Avantages et inconvénients de l'automatisation. [22]

1.4 Conclusion

En résumé, ce chapitre a permis d'établir les bases essentielles de l'automatisation industrielle en présentant les concepts fondamentaux des systèmes automatisés, leurs modes d'organisation ainsi que leurs principales composantes. L'analyse des chaînes d'information et d'énergie a mis en évidence leur complémentarité et leur rôle central dans le pilotage et le fonctionnement des systèmes, tandis que l'approche structurelle a permis de mieux comprendre l'interaction entre la partie opérative et la partie commande. Ces notions constituent un socle indispensable pour appréhender les systèmes automatisés modernes, caractérisés par leur précision, leur efficacité et leur capacité d'adaptation aux exigences industrielles actuelles.

Dans la suite, le chapitre suivant sera consacré à la présentation de l'équipement étudié, à la problématique abordée ainsi qu'aux objectifs de ce travail.

Chapitre 2

Présentation et analyse de l'équipement à automatiser

2.1 Introduction

Dans le contexte industriel actuel, les ateliers connaissent une évolution importante grâce à l'intégration de technologies de plus en plus avancées. Ces innovations permettent de faciliter le travail, d'améliorer la sécurité des opérateurs et d'assurer une production de meilleure qualité. Ce chapitre est consacré à la présentation de la machine industrielle au coeur de notre étude. Nous analyserons son fonctionnement actuel afin d'en identifier les limites techniques ainsi que les points critiques. Par la suite, nous aborderons, de manière générale, les solutions technologiques modernes disponibles dans le domaine industriel. Enfin, nous présenterons l'approche adoptée ainsi que la solution proposée pour remédier aux problèmes identifiés.

2.2 Guide de l'équipement : la machine à rectifier

Afin d'introduire cet équipement, il convient tout d'abord d'en donner une définition claire et précise.

2.2.1 Définition

Dans le domaine de la fabrication, la précision n'est pas un avantage, c'est une nécessité. Que vous fabriquiez des éléments de moteurs, des pièces pour l'aérospatiale ou des outils de fraisage, même la plus infime défaillance peut causer d'importants désagréments. C'est à ce moment-là que les rectifieuses entrent en jeu.[27]

Une rectifieuse est un outil d'usinage de précision employé pour retirer la matière d'un composant via une action abrasive. Le matériau abrasif est généralement disponible sous la forme d'une meule tournante qui rectifie la surface de l'objet afin d'atteindre un niveau élevé de précision et de finesse. Les meuleuses constituent un élément crucial des processus de fabrication et sont employées dans pratiquement toutes les industries, allant de l'automobile à l'aérospatiale.[27]



FIGURE 2.1. Rectifieuse conventionnelle manuel.[1]

2.2.2 Les composants clés d'une rectifieuse conventionnelle manuelle

Pour bien comprendre ce qu'est une rectifieuse, il est nécessaire de dépasser son mode de fonctionnement pour se focaliser sur sa composition. Chaque rectifieuse est constituée de divers éléments indispensables qui collaborent pour garantir un usinage précis et répétitif. Ces composants sont minutieusement élaborés pour assurer stabilité, précision et performance lors des opérations à haute vitesse. Examinons les éléments essentiels qui forment la structure d'une machine de rectification et le rôle de chacun dans son mode de fonctionnement.[1]

Tête de meulage et moteur

La tête de meulage est le coeur de la machine. Elle est équipée d'une meule abrasive et est propulsée par un moteur électrique qui lui permet de tourner à des vitesses très élevées. Cette rotation génère la friction requise pour l'élimination de matière.[1]

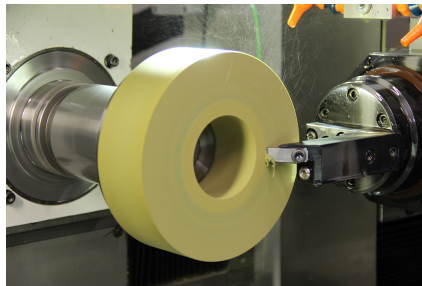


FIGURE 2.2. Meule de rectification.[28]

Broche

La broche, qui régule la rotation de la meule, garantit aussi le maintien d'une vitesse et d'un couple appropriés tout au long du processus. C'est crucial pour la stabilité de la machine et l'efficacité de la coupe pendant les opérations de meulage intensif.[1] Cette efficacité repose sur l'utilisation de technologies spécifiques, telles que :

- Broche à haute vitesse : Idéale pour les applications de broyage très fin.
- Broche à vitesse normale : Pour les opérations de meulage standards
- Systèmes de refroidissement : Refroidissement par circulation d'huile ou circulation d'air afin de maintenir la stabilité thermique.[1]

Table de travail et système de serrage

La pièce est installée et dirigée en position sur la table de travail durant le processus de rectification. En fonction du modèle de machine, cette table a la capacité de se déplacer sur deux axes :

- Axe X : mouvement longitudinal.
- Axe Y : mouvement transversal.

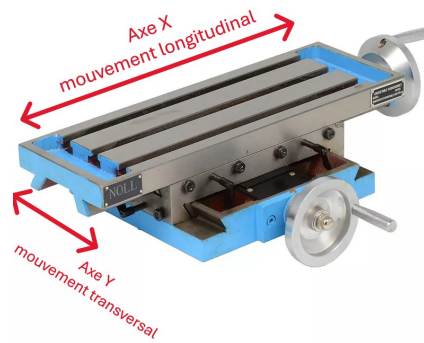


FIGURE 2.3. Les axes X et Y.[28]

Le système de fixation est tout aussi crucial. Cela peut inclure des mandrins à aimant, des attaches mécaniques, des systèmes hydrauliques ou des dispositifs sous vide. Un serrage incorrect peut provoquer des résultats irréguliers, même avec l'équipement le plus précis.[1]



FIGURE 2.4. Table de travail.[28]

Systèmes de lubrification et de refroidissement

Le processus de meulage produit une quantité importante de chaleur due à l'abrasion entre la meule et le métal. Sans un refroidissement approprié, cette chaleur risque de brûler la surface, de déformer la pièce et d'abîmer le meule. Voilà pourquoi chaque rectifieuse de production est dotée d'un système de refroidissement.[1]

Un liquide de refroidissement, qui est généralement une émulsion aqueuse ou un fluide synthétique, est pulvérisé directement sur la zone en contact. Il diminue la température, supprime les résidus (minuscules particules métalliques) et minimise l'attrition des roues. Un système de refroidissement efficace garantit la stabilité thermique ainsi que la qualité de la finition superficielle.[1]

Les systèmes de lubrification revêtent une importance tout aussi cruciale. Ils garantissent le fonctionnement optimal des glissières, des vis à billes et des roulements de la machine. Un défaut dans la lubrification non seulement précipite l'usure de l'équipement, mais compromet aussi la précision du positionnement. Les rectifieuses CNC modernes disposent fréquemment de systèmes de lubrification centralisée ou automatique qui contrôlent le flux d'huile et préviennent les utilisateurs en cas d'anomalie.[1]



(a) liquide de refroidissement.



(b) Rectifieuse pompe (outil de lubrification).

FIGURE 2.5. Refroidissement et Lubrification.[14]

Les systèmes de refroidissement et de lubrification, souvent sous-estimés, sont les garants discrets qui assurent la durabilité à long terme de la machine et une performance stable.[1]

Stabilité du bâti de la machine et de la structure

Une structure robuste et stable assure la cohérence de l'alignement entre la meule et la pièce sous toutes les conditions de coupe. Ceci est particulièrement essentiel lors de la correction de pièces de grande taille et pesantes ou pendant des travaux nécessitant des tolérances strictes. Une conception inadéquate du bâti provoque des micro-mouvements et des vibrations, qui se manifestent par des ondulations à la surface de l'élément.[1]

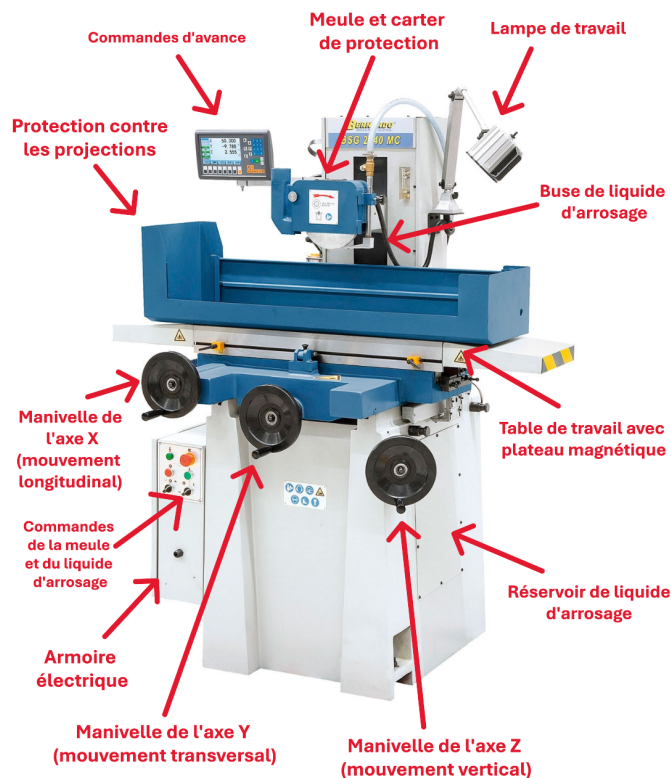


FIGURE 2.6. Composants clés d'une rectifieuse.[28]

2.2.3 Principes de fonctionnement de la rectifieuse

Le principe de la rectifieuse repose sur une abrasion très précise, la matière est enlevée par l'action de milliers de grains microscopiques fixés sur une meule qui tourne. La machine à rectifier, au contraire des machines-outils traditionnelles, intervient en fin de cycle de fabrication pour corriger les déformations thermiques et atteindre des tolérances dimensionnelles extrêmement fines. Le coeur du système est la broche haute précision qui entraîne la meule à des vitesses périphériques très élevées, souvent supérieures à 30 m/s, ce qui exige un équilibrage parfait pour éviter les vibrations parasites qui marqueraient la surface de la pièce.

Le cycle opérationnel débute par la fixation de la pièce, généralement assurée par un plateau magnétique qui garantit une stabilité totale sans les contraintes mécaniques liées aux brides de serrage. Une fois la pièce immobilisée, l'opérateur procède au dressage de la meule à l'aide d'un diamant industriel pour régénérer les arêtes tranchantes des grains abrasifs. Le mouvement de travail combine ensuite une translation rapide de la table, qui déplace la pièce sous l'outil, et une descente micrométrique de la tête porte-meule. Cette profondeur de coupe, souvent limitée à quelques centièmes de millimètre, exige une surveillance constante de la température car le frottement intense génère une chaleur importante qu'un système d'arrosage continu doit impérativement dissiper pour éviter toute brûlure du métal.



FIGURE 2.7. opération de rectification.[27]

D'un point de vue technique, la performance de la machine dépend directement de la qualité du guidage des glissières et de la lubrification des organes mobiles. En maintenance, une attention particulière est portée à la détection de l'usure des roulements de la broche et à la planéité du plateau magnétique. La précision finale du compte rendu repose sur la maîtrise de ces paramètres cinématiques, où chaque mouvement est calculé pour transformer une surface brute en une face parfaitement plane et polie, répondant aux exigences les plus strictes de l'industrie moderne et de la maintenance de précision.[9]

2.2.4 Différents types de rectifieuses industrielles

En fonction des exigences industrielles et des fonctions spécifiques de chaque composant mécanique, les rectifieuses peuvent être désignées en fonction du type de tâche qu'elles réalisent. Celles qui sont le plus souvent employées sont :

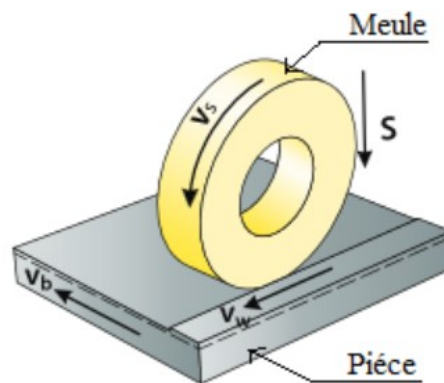
Rectifieuses planes

Les rectifieuses planes sont destinées à produire des surfaces parfaitement planes et lisses. Elles opèrent en déplaçant une meule abrasive horizontale sur l'objet, qui est fixé sur une table de travail soit alternative, soit rotative. La tête de meulage s'abaisse progressivement à chaque passage, éliminant graduellement la matière jusqu'à atteindre l'épaisseur et la qualité de surface désirées.

Ces machines sont largement utilisées dans l'industrie du moulage, en particulier pour la rectification des bases de moules, des plaques de guidage et des plaques d'éjection. Elles sont aussi mises en oeuvre par les ateliers d'outillage et d'emboutissage nécessitant des calibres plats, des gabarits ainsi que des pièces à surface critique. On utilise couramment de l'acier trempé, de l'acier destiné aux outils et même des éléments en céramique pour la fabrication de composants électroniques.[27]



(a) Rectifieuse plane.



(b) Processus de rectification plane.

FIGURE 2.8. opération de rectification plane.[9]

Rectifieuses cylindriques

Les machines à rectifier cylindriques servent à façonner les surfaces externes d'éléments circulaires ou cylindriques, tels que les axes de moteur, les vérins hydrauliques et les rouleaux. La pièce fait pivoter autour de son axe pendant que la meule se déplace sur sa surface, longitudinalement ou radialement. Cela offre une précision exceptionnelle en matière de concentricité et de circularité, même pour les pièces de grande longueur.

On distingue deux catégories majeures de ces machines : les rectifieuses cylindriques

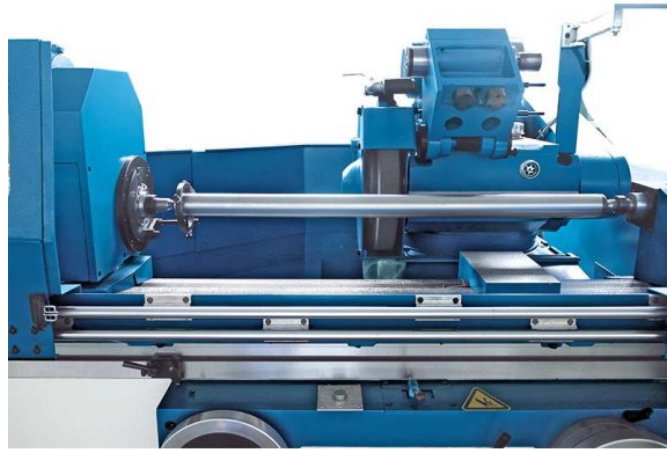
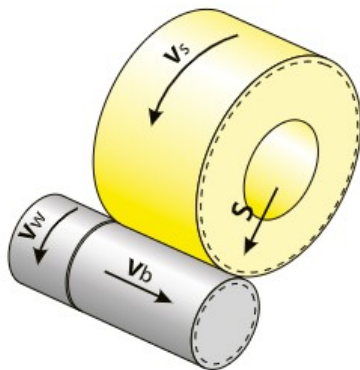
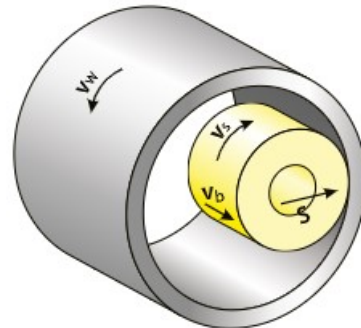


FIGURE 2.9. Rectifieuse cylindrique.[28]

externes (destinées à la finition de surface externe) et les rectifieuses cylindriques internes (utilisées pour la rectification des alésages). Quelques modèles sophistiqués allient les deux. L'usinage cylindrique est fréquemment utilisé dans la fabrication d'arbres de précision, d'essieux pour automobiles et de rouleaux résistants au sein du secteur de l'imprimerie ou de l'acier.[27]



(a) rectification cylindrique extérieure.



