

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Mécanique
Mémoire de projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

Instrumentation et automatisation de la machine de traction bi-axiale
et validation

CHIKHI Ayoub et DJALAB Islem

Présenté et soutenu publiquement le (18/07/2024)

Composition du Jury :

Président :	M.RECHAK Said	Professeur ENP
Promoteur :	M.BELKACEMI Yacine	MCA ENP
Promoteur :	M.GUERGUEB Brahim	MAA ENP
Examineur :	M.SAIDI Djamel	MCA ENP
Invité :	M.ZEHANA Abdelhalim	Gérant USIPRECIS
Invité :	M.ATTALLI Ayoub	Ingénieur

ENP 2024

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Mécanique

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

Instrumentation et automatisation de la machine de traction bi-axiale
et validation

CHIKHI Ayoub et DJALAB Islem

Présenté et soutenu publiquement le (18/07/2024)

Composition du Jury :

Président :	M.RECHAK Said	Professeur ENP
Promoteur :	M.BELKACEMI Yacine	MCA ENP
Promoteur :	M.GUERGUEB Brahim	MAA ENP
Examineur :	M.SAIDI Djamel	MCA ENP
Invité :	M.ZEHANA Abdelhalim	Gérant USIPRECIS
Invité :	M.ATTALLI Ayoub	Ingénieur

ENP 2024

ملخص

يهدف البحث "تجهيز آلة الشد تناثية المحاور وجعلها آلية والتحقق من صحتها" إلى تحسين آلة الشد تناثية المحاور الموجودة من خلال دمج أربعة أجهزة استشعار للقوة بقدرة 5 كيلو نيوتن لقياس القوى المطبقة بدقة، ونظام كاميرا لمعالجة الصور لالتقاط وتحليل تشوه المواد، ونظام تحكم آلي لتبسيط عملية الاختبار. هذا التحسين يوسع وظائف الآلة من خلال تمكين التحكم في سرعة تشوه العينات المختبرة. كل محور من محاور الآلة مزود بجهاز استشعار للقوة يسمح بقياس القوة المطبقة، مما يمكن من الحصول على منحنيات مميزة للمواد المختبرة. وبهذا، ستكون هذه الآلة قادرة على إجراء اختبارات التحقق على مجموعة متنوعة من المواد، مع قدرة تحمل تصل إلى 5 كيلو نيوتن وسوط يبلغ 65 ملم.

كلمات مفتاحية : أجهزة القياس، اختبار الشد تناثي المحاور، التحقق التجريبي، مجسات القوة، كاميرا.

Abstract

The thesis entitled "Instrumentation and Automation of the Bi-Axial Tensile Testing Machine and Validation" aims to enhance an existing biaxial traction machine by integrating four 5 kN force sensors to accurately measure the applied forces, a camera system for image processing to capture and analyze material deformation, and an automated control system to simplify the testing process. This improvement extends the machine's capabilities by enabling control over the deformation speed of the tested samples. Each axis of the machine is equipped with a force sensor to measure the applied force, allowing for the generation of characteristic curves of the tested materials. This machine will thus be capable of performing validation tests on a variety of materials, with a load capacity of 5 kN and a stroke of 65 mm.

Keywords : Instrumentation, biaxial traction, experimental validation, force sensors, camera.

Résumé

Le mémoire intitulé "Instrumentation et automatisation de la machine de traction bi-axiale et validation" vise à améliorer une machine de traction bi-axiale existante en intégrant quatre capteurs de force de 5 kN pour mesurer avec précision les forces appliquées, un système de caméra pour le traitement d'images afin de capturer et analyser la déformation des matériaux, et un système de commande automatisé pour simplifier le processus de test. Cette amélioration étend les fonctionnalités de la machine en permettant le contrôle de la vitesse de déformation des échantillons testés. Chaque axe de la machine est pourvu d'un capteur de force permettant de mesurer la force appliquée, ce qui permettra d'obtenir des courbes caractéristiques des matériaux testés. Cette machine sera ainsi en mesure de réaliser des essais de validation sur une variété de matériaux, avec une capacité de charge de 5 kN et une course de 65 mm.

Mots clés : Instrumentation, traction bi-axiale, validation expérimentale, capteurs de force, caméra.

Remerciements

Nous tenons à remercier sincèrement Allah de nous avoir guidés tout au long de notre étude. Ses bénédictions et ses conseils ont été la raison principale pour laquelle nous avons franchi cette étape.

