

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA
كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie
قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Mention Électronique
Spécialité Instrumentation en électronique

Présenté par

BOUNABI CHAIMAA

&

SEGHIER MOHAMED

Conception et réalisation d'une cadreuse automatique de ferrailage

Proposer par : **Dr. TIDJANI. Naoual**

Année Universitaire 2024-2025

Je dédie ce mémoire à : Mes chers parents qui mont toujours pousse et motive dans mes études. Tous les sacrifices Consentis et ses précieux conseils, et tout le courage qui son me donné pour continu a battre ver mon rêve. A mes sœur Lydia et Leila pour sa disponibilité, son aide, ses scarifications et son attention Et mes frères Abderrazak et Abdel Wahab A tous mes amis en particulier : Rania et Fatima Zohra A toute ma famille, et mes proches. A tous ceux et celles qui m'ont aidé de près ou de loin.

Chaima bounabi

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à Madame Tidjani Naoual, notre encadrante, pour sa disponibilité, ses conseils précieux et son accompagnement tout au long de ce travail. Nos sincères remerciements vont également à l'ensemble des membres du jury, pour l'attention qu'ils porteront à notre projet et pour leurs remarques constructives. Nous remercions également nos enseignants du département d'électronique pour la qualité de la formation reçue durant ces années d'étude. Enfin, une pensée toute particulière à nos familles pour leur soutien moral inconditionnel, et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

ملخص

يتناول هذا المشروع تصميم وإنجاز آلة تقويم وتشكيل تلقائي للأسلاك المعدنية، تُستخدم بشكل أساسي في مجال الخرسانة المسلحة. تم تصميم هذه الآلة لأتمتة ثلاث مراحل أساسية من العملية: تغذية الأسلاك وتصحيح استقامتها، التشكيل ثلاثي الأبعاد، ثم القطع حسب الطول المطلوب. يعمل النظام بالكامل بشكل متسلسل ومنسق، ويتم التحكم فيه بواسطة وحدة تحكم قابلة للبرمجة، لضمان إنتاج سريع ودقيق ومتكرر. تمكن هذه الأتمتة من تقليل التدخل البشري، وتحسين جودة المنتجات النهائية، وتعزيز الإنتاجية في ورش تصنيع الهياكل المعدنية.

الكلمات المفتاحية: المتحكم المنطقي القابل للبرمجة، واجهة الإنسان والآلة، محرك متدرج

Abstract

This project focuses on the design and development of an automatic wire bending machine used primarily in the field of reinforced concrete. The machine is designed to automate the three main stages of the process : wire feeding and straightening, three-dimensional bending, and cutting to the desired length. The entire system operates sequentially and in a coordinated manner, controlled by a programmable controller, to ensure fast, precise, and repeatable production. This automation reduces manual intervention, improves the quality of the final products, and increases productivity in metal reinforcement manufacturing workshops.

Keywords: PLC, HMI, Stepper motor, TIA Portal

Résumé

Ce projet porte sur la conception et la réalisation d'une machine cadreuse automatique pour le façonnage de fil métallique, utilisée principalement dans le domaine du béton armé. La machine est conçue pour automatiser les trois étapes essentielles du processus ; l'alimentation et le redressement du fil, le pliage en trois dimensions, puis la coupe à la longueur désirée. L'ensemble du système fonctionne de manière séquentielle et coordonnée, piloté par un contrôleur programmable, afin d'assurer une production rapide, précise et répétitive. Cette automatisation permet de réduire les interventions manuelles, d'améliorer la qualité des produits finis et de renforcer la productivité dans les ateliers de fabrication d'armatures métalliques.

Mots Clée : API, IHM, moteur pas à pas, TIA Portal

Liste des acronymes et abréviations:

CNC: commande numérique controlable.

EEPROM : Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory (Mémoire non volatile programmable effaçable électriquement).

FBD : Function Block Diagram (Schéma fonctionnel).

HMI : Interface Homme-Machine (Interfaces homme-machine).

I2C : Inter-Integrated Circuit (Circuit inter-intégré).

LAD : Ladder Diagram (Diagramme en échelle).

PTO : Pulse Train Output (Sortie du train d'impulsions).

SRAM : Static Random Access Memory (Mémoire vive statique).

SPI : Serial Peripheral Interface (Interface périphérique série).

SCL : Structured Control Language (Langage de contrôle structuré).

STL : Statement List (Language liste d'instructions).

UART : Universal Asynchronous Receiver Transmitter (Récepteur-transmetteur asynchrone universel).

Table des matières

Table des figures	i
Liste des tableaux	iii
1 GÉNÉRALITÉS	3
1.1 Introduction	3
1.2 Les cadreuses	3
1.2.1 Déffinition d'une cadreuse	3
1.2.2 Application de la cadreuse dans l'industrie	4
1.2.3 Fonctionnement général des cadreuses	4
1.3 Types de cadreuse utiliser dans le ferrailage	6
1.3.1 Cadreuse manuelle	6
1.3.2 Cadreuse semi automatique	6
1.3.3 Cadreuse automatique	7
1.4 Les étriers	8
1.4.1 Importance des étriers	8
1.4.2 But des étriers	9
1.4.3 formes des étriers	9
1.5 les systèmes automatisés	11
1.5.1 Définition	11
1.5.2 Principe de l'automatisation	11
1.5.3 L'objectifs de l'automatisation industrielle	12
1.5.4 Domaine d'application	13
1.5.5 Les types de systèmes automatisés utilisés dans les cadreuses auto- matiques	14
1.6 Conclusion	15
2 Conception d'un prototype de la machine	16
2.1 Introduction	16

2.2	Fonctionnement de la machine	16
2.2.1	Système d'alimentation et de redressement	18
2.2.2	Façonnage	19
2.2.3	Découpage	20
2.3	Conclusion	22
3	Automatisation d'une machine cadreuse : analyse des solutions Arduino et API	23
3.1	Introduction	23
3.2	Automatisation à base d'Arduino	23
3.2.1	Matériel et composants	23
3.2.2	Architecture et schéma électrique de câblages	27
3.2.3	Programmation et algorithmes de contrôle	28
3.3	Automatisation à base de l'API	30
3.3.1	Architecture et composants du système API	30
3.3.2	Programmation de commande et contrôle	32
3.3.3	Communication et gestion	34
3.4	Conclusion	35
4	Assemblage, configuration et test	36
4.1	Introduction	36
4.2	Assemblage	36
4.3	Découpage des modèles avec Cura	38
4.3.1	Configuration et test de la machine	44
4.3.2	Programme de la machine	45
4.4	Conclusion	48
	Bibliographie	50
A	Explications des broches des drivers A4988 et DRV8825	A
B	Tableaux de sélections pour micropas	D

Table des figures

1.1	Redressement	4
1.2	Pliage	5
1.3	Coupage	5
1.4	Façonnage manuel	6
1.5	Façonnage semi-automatique	7
1.6	Façonnage semi-automatique	7
1.7	Exemple des étriers	8
1.8	Représentation des étriers	9
1.9	Type des étriers	10
1.10	Autres formes des étriers	10
2.1	Les parties principales selon l'ordre chronologique de fonction de la machine	17
2.2	Séquence d'opération de la machine cadreuse automatique	17
2.3	système d'alimentation du fil	18
2.4	Système d'alimentation du fil	19
2.5	Mécanisme de transfert du fil redressé vers le système de façonnage	20
2.6	Système mécanique de découpe du fil métallique	21
2.7	Assemblage final de la machine automatique de fabrication de cadres . . .	22
3.1	Carte Arduino Uno	24
3.2	a. Moteur pas à pas NEMA 17 ; b. Moteur pas à pas NEMA 23	25
3.3	a. Module A4988 ; b. Module DRV8825	26
3.4	Fin de course	27
3.5	Cablage électrique	28
3.6	Circuit électrique réel à base d'Arduino	28
3.7	ATM Siemens S7-1200 CPU 1214C DC/DC/DC	31
3.8	Driver de pilotage DM542T (V2.3)	32
3.9	Armoire du système API	32
3.10	Interface homme-machine Siemens KTP400	35

4.1	Le flux de travail de l'idée à l'impression 3D finale	37
4.2	L'interface CAO(SolidWorks)	37
4.3	L'interface CURA	38
4.4	La pièce dessinée sur SolidWorks	39
4.5	Enregistrement en STL	39
4.6	les différentes pièces sur logiciel ELEGOO CURA	40
4.7	Pièces pendant et après le processus d'impression	41
4.8	Support de la machine	42
4.9	les boulons et les écrous utilisés	42
4.10	Machine réalisée	43
4.11	lConfiguration des pins	44
4.12	lConfiguration des pins	44
4.13	Affichage de l'IHM	45
4.14	lProgramme de la forme créée	45
4.15	lCommande de déplacement de la'xe 1	46
4.16	lDéblocage ou blocage de l'axe 2	46
4.17	ommande de déplacement de l'axe 2 pour un sens positif	47
4.18	Commande de déplacement de l'axe 2 pour un sens positif	47
4.19	Compteur de boucle	48
A.1	Broches du module A4988	B
A.2	Broches du module DRV8825	B
B.1	lProgramme de la forme créée	F
B.2	lProgramme de la forme créée	F

Liste des tableaux

4.1	Les principaux paramètres d'impression sur logiciel ELEGOO CURE . . .	40
B.1	Combinaisons des Modes de l'A4988	D
B.2	Combinaison des Modes Micropas du DRV8825	D
B.3	Caractéristiques techniques des moteurs	E
B.4	Caractéristiques techniques des moteurs	E

Introduction Générale

L'industrie moderne connaît une transformation majeure grâce à l'automatisation, un pilier fondamental de l'industrie 4.0. Face à la nécessité d'améliorer la productivité, la précision et la sécurité des procédés de fabrication, les entreprises se tournent de plus en plus vers des systèmes automatisés capables de remplacer ou d'assister efficacement les opérations manuelles. Cette transition s'impose avec d'autant plus d'importance dans les domaines où les tâches sont répétitives, complexes ou nécessitent une précision élevée, comme c'est le cas dans le façonnage de fil métallique.

Dans ce contexte, ce mémoire s'intéresse à l'automatisation d'une machine cadreuse 3D destinée à la mise en forme du fil métallique. Ce dispositif est essentiel dans plusieurs secteurs industriels tels que la construction, la fabrication de pièces métalliques, ou encore les structures en béton armé. La commande de cette machine repose sur deux technologies de contrôle distinctes : les microcontrôleurs de type Arduino, et les automates programmables industriels (API). Chacune de ces approches présente des avantages et des limites spécifiques en termes de coût, de complexité, de robustesse, et d'intégration dans des environnements industriels.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier, concevoir et comparer l'automatisation de cette machine à l'aide de ces deux solutions, dans une perspective d'optimisation des performances globales du système. Une première partie du mémoire est dédiée à la mise en œuvre d'un système de commande basé sur Arduino, avec un accent sur les composants matériels, les schémas de câblage et les algorithmes de contrôle. La seconde partie explore l'intégration d'un API de la gamme Siemens S7-1200, en détaillant son architecture, sa programmation via TIA Portal, et les protocoles de communication associés tels que PROFINET.

Cette étude vise ainsi à fournir une analyse technique approfondie, fondée sur une expérimentation concrète, afin d'identifier la solution la plus adaptée aux exigences d'une machine cadreuse moderne. Elle s'inscrit dans une démarche d'apprentissage et d'application des technologies d'automatisation, tout en contribuant à la réflexion sur le choix des outils de commande dans les systèmes mécatroniques actuels.

Le mémoire est structuré comme suit : Le premier chapitre traite en général les différentes machines cadreuse du fil disponibles sur le marché mondial, de leurs types et de la technologie utilisée.

Le deuxième chapitre est concerné la conception mécanique des principaux parties de la machine (alimentation et redressement, pliage, et coupage).

Le troisième chapitre basé sur l'automatisation de la machine avec deux aspects différents : Arduino et API, en détaillant sur les composants utilisés et le fonctionnement.

Le quatrième couvre les différentes étapes du développement de prototypes de machines, de la conception et de l'impression de pièces 3D à l'assemblage et à le montage, et enfin aux test

Chapitre 1

GÉNÉRALITÉS

1.1 Introduction

Dans le domaine du génie civil, la qualité et la rapidité d'exécution des armatures métalliques conditionnent en grande partie la solidité et la durabilité des ouvrages en béton armé. Pour répondre aux exigences croissantes de performance, de précision et de sécurité, les procédés manuels ont progressivement laissé place à des solutions automatisées. Parmi celles-ci, la cadreuse automatique représente une avancée technologique majeure, en permettant le façonnage rapide et précis de cadres et d'étriers à partir de fil métallique. Ce chapitre est basé sur une présentation générale des cadreuses et leur fonctionnement et les différents types de cadreuse, ainsi que les étriers et de leur importance.

1.2 Les cadreuses

1.2.1 Définition d'une cadreuse

Une cadreuse de ferrailage est un dispositif industriel, Elle gère plusieurs tâches successives sur du fil ou des barres d'acier conçu pour assurer la fabrication en série des armatures métalliques utilisées dans les structures en béton armé. Cet équipement prend en charge un ensemble d'opérations successives sur des fils ou des barres d'acier, généralement livrés en couronnes. Il commence par le redressement, visant à corriger la courbure initiale du matériau, ensuit le pliage, qui permet de former des géométries précises en deux ou trois dimensions selon les besoins du projet, et enfin la coupe, qui détermine la longueur exacte des éléments produits. Ces configurations sont indispensables pour renforcer les composants structurels du béton, comme les poutres, les poteaux, les dalles ou les fondations [1].

1.2.2 Application de la cadreuse dans l'industrie

Les cadreuses ont un rôle crucial dans l'amélioration de la production d'armatures en acier pour le béton armé, et sont couramment utilisées dans l'industrie du bâtiment et des travaux publics, elles prennent part dès les premières étapes de préfabrication et tout au long du processus de construction, en particulier pour la production d'éléments structurels tels que les fondations, colonnes, poutres, murs porteurs et planchers. Les cadreuses, grâce à leur aptitude à créer des structures personnalisées de façon rapide, précise et constante, contribuent grandement à la diminution des temps de production tout en garantissant une meilleure gestion de la qualité et du respect des normes techniques. Dans le domaine industriel, elles sont insérées dans les installations de production automatisée, y compris les centrales de ferrailage, les usines de préfabrication et les ateliers de fabrication de pièces précontraintes ou armées en béton. Ils sont également employés dans les infrastructures complexes telles que les ponts, tunnels, barrages, structures portuaires ou centrales électriques, où l'exactitude des armatures est cruciale pour assurer la sûreté et la pérennité des constructions. En intégrant les cadreuses dans le processus d'industrialisation et de digitalisation du bâtiment, les sociétés de construction parviennent à accroître simultanément leur compétitivité et leur efficacité en matière d'opérations. [2].

1.2.3 Fonctionnement général des cadreuses

Le fonctionnement d'une cadreuse repose sur trois étapes principales et successives : le redressement, le pliage et la coupe.

1.2.3.1 Redressement

Le fil métallique ou la barre d'acier, généralement livré en bobines, a une courbure naturelle. Le redressage est un processus destiné à éliminer cette courbe en utilisant un ensemble de rouleaux de correction, qui fait intervenir des forces opposées. Cette étape est critique pour maintenir la précision pendant le processus de pliage et éviter les défauts structurels au sein des structures.

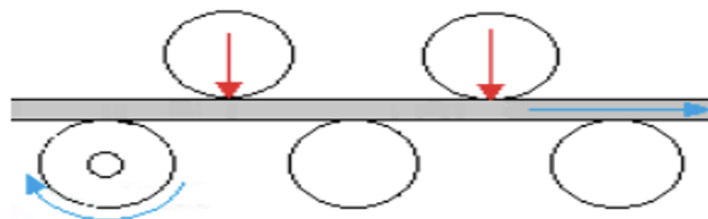


Figure 1.1: Redressement

1.2.3.2 Pliage

Une fois le fil redressé, il est dirigé vers l'unité de pliage. Selon le modèle de cadreuse, le pliage peut être réalisé en 2D, permettant la création de formes planes (rectangles, carrés, étriers), ou en 3D pour des structures plus complexes (cages d'armature, renforts volumétriques). Les mouvements sont pilotés par des automates programmables industriels (API), assurant une grande précision et une répétabilité constante.

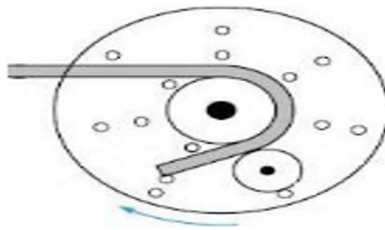


Figure 1.2: Pliage

1.2.3.3 Coupage

La dernière étape consiste à découper le fil à la longueur souhaitée. Cette opération est souvent synchronisée avec le pliage pour un flux de production continu. Les systèmes de coupe peuvent être de type mécanique, hydraulique ou électrique, en fonction des capacités de la machine et du diamètre du fil travaillé.

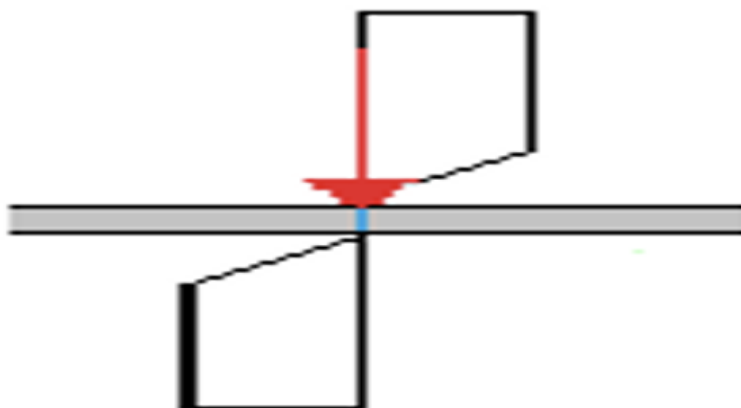


Figure 1.3: Coupage

1.3 Types de cadreuse utiliser dans le ferrailage

1.3.1 Cadreuse manuelle

Les cadreuses manuelles sont des outils de base qui nécessitent l'intervention directe de l'opérateur pour toutes les étapes (redressement, pliage, coupe). Elles sont adaptées aux petits chantiers ou aux travaux de réparation. Leur principal avantage réside dans leur faible coût, mais elles sont limitées en termes de précision, de productivité et de sécurité.