(b) rectification cylindrique intérieure.

FIGURE 2.10. rectification cylindrique.[9]

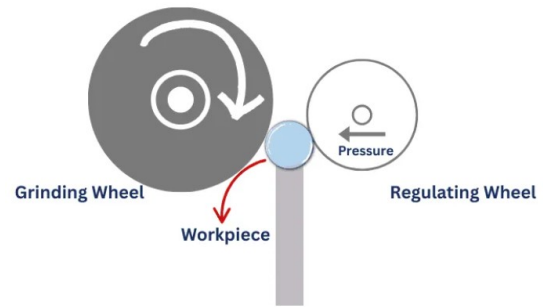
Rectifieuses sans centre :

Les rectifieuses sans centre retirent la matière des pièces cylindriques sans avoir besoin de les fixer ou de les serrer sur des pointes. L'élément est positionné sur une lame porte-pièce entre deux meules en rotation : une meule et une meule de réglage. La meule de réglage gère la vitesse et l'avance axiale de l'objet, alors que la meule participe à son façonnage. Cette configuration favorise une fabrication efficace de petites pièces circulaires telles que des axes de piston, des tiges de palier et des goudons métalliques.

Elle est spécialement conçue pour la fabrication de barres longues ou d'axes de petit diamètre en processus continus et automatisés, nécessitant une intervention minimale de l'opérateur.[27]



(a) Rectifieuse sans centre.



(b) Processus de rectification sans centre.

FIGURE 2.11. Rectification sans centre.[4]

2.2.5 Applications des rectifieuses dans toutes les industries

En 2024, le marché des rectifieuses a dépassé la barre des 6 milliards de dollars et continue de progresser à un taux de croissance annuel moyen de 5,4 % jusqu'en 2034, stimulé par les besoins des secteurs clés.[15]

Secteur industriel	Domaines d'application
Industrie aéronautique	<ul style="list-style-type: none"> Fabrication d'aubes de turbines à géométrie complexe. Composants de sécurité critiques avec des exigences de zéro défaut. Roulements de précision pour environnements extrêmes.
Fabrication automobile	<ul style="list-style-type: none"> Composants du moteur, y compris les arbres à cames et les vilebrequins Pièces de performance exigeant des tolérances serrées. Engrenages de transmission avec profils de dents précis.
Production de dispositifs médicaux	<ul style="list-style-type: none"> Instruments chirurgicaux aux arêtes vives et précises Composants d'implants avec finitions biocompatibles. Équipement de diagnostic nécessitant des surfaces ultra-propres.

TABLE 2.1. Segmentation du marché des machines à meuler par secteurs critiques.[15]

2.3 Comment les limites de l'équipement conventionnel freinent-elles la performance actuelle?

L'identification des obstacles opérationnels passe par une définition claire de la problématique et des contraintes inhérentes au système existant.

2.3.1 Problématique

Malgré leur robustesse et leur fiabilité mécanique, les machines-outils conventionnelles présentent aujourd'hui des limites face aux exigences croissantes de l'industrie moderne, notamment en termes de précision, de productivité et de répétabilité. En effet, l'exploitation essentiellement manuelle de ces équipements, tels que les rectifieuses conventionnelles, introduit des contraintes à la fois techniques et humaines qui influencent directement la qualité des pièces produites ainsi que les conditions de travail des opérateurs.

Dans ce contexte, cette section a pour objectif d'établir une analyse critique de l'équipement étudié, en mettant en évidence les principales faiblesses identifiées lors de la phase d'observation et d'exploitation.

2.3.2 Analyse des contraintes et faiblesses de la machine à rectifier

Précision et répétabilité

À partir de l'étude menée sur la machine conventionnelle, il ressort que la précision des opérations dépend largement du niveau de maîtrise et de l'expérience de l'opérateur. Cette dépendance introduit une variabilité notable dans les résultats, notamment lors de la réalisation de pièces exigeant une grande exactitude.

En outre, la répétabilité demeure limitée en raison de l'intervention humaine dans le processus. Maintenir une consistance dimensionnelle entre différentes pièces peut s'avérer difficile, surtout dans le cadre de la production en série. Cette difficulté peut engendrer des écarts entre les pièces fabriquées, ce qui impacte directement la qualité globale.

Productivité et coûts

L'analyse de l'exploitation de la machine met en évidence une productivité relativement faible, principalement due aux vitesses de traitement limitées. Les réglages manuels ainsi que le contrôle de l'avance par l'opérateur réduisent la cadence, ce qui rend ce type d'équipement peu adapté à une production à grande échelle.

Par ailleurs, le fonctionnement de la rectifieuse repose sur une présence continue de l'opérateur pour assurer le réglage, le positionnement et le suivi des opérations. Cette contrainte augmente la durée globale du cycle de production et diminue l'efficacité du système.

De plus, les phases de préparation, d'ajustement et de vérification occupent une part importante du temps de travail. Ces interruptions fréquentes influencent négativement la rentabilité en réduisant le temps effectivement productif.

Ainsi, ce type de machine se révèle plus approprié pour des productions unitaires ou de faible volume, où la flexibilité prime sur la rapidité.

Limites techniques et sécurité

L'étude de la machine conventionnelle a également permis d'identifier plusieurs insuffisances d'ordre technique affectant ses performances globales. L'absence de systèmes d'asservissement empêche toute correction automatique des erreurs en temps réel, ce qui limite la précision et la fiabilité du processus d'usinage.

Sur le plan de la sécurité, certaines lacunes ont été relevées, notamment l'absence de dispositifs de protection active tels que les capteurs de fin de course ou les systèmes d'arrêt automatique. Cette situation expose l'opérateur à des risques liés aux mouvements mécaniques ainsi qu'aux projections générées lors de l'usinage.

Par conséquent, ces contraintes techniques et sécuritaires constituent un obstacle à l'intégration de ce type d'équipement dans un environnement industriel moderne, où les exigences en matière de performance, de sécurité et de connectivité sont de plus en plus élevées.

2.4 La transition vers les machines-outils à commande numérique

En transposant les principes de pilotage numérique aux machines de meulage, on aboutit à la rectification CNC, dont les spécificités sont détaillées ci-après.

2.4.1 La machine-outil à commande numérique

Une machine-outil à commande numérique désigne un équipement d'usinage fonctionnant selon un cycle automatique programmable. Le contrôleur numérique (calculateur) garantit la commande des éléments mobiles de la machine en se basant sur des instructions numériques relatives à la vitesse et à la position. Les instructions concernant la commande et la configuration des pièces sont saisies soit directement via le clavier, soit par l'intermédiaire de supports autonomes tels que les bandes perforées ou les bandes magnétiques.[6]

2.4.2 Qu'est-ce que la rectification CNC ?

La rectification par commande numérique automatisée se fait grâce à des directives programmées, modifiant automatiquement les coupes, les trajectoires et les vitesses de la meule pour atteindre les résultats recherchés. Cette approche est particulièrement bénéfique pour les pièces présentant une géométrie complexe qui ne peuvent pas être rectifiées à l'aide de machines classiques.[21]



(a) Rectifieuse CNC.



(b) Panneau de Contrôle CNC.

FIGURE 2.12. Rectification par commande numérique.[21]

Système de contrôle et interface CNC

Dans les rectifieuses modernes, le système de commande est le cerveau à l'opération. Il contrôle tout, de la vitesse de meulage au mouvement de la table, y compris les cycles de dressage et le flux du liquide de refroidissement. La commande CNC offre la possibilité de réaliser des cycles de rectification complexes avec une précision répétable.[1]

Par exemple, une rectifieuse CNC est capable de gérer avec précision l'avance à un niveau de précision micrométrique, de réaliser le palpé automatique des pièces et d'appliquer un retour adaptatif basé sur les informations provenant des capteurs. Par rapport aux rectifieuses manuelles, les systèmes CNC diminuent les erreurs humaines tout en boostant significativement la productivité et la constance.[1]

2.4.3 Fonctionnement des rectifieuses à commande numérique

Le processus de rectification est toujours intégré dans le flux de travail, ce qui garantit son efficacité et la qualité des résultats. La programmation débute par la caractérisation de la géométrie des composants via des interfaces interactives. Les contrôleurs modernes intègrent une programmation basée sur la conversation, évitant ainsi le besoin de coder en G-code. [15]

La préparation consiste simplement à disposer les pièces dans les assemblages appropriés et à sélectionner le type de meule adéquat. La mise en place se réalise facilement en positionnant les composants dans les assemblages adéquats et en sélectionnant la meule appropriée, où des dispositifs automatiques de mesure des métaux déterminent précisément la dimension requise.[15]

La machine gère de manière autonome le déplacement des meules et des pièces à travailler tout en définissant les angles d'approche optimaux durant le processus. Les systèmes

élaborés possèdent une surveillance en direct qui évalue les forces de meulage et les changements dimensionnels, ajustements automatiquement réalisés pour assurer que le paramètre est conservé dans des conditions idéales tout au long du cycle.[15]

2.4.4 Principales différences entre la rectification CNC et la rectification conventionnelle

Fonctionnalité	Machine à rectifier manuelle	Machine à rectifier CNC
Précision	Il est possible d'obtenir une grande précision, mais cela dépend de la compétence de l'opérateur	Très haute précision avec répétabilité et automatisation
Flexibilité	Flexible pour des tâches variées mais plus lent à mettre en place	Très flexible et efficace pour les tâches complexes et répétitives
Configuration et programmation	Configuration minimale requise, pas de programmation nécessaire	Nécessite un temps de programmation et d'installation
Maintenance	Des pièces mécaniques plus simples, plus faciles à entretenir	Électronique et logiciel complexes, nécessitant une maintenance spécialisée
Coût	Réduction des coûts initiaux et opérationnels	Coût plus élevé en raison de la technologie et de l'automatisation
Compétences de l'opérateur	La précision et l'efficacité requièrent un haut niveau de compétence	Moins de compétences manuelles nécessaires, plus de concentration sur la programmation et le suivi
Rigidité de la machine	Grande rigidité pour compenser les vibrations des opérations manuelles	Conçu pour une grande rigidité avec un contrôle avancé des mouvements

TABLE 2.2. Différences majeures entre la rectification CNC et la rectification traditionnel [4]

La rectification conventionnelle et numérique

Les résultats suivants ont été obtenus à partir d'un exemple pratique du temps nécessaire pour produire une pièce sur une machine à commande numérique :[2]

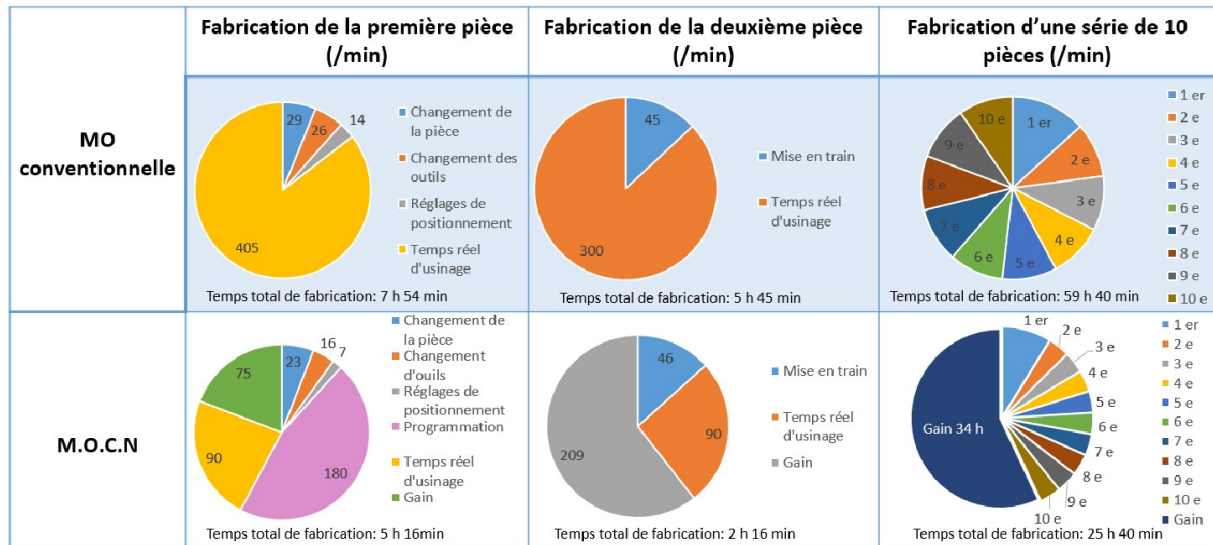


FIGURE 2.13. Comparaison de temps de rectification sur une machine conventionnelle et une machine CN.[2]

2.4.5 Évaluation économique des machines à commande numérique

L'approche de production la plus économique est celle qui génère le coût unitaire le plus faible. La formule suivante est utilisée pour calculer ce coût :

$$C = C_u + \frac{C_r}{L} + \frac{C_p}{ZL} \quad (2.1)$$

avec :

- C : coût total de fabrication pour une pièce.
- C_u : coût d'usinage d'une pièce (matière, main d'oeuvre directe, coût machine).
- C_r : coût de lancement de la série et des réglages des outils et de la machine.
- L : nombre de pièces d'une série.
- C_p : coût de préparation (gammes et programmes d'usinage) et des outillages.
- ZL : nombre total de pièces fabriquées.

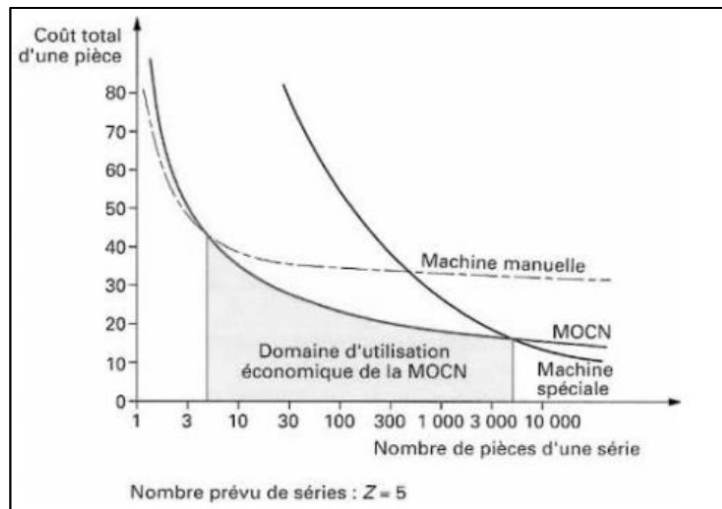


FIGURE 2.14. Domaine d'utilisation des machines-outils à commande numérique.[2]

On constate que le coût total de fabrication par pièce varie en fonction de la quantité ZL d'une manière hyperbolique. En termes de volume de pièces à usiner, l'application économique de la machine-outil à commande numérique se trouve principalement dans les petites et moyennes séries. Les machines-outils traditionnelles restent économiquement viables pour des opérations simples, bien qu'elles soient souvent supplantées par des MOCN d'entrée de gamme. Pour les grandes séries, le recours à des machines spéciales à automatisation rigide se montre encore très avantageux. Si l'on établit une représentation du coût d'une pièce en fonction de la quantité à produire, on peut définir les contraintes économiques liées à l'usage de la commande numérique. Dans l'exemple présenté à la figure 2.14, dès que la série dépasse 5 pièces, l'utilisation d'une machine à commande manuelle devient plus avantageuse qu'une MOCN ; de même, une machine sur mesure le sera pour les séries dépassant les 5 000 pièces.[2]

2.5 La machine moderne : notre vision contre l'épuisement technique actuel

Afin de répondre aux différentes limites identifiées lors de l'analyse de la machine conventionnelle, il est nécessaire de définir un ensemble d'objectifs clairs et structurés. Ces objectifs visent à orienter la démarche de conception et à proposer une solution adaptée aux exigences actuelles en matière de performance, de sécurité et de modernisation industrielle.