Nous sommes également immensément reconnaissants à nos parents pour leur amour indéfectible, leurs encouragements et leur soutien psychologique. Leur confiance en nous a été une source constante de motivation et de force.

Nous remercions chaleureusement M.ATTALLI Ayoub pour ses contributions louables à l'automatisation de la machine. Son expertise et ses connaissances ont été essentielles pour atteindre nos objectifs.

Nous remercions sincèrement nos promoteurs, Dr.BELKACEMI et M.GUERGUEB, pour leurs précieux conseils, leur patience et leurs contributions indéniables à notre projet. Leurs conseils et leur expertise ont joué un rôle crucial dans l'élaboration de cette mémoire.

Nous tenons également à remercier les membres du jury, le président Pr.RECHAK Said et l'examineur M.SAIDI Djamel , nous espérons que vous apprécierez ce travail.

Nous remercions chaleureusement M.DELHOUM Samir pour son aide dans la fabrication de la table.

Dédicace

À ma mère et mon père bien-aimés, Cette dédicace est tout d'abord pour vous, mes piliers les plus solides. Vous m'avez donné l'amour, le soutien et les encouragements nécessaires pour que je puisse poursuivre mes études et atteindre cet important jalon de ma vie. Votre dévouement et votre confiance en moi ont été ma source d'inspiration constante. Merci d'avoir cru en mes rêves et de m'avoir poussé à donner le meilleur de moi-même.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers mes frères, ma sœur, son épouse et mes nièces. Vous avez tous joué un rôle essentiel dans mon parcours.

Je remercie également mes professeurs et mes collègues de classe. Votre enseignement de qualité, vos discussions stimulantes et notre collaboration m'ont aidé à développer mes compétences et à élargir mes horizons. Un merci spécial à mes amis qui ont été mes piliers dans les moments de doute et de fatigue. Votre amour, votre patience et votre croyance en moi ont été une source d'inspiration constante.

Ayoub CHIKHI

Dédicace

Je souhaite dédier ce mémoire à ceux qui m'ont soutenu et encouragé tout au long de mon parcours universitaire.

À mes parents, pour votre amour inconditionnel et votre soutien indéfectible. Vous avez été une source constante de motivation et de réconfort, et je vous suis profondément reconnaissant.

À mes professeurs, pour leur expertise, leur patience et leur dévouement à transmettre le savoir. Votre guidance et vos encouragements ont été essentiels à ma réussite.

À mes frères et mes amis, pour votre compréhension et votre soutien inébranlable durant les moments de doute et de stress. Votre présence a été une source de réconfort et d'inspiration.

À mes camarades de classe, pour notre collaboration et les discussions enrichissantes qui ont élargi mes perspectives et affiné mes compétences. Ensemble, nous avons surmonté les défis et partagé de précieux moments d'apprentissage.

Enfin, à tous ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à mon succès, je vous dédie ce mémoire avec une gratitude immense et sincère.

Islem DJALAB

Table des matières

Liste des tableaux

Table des figures

Liste des acronymes

Introduction générale	15
1 Généralités sur les essais de traction	17
1.1 Introduction	17
1.2 Les essais de traction uni-axiaux	18
1.2.1 Introduction	18
1.2.2 Principe d'essai de traction uni-axiale	19
1.2.2.1 Appareils d'essais	19
1.2.2.2 Procédure du test	21
1.2.2.3 Les données collectées	22
1.2.3 Formes des Éprouvettes	22
1.2.3.1 Éprouvette Cylindrique (ASTM A370)	23
1.2.3.2 Barre de traction plate	23
1.2.3.3 Éprouvette dogbone (ASTM D638)	24
1.2.4 Exploitation des résultats d'essai d'une traction uniaxiale	25
1.3 Les essais de traction bi-axiale	27
1.3.1 Introduction	27
1.3.2 État d'art des machines de traction biaxiaux	28
1.3.3 Les catégories des machines d'essai biaxiale	29
1.3.4 Principe de l'essai de traction biaxiale	31