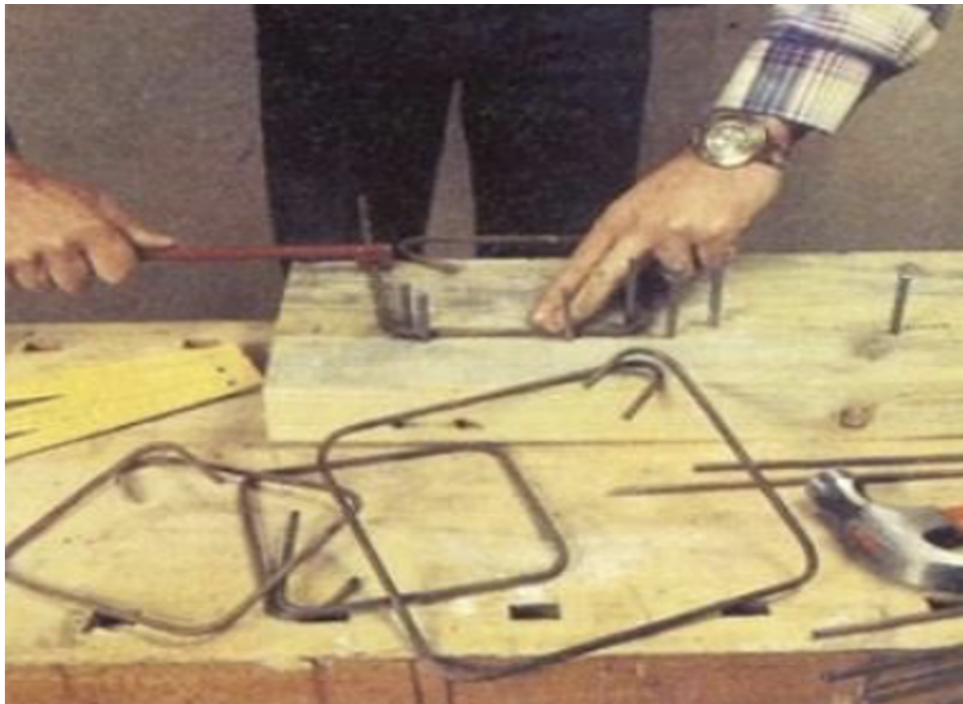


Figure 1.4: Façonnage manuel

1.3.2 Cadreuse semi automatique

Ces machines automatisent certaines fonctions (souvent le redressement et le pliage), tout en nécessitant une surveillance ou une intervention humaine pour la coupe ou le positionnement. Elles sont adaptées aux ateliers de taille moyenne et permettent une meilleure productivité que les cadreuses manuelles tout en restant moins coûteuses que les solutions totalement automatisées.



Figure 1.5: Façonnage semi-automatique

1.3.3 Cadreuse automatique

Les cadreuses automatiques sont des appareils entièrement automatisés, qui peuvent redresser, plier (en 2D ou 3D) et couper le fil sans nécessiter une supervision humaine constante. Ces systèmes sont gérés par des dispositifs automatisés tels que les automates programmables industriels (API) ou les interfaces CNC. Ces appareils garantissent une précision élevée, une vitesse d'exécution optimale et une remarquable répétabilité, des caractéristiques idéales pour la préfabrication en grandes quantités.



Figure 1.6: Façonnage semi-automatique

1.4 Les étriers

Les étriers sont des armatures transversales en acier formées généralement en boucle fermée (carrée, rectangulaire ou circulaire), utilisées dans les éléments en béton armé tels que les poutres, poteaux, semelles, ou longrines. Ils sont façonnés à partir de barres ou de fils métalliques et jouent un rôle essentiel dans le renforcement transversal des structures. Ils sont positionnés perpendiculairement aux barres longitudinales et leur espacement est défini selon les contraintes mécaniques que l'élément doit supporter [3].



Figure 1.7: Exemple des étriers

1.4.1 Importance des étriers

Les étriers sont très importants dans le domaine génie civil, sachant que tous construction Civil exige un grand nombre des étriers, sont fournis pour maintenir les armatures Principales. Sont placés à intervalles appropriés sur les poutres et les poteaux pour Les empêcher de flamber. De plus, ils protègent les structures du béton armé contre L'effondrement lors des activités sismiques (tremblements de terre) Les étriers peuvent avoir des formes multiples en fonction de la conception et de la forme des Éléments. L'utilisation d'étriers est nécessaire pour empêcher les colonnes et les poutres de se Déformer et pour aider à résister aux charges latérales (par exemple, les charges sismiques) [4].

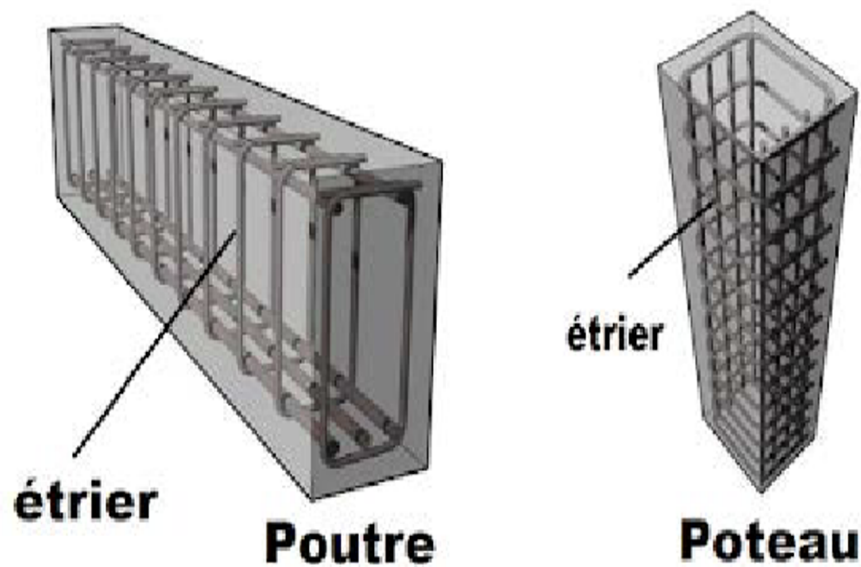


Figure 1.8: Représentation des étriers

1.4.2 But des étriers

- Il augmente la résistance à la compression des Poteaux.
- Sa résistance au cisaillement et à la torsion.
- Il peut améliorer la ductilité des Poteaux.
- Il peut améliorer la ductilité des Poteaux.
- Les étriers empêchent le flambement de l'armature principale des poteaux.
- Au moment du bétonnage, il empêche le mouvement des armatures principales.

1.4.3 formes des étriers

Il existe plusieurs type et modèle des étriers les plus utilisé sont :

- Étrier rectangulaire.
- Étrier circulaire.
- Étrier diamant.
- Étrier carré.
- Étrier triangulaire.
- Étrier spiral.

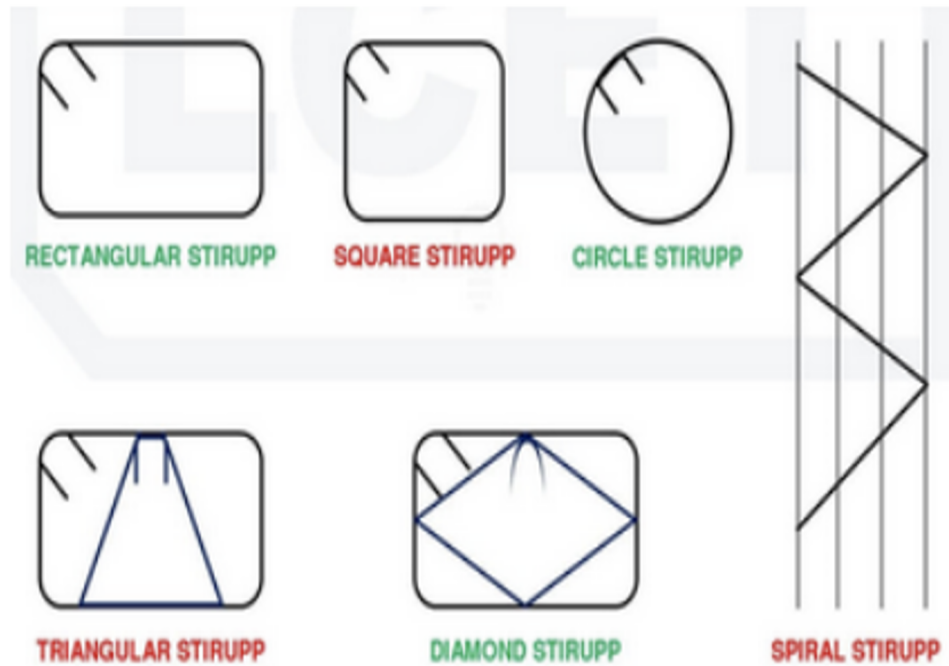


Figure 1.9: Type des étriers

Et plusieurs d'autre formes, les étriers peuvent avoir des formes et des tailles différentes selon la conception du poteau et de la poutre [5].

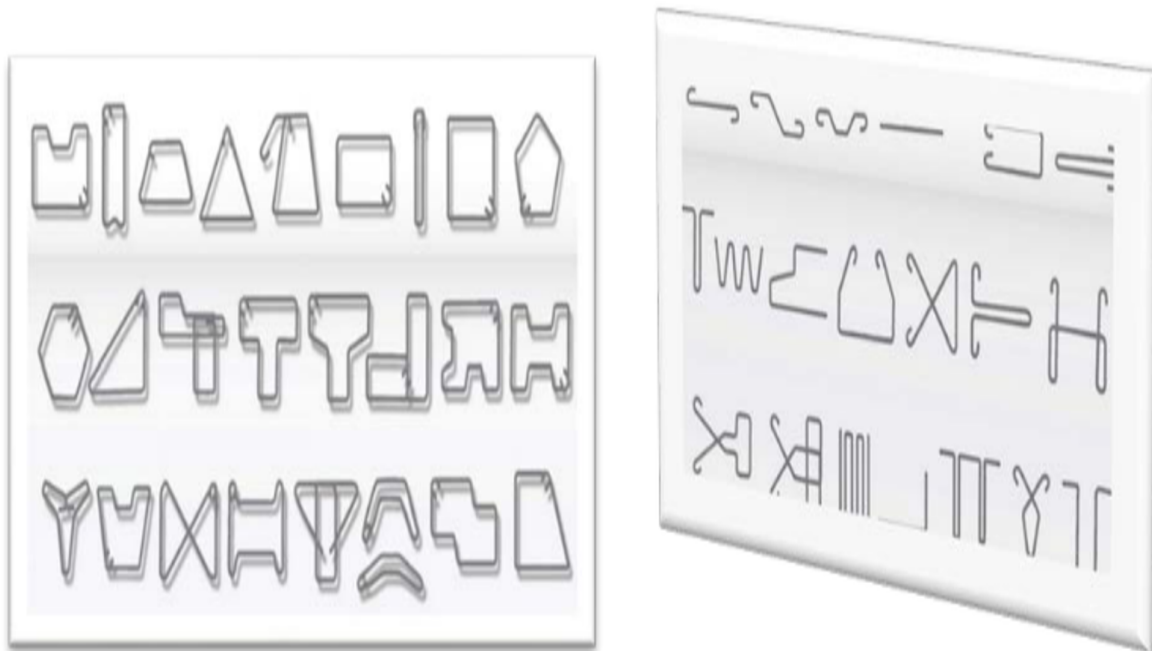


Figure 1.10: Autres formes des étriers

1.5 les systèmes automatisés

1.5.1 Définition

L'automatisation industrielle est un groupement d'une catégorie de technologie et de systèmes qui contrôlent, régulent, gèrent le processus de l'activité industrielle sans induire au niveau de la direction humaine directe comme base technique les plus avancées. L'automatisation est largement véhiculée par les contrôleurs programmables, par la commande numérique, par les capteurs intelligents, par les systèmes de communication, par les systèmes de surveillance etc. ces équipements permettent en temps réel le suivi, le contrôle, l'optimisation des processus en production. L'objectif de l'automatisation est d'assurer, d'une part, la maximisation de la productivité et, d'autre part, la réduction du risque d'erreurs humaines tout en abaissant les coûts de production et en garantissant la sécurité. Par ailleurs, elle permet, grâce à une traçabilité accrue, d'améliorer la qualité des produits et d'assurer une flexibilité dans l'adaptation aux hausses et aux baisses de la demande. L'automatisation est désormais au cœur du concept d'Industrie 4.0, visant à l'interconnexion des machines et à l'analyse des données afin de prévoir les pannes et d'optimiser les performances [6].

1.5.2 Principe de l'automatisation

Le principe de l'automatisation repose sur la capacité d'un système à effectuer de manière autonome des opérations industrielles en utilisant un ensemble de technologies entièrement coordonné, constitué d'automates programmables industriels (API), de capteurs intelligents, d'actionneurs, d'interfaces homme-machine (IHM), en vue d'exécuter des tâches répétitives, complexes ou dangereuses avec un degré de précision élevé, une rapidité accrue et peu d'intervention humaine. L'exécution d'un système automatisé se déroule en plusieurs étapes :

- L'acquisition de données : au cours de laquelle des capteurs mesurent en temps réel (température, position, vitesse, etc.) des grandeurs liées au processus ;
- Le traitement des données : pendant lequel les informations collectées par des capteurs sont transmises vers un automate programmable ou un système de commande, lequel les traite selon des consignes établies à l'avance ;
- La décision : où le contrôleur à partir des données entrantes, détermine quelles actions le système doit mener (rectification de la vitesse, changement de position, arrêt en cas d'anomalie, etc.) ;
- L'actionnement : au cours duquel les actionneurs (moteurs, vérins, relais) réagissent aux ordres fournis en fonction de la gestion du processus et garantissent alors son

ajustement en temps réel ;

- Le contrôle et le retour d'information : au travers duquel un suivi est mis en œuvre en continu pour s'assurer que toutes les opérations sont menées correctement et que, si on constate des différences avec l'état normal, des corrections soient appliquées automatiquement [4].

1.5.3 L'objectifs de l'automatisation industrielle

- Augmentation de productivité : Pour ce qui est de la production en fonction du temps, les systèmes automatiques d'une usine permettent une production de 24 heures sur 24 ce qui permet un volume de production suffisant et de meilleure qualité.
- La précision et la qualité de la production : Pour ce qui est de la production en fonction des quantités, le recours à la commande numérique et aux capteurs permet de réduire l'aléa de production et d'avoir une qualité de produit finie située dans un objectif satisfaisant.
- Le coût du produit : Pour ce qui est de la production en fonction des ressources, le fait d'avoir moins de personnel du fait de la mécanisation des tâches, de diminuer les déchets matières produites du fait des manières de fabriquer mises en œuvre, de diminuer également les consommations d'énergie permet de réduire le coût de production.
- Moins de personnes à mettre sur des tâches répétitives : Pour ce qui est de la production en fonction des personnes, le fait de confier des tâches répétitives et pénibles à des machines permet de laisser les personnels de production sur des tâches à plus forte valeur ajoutée.
- Suivre chaque étape de la production : Pour ce qui est du suivi de production comme du contrôle de la qualité tant à la fabrication qu'au produit fini, un système automatique permanent permet au sein du système de production, à chaque étape, de l'exploitation, un suivi et un contrôle intempestif de l'exploitation tout en anticipant de permettre à ses équipements de mieux fonctionner.
- La sécurité des salariés et des produits : Automatiser ce qui était un travail auparavant fait par des femmes ou des hommes lorsqu'il est dans un lieu trop dangereux pour eux pour la santé sécurité, cela évite les accidents de travail [7].

1.5.4 Domaine d'application

L'automatisation industrielle est largement utilisée dans de nombreux secteurs industriels, apportant des gains significatifs en termes de productivité, de sécurité et de qualité dans chacune de ses applications.

On peut ainsi identifier les domaines suivants :

- Industrie automobile : -Assemblage robotisé des pièces (carrosserie, moteurs, systèmes électriques, ...)
 - Peinture automatisée qui applique de façon uniforme et précise.
 - Soudure robotisée des pièces qui garantit des joints solides et réguliers.
 - Contrôle qualité automatisé par des systèmes de vision.
- Aéronautique :
 - Usinage de précision pour la fabrication de pièces de structures.
 - Inspection non destructive (NDT) par ultrasons ou radiologie pour repérer les défauts.
 - Assemblage automatisé d'éléments complexes comme les ailes et les turbines.
- Agroalimentaire :
 - Processus de tri non automatisé des produits (fruits, légumes, ...).
 - Conditionnement et emballage, pour éviter la contrefaçon.
 - Contrôle de la chaîne logistique.
 - Dosage des ingrédients trop imprécis à l'opération de production.
- Pharmaceutique : -Dosage et remplissage automatisés pour garantir l'homogénéité des produits.
 - Conditionnement stérile avec suivi de traçabilité de la chaîne de fabrication.
 - Contrôle qualité rigoureux pour respecter normes sanitaires et contraintes du respect du circuit de traçabilité.
- Secteur de la construction et du bâtiment travaux publics :
 - Précisons que les machines et bâtiments préfabriqués sont en béton, que les machines de chantier automatisées sont des bulldozers et des pelles afin d'éviter les confusions.
 - Podiums de chantiers pour suivre l'avancement des travaux sont équipés et entretenus par des drones ou des drones-camions qui assurent le suivi de la mise en route des pompes d'extraction et d'acheminement des matériaux ou des nouveaux stocks d'agrégats.
- Énergie et Pétrochimie :
 - Automatisation des systèmes de surveillance des écoulements et de la sécurité sur les pipelines et les infrastructures de terrains avec des techniciens de contrôle formés.