Dans cette optique, les objectifs du projet sont organisés et présentés dans le tableau suivant, en distinguant les différents aspects liés à l'automatisation, à la sécurité, à l'ergonomie et à l'intégration des technologies modernes.

2.5.1 Les Objectifs de notre recherche

Le tableau suivant synthétise les différents objectifs de recherche classés par axes stratégiques d'amélioration.

X	Objectifs
Automatisation du système	<ul style="list-style-type: none"> • Concevoir un système de commande permettant d'automatiser les mouvements principaux de la machine. • Réduire l'intervention manuelle de l'opérateur dans le processus d'usinage. • Améliorer la répétabilité et la stabilité des opérations.
Amélioration de la sécurité	<ul style="list-style-type: none"> • Intégrer des capteurs de fin de course pour limiter les déplacements dangereux. • Mettre en place un système d'arrêt d'urgence. • Réduire les risques liés aux erreurs humaines et aux collisions mécaniques.
Optimisation des performances	<ul style="list-style-type: none"> • Améliorer la précision du positionnement. • Réduire les temps de réglage et d'arrêt. • Augmenter la productivité globale de la machine.
Interface Homme-Machine (IHM)	<ul style="list-style-type: none"> • Développer une interface simple et intuitive pour faciliter l'interaction opérateur-machine. • Permettre le contrôle des paramètres essentiels (vitesse, position, marche/arrêt). • Améliorer l'ergonomie et réduire la complexité d'utilisation.
Intégration de l'IoT	<ul style="list-style-type: none"> • Connecter la machine à un système de supervision à distance. • Permettre la collecte et la transmission des données (état, fonctionnement, alertes). • Introduire les bases de l'industrie 4.0 dans le système proposé.

Validation et expérimentation	<ul style="list-style-type: none">• Tester le système proposé sur la machine réelle ou un prototype.• Évaluer les améliorations obtenues (précision, temps, sécurité).• Comparer les performances avant et après automatisation.
-------------------------------	--

TABLE 2.3. Répartition stratégique de nos objectifs

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la machine à rectifier conventionnelle étudiée, ainsi que son fonctionnement et ses principaux composants. L'analyse réalisée a permis de mettre en évidence plusieurs limites importantes, notamment en termes de précision, de répétabilité, de productivité et de sécurité, principalement dues au caractère manuel de son exploitation.

Face à ces contraintes, nous avons introduit les solutions technologiques modernes, en particulier les systèmes à commande numérique, qui permettent d'améliorer les performances globales des machines industrielles.

Dans ce contexte, les objectifs de notre projet ont été définis afin de proposer une solution adaptée basée sur l'automatisation de la machine.

Ainsi, le chapitre suivant sera consacré à la conception et à la réalisation du système proposé, en détaillant la partie commande, basée sur le Raspberry Pi, ainsi que la partie opérative assurant l'exécution des actions mécaniques.

Chapitre 3

Architecture Matérielle et Méthode d'Automatisation

3.1 Introduction

L'analyse de la rectifieuse conventionnelle réalisée au chapitre précédent a permis d'identifier avec précision les axes de déplacement à automatiser, les contraintes mécaniques de frottement ainsi que les performances de précision attendues. Ces éléments constituent une base essentielle pour orienter les choix techniques liés à la modernisation de la machine.

Pour assurer une transition fiable du mode manuel vers un fonctionnement automatisé, il est indispensable de concevoir une architecture matérielle robuste, capable de garantir à la fois la précision des déplacements, la répétabilité des opérations et la sécurité du système. Cette transition ne se limite pas à l'ajout de composants électroniques, mais implique une véritable intégration entre les parties mécanique, électrique et informatique.

Dans ce chapitre, l'objectif n'est pas seulement de présenter les composants, mais d'expliquer comment ils coopèrent pour former un système intelligent et cohérent.

3.2 Architecture générale du système

La conception d'un système automatisé efficace dépend d'une structure hiérarchique bien définie. Cette structure est cruciale pour isoler les fonctions de puissance, de traitement et de supervision, assurant par conséquent un entretien simple et une évolutivité conforme aux standards de l'Industrie 4.0.

3.2.1 Analyse hiérarchique

L'architecture proposée repose sur une organisation hiérarchique en trois niveaux fonctionnels distincts : le niveau de supervision, le niveau de commande et le niveau terrain.

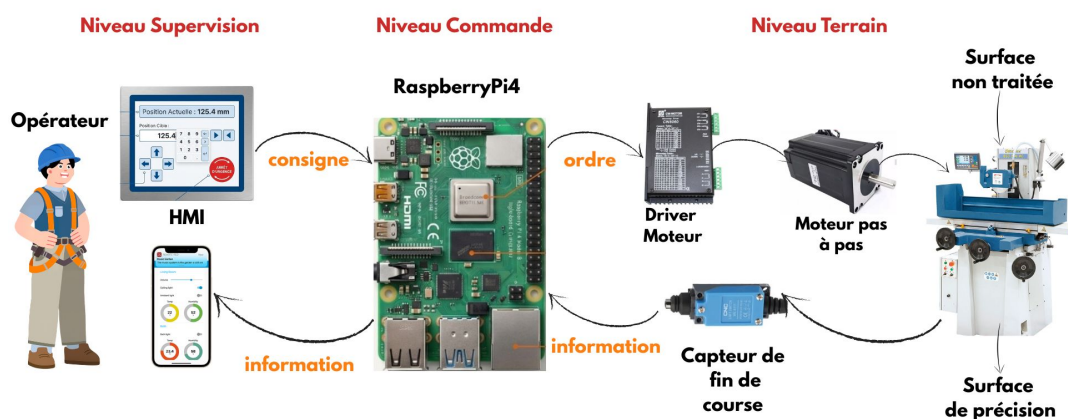


FIGURE 3.1. Architecture Générale du Système.

Au niveau de supervision, l'opérateur interagit avec la machine à travers une interface homme-machine (IHM). Cette interface permet de saisir les consignes de position ou de déplacement, de visualiser l'état du système et de superviser le processus en temps réel. En complément, un système basé sur le protocole MQTT permet la remontée des informations vers une application mobile ou distante, offrant ainsi une capacité de supervision à distance et une ouverture vers les technologies IoT.

Le niveau de commande est assuré par une carte Raspberry Pi 4, qui constitue le cœur du système. Elle reçoit les consignes émises par l'opérateur, les traite, puis génère les signaux de commande adaptés aux actionneurs. Ce niveau joue un rôle central dans la coordination globale du système, en assurant également la gestion des retours d'information provenant des capteurs.

Finalement, le niveau terrain englobe tous les composants physiques qui agissent directement sur l'appareil. Cela englobe principalement les drivers moteurs, les moteurs pas à pas et les capteurs de fin de course. Les drivers établissent le lien de puissance entre le Raspberry Pi et les moteurs, tandis que ces derniers transforment les signaux électriques en actions mécaniques exactes. Pour assurer la sécurité du système, les capteurs de fin de course identifient les limites de mouvement et préviennent tout excès potentiellement dangereux.

3.2.2 Principe de fonctionnement global

Le fonctionnement du système repose sur un échange continu d'informations entre les trois niveaux. L'opérateur définit une consigne via l'IHM, qui est ensuite transmise au Raspberry Pi sous forme de données numériques. Après traitement, celui-ci génère des signaux de commande (STEP/DIR) envoyés aux drivers moteurs, qui pilotent les moteurs pas à pas pour réaliser le mouvement souhaité.

Parallèlement, les capteurs de fin de course assurent un retour d'information vers l'unité de commande, permettant de détecter toute situation anormale ou d'atteindre des positions limites. Ces informations sont ensuite exploitées pour ajuster ou interrompre le mouvement si nécessaire.

En complément, les données de fonctionnement (position, état, alertes) sont transmises vers le système de supervision via le broker MQTT, assurant ainsi une visibilité complète et en temps réel du système.

3.3 Unité de Commande : Raspberry Pi 4

Le choix de l'unité centrale est un élément clé pour assurer le traitement des données et la coordination de l'ensemble des périphériques du projet.

3.3.1 Définition et présentation du Raspberry Pi 4

Le Raspberry Pi est un nano-ordinateur monocarte basé sur une architecture ARM, dont les dimensions sont comparables à celles d'une carte de crédit. Il a été développé par la Fondation Raspberry Pi, issue de l'Université de Cambridge, avec pour objectif de démocratiser l'accès à l'informatique et de favoriser l'apprentissage de la programmation et de l'électronique.

Dans le cadre de ce projet, le choix s'est porté sur le modèle Raspberry Pi 4 Model B, en raison de ses performances élevées et de sa grande polyvalence. Équipé d'un processeur quadricur 64 bits, ce dispositif est capable de gérer simultanément plusieurs tâches, telles que le traitement des consignes, la génération des signaux de commande et la communication avec les différents composants du système.

Par ailleurs, le Raspberry Pi 4 dispose d'une connectivité complète incluant le Wi-Fi, le Bluetooth et l'Ethernet Gigabit, ce qui facilite son intégration dans un environnement connecté et permet la mise en oeuvre de solutions de supervision à distance. De plus, sa compatibilité avec différents périphériques d'affichage, notamment en haute résolution, offre la possibilité de développer des interfaces homme-machine performantes et ergonomiques.[3]



FIGURE 3.2. Raspberry Pi 4 Model B (vue de face).[8]

Enfin, sa flexibilité matérielle et logicielle, associée à un coût relativement faible, en fait une solution particulièrement adaptée aux projets académiques et aux systèmes embarqués. Ainsi, le Raspberry Pi 4 constitue un excellent compromis entre puissance de calcul, évolutivité et accessibilité, répondant parfaitement aux exigences de ce projet d'automatisation.[3]



FIGURE 3.3. Raspberry Pi 4 Model B (vue de derrière).[8]

3.3.2 Architecture et ports du Raspberry Pi 4

Voici une présentation reformulée des éléments centraux du Raspberry Pi 4 Model B.

Coeur du système

Processeur (SoC) : Broadcom BCM2711, un quad-core Cortex-A72 (ARM v8) cadencé à 1,5 GHz.

Mémoire vive (RAM) : Disponible en versions 2 Go, 4 Go ou 8 Go (LPDDR4).

Ports et extensions

USB : Deux ports USB 3.0 (bleus) et deux ports USB 2.0.

GPIO : Le connecteur standard de 40 broches pour le pilotage de composants électroniques.

Stockage : Un lecteur de carte microSD pour le système d'exploitation et les données.

Alimentation

5V DC via connecteur USB-C (minimum 3A)

5V DC via le connecteur GPIO (minimum 3A)

Alimentation par Ethernet (PoE) possible (avec carte PoE HAT en plus)

Connectique vidéo et audio

Affichage : Deux ports micro-HDMI supportant jusqu'à deux écrans en 4K.

Audio/Vidéo analogique : Une prise jack 3,5 mm pour le son et la vidéo composite.

Réseau et sans-fil

Ethernet : Un port Gigabit Ethernet pour des connexions filaires ultra-rapides.

Wi-Fi : Wi-Fi double bande (2,4 GHz et 5,0 GHz).

Bluetooth : Norme 5.0 (BLE) intégrée.[18]

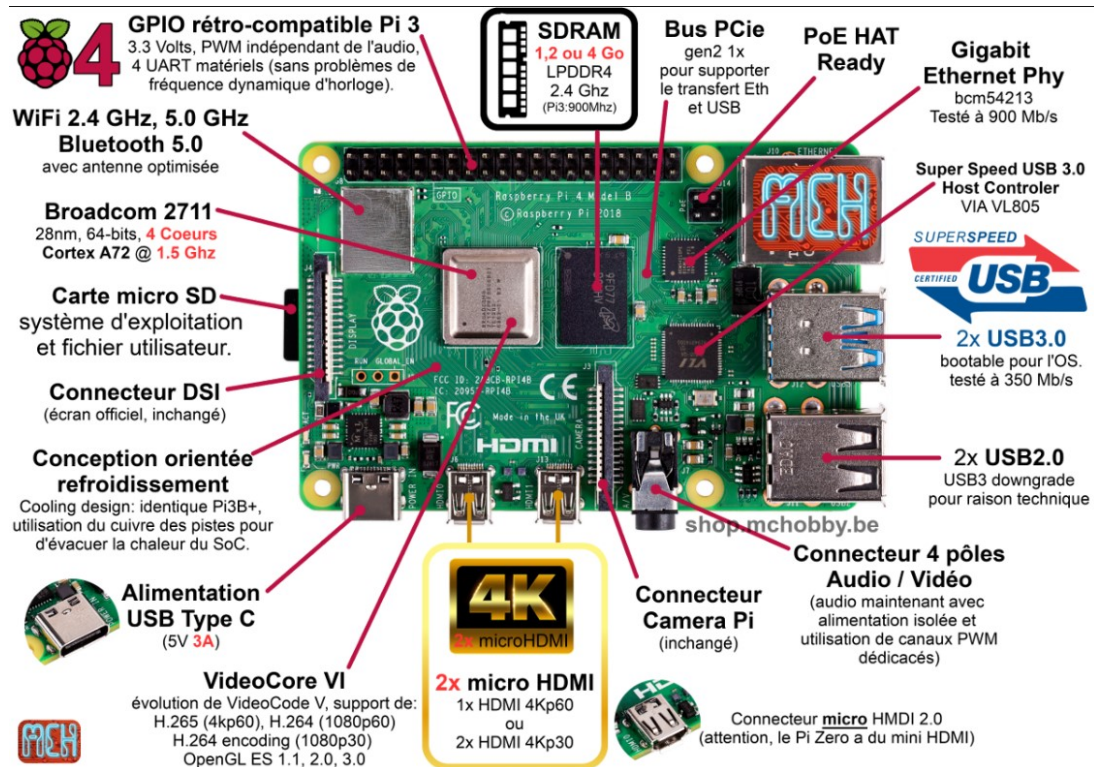


FIGURE 3.4. Guide des éléments clés du Raspberry Pi 4.[18]

3.3.3 Guide du port GPIO sur Raspberry Pi 4

Le Raspberry Pi 4 possède une interface de 40 broches, incluant des ports GPIO (General Purpose Input Output) pour les données et des broches dédiées à l'alimentation.[3]

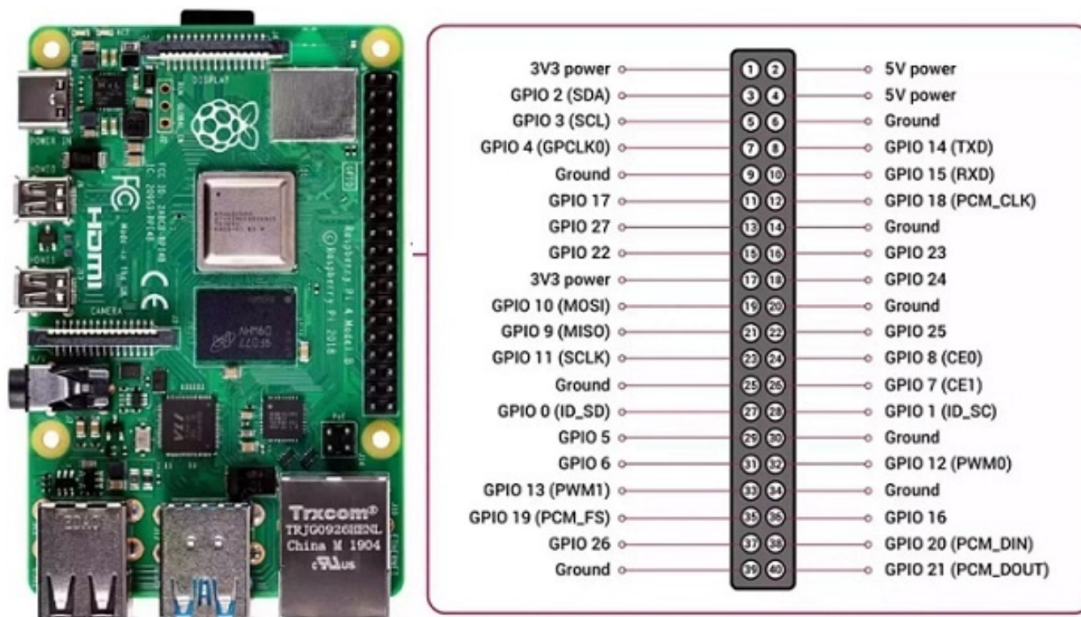


FIGURE 3.5. Schéma des broches du Raspberry Pi 4.[18]

Le tableau ci-dessous détaille l'utilisation des broches du GPIO.