1.3.5	Machine de traction bi-axiale	32
1.3.6	Éprouvette de traction bi-axiale	33
1.3.7	Forme de l'éprouvette cruciforme	33
1.3.8	Quelques types des éprouvettes cruciformes	34
2	Description de la machine de traction bi-axiale existante	36
2.1	Introduction	36
2.2	Présentation de notre machine	36
2.3	Présentation de système de traction	38
2.4	Les modifications apportées sur la machine	40
2.4.1	Le bâti	40
2.4.2	La table	42
2.4.2.1	Procédures de la fabrication mécanique des composants de la table	42
2.4.3	Le support de caméra	48
2.5	Conclusion	51
3	Automatisation et Instrumentation de la Machine de Traction Biaxiale	52
3.1	Introduction	52
3.2	Les composants nécessaires pour automatiser la machine	52
3.2.1	Les moteurs pas a pas	52
3.2.1.1	Avantages et Inconvénients du moteur pas à pas 86BHH76-400B-35J	55
3.2.2	Driver contrôle	55
3.2.2.1	Fonctionnalités principales d'un driver de contrôle pour moteur pas à pas	56
3.2.2.2	Fonctionnement	56
3.2.3	Capteur de fin de course	56
3.2.3.1	Fonctionnalités principales d'un capteur de fin de course	57
3.2.3.2	Fonctionnement	57
3.2.4	Un convertisseur buck	58
3.2.4.1	Avantages	59
3.2.5	Alimentation à découpage	60

3.2.6	Camera raspberry pi v2	60
3.2.6.1	Caractéristiques principales	61
3.2.6.2	Pourquoi la camera de raspberry pi v2?	61
3.2.6.3	Le traitement d'image	62
3.2.7	Raspberry pi 4	62
3.2.7.1	Caractéristiques principales	63
3.2.7.2	Pourquoi le Raspberry Pi 4?	63
3.2.7.3	Communication avec le raspberry pi 4	64
3.2.8	Capteur de force	65
3.2.8.1	Principe de fonctionnement	65
3.2.8.2	Communication avec le capteur	66
3.3	Les technologies utilisée	67
3.3.1	JavaScript(Node Js)	67
3.3.2	Rust	67
3.3.3	Flutter	67
3.3.4	Raspbian(Linux)	67
3.4	Schémas électrique de la machine	68
3.5	Conclusion	70
4	Essai et Résultats de la Machine de Traction Biaxial	71
4.1	Introduction	71
4.2	Description de la Machine de Traction Biaxial	71
4.3	Essai de traction biaxial	72
4.3.1	Matériaux et Méthodes	72
4.3.1.1	Matériau Utilisé	72
4.3.1.2	Préparation des Échantillons	72
4.3.2	Réalisation des essais et analyse des résultats	73
4.3.2.1	Présentation de l'interface graphique d'accueil	73
4.3.2.2	Résultats	75
4.3.3	Analyse des résultats	77
4.4	Conclusion	78

Conclusion générale	79
Bibliographie	80
Annexe A	83
Annexe B	98

Liste des tableaux

2.1	Les éléments constitutifs de la machine	39
2.2	Les dimensions du tube carré	40
2.3	Gamme de fabrication de Bâti	40
2.4	Les composants du support de la caméra	50
3.1	Caracteristiques du capteur HF-5K	66

Table des figures

1.1	Micro machine de traction 5kN	17
1.2	Machine de traction de capacité supérieure à 30MN	18
1.3	Machine de traction mono-axiale automatisée avec ses composants	19
1.4	Dispositif de traction uni axial	19
1.5	Photo de la machine de traction ZWICK	20
1.6	Schéma de l'acquisition des données mécaniques et des images numériques pour un essai de traction uniaxiale	21
1.7	Dimensions d'éprouvette Ronde standardisée	23
1.8	Éprouvette filetée	23
1.9	Dimensions des éprouvettes pour essais de traction selon les normes	24
1.10	Dimensions d'éprouvette dogbone standardisée	25
1.11	Diagramme effort-déformation de la traction simple	26
1.12	Éprouvette cruciforme	27
1.13	Dispositif d'essais biaxiaux Lecompte	28
1.14	Dispositif d'essais biaxiaux Kuwabara	28
1.15	Machines d'essai biaxiales avec un actionneur développées par Bhatnagar	29
1.16	Machines d'essai biaxiales avec deux actionneurs développées par : (a) Hoferlin [15] et (b) Lin [16]	30
1.17	Machines d'essai biaxiales avec quatre actionneurs développées par : (a) Makinde/Green [18] et (b) Gower [19]	31
1.18	Les machines d'essai triaxial développées par : (a) Welsh [20] et (b) ASTREE [22]	31
1.19	Machine d'essai de traction biaxiale	32
1.20	Système intégré d'essais bi-axial planaire de grande capacité	33
1.21	Éprouvette cruciforme	34
1.22	Formes des éprouvettes fréquemment utilisées dans le champ de recherche	35