- Optimisation de l'électricité verte (énergies éolienne, solaire, nucléaire, marémotrice etc.).
- En cas de bonne gestion des temps, des produits semi-finis peuvent assurer la mise à niveau du parc électrique [8].

1.5.5 Les types de systèmes automatisés utilisés dans les cadreuses automatiques

Les cadreuses automatiques sont équipées de différents types de systèmes automatiques de très haute précision permettant, selon le besoin et le degré de complexité du travail à réaliser, de façonner, plier et couper le fil métal sous le contrôle d'un PC qui s'assure du bon déroulement du travail et optimise la productivité, tout en minimisant les risques d'erreurs humaines.

- Systèmes pneumatiques : La fonction de ces systèmes pneumatiques est de créer mouvement grâce à de l'air comprimé. Ils sont régulièrement utilisés dans les cadreuses pour les serrages, les déplacements, les alignements et le verrouillage des fils au moyen de vérins pneumatiques qui sont pilotés par des électrovannes permettant d'obtenir rapidité et précision dans un mouvement répétitif à coût énergétique particulièrement faible. Et les systèmes pneumatiques sont particulièrement intéressants par leur rapidité de réponse et leur résistance à un environnement industriel qui demande peu de manœuvres de panoplies de montages, mais ils sont plus faibles en puissance que les systèmes hydrauliques.
- Systèmes hydrauliques : Les systèmes hydrauliques utilisent des fluides à pression pour transmettre de l'énergie. Ils sont particulièrement adaptés aux opérations exigeant une forte puissance telle que le pliage de barres métalliques de fort diamètre, dans les cadreuses automatiques. Le recours à des pompes hydrauliques, des vérins mais aussi des distributeurs permet à ces systèmes de réaliser des mouvements fluides, puissants, capables de supporter de lourdes charges tout en gardant une grande précision. En comparaison avec les systèmes pneumatiques, les systèmes hydrauliques sont plus puissants et permettent également de maintenir la pression dans le temps, atouts majeurs pour des travaux de découpe obtenant une grande force.
- Systèmes électriques et électroniques : Les systèmes électriques et électroniques constituent des maillons importants de la gestion et du contrôle d'actionneurs, de moteurs et de capteurs dans les cadreuses automatiques. Ils assurent la parfaite synchronisation entre chacune des étapes de la phase d'alimentation du fil, sur

certaines machines avec la phase de pliage et éventuellement de découpe. Une commande numérique programmable (PLC) ou un système embarqué, comme le microcontrôleur, permet un contrôle à temps réel, ce qui limite les risques d'erreurs et amène à un meilleur rendement. Ces systèmes sont, de plus, facilement couplables avec des technologies récentes telles que la détection laser pour le contrôle de la rectitude de l'axe de fil ou d'une interface homme-machine (IHM), pour une prise de commande aisée.

- **Systèmes de contrôle numérique :** Les systèmes de commande numérique (CNC) permettent le pilotage automatique et programmée des opérations de pliage, de découpe du métal (dans les cadreuses). Ils assurent une précision extrême dans la reproduction de formes géométriques complexes. Les systèmes de commandes numériques sont pilotés par un logiciel de programmation qui indique les mouvements à réaliser (angles de pliage, longueurs de coupe...).

L'un des principaux avantages des CNC réside dans la possibilité d'enregistrer plusieurs configurations de cadres et de permettre le changement de production sans perte de temps. De plus, leur intégration avec les logiciels de CAO permet d'optimiser la production en amont [9].

1.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté un panorama général des cadreuses utilisées dans le domaine du ferrailage, en mettant en évidence leur rôle essentiel dans la modernisation et l'optimisation des processus de fabrication des armatures métalliques pour le béton armé. De la description fonctionnelle des machines (manuelles, semi-automatiques et automatiques) à l'étude du fonctionnement par étapes (redressement, pliage, coupage), chaque section a permis de comprendre les principes fondamentaux de la production de cadres et d'étriers.

L'accent a également été mis sur l'importance des étriers dans la résistance mécanique des structures en béton armé, ainsi que sur la diversité de leurs formes en fonction des exigences techniques et structurelles. Enfin, une attention particulière a été portée aux systèmes automatisés embarqués dans les cadreuses modernes ; pneumatiques, hydrauliques, électriques, et numériques qui jouent un rôle clé dans l'amélioration de la productivité, de la précision, de la sécurité et de la qualité des produits.

Le chapitre suivant, aborde de manière plus détaillée la conception d'un prototype, le choix des composants, l'architecture de commande, et l'implémentation de l'automatisation à travers différentes technologies.

Chapitre 2

Conception d'un prototype de la machine

2.1 Introduction

Dans le but d'automatiser le processus de fabrication des cadres métalliques pour le ferrailage, ce chapitre est consacré à la conception mécanique et fonctionnelle de la machine. Il présente de manière structurée les différentes étapes de fonctionnement, depuis l'alimentation et le redressement du fil jusqu'à sa mise en forme et sa découpe finale. La machine repose sur une architecture modulaire, combinant des systèmes électromécaniques pilotés par microcontrôleur. Chaque sous-système (alimentation, façonnage, pliage, et coupage), joue un rôle précis et complémentaire pour assurer une production fluide, précise et répétitive. Ce chapitre détaille le fonctionnement de ces modules, les principes techniques adoptés, ainsi que les choix technologiques retenus.

2.2 Fonctionnement de la machine

Le système étudié et développé a pour objectif de permettre la fabrication automatique de différents modèles de cadres métalliques, destinés au ferrailage des poutres et poteaux en béton armé. Le fonctionnement de la machine repose sur un cycle séquentiel automatisé, structuré autour de trois modules principaux, agencés selon l'ordre logique des opérations.

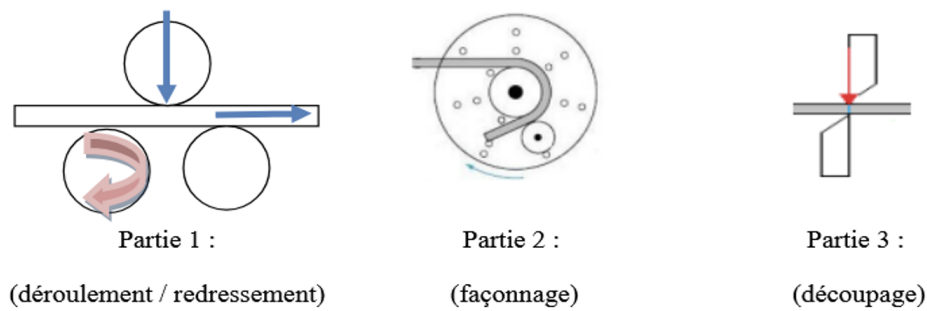


Figure 2.1: Les parties principales selon l'ordre chronologique de fonction de la machine

Dans un premier temps, le fil métallique est prélevé à partir d'une bobine et introduit dans la machine par un système d'alimentation, composé d'un extrudeur motorisé (partie 1) et de rouleaux redresseurs chargés de corriger les déformations du fil. Ensuite, le fil redressé est dirigé vers un module de pliage tridimensionnel (partie 2), piloté par des axes de rotation et de translation, permettant de réaliser des formes variées avec une grande précision. Enfin, le fil façonné est acheminé vers un module de coupe (partie 3), qui le sectionne à la longueur souhaitée, conformément aux dimensions programmées. L'ensemble des opérations est entièrement supervisé par un microcontrôleur programmable, assurant un contrôle automatisé, rapide et fiable du processus de production. Cette architecture permet une fabrication répétable, précise et à haut rendement, tout en réduisant considérablement l'intervention humaine.

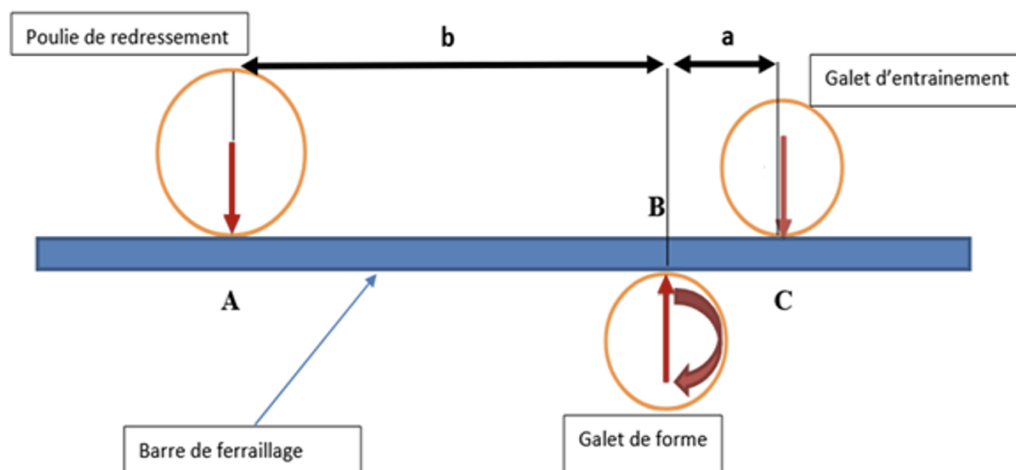


Figure 2.2: Séquence d'opération de la machine cadreuse automatique

2.2.1 Système d'alimentation et de redressement

Le système d'alimentation et de redressement constitue un composant essentiel dans toute machine dédiée au façonnage du fil métallique. Il remplit une double fonction : acheminer le fil de manière continue vers les modules de pliage et de coupe, tout en corrigeant les déformations résiduelles générées par le stockage du fil sous forme de couronne. Une alimentation fluide et constante, combinée à un fil parfaitement redressé, est primordiale pour garantir la précision dimensionnelle et la qualité géométrique des cadres réalisés. Ce système conditionne donc directement la performance et la fiabilité de l'ensemble du processus de fabrication.

Fonctionnement : Le système d'alimentation adopté repose sur un mécanisme d'entraînement compact à pignon cranté, inspiré des technologies couramment utilisées dans les imprimantes 3D, mais ici adapté à la manipulation de fil métallique. Son fonctionnement s'appuie sur un principe de friction contrôlée, dans lequel un moteur entraîne un pignon denté assurant la propulsion du fil, tandis qu'un bras presseur à ressort maintient ce dernier en contact permanent avec le pignon pour garantir une adhérence optimale.

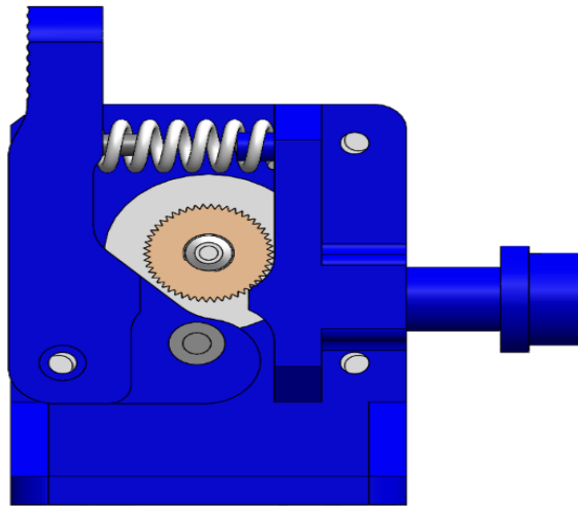


Figure 2.3: système d'alimentation du fil

Ce dispositif présente plusieurs avantages majeurs : précision d'avance élevée, faible encombrement et grande fiabilité mécanique, des qualités essentielles pour un fonctionnement en environnement automatisé. Une fois le fil alimenté, il est vers un système de redressement constitué de galets disposés en quinconce. Ce passage forcé entre les galets induit une modification progressive de la courbure initiale du fil, permettant de corriger efficacement les déformations résultant du stockage en couronnes. Les galets sont mon-

tés sur des axes fixes ou ajustables, autorisant un réglage précis de la force correctrice appliquée au fil, afin d'obtenir une linéarité optimale avant le pliage.

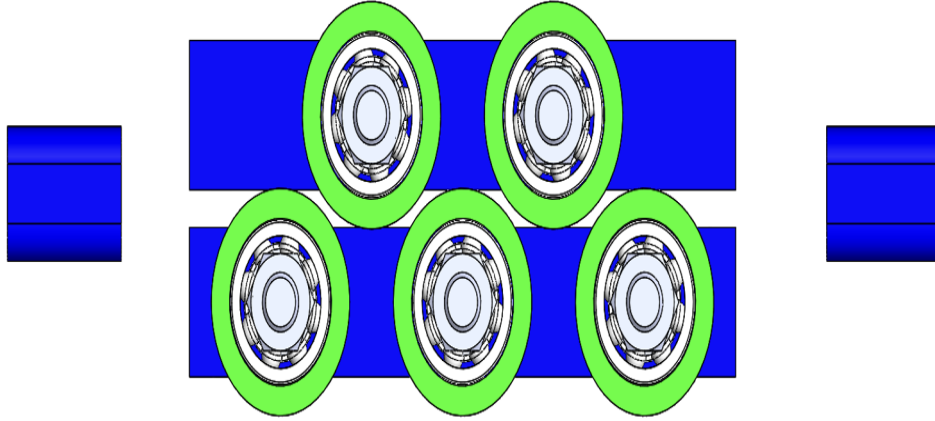


Figure 2.4: Système d'alimentation du fil

2.2.2 Façonnage

Le système de pliage représente le module central de la machine, chargé d'assurer la mise en forme du fil métallique. Il repose sur un mécanisme rotatif piloté par un moteur pas-à-pas, permettant de suivre une trajectoire de pliage préprogrammée. Conçu pour réaliser des déformations précises du fil selon des angles spécifiques, ce système garantit une exécution conforme aux exigences géométriques. Il constitue ainsi le responsable principal de la forme finale des pièces produites, en assurant la fidélité aux dimensions et aux configurations attendues.

Fonctionnement : Le système de façonnage repose sur une coordination précise entre plusieurs éléments mécaniques, pilotés par des moteurs pas à pas. Une fois le fil redressé, il est introduit dans un système d'extrusion spécialement adapté, inspiré des mécanismes utilisés en impression 3D. Qui assure une pression constante sur le fil pour garantir une alimentation fluide et régulière. L'entraînement du fil est assuré par un moteur pas à pas, qui permet un contrôle précis de l'avance sans glissement ni perte de position. Lorsque la longueur programmée est atteinte, le module de pliage entre en action un moteur dédié active un bras qui effectue la déformation du fil autour d'un axe fixe selon l'angle défini. Un second moteur, monté sur l'axe longitudinal du fil, permet également la rotation du fil sur lui-même, ce qui autorise la réalisation de formes tridimensionnelles complexes. L'ensemble du processus est géré par un microcontrôleur, qui synchronise les phases d'alimentation, de rotation et de pliage avec une grande précision. Ce système assure ainsi une mise en forme entièrement automatisée, fiable, répétitive et adaptée à des géométries complexes.

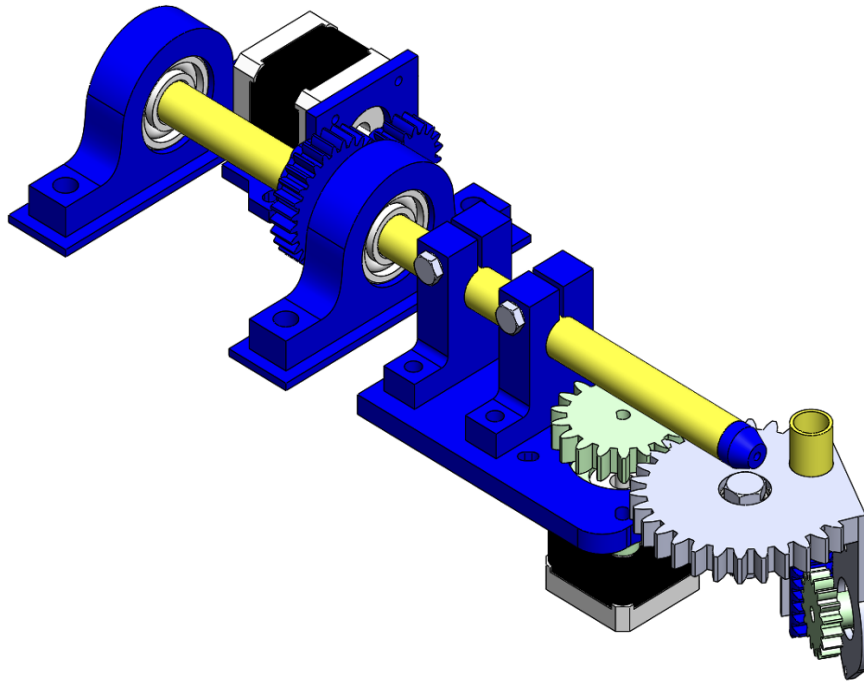


Figure 2.5: Mécanisme de transfert du fil redressé vers le système de façonnage

2.2.3 Découpage

Le système de coupage est l'étape finale du processus de fabrication automatique des cadres en fil métallique. Il permet de séparer proprement le fil après sa mise en forme, tout en maintenant la précision et la cadence de production.