Broches	Utilisation	Descriptif
6-9-14-20-25-30-34-39	Alimentation	Masse
2-4	Alimentation	+ 5 V
1-17	Alimentation	+ 3,3 V
8-10	UART	Ces deux broches donnent accès à un UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter = émetteur récepteur asynchrone universel) qui pourra dialoguer avec un terminal ou tout autre appareil possédant un port série.
19-21-23-24-26	Bus SPI	Ces cinq broches fournissent un bus SPI (Serial Peripheral Interface = interface de périphérique série). C'est un bus de transmission de données série synchrone. Il est utilisé pour faire communiquer des circuits intégrés.
3-5	Bus I2C	Ces deux contacts fournissent un bus I2C. Le bus I2C permet de piloter les nombreux circuits intégrés compatibles avec ce type de bus
27-28	I2C EEPROM	Ces deux broches ne doivent absolument pas être utilisées. Elles sont réservées au dialogue avec l'EEPROM présente sur les cartes d'extension répondant aux spécifications HAT
7-11-12-13-15-16-18-22-29-31-32-33-35-36-37-38-40	GPIO	Ces dix-sept broches sont des entrées/sorties numériques.

TABLE 3.1. Spécifications des ports d'extension. [3]

3.3.4 Le système d'exploitation Raspbian

Raspbian est un système d'exploitation open source basé sur la distribution GNU/Linux Debian, conçu spécifiquement pour le plus petit ordinateur du monde, à savoir le Raspberry Pi. Raspbian ne se limite pas à être un simple système d'exploitation de base, il propose également plus de 35 000 paquets, soit des logiciels pré-compilés présentés sous une forme optimisée pour faciliter leur installation sur votre Raspberry Pi grâce aux gestionnaires de paquets. Le Raspberry Pi est un merveilleux dispositif, bien qu'il soit toujours moins puissant qu'un ordinateur moderne. Il est donc conseillé de mettre en place un système conçu pour lui. Raspbian a été conçu avec cette intention, ce qui le rend particulièrement approprié pour le Raspberry Pi.



FIGURE 3.6. Le système d'exploitation Raspbian.[8]

Choix de la carte micro SD

On utilise la carte mémoire puisqu'elle va contenir le système d'exploitation ainsi que les applications que nous développerons. Il vaut mieux qu'elle ait une grande capacité (au moins 16 Go) et soit de bonne qualité, car cette carte mémoire sera utilisée comme un disque dur pour stocker le système d'exploitation et les programmes, et la vitesse de transfert de données entre la micro SD et le processeur doit être la plus rapide possible. Ainsi, il est nécessaire d'utiliser une carte mémoire d'une classe supérieure (au moins de classe 10).

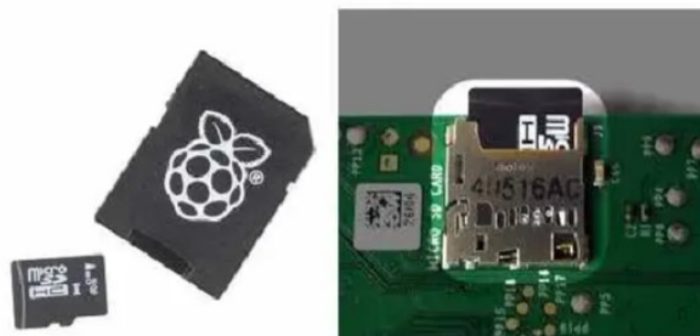


FIGURE 3.7. carte mémoire.[8]

Ensuite, insérez la carte microSD dans la carte et connectez les périphériques habituels (clavier, écran, souris) avant de brancher l'alimentation. Pour conclure, paramétrez le Raspberry Pi depuis l'interface graphique ou en SSH afin de pouvoir le piloter à distance.

3.4 L'ensemble puissance : Architecture du système de motorisation

L'architecture de ce système repose sur l'association de deux éléments clés : le moteur pas à pas, qui exécute le mouvement, et son pilote (driver), qui assure la gestion de la puissance.

3.4.1 Qu'est-ce qu'un moteur pas à pas ?

3.4.1.1 Définition

Un moteur pas à pas est un dispositif électromécanique qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique. Par ailleurs, un moteur pas à pas est un type de moteur synchrone sans balais capable de segmenter une rotation complète en une multitude d'étapes. Lorsqu'un moteur pas à pas est utilisé avec des impulsions de commande électriques dans le bon ordre, l'arbre ou la broche du moteur effectue une rotation par paliers, offrant un contrôle précis de sa position sans aucun système de retour d'information, pourvu que le moteur soit adapté à l'application.[7]

Le moteur utilisé c'est le **NEMA 23**[7], un format standardisé de moteur pas à pas mesurant 2,3 pouces de côté. Il est principalement choisi pour sa capacité à offrir une grande précision et une force de rotation élevée.



FIGURE 3.8. Moteur pas à pas (Nema 23).[7]

Un moteur pas à pas se caractérise par le nombre de pas par tour (N_p) d'où la relation suivante [16] :

$$\Delta\alpha = 360^\circ / N_p$$

avec :

- $\Delta\alpha$: l'angle entre 2 pas en degré
- N_p : le nombre de pas par tour

Application de la formule à notre moteur NEMA 23 (JK57HS76-2804)

- Nombre de pas (N_p) : 200 pas par tour

$$\Delta\alpha = \frac{360^\circ}{200} = 1,8^\circ$$

Le moteur tourne de $1,8^\circ$ à chaque impulsion électrique. Il faut donc 200 pas ($200 \times 1,8^\circ$) pour effectuer un tour complet de 360°

3.4.1.2 Construction de moteurs pas à pas

Les moteurs pas à pas se composent généralement d'embouts avant et arrière, de roulements, d'un arbre central, d'un noyau de rotor, d'un noyau de stator, d'un assemblage de stator, de rondelles ondulées, de vis et d'autres pièces. Le stator et le rotor constituent les deux composants majeurs d'un moteur pas à pas. Tous deux sont constitués de matériaux magnétiques et possèdent respectivement six et quatre pôles magnétiques. Les six pôles magnétiques du stator intègrent des bobinages de contrôle, et les deux pôles en face constituent une phase.[7]

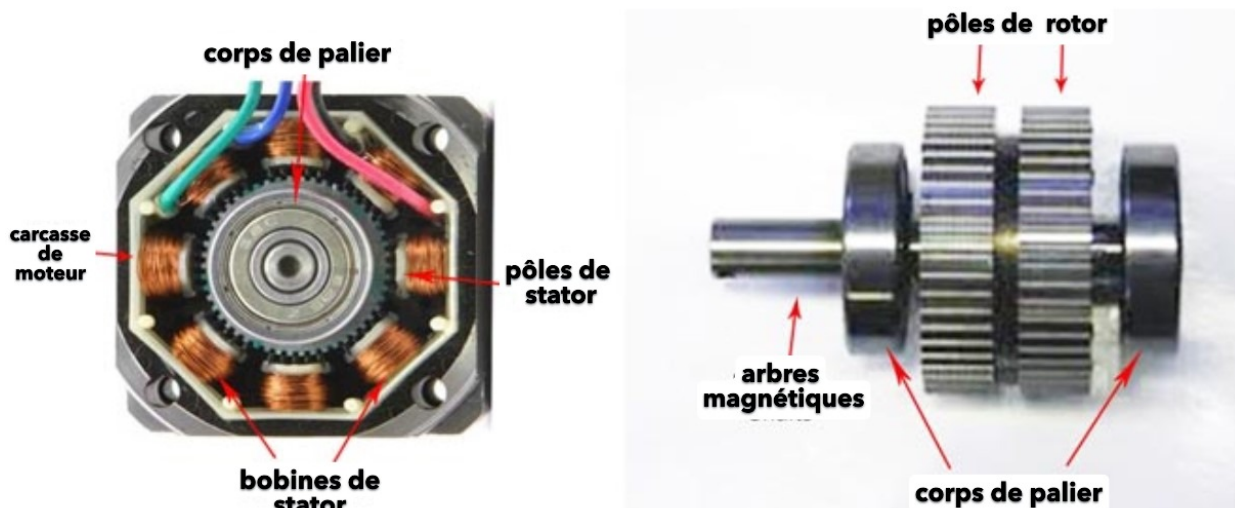


FIGURE 3.9. Constitution interne d'un moteur pas à pas.[7]

3.4.1.3 Types de moteurs pas à pas

On distingue trois grandes familles de moteurs pas à pas selon la nature de leur rotor :

Moteur pas à pas à réluctance variable (VR)

Les moteurs pas à pas à réluctance variable sont les plus simples. Ils se composent d'un rotor en fer doux muni de plusieurs dents et d'un stator bobiné. Lorsque le courant est appliqué aux enroulements du stator, les pôles deviennent magnétisés et attirent les dents du rotor, ce qui provoque la rotation.[7]

Grâce à leur rotor léger, ces moteurs sont rapides et faciles à contrôler, avec une structure simple. Cependant, ils présentent des limites importantes, notamment un couple faible et

une faible résolution, ce qui les rend moins précis et moins puissants que les autres types de moteurs pas à pas.[7]

Moteur pas à pas à aimant permanent (PM)

Les moteurs pas à pas à aimants permanents intègrent des aimants dans leur rotor. Le changement du sens du courant dans les bobines modifie les pôles magnétiques, ce qui entraîne la rotation du rotor. Pour améliorer la précision, ces moteurs possèdent plusieurs pôles et aimants, permettant de réduire l'angle de pas.[7]

Grâce aux aimants permanents, ils offrent un couple plus élevé que les moteurs à réluctance variable. Leur structure reste simple et économique, mais leur résolution demeure relativement faible.[7]

Moteurs pas à pas hybrides (HY)

Les moteurs pas à pas hybrides sont les plus utilisés dans l'industrie. Ils combinent les avantages des moteurs à réluctance variable et à aimants permanents, ce qui leur permet d'offrir de meilleures performances, notamment en termes de précision (résolution), de couple et de vitesse, mais à un coût plus élevé.[7]

Leur rotor contient des aimants permanents aimantés axialement, disposés sous forme de deux anneaux opposés montés sur l'arbre. Ces anneaux possèdent des rainures formant des dents, ce qui améliore le contrôle du mouvement et la précision du moteur.[7]

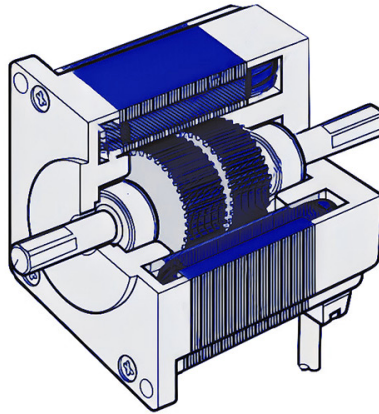


FIGURE 3.10. Moteurs pas à pas hybrides.[16]

— Calcul de la géométrie du rotor (NR) [16] :

$$NR = SPR/\Phi$$

avec :

- NR : Nombre total de dents du rotor (cumul des deux culasses).
- Φ : Nombre de phases du moteur.

— SPR : Nombre de pas par tour.

Application de la formule à notre moteur NEMA 23 (JK57HS76-2804)

Puisque notre moteur est un modèle standard à 2 phases ($\Phi = 2$) et qu'il fait 200 pas par tour ($SPR = 200$), on peut vérifier son nombre de dents :

$$NR = 200/2 = 100 \text{ dents}$$

(Chaque culasse de notre rotor possède donc 50 dents décalées).

3.4.2 Qu'est-ce qu'un pilote de moteur pas à pas ?

3.4.2.1 Définition

Un pilote de moteur pas à pas est un dispositif électronique conçu pour contrôler le mouvement d'un moteur pas à pas en envoyant des impulsions électriques selon une séquence spécifique. Chaque impulsion correspond à un pas, et le pilote détermine la direction, la vitesse et les caractéristiques de couple du moteur en régulant le timing et l'amplitude de ces impulsions. Les pilotes modernes intègrent des fonctionnalités sophistiquées telles que la limitation du courant, le micro-pas et les circuits de protection qui améliorent les performances et la sécurité.[13]

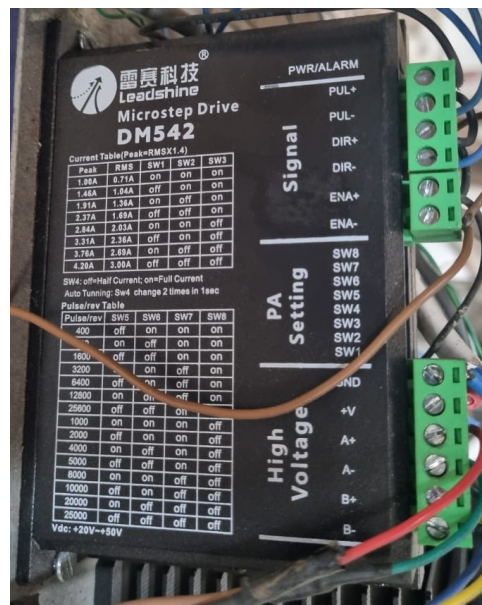


FIGURE 3.11. Pilote de moteurs pas à pas hybrides.[13]

3.4.2.2 Principe de fonctionnement d'un pilote de moteur pas à pas

Le fonctionnement fondamental d'un pilote de moteur pas à pas repose sur la création d'impulsions, le contrôle du courant et le changement de phase.[13]

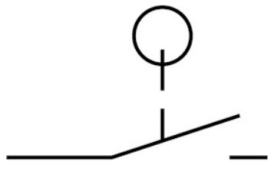
- Commandes de pas et d'orientation : Le pilote reçoit des signaux numériques (habituellement des impulsions de 5V ou 3,3V) émis par un contrôleur. La quantité d'impulsions détermine le nombre de pas du moteur, tandis que la broche de direction gère la rotation dans le sens horaire ou antihoraire.
- Analyse du pouls : Selon le signal perçu, le pilote détermine quelle bobine de moteur doit être alimentée et dans quel ordre. Les modes couramment utilisés incluent le pas à pas, le demi-pas et le micro-pas.
- Régulation du courant (contrôle par hacheur) : Grâce à une méthode dénommée modulation de largeur d'impulsion, le pilote modifie de manière dynamique l'intensité du courant pour garantir un couple efficace tout en prévenant la surchauffe de la bobine.
- Micro-pas : Les pilotes récents subdivisent les pas complets en segments plus petits (comme 1/8, 1/16, 1/32) en modulant le courant à travers deux bobinages de façon sinusoïdale. Cela perfectionne la fluidité du déplacement et l'exactitude du positionnement.
- Dispositifs de protection : Les pilotes de haute performance intègrent généralement des fonctions de verrouillage en cas de surtension ou sous-tension, de prévention des courts-circuits et d'arrêt thermique.