2.1	Image de la machine de traction biaxiale avec l'ancien bâti	37
2.2	Image de la machine de traction biaxiale avec le nouveau bâti	38
2.3	Image descriptive des éléments de la machine	38
2.4	Image de la conception du nouveau bâti	41
2.5	Image réelle du nouveau bâti	41
2.6	Image de la conception de la Table	42
2.7	Image de la conception du pied de la table	43
2.8	Image de la conception de la traverse en acier galvanisé	44
2.9	Image de la conception de la traverse en acier S235	44
2.10	Image de la conception du renfort	45
2.11	Image de la conception du renfort	45
2.12	Image de la conception du tube utilisé pour fabriquer le cadre de la table	46
2.13	Image de la conception du plateau	46
2.14	Montage de la Table	47
2.15	La table avec une couche d'antirouille	48
2.16	La table après la peinture	48
2.17	Imprimante 3D (a) Ender 3 (b) Creality 10	49
2.18	Image réelle du support de la caméra en utilisant un support de comparateur	51
3.1	Moteur pas à pas hybride	53
3.2	Schéma géométrique illustrant le moteur pas à pas (86BHH76-400B-35J) fabriqué par CW-motor	53
3.3	Moteur pas à pas (86BHH76-400B-35J) fabriqué par CW-motor	54
3.4	Couple mécanique en fonction de la fréquence de rotation	54
3.5	Le driver contrôle DM542-05	55
3.6	Capteur de fin de course	57
3.7	Schéma électrique de pull-down	58
3.8	Les résistances de pull-down	58
3.9	Convertisseur buck 24/12v	59
3.10	Convertisseur buck 12/5.1v	59
3.11	Alimentation à découpage	60
3.12	Camera raspberry pi v2	61

3.13	Raspberry pi 4	62
3.14	Capteur de force HF-5K	65
3.15	Décodeur du capteur HF-5K	66
3.16	Schéma électrique de la machine	68
3.17	Schéma électrique des capteurs de force	69
4.1	Montage final de la machine de traction biaxiale	71
4.2	Image de la conception de l'éprouvette	72
4.3	Image réelle de l'éprouvette	73
4.4	Fenêtre principale	73
4.5	Fenêtre pour la visualisation des forces	74
4.6	Fenêtre pour l'affichage des testes sauvegardés	74
4.7	Courbe de force-déplacement pour l'éprouvette de 4mm d'épaisseur	75
4.8	Courbe de contrainte-déformation pour l'éprouvette de 4mm d'épaisseur	75
4.9	Courbe de force-déplacement pour l'éprouvette de 6mm d'épaisseur	76
4.10	Courbe de contrainte-déformation pour l'éprouvette de 6mm d'épaisseur	76
4.11	Courbe de force-déplacement pour l'éprouvette de 8mm d'épaisseur	77
4.12	Courbe de contrainte-déformation pour l'éprouvette de 8mm d'épaisseur	77

Liste des acronymes

- **ASTM** : America's Society For Testing and Materials.
- **ISO** : International Standardization Organization.
- **PLC** : Programmable Logic Controllers
- **UI** : User Interface
- **PWM** : Pulse Width Modulation
- **IMCS** : Incremental Motion Control Systems

Introduction générale

Depuis les débuts de l'ère industrielle, les essais mécaniques ont été cruciaux pour garantir la fiabilité des matériaux utilisés dans la construction et l'ingénierie. Initialement développés pour évaluer la résistance des matériaux sous des charges spécifiques, ces tests ont évolué au fil du temps, particulièrement au XXe siècle avec les efforts pour standardiser les méthodes et théoriser le comportement mécanique des matériaux, notamment grâce aux contributions de figures comme Stephen Timoshenko.[1] Cette évolution a été essentielle pour répondre aux exigences croissantes de diverses industries, telles que l'aérospatiale, l'automobile et les soins de santé, où la performance des matériaux sous différentes contraintes est primordiale pour la sécurité et la durabilité des produits finis.

Dans ce contexte, les matériaux polymères haute performance ont émergé comme des solutions clés, répondant à des besoins spécifiques tels que la légèreté, la résistance et la flexibilité dans des environnements variés. Cependant, pour optimiser leur utilisation et garantir leur fiabilité, il est devenu essentiel de développer des méthodes de test plus sophistiquées. En initiant un projet d'instrumentation pour la machine de traction biaxiale réalisée l'année passée, le présent travail vise à intégrer des capteurs de force, une caméra pour la mesure de la déformation par corrélation d'images, à automatiser les essais de traction biaxiale et à développer un logiciel capable de générer un graphique de contrainte-déformation.