Fonctionnement : Ce système repose sur un dispositif mécanique de type bielle-manivelle, conçu pour transformer un mouvement rotatif en un mouvement linéaire alternatif. Le cœur du mécanisme est un moteur pas à pas, monté sur une structure métallique rigide, assurant la stabilité et la robustesse de l'ensemble. Lorsque le moteur est activé, il entraîne un bras de manivelle qui met en mouvement une bielle. Cette bielle convertit la rotation du moteur en un mouvement vertical, permettant à une lame mobile de descendre avec précision pour cisailer le fil métallique.

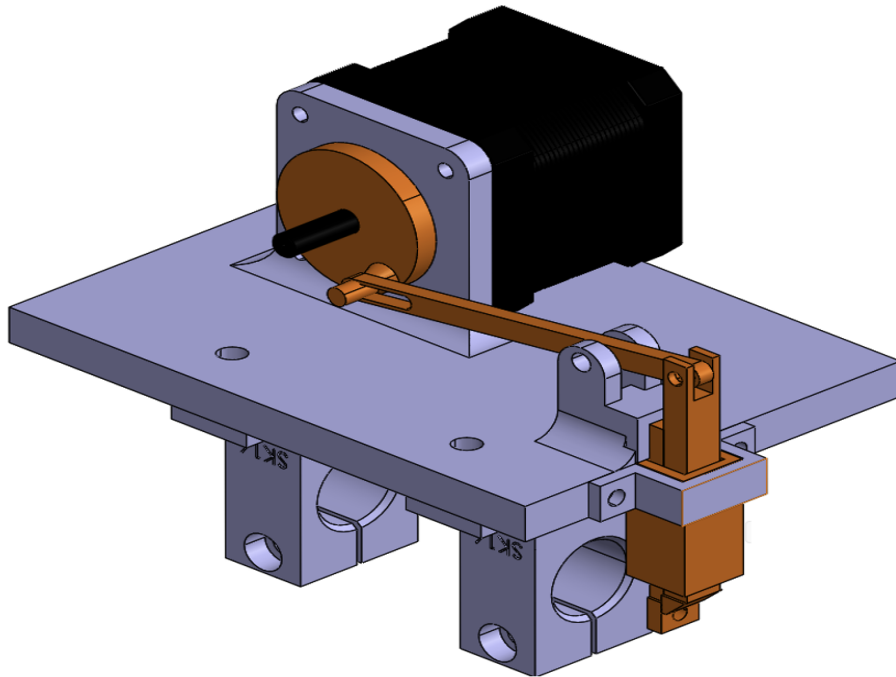


Figure 2.6: Système mécanique de découpe du fil métallique

Le fonctionnement du système est entièrement automatisé : une fois que le module de pliage a achevé la mise en forme du cadre, le microcontrôleur ou l'automate programmable envoie une commande électrique au moteur. Celui-ci effectue alors une rotation partielle ce qui provoque la descente de la lame mobile. Le fil est alors coupé net entre les deux lames par effet de cisaillement. Après l'opération, le moteur inverse son mouvement, permettant à la lame de remonter et de revenir en position initiale, prête pour un nouveau cycle. Grâce à sa conception simple et robuste, ce système garantit une coupe rapide, propre et fiable, tout en résistant à l'usure mécanique. Il contribue de manière significative à la qualité finale des cadres produits, en assurant des longueurs constantes et des coupes nettes, tout en s'intégrant parfaitement dans un environnement de production automatisé à haute cadence.

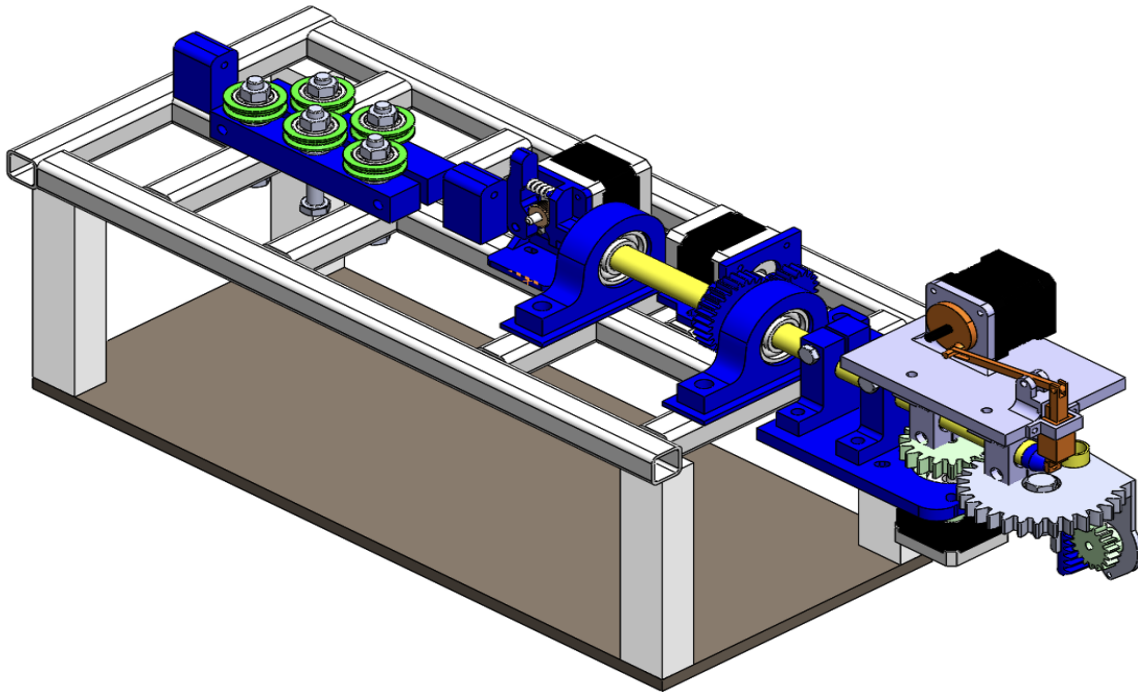


Figure 2.7: Assemblage final de la machine automatique de fabrication de cadres

2.3 Conclusion

Ce chapitre a présenté la conception détaillée du prototype de la machine cadreuse automatique, en mettant l'accent sur son architecture modulaire et les principes de fonctionnement de ses principaux sous-systèmes. À travers l'étude des modules d'alimentation, de redressement, de pliage et de découpe, il a été démontré que l'automatisation complète du processus de fabrication des cadres métalliques est non seulement réalisable, mais également optimisable en termes de précision, de répétabilité et de rendement.

L'intégration de composants électromécaniques pilotés par microcontrôleur permet d'assurer un contrôle séquentiel et synchronisé des différentes étapes, réduisant considérablement l'intervention humaine tout en garantissant une qualité constante des produits fabriqués. La conception retenue s'appuie sur des choix technologiques robustes et éprouvés, adaptés aux contraintes industrielles et aux exigences du domaine du ferrailage.

Ce travail de conception constitue une base solide pour la phase suivante, qui portera sur la mise en œuvre effective, la validation expérimentale des performances, et l'optimisation des paramètres de fonctionnement du prototype.

Chapitre 3

Automatisation d'une machine cadreuse : analyse des solutions Arduino et API

3.1 Introduction

L'automatisation joue un rôle essentiel dans l'optimisation des machines industrielles en améliorant leur efficacité. L'automatisation de la machine de façonnage du fil métallique repose sur deux principales approches principales de contrôle des systèmes mécaniques : Arduino et l'automate programmable industriel (API). L'approche Arduino est une plateforme de développement open source qui offre une solution économique et flexible pour les prototypages et les petites applications avec une adaptation rapide. À l'inverse, l'approche API est un système permet de répondre aux exigences industrielles en matière de flexibilité, de sécurité et d'évolutivité, et de traitements en temps réel avec une intégration dans un environnement de production automatisée. Ce chapitre, basé sur une étude d'analyse comparative de ces deux approches, vise à identifier les avantages et les limites de chacune dans le contexte d'une machine cadreuse 3D.

3.2 Automatisation à base d'Arduino

3.2.1 Matériel et composants

a. Carte Arduino Uno

C'est un microcontrôleur basé sur **ATmega328P**, la carte Arduino Uno est utilisée comme unité de commande principale dans le développement de systèmes embarqués

et de projets automatisés. Elle dispose de **14 broches numériques d'entrée/sortie (D0 → D13)**, dont **6 broches** génèrent un signal **PWM (D3, D5, D6, D9, D10 et D11)** avec une résolution de **8 bits**, ainsi que de **6 entrées analogiques (A0 → A5)** permettant de lire des capteurs avec une résolution de **10 bits**. La carte fonctionne à **5 V**, avec une alimentation via un port USB ou une source externe de **7 V à 12 V**, via la prise jack ou la broche VIN. Cette carte peut fournir une tension jusqu'à **3,3 V ou 5 V**, et une intensité de courant de **50 mA jusqu'à 500 mA**. Elle possède une capacité de **32 ko de mémoire flash**, avec **2 ko de SRAM** et **1 ko d'EEPROM**, et elle est compatible avec les protocoles de communication tels que **SPI, I2C et UART**.



Figure 3.1: Carte Arduino Uno

La programmation de la carte Arduino UNO est assurée par l'environnement de développement (IDE) qui permet de programmer la carte en utilisant un langage de programmation dérivé de *C/C++* utilisé pour écrire des sketches (**programmes**) qui contrôlent la carte à l'aide d'ensemble de bibliothèques spécifiques facilitant la gestion de différents matériels et composants intégrant avec la carte (capteur, moteur, modules de communication et interfaces utilisateur). Le programme Arduino à la base comporte de deux fonctions essentielles, la fonction `setup` qui initialise les broches et définit les paramètres, et la fonction **loop** qui contient la logique principale du programme.

Dans le cadre de cette machine cadreuse 3D d'un fil l'Arduino assure la coordination entre les différents composants de la machine, jouant ainsi un rôle central dans la logique

de commande.

b. Moteurs pas à pas (NEMA 17 et NEMA 23)

Un moteur pas à pas est un type de moteur à courant continu dont la rotation se fait par pas discret. Il se déplace d'un angle fixe à chaque impulsion électrique, ce qui permet un contrôle très précis de la position sans besoin de capteur de position dans la plupart des cas. Le terme « NEMA » signifie : « National Electrical Manufacturers Association », ce terme dans le contexte des moteurs pas à pas désigne uniquement les dimensions mécaniques de la face avant du moteur et non ses performances électriques, de sorte que le chiffre 17 indique que la plaque frontale est de 1,7 pouce (43,2 mm x 43,2 mm), et pour le chiffre 23 c'est de 2,3 pouces (58,4 mm x 58,4 mm).



Figure 3.2: a. Moteur pas à pas NEMA 17 ; b. Moteur pas à pas NEMA 23

En termes de caractéristiques, les moteurs NEMA sont généralement à deux phases, bipolaires ou unipolaires. À chaque impulsion électrique envoyée par un driver de pilotage, le moteur tourne d'un angle précis appelé pas, qui est généralement égal à $1,8^\circ$ par pas, soit 200 par tour. Grâce à la combinaison des broches de sélection du mode (MS0, MS1, MS2), il est possible d'obtenir une rotation encore plus fine ($1/2$, $1/4$, $1/8$, $1/16$ et $1/32$ pas). Le moteur est alimenté par une source de tension et de courant continu. Sa tension nominale dépend principalement de la résistance des enroulements et du courant nominal que le moteur doit supporter pour délivrer son couple maximal à l'arrêt pour fonctionner sans surchauffe ni perdre ses caractéristiques [10]. La tension d'alimentation peut être supérieure à cette tension nominale (12 V ou 24 V) si un driver à courant régulé est utilisé, ce qui permet une montée plus rapide du courant dans les bobines et donc de meilleures performances à haut vitesse, avec un couple amélioré [11].

c. Drivers de pilotage (DRV8825 et DRV4988)

Les drivers A4988 et DRV8825 sont des pilotes qui contrôlent les moteurs pas à pas bipolaires dans des applications telles que les machines CNC, les imprimantes 3D et les robots. Les deux drivers sont compatibles avec l'Arduino pour piloter les moteurs pas à pas et nécessitent une connexion correcte des broches STEP et DIR du driver pour contrôler la vitesse et la direction du moteur.

Le driver A4988 a été développé par Allegro Microsystems. Sa tension logique de fonctionnement est de 3,3 V ou 5V et fournit un courant maximal jusqu'à 2 A (avec un bon refroidissement) et avec plage de tension d'alimentation du moteur de 8,2 V à 35 V, le A4988 donne des options de micro-pas de 1, 1/2, 1/4, 1/8 et 1/16 pas selon les besoins. Le driver DRV8825 a été conçu par Texas Instruments. Il fonctionne avec une tension logique de 3,3 V ou 5V et offre un courant maximal jusqu'à 2,5 A (avec refroidissement actif). Sa plage de tension d'alimentation du moteur de 8,2 V à 45 V, et permet d'effectuer des micro-pas de 1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 et 1/32 pas.

Les deux drivers disposent également d'un potentiomètre de réglage du courant, qui permet de limiter l'intensité maximale délivrée au moteur, protégeant ainsi à la fois le moteur et le driver contre les surcharges.

Ces drivers sont largement utilisés pour assurer la précision et la polyvalence du moteur, mais comme toute composante électrique, ils présentent à la fois des avantages et des inconvénients tel que le DRV8825 est plus puissant l'A4988, mais aussi il est plus cher que lui qui est économique et simple. Le DRV8825 a protection contre les surtensions et une meilleure gestion de la chaleur mais dans certains cas où les courants sont élevés, un refroidissement actif est nécessaire.



Figure 3.3: a. Module A4988 ; b. Module DRV8825

d. Source d'alimentation

La source d'alimentation du circuit est choisie en fonction de la somme des courants des moteurs qui y sont connectés et de la tension qu'elle peut supporter par ces moteurs, afin d'assurer leur bon fonctionnement. La somme des courants ne dépasse pas de 9 A et l'application a besoin d'un bon couple mais pas d'une haute vitesse, alors une alimentation

de 12 V/9 A est satisfaisant.

e. Fin de course

Une fin de course est un interrupteur mécanique qui change d'état (ouvert/fermé) lorsqu'il est actionné par un mouvement mécanique. Il est largement utilisé dans l'automatisation, les imprimantes 3D, les robots, etc. Elle peut être reliée avec une résistance pull-up ou pull-down selon les besoins, et peut supporter jusqu'à 125 VAC/15 A, 250 VAC/6 A, 250 VDC/0,3 A ou 125 VDC/0,6 A. Son rôle dans le circuit est assuré la "Homing" du moteur.



Figure 3.4: Fin de course

3.2.2 Architecture et schéma électrique de câblages

La connexion entre les composants du circuit électrique de la machine se fait en connectant les broches STEP et DIR de driver avec les broches numériques d'Arduino appropriées, et en configurant les autres broches selon les exigences et les besoins. Il faut également assurer l'alimentation logique 5 V des drivers et de 12 V pour les moteurs. Réaliser le circuit de fin de course avec une résistance pull-up interne et une résistance de limitation du courant.

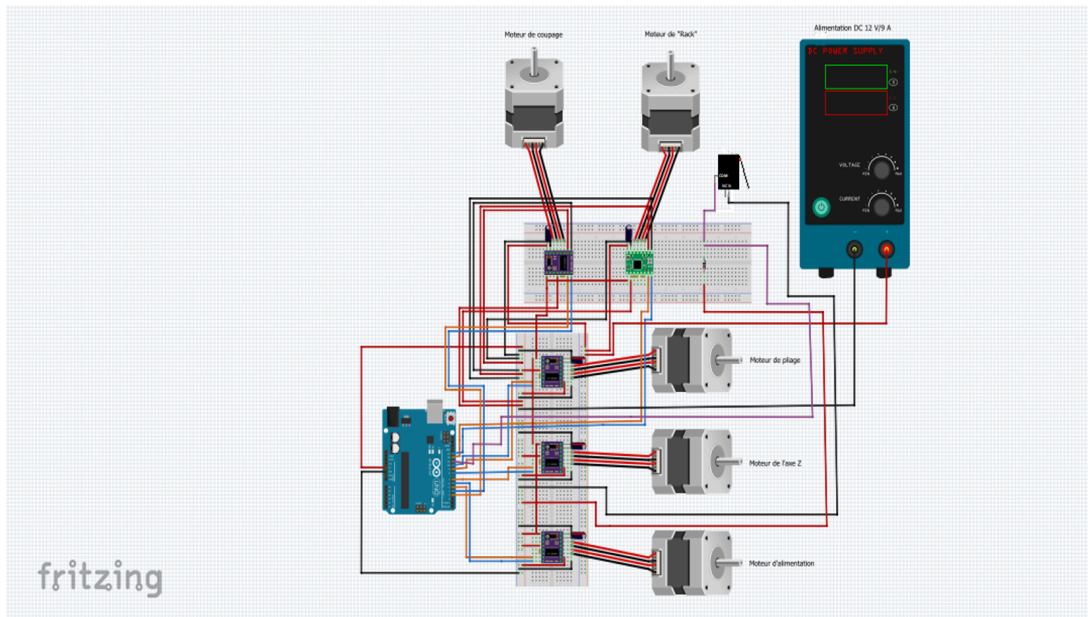


Figure 3.5: Cablage électrique

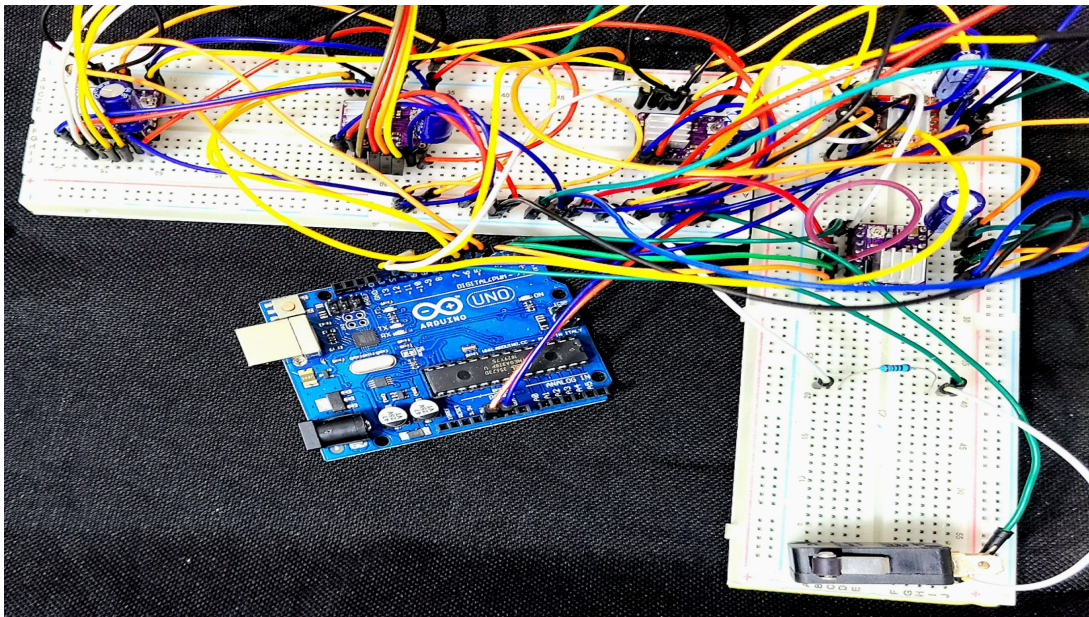


Figure 3.6: Circuit électrique réel à base d'Arduino

3.2.3 Programmation et algorithmes de contrôle

L'environnement de développement intégré (IDE) Arduino est une plateforme conviviale utilisée pour écrire et compiler et téléverser du code sur des cartes Arduino. Il permet d'intégrer des bibliothèques pour simplifier la gestion des composants et des fonctionnalités avancées.