3.5 Systèmes de protection contre les erreurs de positionnement

La prévention des anomalies de déplacement repose sur l'utilisation de composants matériels spécifiques capables de détecter en temps réel les limites physiques des axes.

3.5.1 Interrupteurs de fin de course

Un interrupteur de fin de course est un dispositif électromécanique utilisé pour détecter la présence ou l'absence d'un objet par le biais d'un contact physique. L'interrupteur transmet alors cette information via un signal électrique. Ces dispositifs sont habituellement employés pour identifier la fin de parcours d'un élément et garantir que les actions demeurent dans des limites établies, d'où l'appellation de commutateur de fin de course. Les switches de fin de course sont connus pour leur fiabilité, leur simplicité et leur longévité dans les secteurs industriels.[12]



(a) Symbole de l'interrupteur de fin de course.



(b) Interrupteur de fin de course électronique.

FIGURE 3.12. Interrupteur de fin de course.[12]

3.5.2 Fonctionnement d'un interrupteur de fin de course

Les composants de base d'un interrupteur de fin de course comprennent un actionneur relié mécaniquement à un ensemble de contacts. Lorsqu'un objet entre en contact avec l'actionneur, le dispositif actionne les contacts pour établir ou interrompre une connexion électrique.[12]

- Contact physique : Un objet ou un composant de l'appareil entre en interaction avec un actionneur de l'interrupteur de limite.
- Mécanisme d'activation : Ce dispositif actionne un commutateur électrique de manière mécanique.
- Signal électrique : En fonction de sa configuration, le commutateur activera ou désactivera un circuit électrique.
- Commande ou indication : Ce signal est utilisé pour contrôler des machines, réaliser des sécurisations ou compter des éléments.[12]

3.6 Validation expérimentale et essais préliminaires sur banc d'étude

Avant de procéder à l'intégration définitive des composants matériels sur la rectifieuse conventionnelle, la mise en place d'un banc d'essai expérimental s'est révélée indispensable. Cette phase de tests préliminaires "à blanc" avait pour objectifs principaux :

La validation du câblage : Vérifier la conformité des interconnexions logiques et de puissance afin d'écartier tout risque de court-circuit avant le montage final.

Le test des scripts de commande : Évaluer le comportement de l'unité de commande (Raspberry Pi 4) lors de l'exécution des programmes de génération d'impulsions.

Le contrôle de la dynamique du moteur : S'assurer du bon fonctionnement du moteur pas à pas NEMA 23, notamment la validation de son sens de rotation, de sa fluidité de mouvement en mode micro-pas, et de sa réponse aux consignes de vitesse.

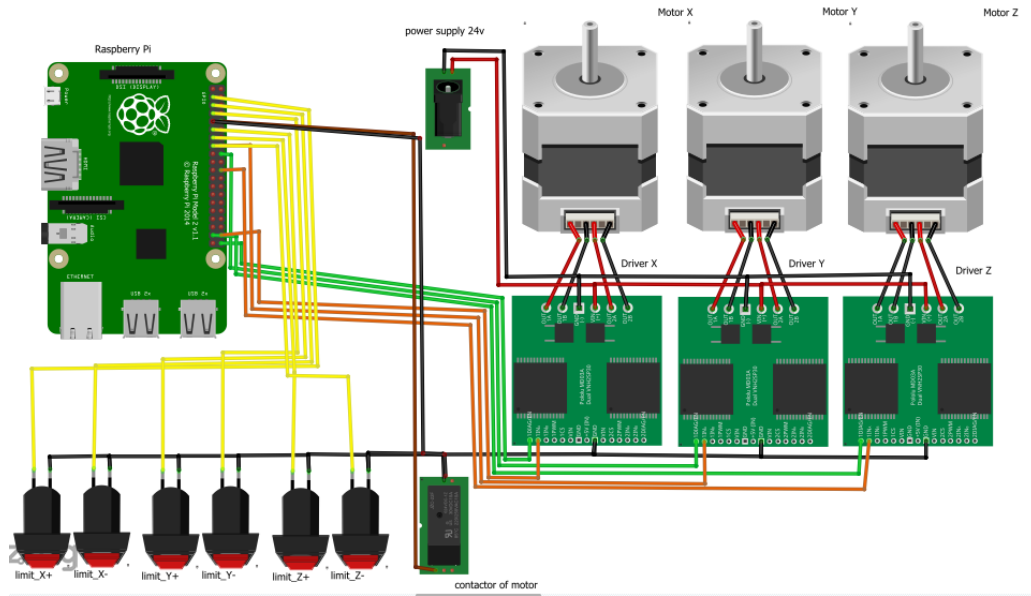


FIGURE 3.13. Schéma de câblage

Cette démarche de prototypage en environnement sécurisé a permis d'ajuster les paramètres logiciels et de garantir la fiabilité de la chaîne de motorisation avant son implantation mécanique définitive sur la machine.

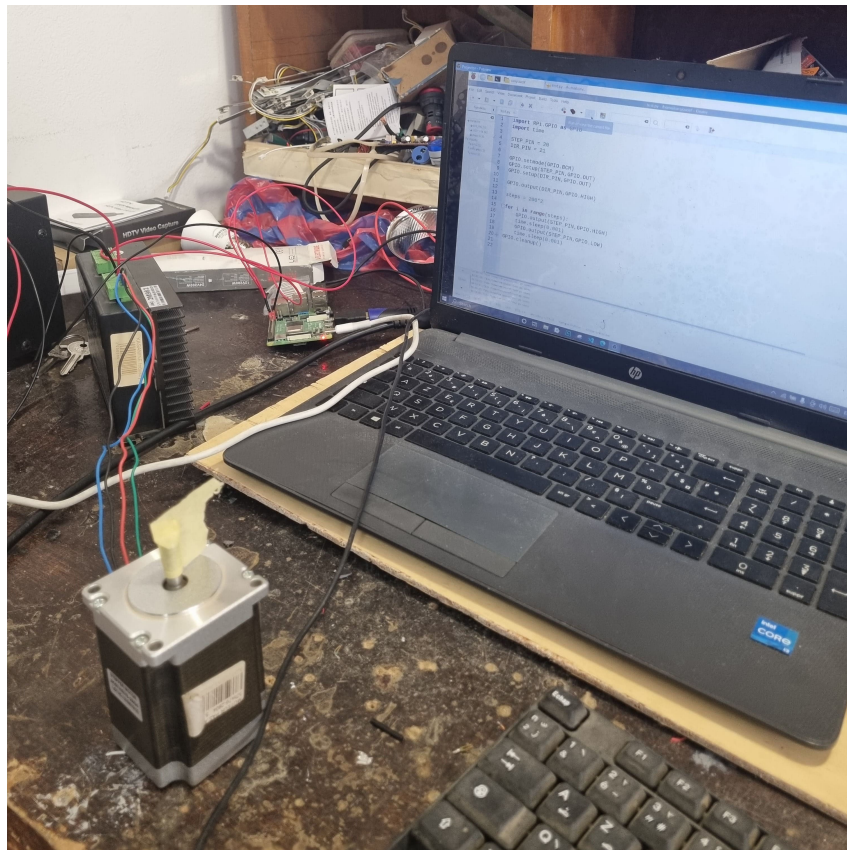


FIGURE 3.14. Banc d'essai expérimental pour la validation préliminaire de la chaîne de motorisation.

3.7 Conclusion

En résumé, ce chapitre a permis de présenter l'architecture matérielle ainsi que la méthode d'automatisation adoptée pour la modernisation de la rectifieuse conventionnelle. L'étude de l'organisation hiérarchique du système a mis en évidence le rôle du niveau de supervision, de l'unité de commande basée sur le Raspberry Pi 4 ainsi que des différents composants du niveau terrain, tels que les moteurs pas à pas, les drivers et les capteurs de fin de course. L'analyse du principe de fonctionnement global a également permis de mieux comprendre l'échange des informations entre les différentes parties du système afin d'assurer la précision des déplacements, la sécurité du fonctionnement et la supervision en temps réel. Ainsi, cette architecture constitue une base essentielle pour garantir une automatisation fiable, flexible et adaptée aux exigences de l'Industrie 4.0.

Dans la suite, le chapitre suivant sera consacré à la transformation finale de la machine, en présentant les différentes étapes de réalisation, d'intégration et de mise en oeuvre du système automatisé.

Chapitre 4

Programmation, installation et supervision du système

4.1 Introduction

Les études et conceptions réalisées précédemment ont permis de définir les bases techniques nécessaires à l'automatisation de la rectifieuse plane MONOPRECIS N° 11. Après le choix des composants mécaniques et électroniques, il devient essentiel de mettre en oeuvre la programmation, l'installation et la supervision du système afin d'assurer un fonctionnement précis, fiable et sécurisé.

Ce chapitre présente le développement de la logique de commande, l'intégration matérielle des différents éléments de la machine ainsi que la conception de l'interface de supervision permettant le contrôle et le suivi du système automatisé.

4.2 Périmètre industriel du projet

Cette section introduit l'environnement industriel de notre projet. Elle présente d'une part l'entreprise partenaire et, d'autre part, la machine-outil qui constitue l'élément central de notre étude technique.

4.2.1 Présentation de l'entreprise

SARL Machine Process est une entreprise familiale implantée dans la zone industrielle N° 37 de Sidi Bel Abbès, spécialisée dans la réhabilitation et la fabrication des équipements mécaniques dynamiques destinés aux secteurs des utilités et de la production industrielle. Grâce à son expérience et à son savoir-faire technique, l'entreprise intervient sur différents types d'équipements industriels tels que les ventilateurs centrifuges, les pompes centrifuges, les moteurs diesel et les compresseurs centrifuges.

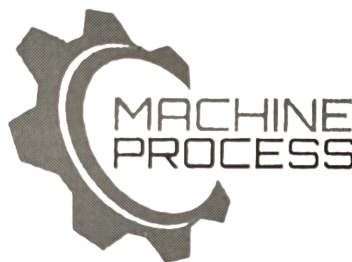


FIGURE 4.1. Logo de l'entreprise Machine Process.[23]

4.2.2 La rectifieuse plane MONOPRECIS N° 11

La rectifieuse plane Monoprécis Modèle 11 [23] est une machine à commandes essentiellement manuelles conçue pour l'obtention de finitions de surface de haute précision

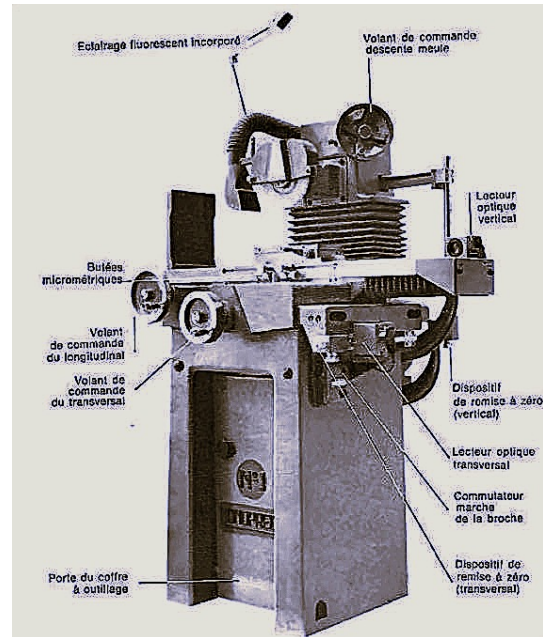


FIGURE 4.2. Rectifieuse plane MONOPRECIS N° 11. [23]

Ses caractéristiques techniques se répartissent comme suit :

Dimensions et capacités	
Dimensions de la table	Elle mesure 400 mm de longueur pour 130 mm de largeur
Plateau magnétique	La machine peut être équipée d'un plateau magnétique manuel de 250 x 125 mm
Capacité de charge	Le poids maximum autorisé pour une pièce est de 500 kg
Motorisation et Broche	
Puissance	le moteur de la broche affiche une puissance de 1,5 CV (environ 1,1 kW) ou 0,75 kW selon les versions
Vitesse de rotation	La vitesse de la broche est comprise entre 2 800 et 2 850 tr/min
Entraînement	La broche est entraînée par deux courroies trapézoïdales. Elle est montée sur des roulements à contacts obliques et est graissée à vie
Caractéristiques de la Meule	
Diamètre	180 mm
Épaisseur	3 mm (épaisseur normale) à 32 mm selon la configuration
Alésage	Les spécifications indiquent soit 31,75 mm, soit 20 mm
Précision des Commandes	
Commande transversale	Une graduation du volant correspond à un déplacement de 0,02 mm

Commande verticale	Une graduation correspond à un déplacement de 0,01 mm
Commande longitudinale	Assurée par une courroie crantée inextensible en prise directe avec la table
Caractéristiques Électriques et Divers	
Branchement	La machine est prévue pour fonctionner en 220 V ou 380 V triphasé
Équipements additionnels	Elle peut être équipée d'un système de visualisation (ex : ANILAM WIZARD 211) et d'un système de refroidissement pour éviter les dommages thermiques aux pièces
Sécurité	Elle intègre des dispositifs tels que des carters de protection et des boutons d'arrêt d'urgence

TABLE 4.1. caractéristiques techniques de la rectifieuse

4.3 Développement de la logique de commande

La logique de commande constitue le cœur fonctionnel du système automatisé. Elle permet de coordonner les déplacements des différents axes, de gérer les séquences d'usinage et d'assurer la communication entre les composants matériels et l'interface de supervision.

4.3.1 Principes de la programmation industrielle

La programmation des machines industrielles consiste à coder des instructions numériques afin d'automatiser les opérations de production, de piloter les mouvements mécaniques et de coordonner le fonctionnement des lignes de fabrication. Elle représente aujourd'hui un élément essentiel dans l'industrie moderne, car elle permet de transformer des machines conventionnelles en systèmes intelligents capables d'exécuter des tâches complexes avec une grande précision et une vitesse élevée.

Le principe repose sur l'envoi d'instructions logiques et séquentielles vers une unité de commande. Ces instructions définissent les déplacements des axes, la vitesse des moteurs, les temps de fonctionnement, ainsi que les réactions du système selon les informations reçues par les capteurs. Par exemple, dans une rectifieuse automatisée, un programme peut commander le déplacement précis de la table suivant les axes X, Y et Z, contrôler la rotation de la broche et gérer automatiquement les différentes étapes de l'usinage.

4.3.2 Python : Le choix évident pour ce projet

Le choix du langage Python dans le cadre de ce projet repose sur plusieurs critères techniques et pratiques liés aux besoins de l'automatisation industrielle et de la supervision.