Cette machine de traction biaxiale est conçue pour évaluer avec précision la réponse mécanique des films polymères soumis à une charge de traction biaxiale. L'objectif de ce travail est de permettre la réalisation d'essais à vitesse contrôlée avec mesure de la force et de la déformation grâce à l'utilisation de méthodes contemporaines de fabrication, garantissant des tests fiables et reproductibles des matériaux polymères.

La machine permettra la caractérisation de plusieurs types de matériaux. Les résultats de cette étude approfondiront nos connaissances sur le comportement mécanique de divers matériaux soumis à une contrainte de traction biaxiale et offriront des suggestions fructueuses pour optimiser leur utilisation par la conception et la production.

La machine de traction biaxiale, équipée de cette nouvelle instrumentation, sera un outil utile pour les recherches ultérieures. Elle facilitera les essais, générera des graphes précis et améliorera la qualité des données obtenues.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres de la manière suivante :

Chapitre 1 : Le premier chapitre présente des généralités sur les essais de traction et le comportement mécanique des matériaux.

Chapitre 2 : Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de la machine réalisée et aux modifications apportées.

Chapitre 3 : Le troisième chapitre est dédié à l'automatisation et l'instrumentation de la machine. Le processus d'automatisation permet de mener des essais biaxiaux entièrement contrôlés.

Chapitre 4 : Le quatrième chapitre est réservé aux essais et aux résultats obtenus par notre machine de traction biaxiale.

Enfin, nous terminerons ce mémoire par les principales conclusions et quelques perspectives.

Chapitre 1

Généralités sur les essais de traction

1.1 Introduction

Une machine d'essais de traction, également appelée appareil d'essais de traction ou machine d'essais universelle est un système d'essais électromécanique qui exerce une force de traction sur un matériau afin de déterminer sa résistance à la traction et son comportement à la déformation jusqu'à la rupture. Une machine d'essais de traction typique se compose d'un capteur de force, d'une traverse, d'un extensomètre (capteur de déformation), de mâchoires, d'une électronique et d'un système d'entraînement. Elle est commandée par un logiciel d'essai qui permet de définir les paramètres de la machine et réglages de sécurité; le logiciel permet également d'enregistrer les paramètres d'essai de normes d'essai telles que ASTM et ISO. La force exercée sur la machine et la déformation de l'éprouvette sont enregistrées tout au long de l'essai. La mesure de la force nécessaire pour étirer ou allonger un matériau jusqu'à une déformation permanente ou une rupture aide les concepteurs et fabricants à prédire comment les matériaux se comporteront lorsqu'ils seront utilisés.[2] L'échelle des machines peut passer d'une micro a une mégamachine d'essais mécaniques. Les figures ci-dessous montrent des machines ou on peut aller a des forces dépassant les 30 méga Newtons. Le projet concerne une machine automatisée utilisant des moteurs pas à pas pouvant réaliser des essais de traction biaxiale.[3]

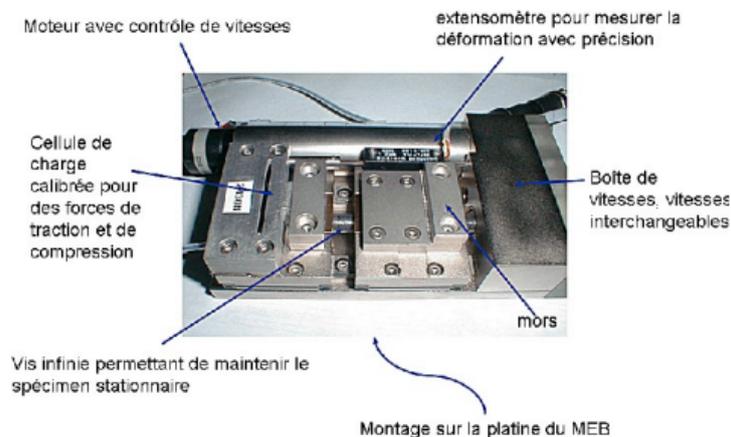


FIGURE 1.1 – Micro machine de traction 5kN

[1]



FIGURE 1.2 – Machine de traction de capacité supérieure à 30MN
[3]

1.2 Les essais de traction uni-axiaux

1.2.1 Introduction

Les essais de traction sont une technique courante pour trouver les caractéristiques mécaniques critiques des matériaux d'ingénierie, Ils consistent à augmenter progressivement la force de traction axiale de manière monotone jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La norme est définie par la Société Américaine pour les Essais et Matériaux America's Society For Testing and Materials (ASTM).[4]

L'essai est effectué en fixant éprouvette entre deux mors attachés à la machine. Un mors est stationnaire, tandis que l'autre mors se déplace à une vitesse constante, La charge appliquée sur l'éprouvette est mesurée à l'aide d'une cellule de charge, et la déformation ou l'allongement est mesuré à l'aide d'un transducteur de déplacement. Les données de charge et de déformation sont enregistrées en continu pendant le test.[5]

La figure 1.3 montre la machine de traction monoaxiale modèle Z330E équipée d'une unité électronique permettant de mesurer les différents paramètres mécaniques des matériaux testés.