Une bibliothèque est un ensemble de fonctions pré-écrites facilitant l'utilisation de capteurs, de moteurs et de protocoles de communication, et permettant d'éviter d'écriture des algorithmes complexes à partir de zéro.

Dans le cadre de l'automatisation d'une cadreuse du fer, le contrôle du moteur pas à pas via Arduino, Il nécessite l'utilisation de bibliothèques spécifiques telles que AccelStepper, Stepper, TMC Stepper, EasyDriver et UStepper. Chacune de ces bibliothèques à ses propres propriétés et sa propre manière de contrôler, et elle est conçue pour être compatible avec un driver spécifique.

Pour le pilotage d'un un moteur pas à pas NEMA avec un driver A4988 ou DRV8825, AccelStepper c'est la bibliothèque appropriée. Elle fournit un contrôle avancé des moteurs pas à pas avec accélération et décélération pour assurer des mouvements fluides et précis.

Le programme Arduino contient trois parties principales :

Partie définition et déclaration

Il s'agit de définir les différentes bibliothèques nécessaires avec la définition de certains composants, ainsi que la déclaration de différentes variables. Cette partie inclut des objets AccelStepper pour définir le type de driver et les broches Arduino connectées avec lui pour contrôler le pas et la direction.

Il concerne le bloc `setup()` qui inclut le démarrage de la communication `Serial.begin()`, l'initialisation des broches (`PinMode`), ainsi que la configuration des composants et matériels avec la définition de leurs paramètres initiaux.

L'instruction de la bibliothèque AccelStepper utilisée dans ce bloc :

`stepper.setMaxSpeed()` → Définit la vitesse maximale en (pas/second) pour le moteur.

Partie programme principal

Bloc `loop()` : représente une boucle qui s'exécute indéfiniment après `setup()`. Il contient la logique principale du programme. Pour la gestion du contrôle des différents moteurs de la machine cadreuse automatique durant les différentes étapes, et d'après la création des fonctions (par exemple `void form()`), un message est envoyé via le moniteur série en utilisant l'instruction `Serial.readString()`. L'appel des fonctions est ensuite assuré par la structure conditionnelle suivante :

```
if (mode.startsWith("form")) {  
    form();  
}
```

La commande des moteurs est séquentielle selon la nature de la forme à créer. Le moteur d'une partie quelconque de la machine est activé à un moment précis durant la création de la forme, à l'aide d'une boucle `while` de la forme suivante :

```
while (stepper.currentPosition() != cible) {  
    stepper.setSpeed(vitesse); // Définit la vitesse constante sans accélération  
    stepper.run(); // Exécute un pas à la vitesse prédéfinie  
}
```

`stepper.setSpeed()`; → Définit la vitesse constante pour un mouvement continu sans accélération. `stepper.run()`; → Exécute un pas à la vitesse prédéfinie par `setSpeed()`. `stepper.setCurrentPosition()`; → Réinitialise manuellement le compteur de moteur à une valeur spécifiée. `delay()`; → Mettre en pause l'exécution du programme pendant un temps spécifié.

3.3 Automatisation à base de l'API

Dans le cadre de l'automatisation de la machine cadreuse, l'utilisation d'un Automate Programmable Industriel (API) permet de piloter les différents actionneurs de manière fiable, flexible et évolutive. Ce choix technologique répond aux exigences de précision, de synchronisation et de répétabilité du système. L'API assure la gestion des signaux entrants (capteurs) et sortants (moteurs, électrovannes, etc.), tout en offrant une programmation structurée via l'environnement TIA Portal. La section suivante détaille l'architecture du système basé sur l'API, ainsi que les caractéristiques techniques de ses principaux composants.

3.3.1 Architecture et composants du système API

a. Présentation et description matériel de l'API

Le CPU 1214C est automate programmable industriel compact de la gamme SIMATIC S7-1200, conçu pour des applications d'automatisation industrielle. Il est puissant et adapté aux systèmes automatisés nécessitant un contrôle précis. Ce CPU est un automate qui fonctionne avec une source de tension continue (DC) d'une valeur nominale de 24 V avec une plage admissible de 20,4 V à 28,8 V. Il dispose de 14 entrées numériques (DI14 x DC24V), 10 sorties numériques (DO10 x DC24V) et 2 entrées analogiques intégrées de 0 à 10 V. Il possède également 6 compteurs rapides et 4 sorties d'impulsions intégrées (PTO) pour générer les trains d'impulsions. Sa mémoire de travail est de 100 Ko et 75 ko pour le programme en plus d'une mémoire extensible via carte extensible jusqu'à 32 Go.



Figure 3.7: ATM Siemens S7-1200 CPU 1214C DC/DC/DC

Il intègre un port Ethernet industriel avec interface PROFINET pour la communication réseau et pour échanger les données avec des automates ou interfaces opérateurs. Le CPU 1214C est modulaire et peut être étendu jusqu'à 3 modules de communication pour communication série et jusqu'à 8 modules d'entrées-sorties pour l'extension des E/S.

b. Intégration de l'API dans la machine

L'intégration de l'API à la machine peut créer un problème de compatibilité entre les drivers A4988 et DRV8825 et l'API elle-même. Il est alors nécessaire de la remplacer par un autre modèle adapté aux applications industrielles et compatible avec l'API. Le driver DM542T (V2.3) est un driver numérique de pilotage conçu par STEPPERONLINE pour les moteurs pas à pas Nema 17 et 23. Il utilise une technologie DSP pour garantir des mouvements précis et silencieux. Le driver DM542T supporte une tension de sortie de 20-50 VDC, et offre un courant de sortie de 8 niveaux sélectionnables, allant de 1,0 A à 4,2 A en pic et 3,0 A d'un courant RMS maximal, avec 15 résolutions disponibles entre 400 et 25600 pas/tour pour un mouvement ultra-lisse. Ce driver intègre une protection contre les surtensions, ainsi que la possibilité de réduire automatiquement du courant au repos afin de diminuer l'échauffement. Il est adapté aux applications nécessitant précision et faible bruit, et dans les machines CNC, les imprimantes 3D et les robots industriels.



Figure 3.8: Driver de pilotage DM542T (V2.3)



Figure 3.9: Armoire du système API

3.3.2 Programmation de commande et contrôle

La programmation des de l'automate est assurée par l'environnement de Siemens officiel TIA Portal qui constitue une plateforme unifiée pour la configuration, la programmation et la mise en service des automates SIMATIC, notamment les gammes S7-1200, S7-1500 et S7-300, ainsi que la programmation des interfaces homme machine (HMI) et d'autres équipements de programmation. Cet environnement supporte plusieurs langages de programmation, tels que LAD qui est utilisé pour sa simplicité et sa ressemblance avec les schémas électriques, FBD pour une programmation graphique intuitive, SCL c'est un langage structuré similaire à Pascal, adapté aux traitements logiques complexes, et STL

qui permet un contrôle très précis du matériel et une optimisation de la mémoire, ou une manipulation fine des registres et bits internes. Le logiciel TIA Portal assure la commande et la gestion précise des mouvements des moteurs pas à pas grâce aux fonctions intégrées suivantes :

MC_Power → Active ou désactive la puissance de l'axe. Il établit la liaison entre le contrôleur et l'axe configuré, permettant de préparer le moteur pour le mouvement ou de le mettre hors tension.

MC_Reset → Réinitialise l'état de l'axe en cas d'erreur ou d'arrêt, pour permettre une reprise normale du contrôle.

MC_Home → Lance une procédure de référencement (homing) pour repositionner l'axe à une position de référence (zéro machine), essentielle au bon démarrage d'un cycle automatique.

MC_Halt → Annule toutes les opérations de mouvement en cours de manière contrôlée et freine l'axe avec la décélération configurée jusqu'à arrêt.

MC_MoveAbsolute → Commande un déplacement de l'axe vers une position absolue par rapport à la position de référence (home). Permet un déplacement précis en spécifiant la distance, la vitesse, l'accélération et la décélération.

MC_MoveRelative → Similaire à *MC_MoveAbsolute*, mais le déplacement se fait par rapport à la position actuelle de l'axe. Utile pour des mouvements incrémentaux dans des séquences répétitives ou des cycles en boucle.

MC_MoveVelocity → Commande un mouvement continu à une vitesse définie, sans cible de position.

MC_MoveJog → Similaire à un mouvement continu, mais utilisé pour un déplacement manuel (jogging), souvent à des fins de test ou de mise en service.

MC_CommandTable → Regroupe en une seule séquence de mouvements plusieurs tâches individuelles pour la commande d'un axe.

MC_ChangeDynamic → Permet de modifier dynamiquement les paramètres de mouvement d'un axe (accélération, décélération, temps de lissage) pendant son fonction-

nement.

MC_WriteParam → Permet une reconfiguration dynamique des axes via le programme utilisateur, sans passer par TIA Portal.

MC_ReadParam → Lit les valeurs actuelles des paramètres d'un axe (ex : position, vitesse, état des erreurs).

3.3.3 Communication et gestion

a. Communication entre l'API et l'interface de programmation (PC)

Siemens utilise le protocole de communication S7 pour communiquer avec un PC. Celui-ci permet d'échanger des données entre automates ou entre automate et PC via MPI, Profibus ou industriel Ethernet. Elle utilise des blocs fonctionnels, comme B END/B RCV, pour envoyer et recevoir des données. Dans ce cadre, le logiciel TIA Portal permet de configurer l'interface PG/PC (par exemple, choisir MPI, Ethernet ou USB) pour établir la communication. Le programme est généré sur le PC, puis transféré dans la mémoire de l'API pour exécution autonome [12] [13]. Le CPU 1214C utilise principalement le protocole Profinet via son port Ethernet intégré pour la communication industrielle et la programmation, ainsi que via d'autres protocoles spécifiques comme USS, Modbus RTU, et la communication S7 via T Send/T Receive pour l'échange de données [14].

b. Communication entre l'API et l'interface de programmation (PC)

L'intégration d'une IHM avec un automate Siemens se fait généralement via une connexion physique avec un câble Ethernet en utilisant le protocole Profinet ou Modbus TCP/IP, selon la configuration et les besoins [13] [15]. Le KTP400 Basic est un panneau opérateur HMI compact, destiné aux applications industrielles simples. Il offre des fonctions de base telles que la visualisation des processus, la gestion des alarmes, la gestion des recettes et le changement de langue, avec une interface tactile intuitive [14].

La configuration de cette IHM se réalise dans le logiciel TIA Portal, où l'on associe les variables (tags) de l'automate aux éléments graphiques de l'interface, la communication entre eux se faisant via le protocole Profinet mentionné ci-dessus [15] [14].



Figure 3.10: Interface homme-machine Siemens KTP400

3.4 Conclusion

Ce chapitre a permis d'étudier et de comparer deux approches majeures d'automatisation appliquées à la machine cadreuse : la solution à base de carte Arduino et celle basée sur un automate programmable industriel (API). L'approche Arduino se distingue par sa simplicité, sa flexibilité, son faible coût et sa facilité d'implémentation, ce qui en fait une solution adaptée pour le prototypage rapide et les applications peu complexes. En revanche, l'approche API offre une robustesse industrielle, une grande fiabilité, une capacité à gérer des systèmes complexes en temps réel, ainsi qu'une intégration facilitée dans des environnements industriels normalisés grâce aux protocoles comme PROFINET.

L'analyse des architectures, des composants, des outils de programmation et des schémas de communication a permis de mieux cerner les avantages et les limites de chaque solution. Tandis qu'Arduino convient aux environnements d'expérimentation ou de petites productions, l'API s'impose comme la solution idéale pour des applications industrielles exigeant sécurité, précision et évolutivité.

Ce travail ouvre la voie à une réflexion approfondie sur le choix du système de commande le plus adapté en fonction du contexte d'usage, des contraintes techniques et des objectifs de performance, avec une possible transition vers une solution hybride combinant la flexibilité de l'Arduino et la fiabilité de l'API.

Chapitre 4

Assemblage, configuration et test

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons l'étape de la réalisation pratique de notre machine de pliage et de coupe de fil métallique. Cette phase inclut le prototypage rapide à l'aide de l'impression 3D, ainsi que l'implémentation du système de commande à travers deux approches distinctes : la programmation via microcontrôleur Arduino et l'automate programmable industriel (API). Nous décrivons dans un premier temps le processus de conception des pièces mécaniques assisté par ordinateur (CAO), leur préparation avec le logiciel Cura, et leur impression effective. Par la suite, nous présentons les différentes méthodes de pilotage automatisé de la machine, en détaillant le matériel utilisé, les schémas de câblage, et les algorithmes de commande.

4.2 Assemblage

Dans la section de prototypage rapide, notre processus commence par une idée de produit, que nous développons ensuite en un croquis. Ce croquis est converti en un dessin assisté par ordinateur (DAO/CAD) pour l'impression 3D.



Figure 4.1: Le flux de travail de l'idée à l'impression 3D finale

Aujourd'hui, il existe une grande variété d'applications de modélisation 3D, allant des plus simples et conviviales aux plus complexes. Nous avons opté pour SolidWorks, un programme qui nous permet de créer des modèles et de les exporter au format STL.



Figure 4.2: L'interface CAO(SolidWorks)

4.3 Découpage des modèles avec Cura

Cura est un logiciel de découpage (slicing), utilisé pour l'impression 3D. Il convertit les modèles 3D en instructions compréhensibles par les imprimantes 3D. Voici quelques-unes des fonctionnalités et caractéristiques principales du logiciel Cura :

- Découpage (Slicing) : Cura découpe un modèle 3D en couches et génère le G-code correspondant, qui est le langage compris par les imprimantes 3D.
- Interface conviviale : Il offre une interface intuitive et facile à utiliser, ce qui le rend accessible aussi bien aux débutants qu'aux utilisateurs expérimentés.
- Paramètres personnalisables : Les utilisateurs peuvent ajuster un large éventail de paramètres tels que la hauteur des couches, la vitesse d'impression, la température et les structures de support, afin d'optimiser l'impression selon l'imprimante et les matériaux utilisés.
- Profils préconfigurés : Cura est livré avec des profils préconfigurés pour différents types d'imprimantes 3D et de matériaux, ce qui simplifie le processus de configuration.
- Compatibilité avec plusieurs formats de fichiers : Il prend en charge différents formats de fichiers comme STL, OBJ et 3MF, qui sont couramment utilisés en modélisation 3D.



Figure 4.3: L'interface CURA

Cura est largement utilisé dans l'impression 3D amateur et professionnelle en raison de ses fonctionnalités robustes et de sa facilité d'utilisation.

Les étapes de l'impression 3D

Nous allons maintenant prendre un exemple pratique afin que le lecteur de cette note puisse comprendre les étapes les plus importantes de l'impression de pièces en 3D. Par exemple, nous prenons cette pièce et réalisons un dessin sur SolidWorks avec les dimensions appropriées.