Avantages	Justification
Libre et gratuit	Python est un langage open-source entièrement gratuit, ce qui constitue un avantage important pour les projets académiques et industriels à faible coût. Son utilisation ne nécessite aucune licence propriétaire, ce qui réduit considérablement les coûts de développement du système automatisé.
Compatibilité avec le Raspberry Pi et les systèmes embarqués	Python possède une excellente compatibilité avec les plateformes embarquées comme le Raspberry Pi utilisé dans ce projet. Il permet un accès simple aux ports GPIO afin de piloter directement : les moteurs pas à pas, les drivers et les capteurs de fin de course.
Bibliothèques étendues et outils intégrés	Dans ce projet, plusieurs bibliothèques ont été exploitées : <ul style="list-style-type: none"> • RPi.GPIO pour le contrôle des entrées/sorties du Raspberry Pi . • json pour la communication entre les programmes. • time pour la gestion des temporisations moteur. • PyQt5 pour la création de l'interface homme-machine .
Gestion du temps réel et du multitâche	Python permet la gestion du multitâche grâce au module threading , utilisé dans ce projet pour exécuter plusieurs opérations en parallèle. Cela améliore la réactivité et la fluidité du système de supervision industrielle.
Rentabilité et évolutivité	L'utilisation de Python avec un Raspberry Pi permet de concevoir une solution industrielle à faible coût tout en conservant des fonctionnalités avancées de supervision et d'automatisation.

TABLE 4.2. Critères de choix du langage Python pour le projet

4.3.3 De la logique algorithmique à l'implémentation

Avant de développer le programme de commande, il est nécessaire de définir l'algorithme de fonctionnement de la machine afin de structurer la logique des différentes opérations du système automatisé. Une fois cette logique établie, son implémentation a été réalisée en Python sur Raspberry Pi pour assurer le pilotage et la supervision de la machine.

4.3.3.1 Modélisation logique de l'algorithme

Cette section présente la logique de fonctionnement de la machine à travers un organigramme détaillé et une description étape par étape de son cycle d'usinage.

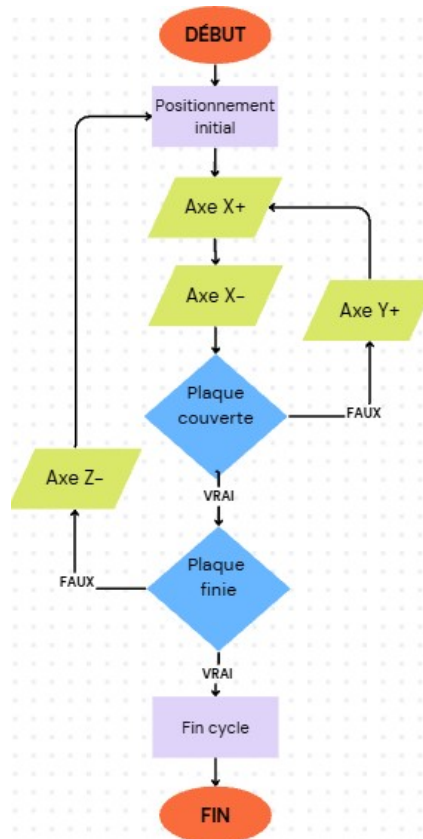


FIGURE 4.3. Organigramme du fonctionnement automatique de la machine.

Cinématique d'un cycle d'usinage complet (Exemple : Plaque 100 * 50 mm)

1. **Positionnement initial** : La meule est positionnée à l'origine physique O.
2. **Passe aller (Axe X+)** : Le moteur X avance lentement à la vitesse programmée jusqu'à l'extrémité de la pièce au point A (déplacement de 10 cm).
3. **Passe retour (Axe X-)** : La table inverse son sens de rotation et revient au point de départ O en suivant exactement la même trajectoire. La meule reste en contact avec le métal pour parfaire l'état de surface.
4. **Décalage latéral (Axe Y+)** : Une fois l'aller-retour X terminé, le moteur Y s'active pour déplacer la table d'un pas déterminé α (par exemple 5 mm) dans la direction du point B. Cela décale la meule pour la bande d'usinage suivante..
5. **Balayage de la surface** : Les étapes 2, 3 et 4 se répètent en boucle jusqu'à ce que la meule ait couvert la totalité de la largeur (les 5 cm menant au point B).
6. **Pénétration verticale (Axe Z-)** : Dès que la surface complète a été balayée, le moteur Y ramène la table à sa position d'origine ($Y = 0$). Simultanément, le moteur Z s'active pour faire descendre la broche selon l'axe C d'une valeur micrométrique (paramètre "C"). Un nouveau cycle de balayage de surface recommence alors sur cette nouvelle couche profonde.

Remarque : Les mouvements Y- et Z+ ne font pas partie du cycle normal d'usinage. L'axe Y- est utilisé pour le retour de la table à sa position d'origine avant une nouvelle couche d'usinage, tandis que l'axe Z+ est principalement utilisé lors des opérations de référencement (Prise d'origine), de dégagement de l'outil ou de maintenance.

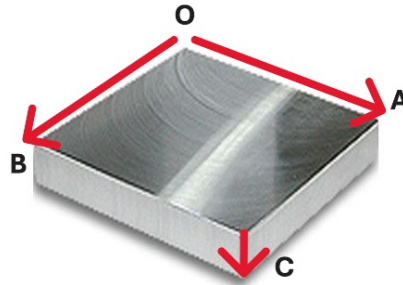


FIGURE 4.4. Repérage des axes de déplacement sur le brut en acier plat.

4.3.3.2 Développement et syntaxe du programme

Cette section détaille l'implémentation concrète du code source en langage Python et les règles syntaxiques choisies pour traduire l'algorithme de commande de la rectifieuse

Initialisation et simulation GPIO

Cet extrait montre l'initialisation des bibliothèques nécessaires ainsi que la configuration des broches GPIO du Raspberry Pi.

Listing 4.1. Configuration initiale des broches GPIO

```

1 import time
2 import json
3 import os
4 import threading
5
6 # pigpio for hardware-accurate timing
7 try:
8     import pigpio
9     pi = pigpio.pi()
10    if not pi.connected:
11        raise RuntimeError("pigpio daemon not running - run: sudo
        ↳ pigpiod")
12    USE_PIGPIO = True
13    print("[GPIO] pigpio connected")
14 except Exception as e:
15    print(f"[WARN] pigpio not available ({e})")
16    print("[WARN] Falling back to RPi.GPIO simulation mode")
17    USE_PIGPIO = False

```

```

18     pi = None
19
20 % RPi.GPIO fallback
21 if not USE_PIGPIO:
22     try:
23         import RPi.GPIO as GPIO
24         ON_PI = True
25     except ImportError:
26         print("[WARN] RPi.GPIO not found - running in SIMULATION
27               ↳ mode")
28         ON_PI = False
29
30 class _GPIO:
31     BCM = OUT = IN = HIGH = LOW = PUD_UP = 1
32     def setmode(self, *a): pass
33     def setup(self, *a, **k): pass
34     def output(self, *a): pass
35     def input(self, p): return 1
36     def cleanup(self): pass
37
38 GPIO = _GPIO()

```

Définition et configuration des entrées/sorties GPIO

Cette partie définit les broches GPIO utilisées pour les moteurs pas à pas et les capteurs de fin de course

Listing 4.2. Configuration des broches des moteurs et capteurs

```

1 STEP1, DIR1 = 20, 21      # Motor 1 - X axis
2 STEP2, DIR2 = 23, 24      # Motor 2 - Y axis
3 STEP3, DIR3 = 25, 26      # Motor 3 - Z axis
4 LIM_X_PLUS   = 2          # X+ limit switch
5 LIM_X_MINUS  = 3          # X- limit switch
6 LIM_Y_PLUS   = 4          # Y+ limit switch
7 LIM_Y_MINUS  = 17         # Y- limit switch
8 LIM_Z_PLUS   = 27         # Z+ limit switch
9 LIM_Z_MINUS  = 22         # Z- limit switch
10
11 # GPIO SETUP
12 def setup_gpio():
13     if USE_PIGPIO:
14         for pin in [STEP1, DIR1, STEP2, DIR2, STEP3, DIR3]:
15             pi.set_mode(pin, pigpio.OUTPUT)
16             pi.write(pin, 0)

```

```

17     for pin in [LIM_X_PLUS, LIM_X_MINUS, LIM_Y_PLUS,
18                LIM_Y_MINUS, LIM_Z_PLUS, LIM_Z_MINUS]:
19         pi.set_mode(pin, pigpio.INPUT)
20         pi.set_pull_up_down(pin, pigpio.PUD_UP)
21     else:
22         GPIO.setmode(GPIO.BCM)
23         for pin in [STEP1, DIR1, STEP2, DIR2, STEP3, DIR3]:
24             GPIO.setup(pin, GPIO.OUT)
25             GPIO.output(pin, GPIO.LOW)
26         for pin in [LIM_X_PLUS, LIM_X_MINUS, LIM_Y_PLUS,
27                    LIM_Y_MINUS, LIM_Z_PLUS, LIM_Z_MINUS]:
28             GPIO.setup(pin, GPIO.IN, pull_up_down=GPIO.PUD_UP)
29
30     print("[GPIO] Setup complete")

```

Fonctions de Pilotage Moteur (Cinématique Bas-Niveau)

Cette partie démontre la conversion des consignes IHM (vitesse) en signaux électriques exploitables par les drivers des moteurs pas à pas.

Listing 4.3. Fonctions de Pilotage Moteur.

```

1  def gpio_read(pin):
2      return pi.read(pin) if USE_PIGPIO else GPIO.input(pin)
3
4  def gpio_write(pin, val):
5      if USE_PIGPIO:
6          pi.write(pin, val)
7      else:
8          GPIO.output(pin, val)
9
10 def get_delay(vitesse_ms):
11     """
12     Convert m/s to step delay in microseconds.
13     DM542 minimum pulse width = 2.5ms -> we use min 5ms per half-
14         ↳ period
15     """
16     if vitesse_ms <= 0:
17         return 500      # 500ms = safe slow speed
18
19     steps_per_sec = (vitesse_ms * 1000.0) * STEPS_PER_MM_X
20     delay_us = int(1_000_000 / (2 * steps_per_sec))
21     return max(delay_us, 5)      # never below 5ms (DM542 safe
22         ↳ minimum)

```

Algorithme Principal (Le Cerveau de la Machine)

Cette partie montre comment les trois axes sont orchestrés pour accomplir l'usage complet.

Listing 4.4. Algorithme Principal

```

1 def run_planer(params: dict):
2     """
3     Main 3-motor planer cycle:
4     Motor1 (X) sweeps length A back and forth
5     Motor2 (Y) steps by B/passes each time Motor1 completes a pass
6     Motor3 (Z) plunges by C each time Motor2 completes full B
7     """
8     global pos_x, pos_y, pos_z
9     A      = params.get("A",      100.0)
10    B      = params.get("B",      100.0)
11    C      = params.get("C",       5.0)
12    vitesse = params.get("vitesse", 0.5)
13    passes_y = max(1, int(params.get("pos_x", 10))) # number of Y
14    ↪ increments
15
16    delay = get_delay(vitesse)
17    steps_A = int(A * STEPS_PER_MM_X)
18    steps_B = int(B * STEPS_PER_MM_Y)
19    steps_C = int(C * STEPS_PER_MM_Z)
20    step_y = max(1, steps_B // passes_y)
21
22    print(f"[RUN] A={A}mm B={B}mm C={C}mm vitesse={vitesse}m/s
23    ↪ delay={delay:.6f}s")
24    write_state({"status": "running"})
25
26    y_total = 0
27    z_layer = 0
28
29    # -- Home first
30    home_all(delay)
31    if stop_flag.is_set():
32        return
33
34    while not stop_flag.is_set():
35        # -- Motor1 FORWARD along X (length A)
36        print(f"[M1] Forward - layer Z={z_layer} Y={y_total}")
37        ok = move_to_limit(STEP1, DIR1, GPIO.HIGH, LIM_X_PLUS,

```

```

    ↪ delay)
36     if ok < 0:
37         break
38     pos_x = A
39     write_state({"x": pos_x})
40     if stop_flag.is_set() or fin_flag.is_set():
41         break
42
43     # -- Motor1 RETURN
44     print("[M1] Return")
45     ok = move_to_limit(STEP1, DIR1, GPIO.LOW, LIM_X_MINUS,
    ↪ delay)
46     if ok < 0:
47         break
48     pos_x = 0.0
49     write_state({"x": pos_x})
50     if stop_flag.is_set() or fin_flag.is_set():
51         break

```

Communication Inter-Processus (IPC) via JSON

Cet extrait illustre comment vous avez résolu le problème de communication entre l'interface graphique (IHM) et le programme de contrôle moteur sans risquer de bloquer le système.

Listing 4.5. CommunicationInter-Processus (IPC) via JSON

```

1  def read_state():
2      """Read the shared state file written by HMI."""
3      try:
4          with open(STATE_FILE, "r") as f:
5              return json.load(f)
6      except Exception:
7          return {}
8
9  def write_state(data: dict):
10     """Write machine status back to shared state file."""
11     try:
12         # Read existing first so we don't overwrite HMI params
13         try:
14             with open(STATE_FILE, "r") as f:
15                 current = json.load(f)
16         except Exception:
17             current = {}

```

```

18
19     current.update(data)
20
21     with open(STATE_FILE, "w") as f:
22         json.dump(current, f, indent=2)
23 except Exception as e:
24     print(f"[STATE] Write error: {e}")

```

4.4 Phases de transformation matérielle de l'équipement

L'implémentation physique de la solution d'automatisation s'articule autour de modifications structurelles majeures de l'équipement. Cette partie traite du rétrofit cinématique des axes, de l'instrumentation de sécurité et de l'architecture générale du câblage.

4.4.1 Cinématique et transmission par vis à bille

Le passage d'une commande manuelle à une gestion automatisée par microcontrôleur sur la rectifieuse plane Monoprécis N° 11 impose une refonte rigoureuse de sa chaîne cinématique. Afin d'éliminer le jeu fonctionnel par inversion (Le jeu mécanique), de réduire les couples de friction et de garantir une précision micrométrique lors du positionnement par les moteurs pas à pas, l'intégration de vis à billes de précision a été planifiée sur les trois axes de déplacement.



(a) Vis de guidage à billes



(b) Démontage du système vis-écrou trapézoïdal.

FIGURE 4.5. Transmission par vis à bille

Axe Transversal (Axe Y) : Remplacement direct et précharge des paliers

L'axe transversal, responsable du balayage de la largeur de la pièce à rectifier, est géométriquement le plus adapté à cette conversion en raison de son architecture d'origine en "tunnel" sous le chariot.

La vis à billes est implantée dans le canal central du bâti, reprenant la position coaxiale exacte de la vis trapézoïdale d'origine.

Axe Vertical (Axe Z) : Passage en prise directe et suppression du jeu de denture

D'origine, le déplacement vertical de la tête porte-meule s'effectue via un volant actionnant un renvoi d'angle à pignons hélicoïdaux (engrenages à 45°), lequel entraîne la vis de descente. Pour l'automatisation, la suppression de ce boîtier de pignons en fonte est indispensable afin d'éliminer définitivement les jeux de denture.

La vis à billes s'aligne verticalement le long de la colonne arrière (le montant), reprenant la trajectoire de la tige filetée verticale d'origine.