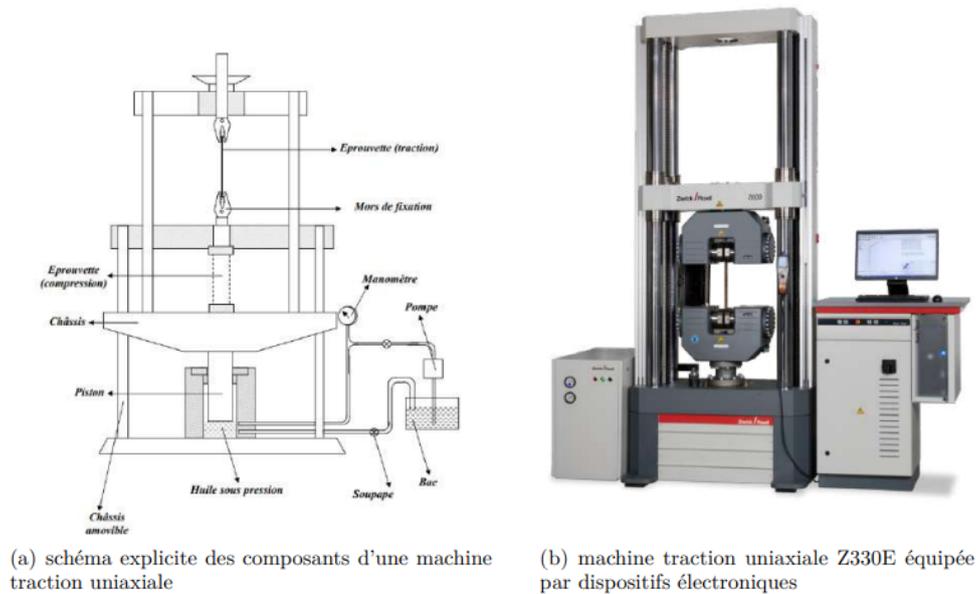


FIGURE 1.3 – Machine de traction mono-axiale automatisée avec ses composants [6]

1.2.2 Principe d'essai de traction uni-axiale

L'éprouvette est solidement attachée dans les mâchoires de deux pièces (les mors), l'un fixé sur le bâti de la machine, l'autre sur une traverse mobile.

Cette dernière sert à tirer sur l'échantillon à l'aide d'une force. On mesure simultanément cette force et l'allongement de l'échantillon.

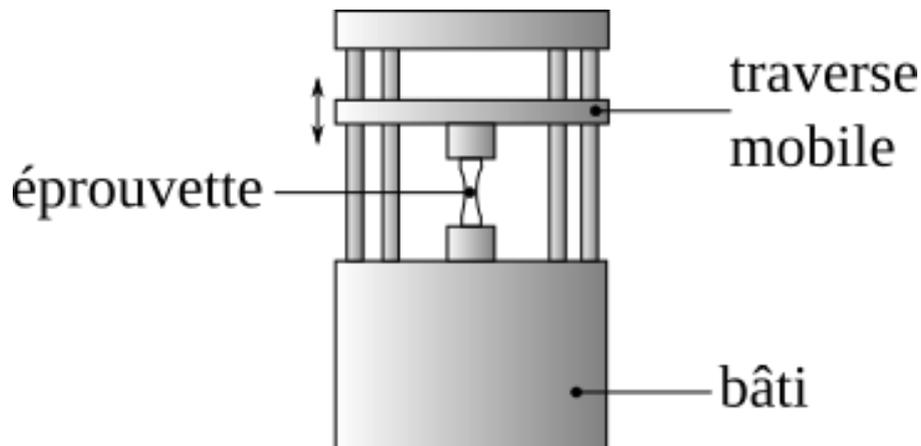


FIGURE 1.4 – Dispositif de traction uni axial

1.2.2.1 Appareils d'essais

Une machine de traction moderne est équipée d'un entraînement électrique ajustable permettant de réaliser des essais simples ou cycliques à vitesse contrôlée. Elle est dotée de capteurs de force et d'allongement, ainsi que d'un système de démarrage. Avec l'aide des ordinateurs, le contrôle des essais et la collecte des données sont grandement facilités. Des capteurs couplés à des cartes d'acquisition de données, contrôlés par des logiciels très poly-

valents, permettent de gérer des machines capables de générer des forces allant jusqu'à 100 kN. Le dispositif de démarrage comprend une paire de mors ou un autre système de fixation adapté à la forme de l'éprouvette (par exemple, pour une éprouvette avec tête filetée ou tête à épaulement).