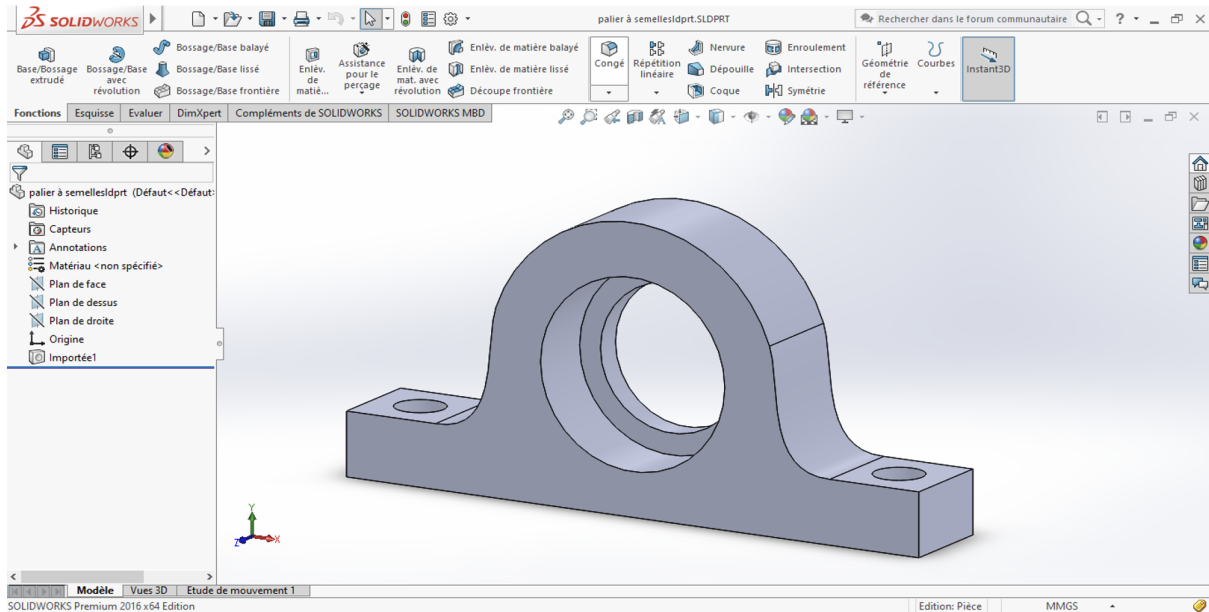


Figure 4.4: La pièce dessinée sur SolidWorks

Ensuite, nous cliquons sur l'icône "Enregistrer sous" et nous spécifions le format STL.

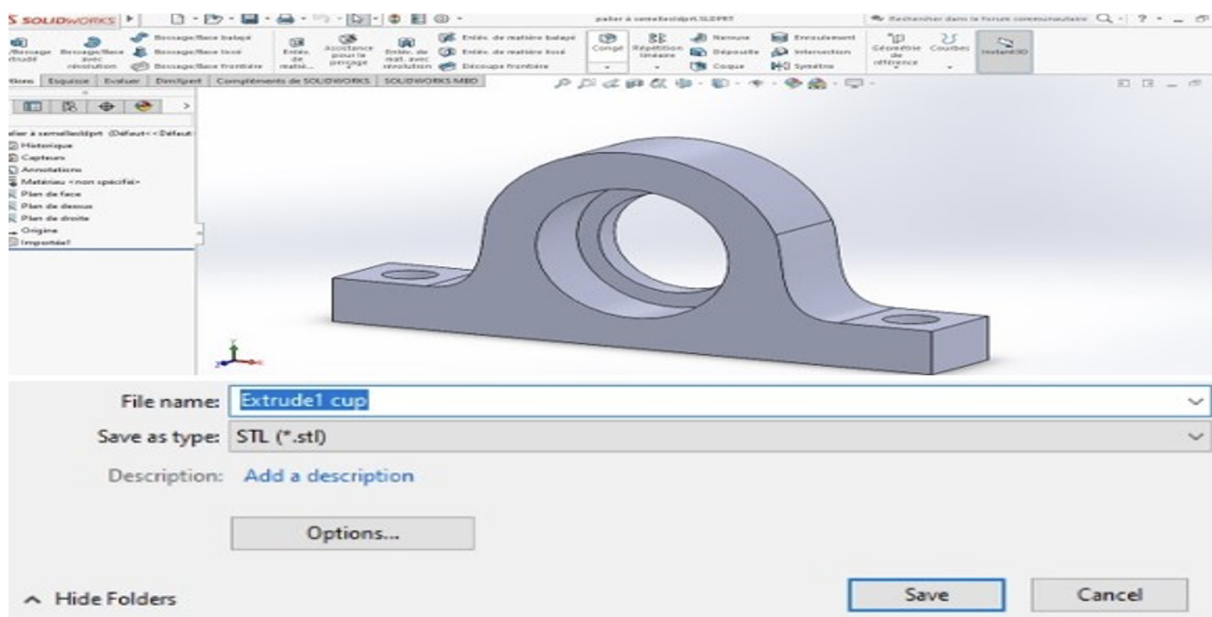


Figure 4.5: Enregistrement en STL

Ensuite, nous ouvrons le programme Cura après l'avoir téléchargé depuis le site officiel. Le téléchargement est totalement gratuit. La première chose à faire après l'ouverture du programme est d'ajouter l'imprimante sur laquelle nous allons travailler. Nous choisissons cette option : Imprimantes ELEGOO Ensuite, nous recherchons Creality 3D et sélectionnons le modèle Creality Ender 3 Pro. Cette interface nous donne, sur la droite, le contrôle des paramètres d'impression, et sur la gauche, la gestion de l'orientation et du positionnement de la pièce.

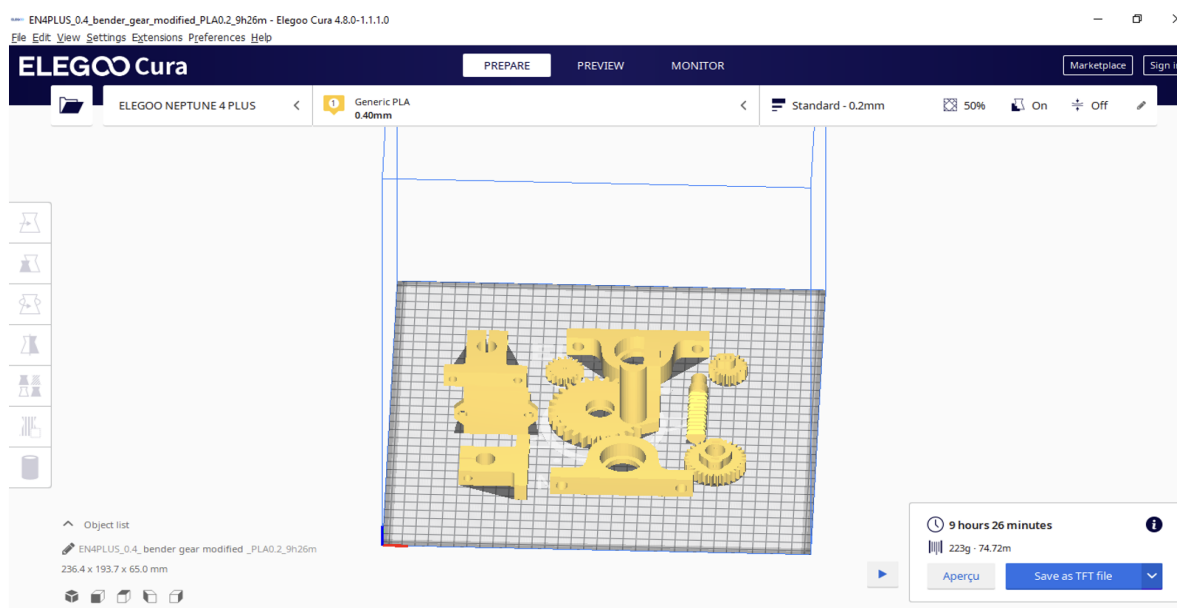


Figure 4.6: les différentes pièces sur logiciel ELEGOO CURA

Il faut ensuite régler des paramètres d'impression, Dans notre cas nous choisissons :

Tableau 4.1: Les principaux paramètres d'impression sur logiciel ELEGOO CURE

Paramètre	Valeur
Hauteur de la couche	0.2 mm
Épaisseur de la paroi	0.8 mm
Nombre de lignes de la paroi	3
Densité de remplissage	50%
Motif de remplissage	Cubique
Générer les supports	Arborescence

À la fin, nous cliquons sur "Slice" (Découper). Le logiciel nous indique alors le temps nécessaire pour l'impression et le poids de la pièce. Puis, nous cliquons sur "Save to Disk" pour enregistrer le fichier, L'étape d'impression peut alors commencer. Nous retirons la carte TF, la connectons à l'ordinateur pour y copier le fichier G-code, puis nous la

réinsérons dans l'imprimante. Sur l'écran LED de l'imprimante, nous choisissons "Print from TF card" et identifions le fichier en fonction du nom précédemment donné. Nous attendons que l'imprimante atteigne la température requise pour l'extrudeur et le plateau, puis l'impression démarre. L'écran affiche alors le pourcentage d'avancement, le temps consommé, ainsi que la température actuelle. À la fin du temps indiqué par le programme, votre pièce imprimée est terminée.

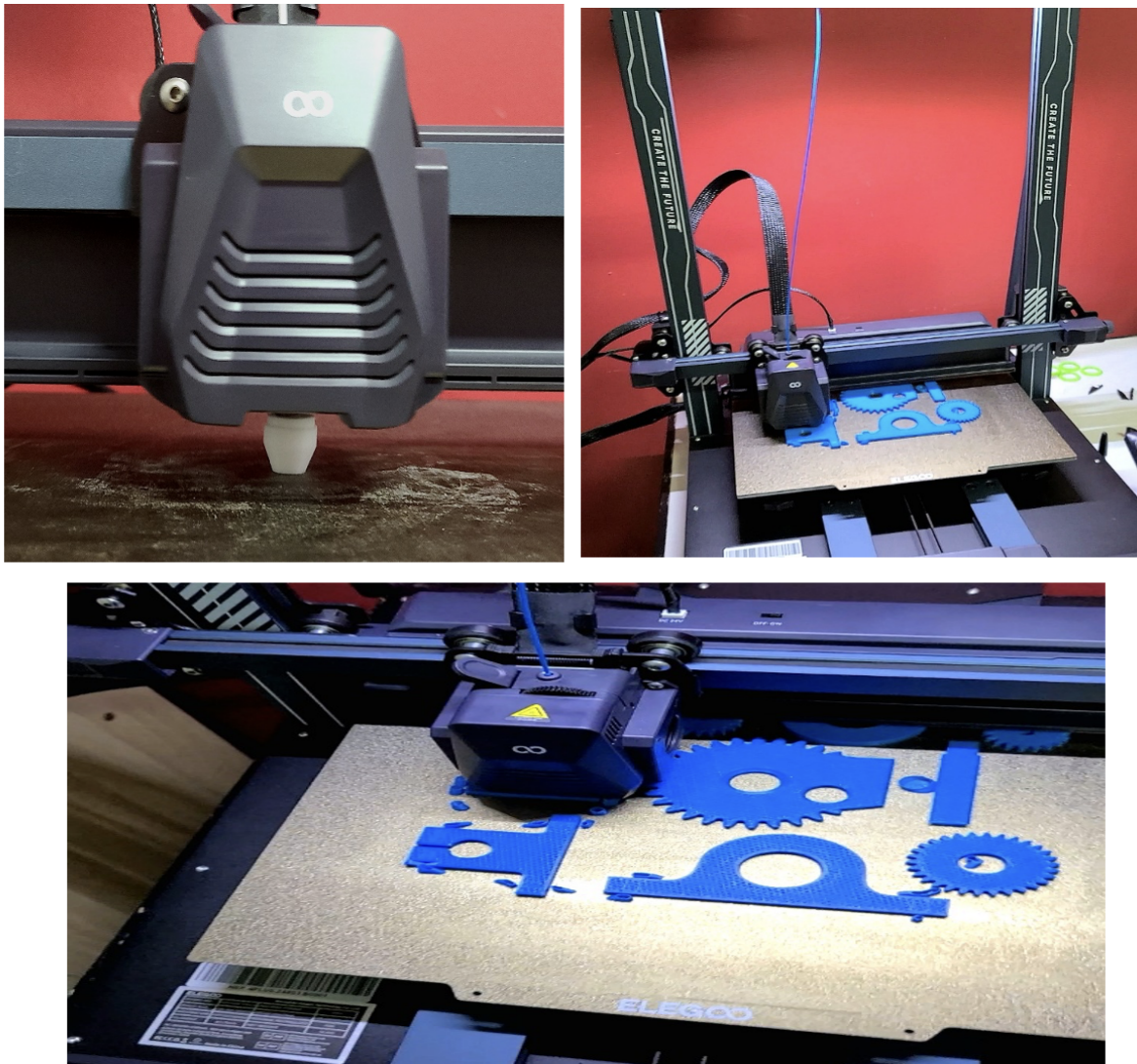


Figure 4.7: Pièces pendant et après le processus d'impression

Pour la réalisation de notre machine, nous avons utilisé une table en bois comme support de base.



Figure 4.8: Support de la machine

Les pièces imprimées en 3D y sont solidement fixées à l'aide de boulons.



Figure 4.9: les boulons et les écrous utilisés

Nous avons recours à deux modèles de roulements :

- Le premier type(608-2RS) est monté dans les poulies de redressement.
- Le deuxième type(6202-2RS) est intégré dans les paliers. Le système est animé par trois moteurs NEMA 17, l'un dédié à l'alimentation du fil et redressement. L'autre pour la forme 3D, le troisième moteur est utilisé pour le pliage.