Axe Longitudinal (Axe X) : Conception de l'adaptation lourde

L'axe longitudinal (mouvement d'aller-retour de la table) représente la modification structurelle la plus complexe sur la Monoprécis N° 11. Conçue d'origine pour un entraînement manuel rapide via un système de courroie inextensible ou de câble, la table ne possède initialement aucun mécanisme de transmission par vis, et donc aucun dégagement pour un écrou.

La vis à billes doit être installée horizontalement au centre parfait du chariot inférieur, parallèlement et à mi-distance des rails de guidage à galets croisés. Un alignement rigoureusement centré est requis pour contrer tout moment de lacet ou phénomène de coincement lors des inversions rapides imposées par le programme.

4.4.2 Antégration des motorisation et supports d'axes

L'intégration des actionneurs sur la rectifieuse constitue la phase d'interfaçage direct entre la partie commande informatique (gérée par le Raspberry Pi 4) et la partie opérative mécanique. Pour répondre aux exigences de couple de maintien, de résolution angulaire et de coût de développement, des moteurs pas à pas de type NEMA ont été sélectionnés et implantés sur chaque axe.



FIGURE 4.6. Dispositif de motorisation pas-à-pas et réduction par courroie crantée

La mise en place de ces motorisations a nécessité la conception et la fabrication de supports d'adaptation spécifiques (brides et cloches d'alignement) pour garantir une concentricité parfaite entre les arbres moteurs et les nouvelles vis à billes.

4.4.3 Mise en place des capteurs de fin de courses

L'automatisation d'une machine-outil conventionnelle comme la rectifieuse Monoprécis N° 11 ne peut s'envisager sans l'intégration d'un système de retour d'état (Le retour d'information) dédié à la sécurité opérationnelle. Dans un système piloté en boucle ouverte par des moteurs pas à pas, la mise en place de capteurs de fin de course (limit switches) est une nécessité critique. Ils remplissent un double rôle : servir de référence géométrique absolue au démarrage de la machine (phase de prise d'origine machine) et agir comme des butées de sécurité matérielles pour empêcher tout dépassement de course susceptible de détériorer les glissières à galets croisés ou les nouvelles transmissions à vis à billes.

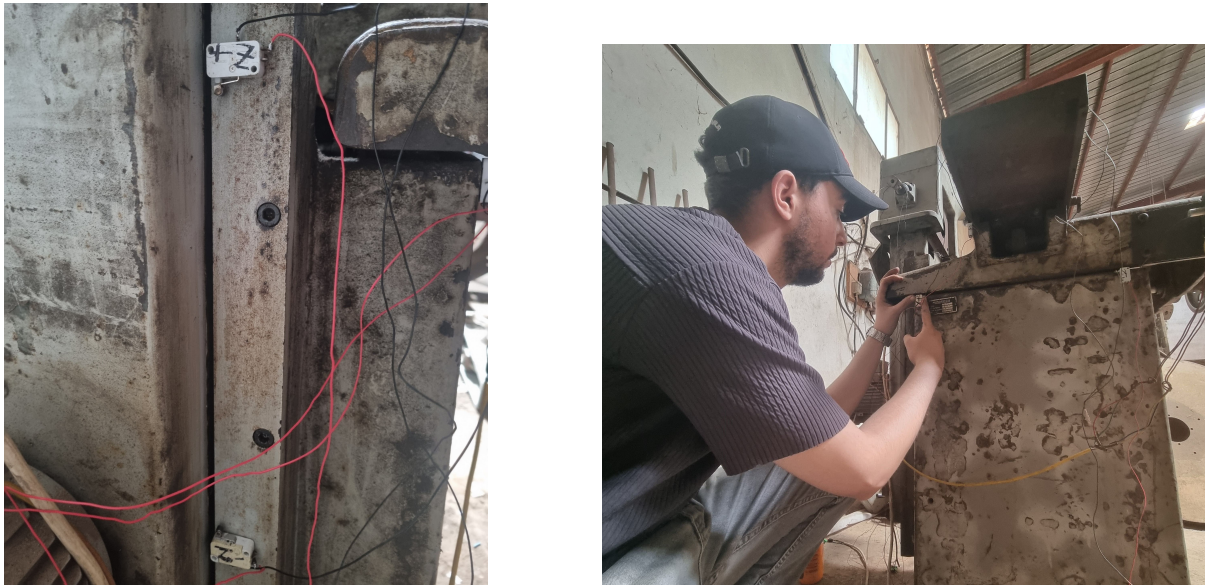


FIGURE 4.7. mise en place des capteurs de fin de courses

4.4.4 Conception et intégration de l'armoire électrique

L'architecture du câblage réalisée dans ce projet assure la communication entre l'unité de commande, les actionneurs et les capteurs de sécurité de la machine automatisée. Cette architecture a été conçue afin de garantir un fonctionnement fiable, sécurisé et précis du système.



FIGURE 4.8. De la conception au montage de l'armoire électrique

Le système repose principalement sur un Raspberry Pi chargé de piloter les moteurs pas à pas à travers des drivers de puissance, tout en assurant la lecture des capteurs de fin de course et la commande de la broche.

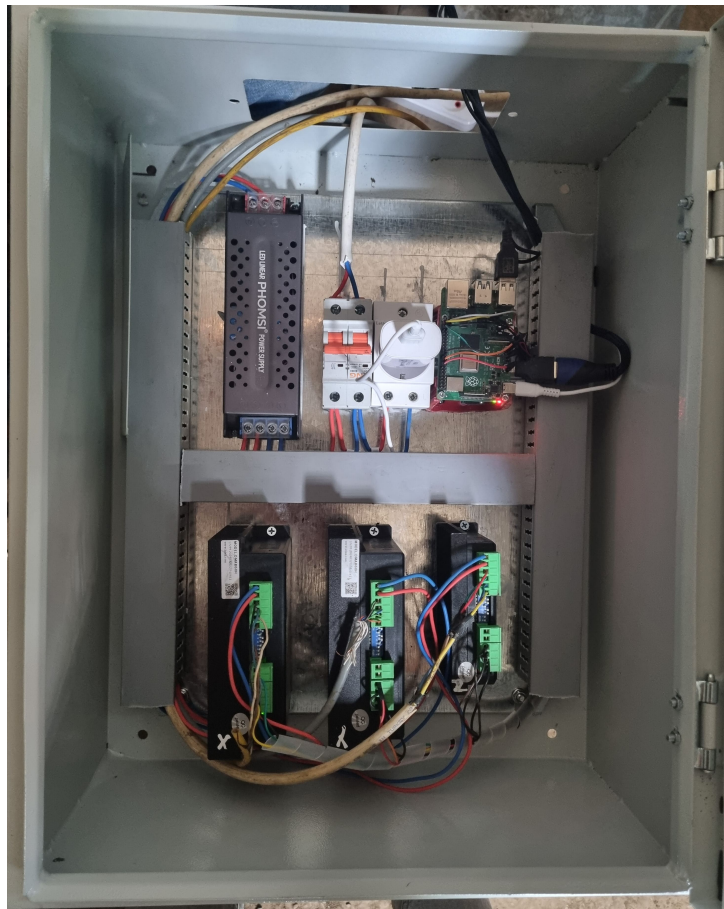


FIGURE 4.9. L'architecture du câblage.

4.5 Conception de l'interface utilisateur et supervision du système (IHM)

L'interface Homme-Machine (IHM) réalisée dans ce projet a été conçue à l'aide de la bibliothèque graphique **PyQt5** afin d'assurer la supervision et le contrôle de la machine. Cette solution permet de développer des interfaces interactives, modernes et adaptées aux applications industrielles. Elle offre également une bonne compatibilité avec le Raspberry Pi ainsi qu'une grande flexibilité pour la gestion des commandes, de la supervision en temps réel et de l'interaction entre l'opérateur et le système automatisé.

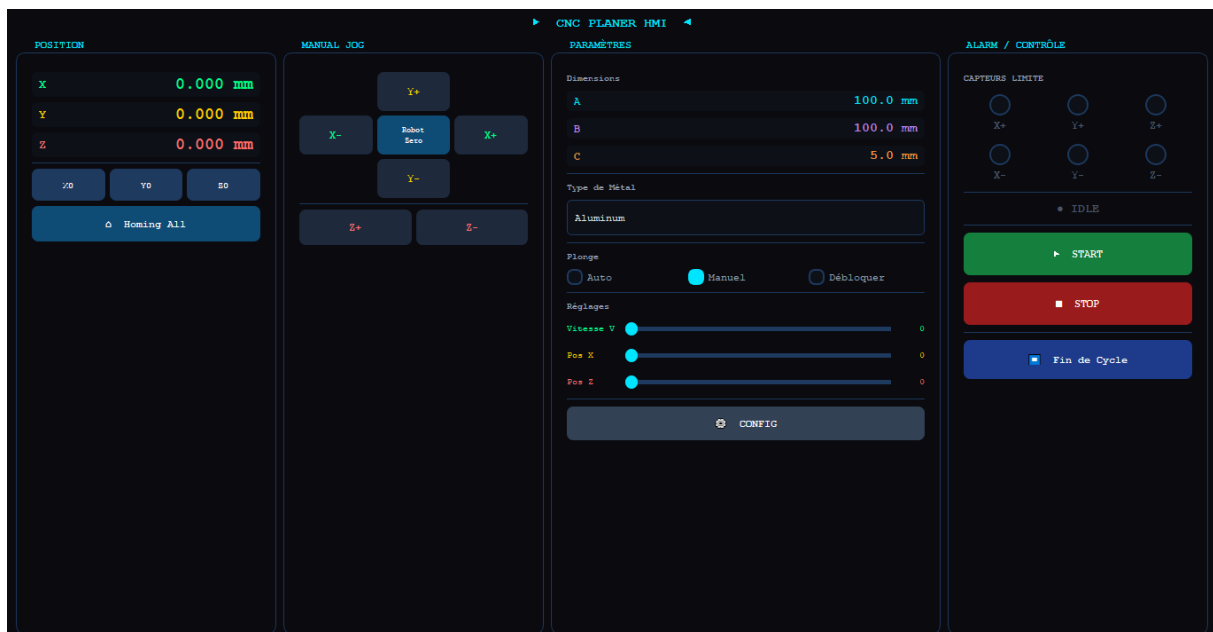


FIGURE 4.10. Interface Homme-Machine (IHM).

4.5.1 Interface principale de contrôle et d'alarme

Cette première interface représente l'écran principal de supervision du système. Elle joue le rôle de tableau de bord général permettant à l'opérateur de surveiller l'état de la machine et d'exécuter les commandes essentielles.

Description des éléments :

- Capteurs limites X+, X-, Y+, Y-, Z+, Z- : Ces indicateurs correspondent aux capteurs de fin de course installés sur les axes de déplacement de la machine. Leur rôle est de détecter les limites mécaniques afin d'éviter les dépassements et les collisions.
- Indicateur d'état (IDLE) : Affiche l'état actuel de la machine, Le mode IDLE indique que le système est en attente d'exécution.
- Bouton START : Permet le démarrage du cycle automatique de la machine.

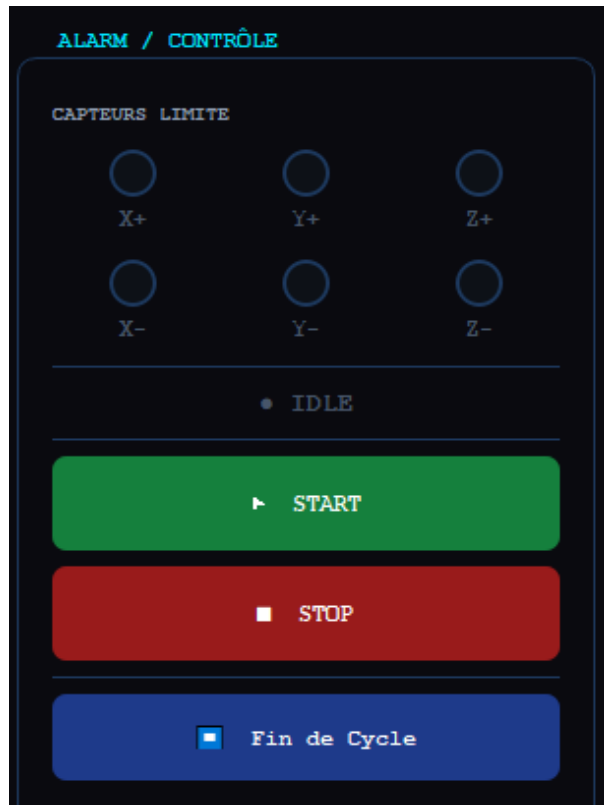


FIGURE 4.1.1. Interface principale de contrôle et d'alarme.

- Bouton STOP : Utilisé pour arrêter immédiatement le fonctionnement du système en cas de besoin.
- Fin de cycle : Ce voyant s'active lorsque l'opération d'usinage ou la séquence programmée est terminée.

4.5.2 Interface des paramètres de configuration

Cette interface est dédiée à la configuration des paramètres de fonctionnement de la machine.

Description des éléments :

- Dimensions A, B et C : Ces valeurs correspondent aux dimensions de travail ou aux paramètres géométriques nécessaires à l'usinage.
- Type de métal : Permet de sélectionner le matériau utilisé, comme l'aluminium. Cette sélection influence les paramètres de vitesse et d'avance.
- Mode de fonctionnement : Auto (fonctionnement automatique suivant le programme), Manuel (contrôle manuel par l'opérateur) ou Débloquer (permet le déverrouillage du système ou la réinitialisation).

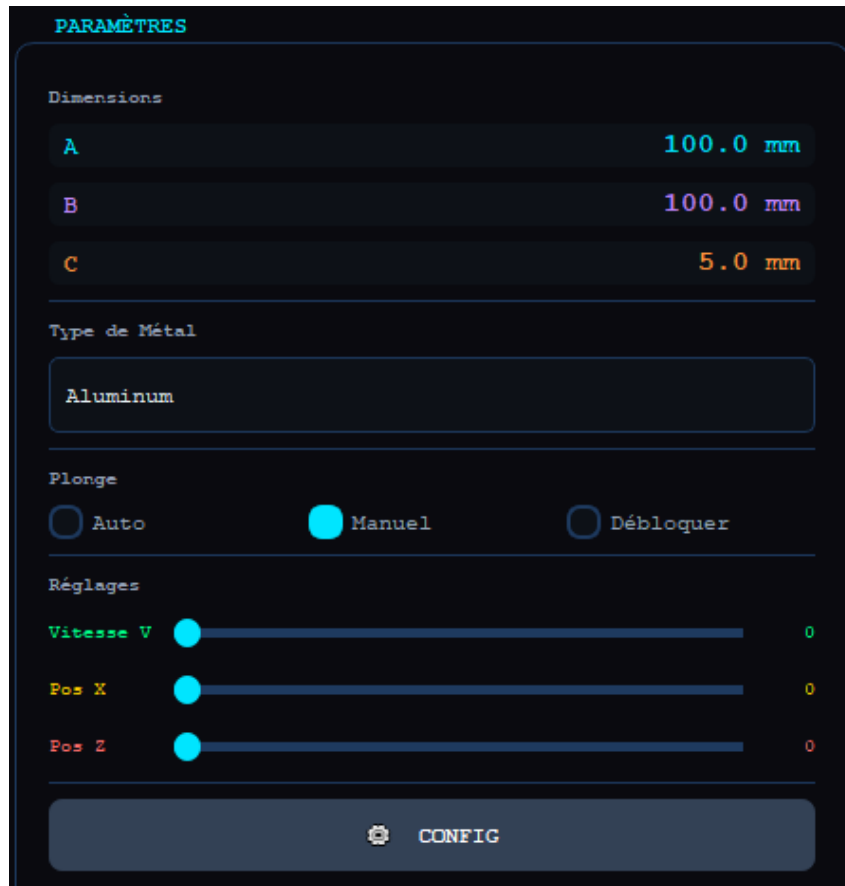


FIGURE 4.12. Interface des paramètres de configuration.