Pour éviter toute flexion, il est crucial que les fixations soient bien alignées et orientées selon l'axe de traction. Cela peut être particulièrement délicat, mais c'est essentiel lorsqu'on teste des matériaux fragiles, comme les céramiques, qui ne peuvent pas tolérer de désalignement. De même, toute composante de torsion doit être évitée. L'effort est appliqué par l'entraînement, qu'il soit mécanique ou hydraulique, sur l'un des mors de fixation.

Un système de réglage permet de maintenir une vitesse de déformation constante. Ce système offre également la possibilité d'effectuer des cycles de déformation (par exemple, à vitesse d'accroissement constante ou en cycles sinusoïdaux) ou d'imposer la contrainte plutôt que la déformation.

La figure 1.5 schématise l'ensemble des éléments qui interviennent dans la réalisation des essais de traction uniaxiale.

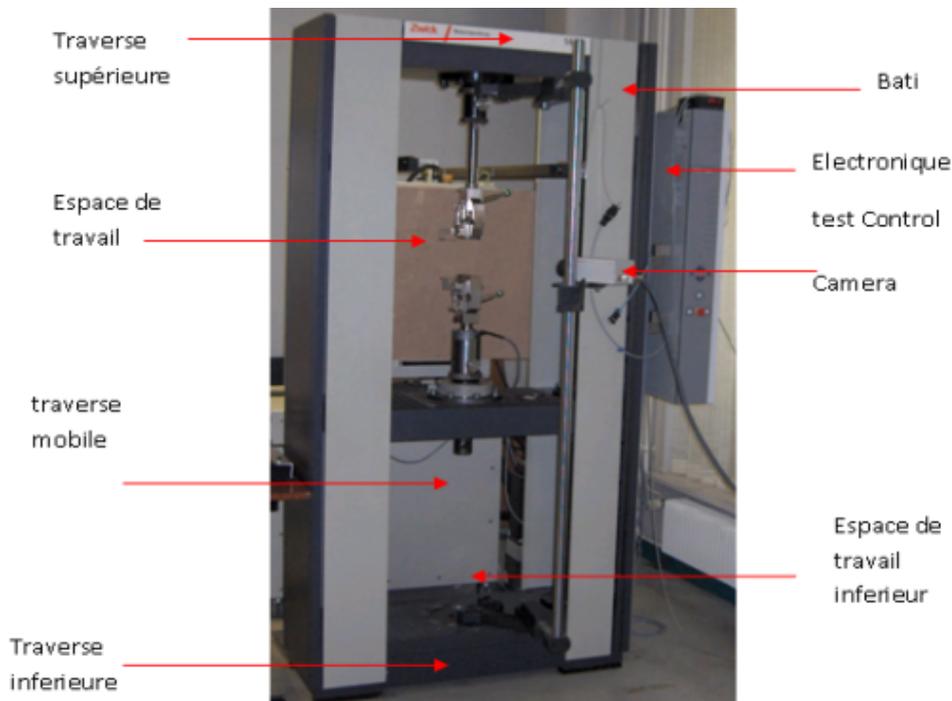


FIGURE 1.5 – Photo de la machine de traction ZWICK
[7]