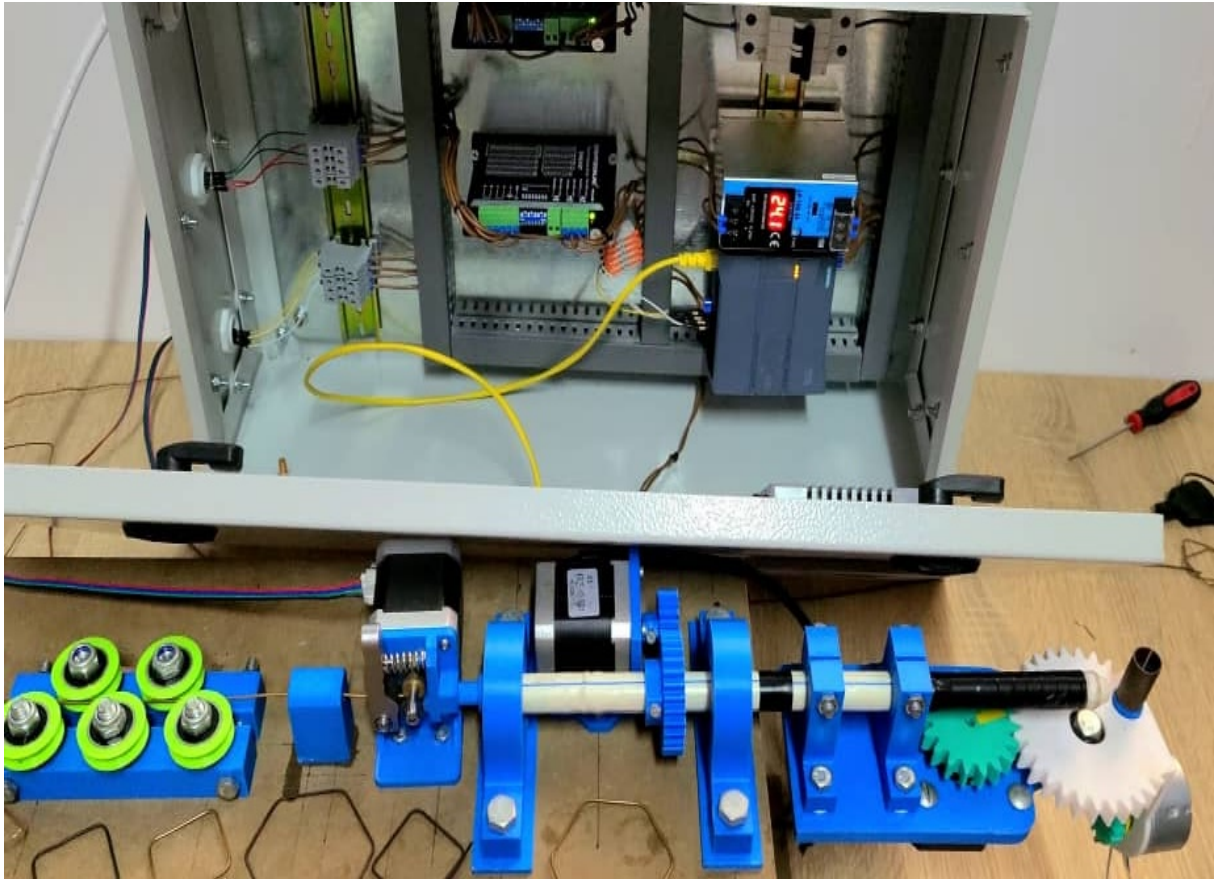


Figure 4.10: Machine réalisée

4.3.1 Configuration et test de la machine

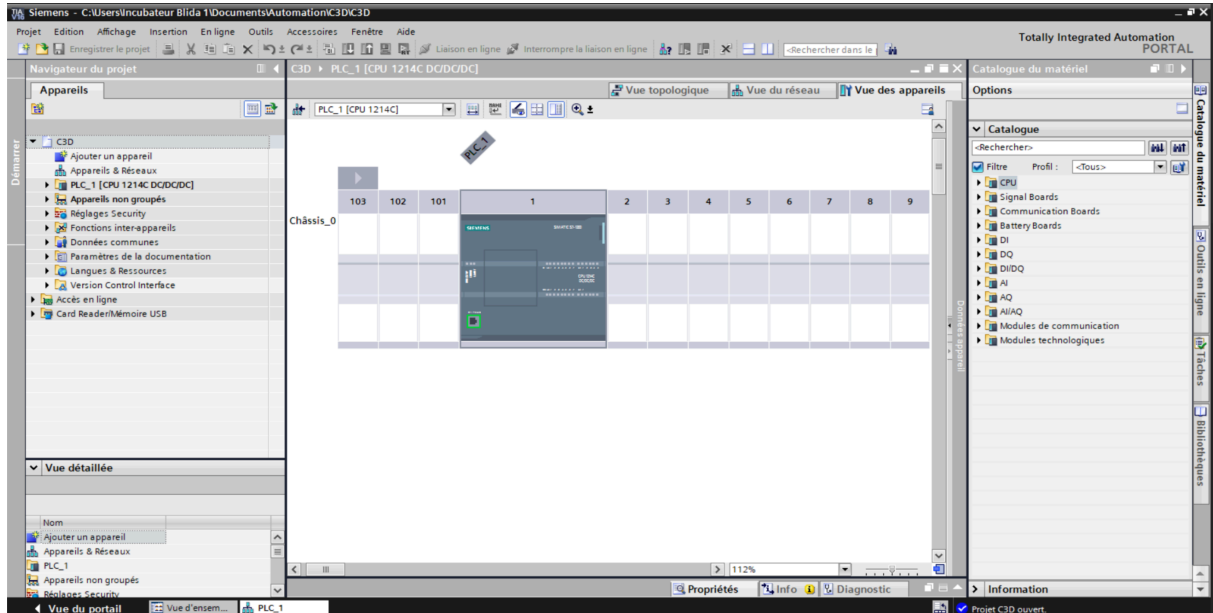


Figure 4.11: lConfiguration des pins

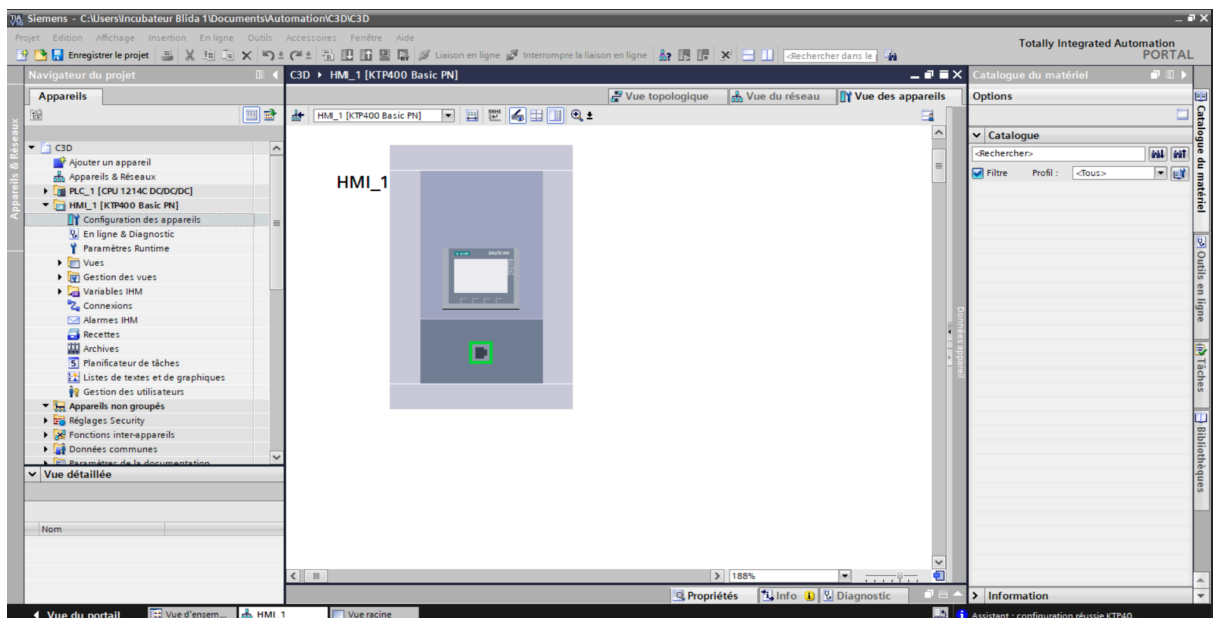


Figure 4.12: lConfiguration des pins

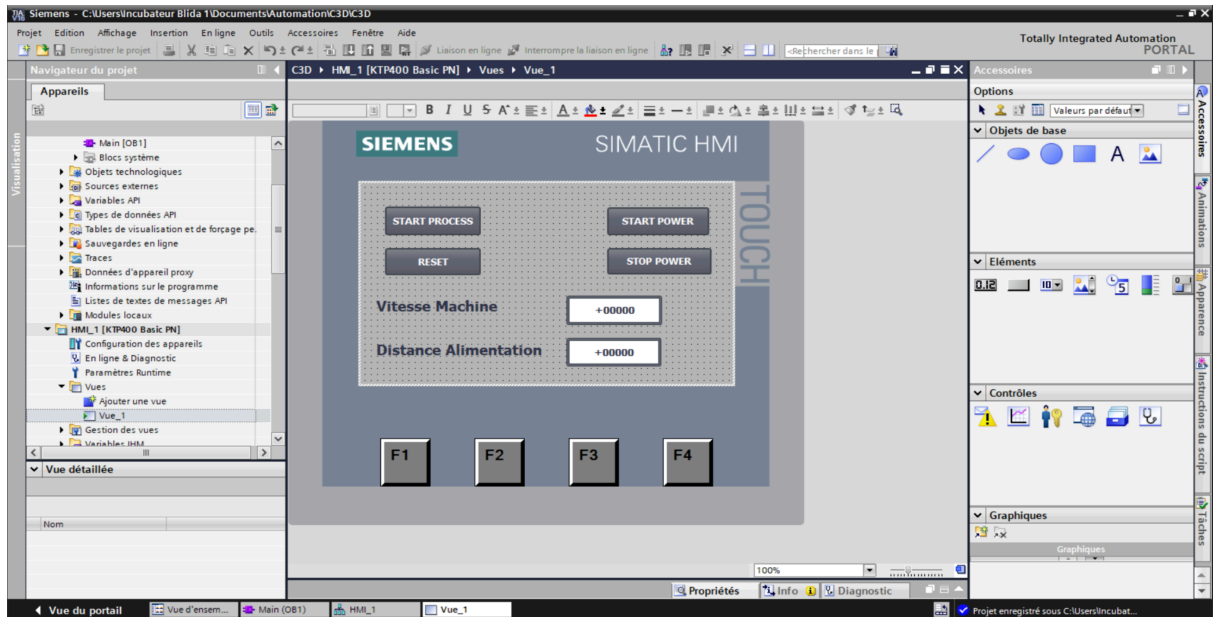


Figure 4.13: Affichage de l'IHM

4.3.2 Programme de la machine

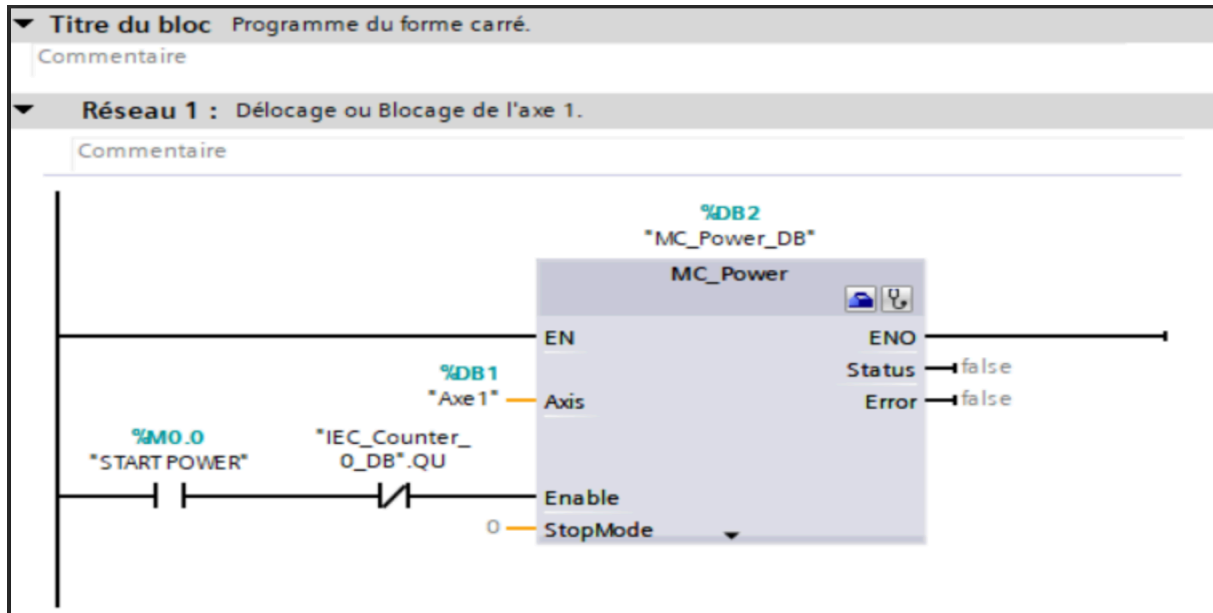


Figure 4.14: lProgramme de la forme créée

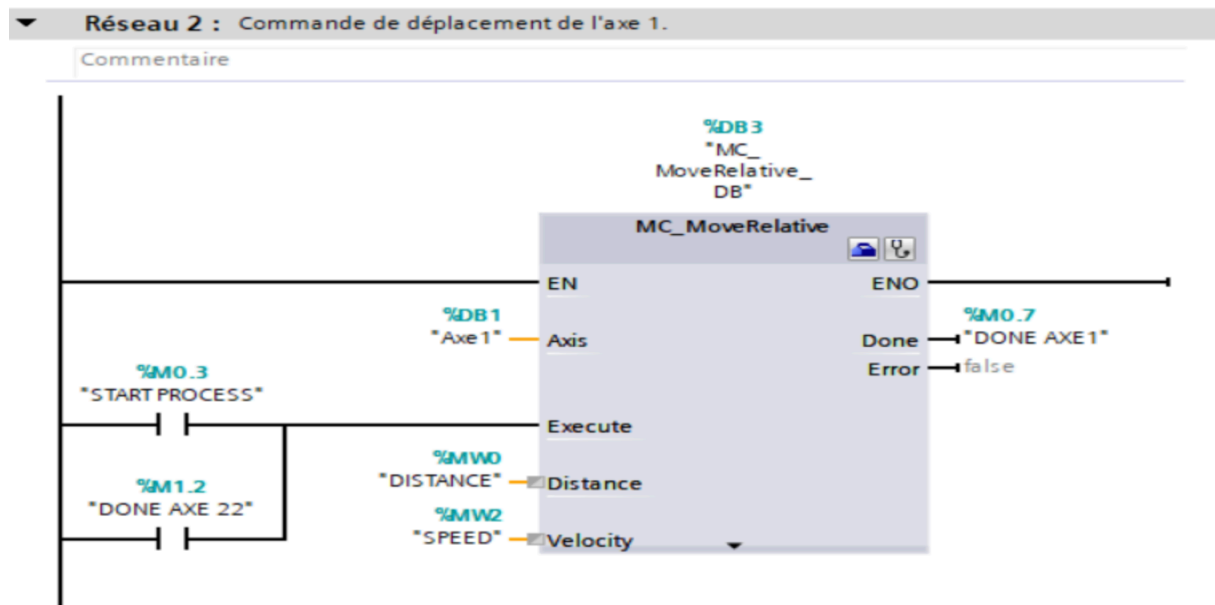


Figure 4.15: lCommande de déplacement de la'xe 1

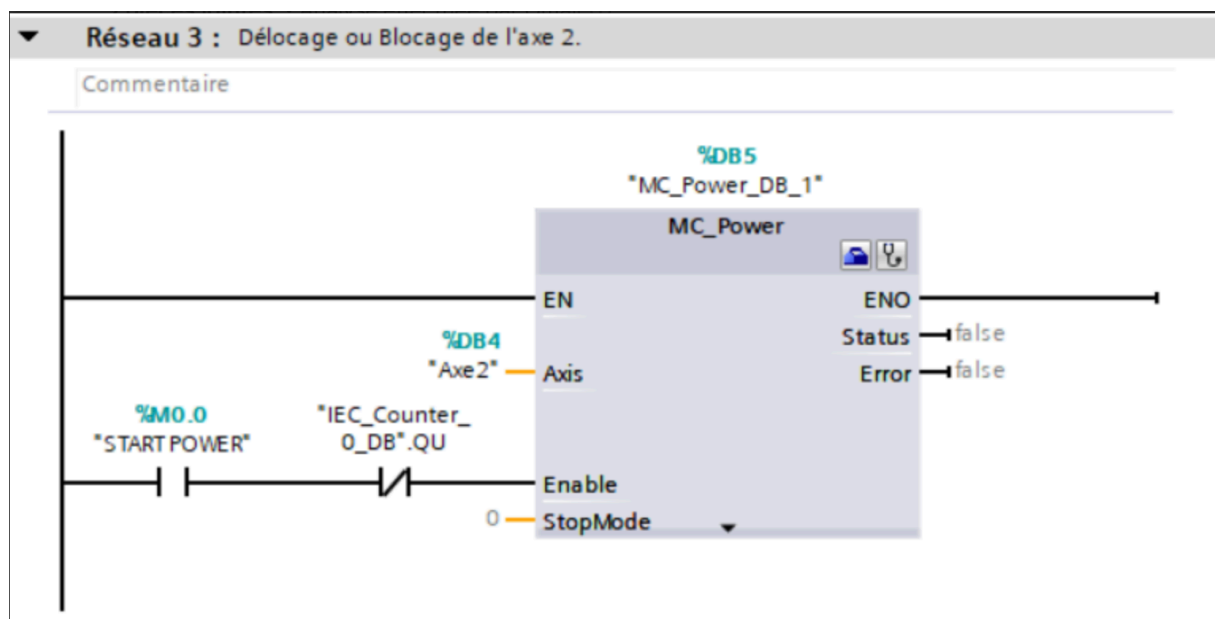


Figure 4.16: lDéblocage ou blocage de l'axe 2

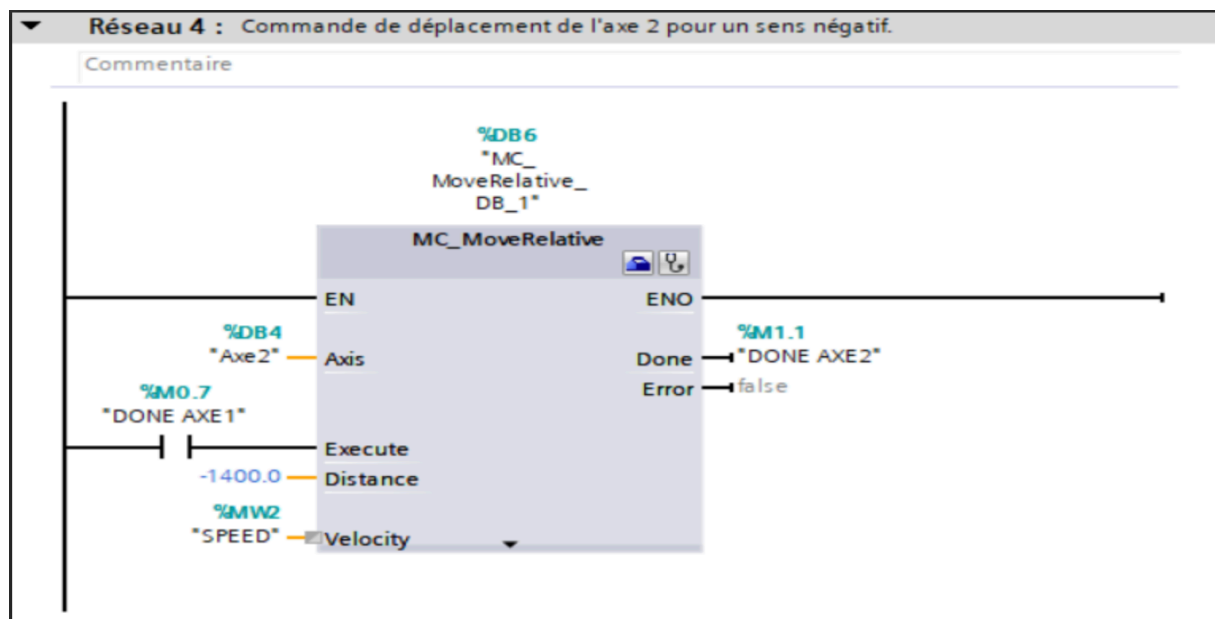


Figure 4.17: ommande de déplacement de l'axe 2 pour un sens positif

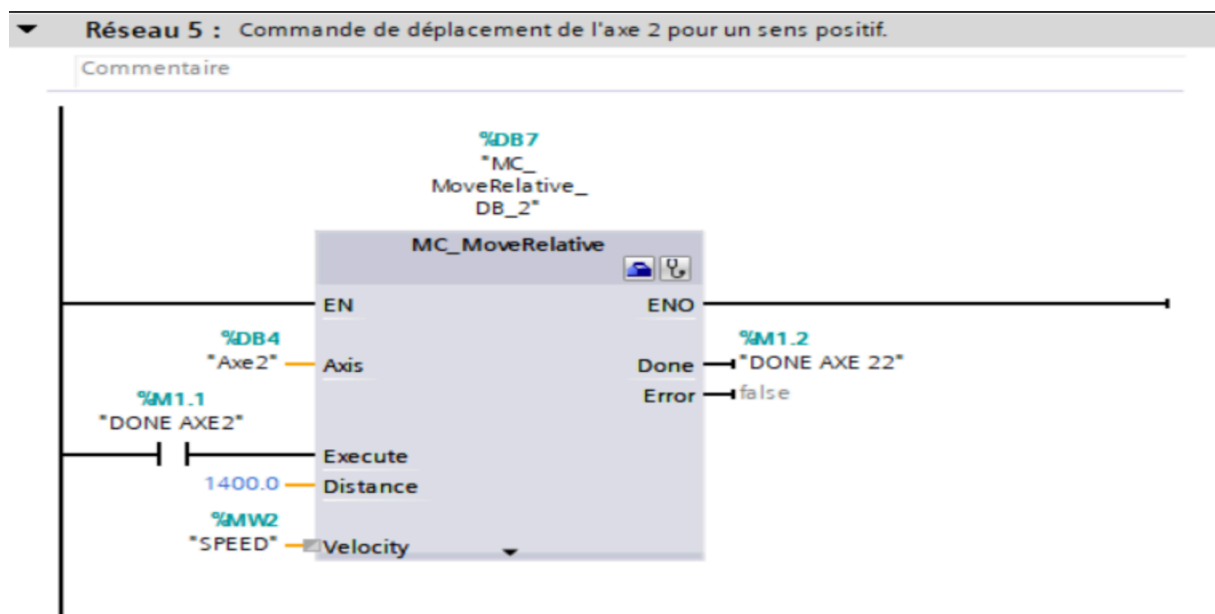


Figure 4.18: Commande de déplacement de l'axe 2 pour un sens positif

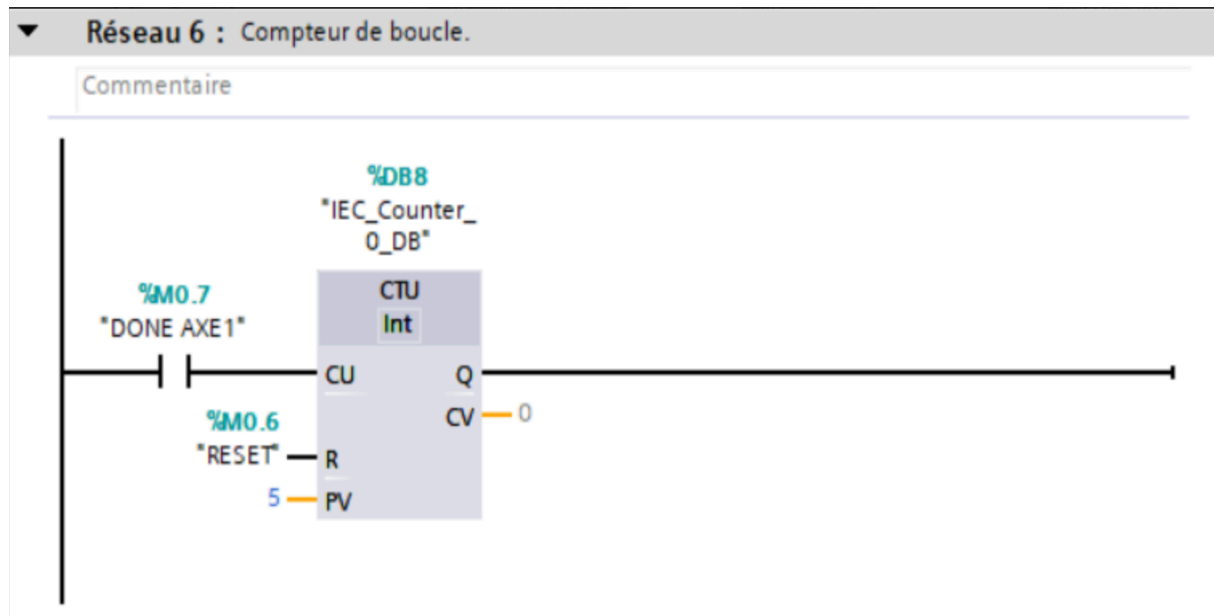


Figure 4.19: Compteur de boucle

4.4 Conclusion

Ce chapitre a présenté en détail l'implémentation pratique du système d'automatisation de la machine cadreuse. À travers l'intégration d'un automate programmable industriel (API) de la gamme Siemens S7-1200 et le logiciel TIA Portal, nous avons pu concevoir un contrôle précis, fiable et flexible du processus de fabrication des cadres métalliques. L'interface homme-machine (IHM) a permis une interaction intuitive avec l'utilisateur, facilitant la visualisation, la configuration et la supervision du système en temps réel.

Par ailleurs, l'utilisation de l'impression 3D pour la fabrication de certaines pièces mécaniques a permis une réduction significative des coûts de prototypage et un gain de temps dans le développement. La modélisation sous SolidWorks a assuré une conception optimisée, adaptable aux besoins spécifiques du projet.

L'ensemble de ces choix technologiques témoigne de la faisabilité d'une solution industrielle performante à coût réduit, ouvrant la voie à une éventuelle industrialisation du prototype.

Conclusion Générale

L'automatisation constitue aujourd'hui un enjeu stratégique majeur pour l'industrie moderne, en quête permanente de précision, de fiabilité et de productivité. Ce mémoire s'est inscrit dans cette dynamique en abordant la conception et la mise en œuvre d'un système automatisé pour une machine cadreuse 3D de fil métallique. L'objectif principal était de comparer deux approches de commande : l'une basée sur la plateforme Arduino, et l'autre sur l'automate programmable industriel (API) Siemens S7-1200.

À travers l'étude détaillée de l'architecture matérielle, des schémas de câblage, des algorithmes de commande et des environnements de développement associés, ce travail a permis de mettre en évidence les atouts et les limites propres à chaque technologie. L'approche Arduino s'est distinguée par sa simplicité, son faible coût et sa grande flexibilité, ce qui la rend particulièrement adaptée aux projets de prototypage ou aux petites structures. À l'inverse, l'API s'est révélé plus robuste, plus sécurisé et mieux intégré dans des environnements industriels complexes grâce à des fonctionnalités avancées comme la gestion du temps réel, les communications réseau (PROFINET) et l'extensibilité modulaire.

L'expérience acquise dans ce projet montre que le choix d'une technologie d'automatisation doit s'effectuer en tenant compte du contexte d'usage, des contraintes techniques et économiques, ainsi que du niveau d'exigence en matière de fiabilité et de maintenance. Le recours à Arduino peut constituer une solution efficace pour la phase de conception et de validation, tandis que l'API représente une solution plus pérenne pour le déploiement industriel à grande échelle.

En conclusion, ce mémoire a non seulement permis de mettre en œuvre des compétences techniques variées, mais aussi de nourrir une réflexion plus globale sur les enjeux de l'automatisation dans l'industrie. Des perspectives intéressantes peuvent être envisagées pour la suite, notamment l'intégration d'une interface homme-machine (IHM) plus interactive, la supervision à distance ou encore l'exploitation de technologies d'intelligence artificielle pour optimiser les trajectoires de pliage du fil en temps réel.

Bibliographie

- [1] Tecnofer. Machines et technologies pour le travail du fer, 2019. Documentation technique.
- [2] F. Benamar. L'automatisation dans l'industrie du béton. *Revue Génie Civil*, 2021.
- [3] Courtrans. Nos projets. <https://courtrans.com/our-project/>. Consulté en 2025.
- [4] Jean-Louis Faure. *Les automatismes industriels*. Dunod, 5ème édition edition, 2019.
- [5] Rhodes Precast. Rebar stirrups. <http://rhodesprecast.com/content/rebar-stirrups>.
- [6] M. Gauthier. *Contrôle industriel et automatisme*. Technip, 2018.
- [7] Numéro 241. *Revue Automation & Industrie*, 2021.
- [8] F. Golanski. *Applications industrielles de l'automatisation*. Université de Lorraine, 2018.
- [9] Siemens. *Guide technique des systèmes automatisés industriels*, 2021.
- [10] V. Jones and W. Chin. *Stepper Motors : Fundamentals, Applications and Design*. Electronics Handbook Press, 2011.
- [11] Pololu Robotics and Electronics. A4988 stepper motor driver carrier with voltage and current control, 2020.
- [12] J. Dupont. *Communication industrielle avec les automates Siemens*. Éditions Techniques Industrielles, Paris, 2021.