- Réglages vitesse et positionnement : Vitesse pour l'axe X et pour le positionnement des axes Y et Z.
- Bouton CONFIG : Sert à enregistrer et appliquer les paramètres configurés.

4.5.3 Interface de commande manuelle (Jog)

Cette interface assure le contrôle manuel des déplacements de la machine.

Description des éléments :

- X+ / X- : Déplacement de l'axe X.
- Y+ / Y- : Déplacement de l'axe Y dans les directions positive et négative.
- Z+ / Z- : Contrôle vertical de l'axe Z.
- Robot Sense : Zone centrale représentant l'état de détection ou la surveillance du système.

Fonction principale : Le mode Jog permet à l'opérateur :

- Positionner manuellement l'outil.
- Effectuer les tests de déplacement.

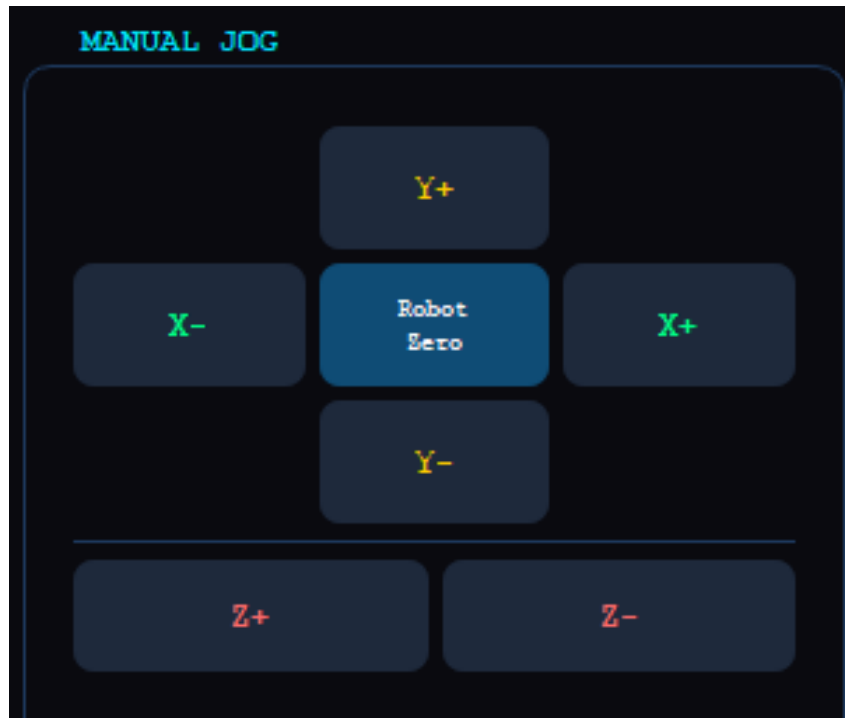


FIGURE 4.13. Interface de commande manuelle (Jog).

- Calibrer les axes.
- Réaliser les opérations de maintenance.

Cette fonctionnalité est très importante lors de la phase de réglage et de mise en service de la machine.

4.5.4 Interface de positionnement des axes

Cette interface affiche les positions instantanées des différents axes de la machine.

Description des éléments :

- Coordonnées X, Y et Z : Affichent en temps réel la position actuelle de l'outil ou de la table de travail en millimètres.
- Boutons X0, Y0 et Z0 : Permettent la remise à zéro individuelle des coordonnées des axes.
- Bouton Homing All : Lance la procédure de référencement automatique de tous les axes afin de revenir à la position d'origine machine.



FIGURE 4.14. Interface de positionnement des axes.

4.6 Extension IoT : Supervision mobile et alertes en temps réel

Pour assurer une transmission de données légère, rapide et fiable, nous avons opté pour le protocole MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Dans cette architecture :

- **Le Raspberry Pi (Publisher) :** Agit comme le noeud central. Il surveille en permanence les capteurs et le déroulement de l'algorithme d'usinage. En cas d'événement (fin de cycle, déclenchement d'un fin de course, ou arrêt d'urgence), un script Python publie instantanément un message sur un canal spécifique (Topic).
- **Le Serveur (Broker) :** Réceptionne et route les messages de manière sécurisée.
- **Le Terminal Mobile (Subscriber) :** Reçoit les données en temps réel via une application dédiée.

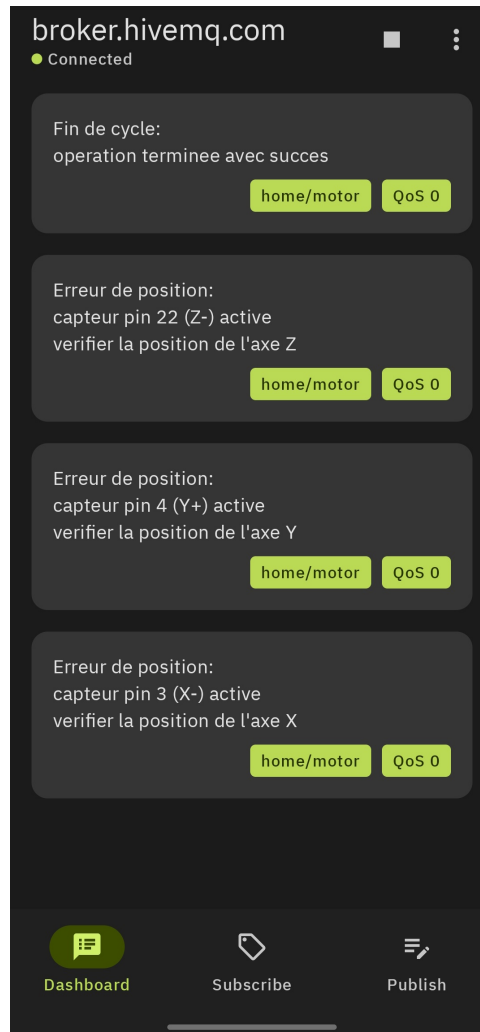


FIGURE 4.15. Interface de supervision mobile et réception des alertes.

4.7 Conclusion

Ce chapitre a permis de concrétiser l'automatisation de la rectifieuse N° 11 par une synergie entre le pilotage intelligent via Raspberry Pi et l'évolution mécanique des axes. Les solutions développées garantissent désormais une exécution sécurisée, une précision accrue et une supervision moderne à distance. Cette transformation technique constitue le socle indispensable à l'optimisation des performances industrielles attendue par notre projet.

VALIDATION EXPÉRIMENTALE ET ANALYSE DES RÉSULTATS

Présentation des résultats de l'automatisation

L'implémentation du système automatisé basé sur le Raspberry Pi 4, des moteurs pas à pas NEMA 23, des pilotes de moteur et des capteurs de fin de course a permis une transformation significative de la rectifieuse plane MONOPRECIS N° 11.

Les principaux résultats observés sont les suivants :

- Les axes motorisés fonctionnent correctement avec des déplacements fluides et réguliers.
- Les moteurs pas à pas assurent un positionnement précis des axes de la machine.
- Les capteurs de fin de course répondent immédiatement en cas de dépassement ou d'erreur de position.
- Le système de sécurité arrête automatiquement le mouvement lorsqu'une anomalie est détectée.
- L'interface IHM permet une commande simple et rapide de la machine.
- Le mode automatique réduit fortement l'intervention manuelle de l'opérateur.



FIGURE 4.16. Opération de rectification réelle

Comparaison entre le mode manuel et le mode automatique

Pour valider l'apport de l'automatisation, nous avons réalisé la rectification d'une même plaque en acier (100 x 50 x 10 mm) selon deux modes : manuel (par un opérateur expérimenté) et automatique (via le système développé).

Protocole de test :

Pièce : Plaque en acier non traité.

Objectif : Rectification de la face supérieure pour obtenir une surface plane et une épaisseur finale de 9.9 mm (enlèvement de matière de 0.1 mm).

Critères de comparaison : Précision dimensionnelle, temps de cycle, qualité de surface, et intervention opérateur.

Critère	Mode Manuel	Mode Automatique	Gain / Amélioration
Précision dimensionnelle	$\pm 0,25$ à $\pm 0,35$ mm	$\pm 0,04$ à $\pm 0,06$ mm	+82 %
Temps de cycle	7 min	4.5 min	-35,7 %
Qualité de surface	Variable	Homogène	Dispersion réduite de ~ 85 %
Intervention opérateur	7 min (continue)	2 min	-71,4 %

TABLE 4.3. Comparaison structurée : mode manuel vs mode automatique

Temps de cycle



FIGURE 4.17. Comparatif des temps de cycle : mode manuel vs mode automatique

Interprétation des résultats

Les résultats du tableau confirment que l'automatisation de la rectifieuse MONOPRECIS N° 11 transforme une machine manuelle à la précision aléatoire et à la productivité limitée en un équipement stable, rapide et homogène. Le gain le plus remarquable est l'amélioration de la précision dimensionnelle (+82 %), qui ouvre la voie à des applications industrielles jusqu'ici inaccessibles avec cette machine. La réduction du temps d'intervention opérateur (-71,4 %) améliore non seulement la productivité mais aussi les conditions de travail, alignant ainsi le projet avec les objectifs initiaux d'automatisation, de sécurité et de performance.

Synthèse et validation des objectifs du projet

Objectif initial	Résultat obtenu	Validation
Automatiser les mouvements principaux	Pilotage 3 axes par moteurs pas à pas	Atteint ✓
Améliorer la précision	$\pm 0,04$ à $\pm 0,06$ mm (gain 82%)	Dépassé ✓
Réduire le temp de cycle	Cycle réduit de 35,7 %	Atteint ✓
Augmenter la productivité globale	Intervention opérateur réduite de 71,4 %	Atteint ✓
Améliorer la sécurité	Présence continue diminuée	Partiellement (fins de course intégrés)

TABLE 4.4. Évaluation de l'atteinte des objectifs du projet

Perspectives d'amélioration

Le système actuel, bien que performant, offre plusieurs axes d'amélioration pour une version future.

- L'ajout d'une sonde de palpation tactile permettrait de mesurer automatiquement les dimensions de la pièce avant l'usinage et de détecter la surface de référence. Cette fonctionnalité améliorerait considérablement la précision du positionnement initial et réduirait les risques d'erreurs liés au référencement manuel.

- L'interface graphique pourrait être enrichie par l'ajout d'une visualisation 3D des trajectoires programmées avant l'exécution du cycle, permettant à l'opérateur de vérifier visuellement les déplacements et d'identifier d'éventuelles erreurs de paramétrage.
- Le système MQTT actuellement implémenté transmet uniquement des alertes en temps réel. Il serait pertinent d'étendre cette fonctionnalité pour permettre un enregistrement historique des données de fonctionnement (positions, vitesses, durées des cycles, alertes) dans une base de données locale ou distante.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail de recherche a permis de concrétiser la modernisation d'un équipement industriel conventionnel par l'intégration de technologies numériques contemporaines. En transformant la rectifieuse Monoprécis N° 11 en un système automatisé, cette étude démontre qu'une approche de rétrofit technologique constitue une solution pertinente pour adapter le patrimoine industriel existant aux exigences de l'Industrie 4.0.

L'alliance entre l'informatique embarquée, la programmation et la mécanique de précision illustre la faisabilité technique de la transition d'un mode de fonctionnement manuel vers une gestion pilotée par logiciel. Ce projet souligne l'importance de l'interdisciplinarité pour répondre aux défis actuels de la production, en conciliant la robustesse des machines traditionnelles avec la souplesse des outils numériques modernes.

En conclusion, ce mémoire constitue un socle pour de futures réflexions sur l'intelligence et la connectivité des machines-outils. Il confirme que la numérisation des équipements classiques reste une voie stratégique pour assurer la pérennité et la performance des outils de production au sein d'un environnement industriel en constante évolution.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Alex, *What Is a Grinding Machine? The Ultimate Guide in One Place*, Rosnok Machine, 2025,
- [2] B. Zammouchi, & A. Bougaila, *Conception et réalisation d'une machine CNC à 3 axes*, Mémoire de Master, Université de Blida 1, 2021.
- [3] K. Amoudache, & A. Amiar, *Conception et Mise en oeuvre d'un Système Embarqué de Reconnaissance d'Objets*, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2024.
- [4] <https://artizono.com/fr/machine-a-rectifier-a-commande-numerique-et-machine-a-rec>
- [5] https://www.assistancescolaire.com/eleve/3e/technologie/reviser-une-notion/3_tec_14
- [6] M. C. DJAMAA, *Machines-Outils à Commande Numérique*, Polycopié de Cours, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2020.
- [7] D. Zhang, *Qu'est-ce qu'un moteur pas à pas?*, Stepperonline, 2020,
- [8] <https://datacapturecontrol.com/articles/io-devices/single-board-computers/raspberry-pi-4b>
- [9] J. F. Debongnie, *Usinage*, Editions du CEFAL, 2006, 213 pages.
- [10] https://etab.ac-poitiers.fr/coll-missy-la-rochelle/sites/coll-missy-la-rochelle/IMG/pdf/1._cours_chaines_d_energie-_chaîne_d_information-3.pdf
- [11] I. Bouhenni, *Simulation d'une chaîne de production au niveau de l'unité de production Moulin Ouled Mimoun*, Mémoire de Master ,Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, 2016.
- [12] A. T. Joy, *Guide complet des interrupteurs de fin de course*, Tameson, 2024.
- [13] <https://www.jssmotor.com/fr/blog/what-are-the-main-functions-of-a-stepper-motor-c>
- [14] T. Cheri, *Rectification CNC vs Rectification conventionnelle :choisir bonne méthode*, KENENG, 2025.
- [15] <https://mytmachining.com/fr/quest-ce-quune-rectifieuse-a-commande-numerique-et-co>
- [16] H. Mazelin, *Les moteurs pas à pas*, redohm, 2018.

- [17] M. Kebabla, *Architecture des Systèmes Automatisés*, Polycopié de Cours, Université Batna 2, 2022.
- [18] F. Mocql, *Raspberry Pi 4 : 4 nouveautés qui vont vous faire craquer!*, Framboise 314, 2019.
- [19] M. Habbab, *Architecture des Systèmes Automatisés*, Polycopié de Cours, Université de Béchar, 2021.
- [20] <https://bpmei-prades.com/cours/les-systemes-automatisees/lessons/structure-generale-dun-systeme-automatise-de-production>
- [21] Steven, *Rectification CNC : Guide de précision ultime*, Partmfg, 2025.
- [22] <https://www.plcmasters.com/fr/blogs/news/advantages-and-disadvantages-of-industrial-automation>
- [23] SARL Machine Process, *Entreprise Industrielle*, Zone Industrielle de Sidi Bel Abbès, Algérie.
- [24] H. Sankara, *SYSTEME AUTOMATISE DE PRODUCTION (S.A.P)*, AUTOMATISME, 2026.
- [25] <https://technologie-sciarretta.ovh/?p=739>
- [26] <https://tinyurl.com/58m347d2>
- [27] <https://www.xyzncnc.com/fr/what-is-a-grinding-machine-guide-types-uses.html>
- [28] K. Labidi, *Généralités sur la rectification*.