- [13] M. Martin. Intégration des ihm dans les systèmes automatisés. *Revue Française d'Automatique*, 45(3) :123–130, 2024.
- [14] Siemens AG. Profinet - industrial ethernet communication protocol. <https://support.industry.siemens.com>, 2023. Siemens Industry Online Support.
- [15] Siemens AG. *TIA Portal V16 - Programming Software for SIMATIC Controllers*, 2022. Siemens Industry Online Support.

Annexe A

Explications des broches des drivers A4988 et DRV8825

A.1 Explications des broches des drivers

$\overline{\text{EN}}$ (ENABLE) : Active/Désactive le driver. Lorsque cette broche est mise à LOW, le pilote est activé et peut contrôler le moteur. Lorsqu'il est mis à HIGH, le pilote est désactivé. Donc mettre à GND pour activer).

MS0, MS1, MS2 (MODE SELECTION) : Sélection du mode de micro-pas (1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 et 1/32).

RST (RESET) : Réinitialisation de driver lorsque cette broche est mise à LOW. Pour un fonctionnement normal, il doit être maintenu à HIGH.

SLP (SLEEP) : Mode veille. Lorsque ce pin est mis à LOW, le DRV8825 entre en mode veille pour réduire la consommation d'énergie.

STEP : Entrée de pas qui reçoit les impulsions pour faire avancer le moteur d'un pas.

DIR (DIRECTION) : Cette broche contrôle la direction de rotation du moteur. HIGH pour une direction, LOW pour l'autre.

VMOT : est la tension d'alimentation pour le moteur pas à pas, généralement comprise entre 8,2 V et 45 V.

GND : est la référence de masse pour l'alimentation du moteur.

1A, 2A, 1B, 2B : Sorties de pont H. Ces pins sont connectés aux enroulements du moteur pas à pas.

VDD : est la tension d'alimentation pour la logique interne du DRV8825, généralement de 3,3 V ou 5 V.

EN : Défaut. Ce pin est utilisé pour indiquer un état de défaut, tel qu'une surchauffe ou un court-circuit. Bas si un défaut est détecté.

GND : est la référence de masse pour la logique.

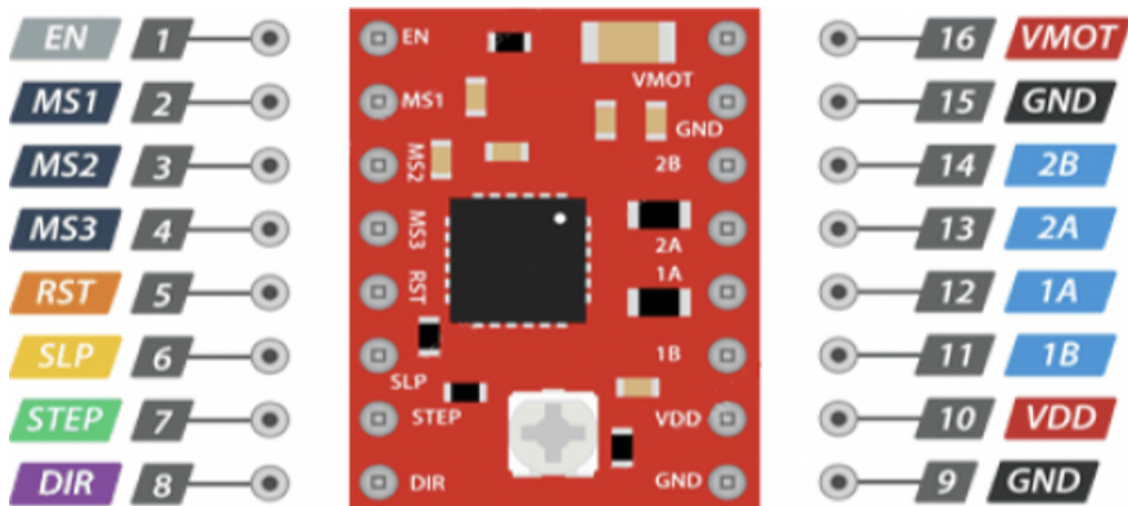


Figure A.1: Broches du module A4988

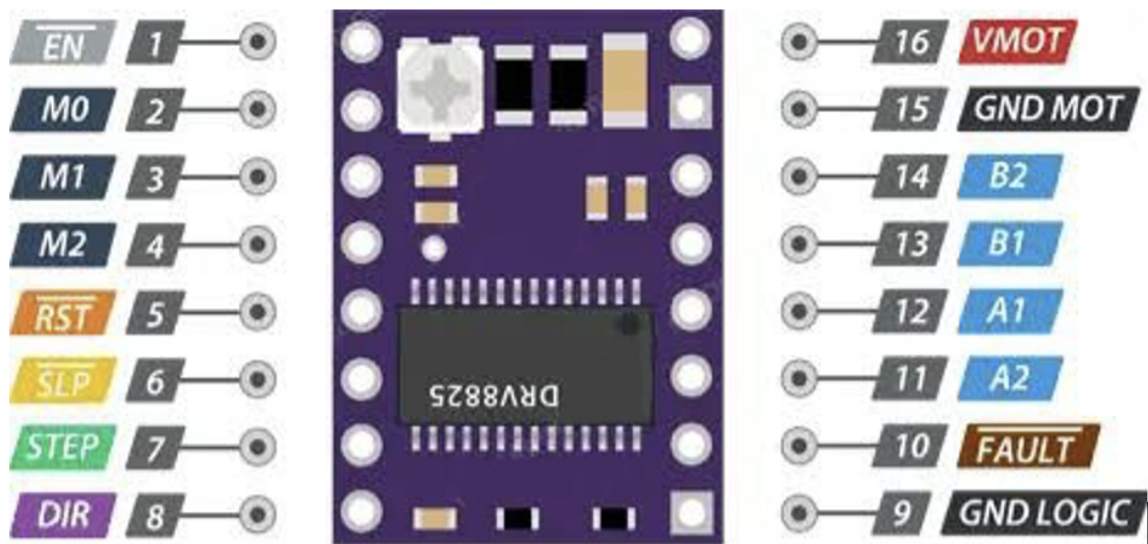


Figure A.2: Broches du module DRV8825

A.2 Explications des broches de driver DM542T (V2.3)

PUL+ : entrée de signal pour les impulsions de pas. Chaque impulsion fait avancer le moteur d'un pas.

PUL- : masse du signal PUL.

DIR+ : permet de contrôler la direction de rotation du moteur. Niveau haut ou bas change le sens de rotation.

DIR- : masse du signal DIR.

ENA+ : permet d'activer ou désactiver le driver (Niveau logique).

ENA- : masse du signal ENA.

VCC : entrée de tension continue pour alimenter le moteur.

GND : Masse d'alimentation.

A+, A-, B+ et B- : Phases d'enroulements du moteur pas à pas.

Annexe B

Tableaux de sélections pour micropas

Tableau B.1: Combinaisons des Modes de l'A4988

Mode Micropas	MS2	MS1	MS0
Pas complet	Bas	Bas	Bas
1/2 pas	Bas	Bas	Haut
1/4 pas	Bas	Haut	Bas
1/8 pas	Bas	Haut	Haut
1/16 pas	Haut	Haut	Haut
$V_{ref} = I_{71\%} * 8 * R_{I_{sense}}$			

Tableau B.2: Combinaison des Modes Micropas du DRV8825

Mode Micropas	MS2	MS1	MS0
Pas complet	Bas	Bas	Bas
1/2 pas	Bas	Bas	Haut
1/4 pas	Bas	Haut	Bas
1/8 pas	Bas	Haut	Haut
1/16 pas	Haut	Bas	Bas
1/32 pas	Haut	Bas	Haut
1/32 pas	Haut	Haut	Bas
1/32 pas	Haut	Haut	Haut
$V_{ref} = I_{71\%} * 5 * R_{I_{sense}}$			

Tableau B.3: Caractéristiques techniques des moteurs

Caractéristique	KS42STH48-1684A	JK42HS48-1684-08AF
Modèle	NEMA 17	NEMA 17
Résolution	200 pas/tour (1,8)	200 pas/tour (1,8)
Tension nominale	2,8 V	2,8 V
Courant nominal / phase	1,68 A	1,68 A
Résistance de bobine	1,65 Ω	1,65 Ω
Inductance d'enroulement	2,8 mH	2,8 mH
Couple de maintien	5,1 kg·cm (0,5 Nm)	4,4 kg·cm (0,43 Nm)
Sorties	Bipolaire (quatre fils)	Bipolaire (quatre fils)
Diamètre de la tige	5 mm	5 mm
Longueur de la tige	21 mm	24 mm
Dimensions	42 mm $\times$ 42 mm $\times$ 48 mm	42 mm $\times$ 42 mm $\times$ 48 mm
Poids	350 grammes	350 grammes

Tableau B.4: Caractéristiques techniques des moteurs

Paramètre	JK57HS56-2804-01	LDO-42STH33-1334A
Modèle	NEMA 23	NEMA 17
Résolution	200 pas/tour (1,8)	200 pas/tour (1,8)
Tension nominale	2,5 V	2,8 V
Courant nominal / phase	2,8 A	1,33 A
Résistance de bobine	0,9	2,1
Inductance d'enroulement	2,5 mH	2,5 mH
Couple de maintien	1,26 Nm	2,2 kg·cm (0,22 Nm)
Sorties	Bipolaire (quatre fils)	Bipolaire (quatre fils)
Diamètre de la tige	6,35 mm	5 mm
Longueur de la tige	20,6 mm	24 mm
Dimensions	57 mm 57 mm 56 mm	42 mm 42 mm 34 mm
Poids	680 grammes	220 grammes

```
void square() {
  while (count != 4) {
    int angleConst = 16;
    int feed = 60;
    int feedDistance = feed * 48;
    while (feederStepper.currentPosition() != feedDistance) {
      feederStepper.setSpeed(1200);
      feederStepper.run();
    }
    feederStepper.setCurrentPosition(0);
    delay(100);

    while (benderStepper.currentPosition() != -90 * angleConst) {
      benderStepper.setSpeed(-1200);
      benderStepper.run();
    }
    benderStepper.setCurrentPosition(0);
    delay(100);

    while (benderStepper.currentPosition() != 90 * angleConst) {
      benderStepper.setSpeed(1200);
      benderStepper.run();
    }
    benderStepper.setCurrentPosition(0);
    delay(100);
    count++;
  }
}
```

Figure B.1: lProgramme de la forme crée

```
int feed = 80;
int feedDistance = feed * 48;
while (feederStepper.currentPosition() != feedDistance) {
  feederStepper.setSpeed(1200);
  feederStepper.run();
}
}
```

Figure B.2: lProgramme de la forme crée

Listes des acronymes et abréviations