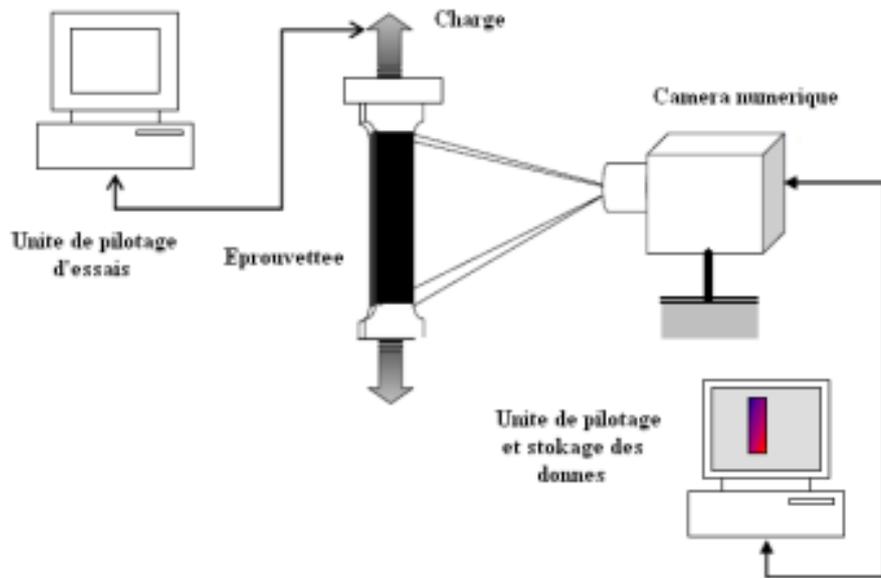


FIGURE 1.6 – Schéma de l'acquisition des données mécaniques et des images numériques pour un essai de traction uniaxiale

[7]

Bien que les machines de traction soient robustes, il n'est généralement pas suffisant de mesurer l'allongement en se basant uniquement sur le déplacement de la traverse. Ceci est particulièrement vrai pour les éprouvettes courtes, où l'allongement élastique du cadre de la machine et des dispositifs de fixation peut être significatif par rapport à celui de l'échantillon. Il est donc préférable de fixer un extensomètre aux extrémités de la longueur de mesure et d'utiliser ce signal pour tracer les courbes. Ce signal est essentiel pour ajuster le déplacement de la traverse lors d'un essai de traction à vitesse de déformation constante, qui est le mode d'essai privilégié.

Alternativement, on peut ajuster le déplacement de la traverse de manière à ce que la contrainte de traction ou de compression augmente selon une fonction temporelle prédéfinie (fatigue oligocyclique à amplitude de contrainte constante). Un troisième mode de réglage consiste en un contrôle direct de la vitesse de la traverse. Ce mode est utilisé lorsqu'on souhaite uniquement déterminer la résistance à la traction sans utiliser un extensomètre.

1.2.2.2 Procédure du test

La procédure commence par la préparation de l'échantillon, qui doit être représentatif du matériau à tester et découpé selon des dimensions standardisées. Les dimensions initiales, telles que la longueur de la section de jauge et les dimensions transversales, sont mesurées avec précision. L'échantillon est ensuite fixé dans les mâchoires de la machine de traction, en veillant à son bon alignement pour éviter des efforts de flexion ou de cisaillement.

Une fois l'échantillon installé, des instruments de mesure, comme un extensomètre pour la déformation et des capteurs pour la force, sont mis en place. La machine de traction est configurée avec une vitesse de traction appropriée, et le test commence par l'application progressive d'une charge croissante. Les données de force et de déformation sont enregistrées en continu jusqu'à la rupture de l'échantillon. Les points clés, tels que la charge maximale et la déformation à la rupture, sont notés.

1.2.2.3 Les données collectées

Les données collectées lors d'un test de traction uniaxiale sont essentielles pour caractériser les propriétés mécaniques du matériau testé. Ces données comprennent principalement les mesures de force et de déformation tout au long du test.

Les mesures initiales incluent la longueur de la section de jauge (L_0), qui est la longueur de la partie de l'échantillon où la déformation sera mesurée, et la section transversale initiale (A_0), calculée à partir de la largeur et de l'épaisseur de l'échantillon. Ces mesures sont essentielles pour déterminer la contrainte appliquée au matériau.

Pendant le test, deux types de données principales sont recueillies : la force appliquée (F) et l'allongement (ΔL). La force appliquée est mesurée par les capteurs de force de la machine de traction, tandis que l'allongement est mesuré par l'extensomètre. Ces mesures sont utilisées pour calculer la contrainte (σ) et la déformation (ε) du matériau. La contrainte est calculée en divisant la force appliquée par la section transversale initiale, et la déformation est calculée en divisant l'allongement par la longueur initiale de la section de jauge.

La courbe contrainte-déformation obtenue à partir des données de force et de déformation révèle plusieurs points clés sur le comportement du matériau. La limite d'élasticité (σ_e) est la contrainte maximale avant que le matériau ne commence à se déformer plastiquement, indiquant jusqu'à quel point le matériau peut revenir à sa forme initiale après déformation. La résistance à la traction (σ_u) est la contrainte maximale que le matériau peut supporter avant de rompre, ce qui est crucial pour déterminer la robustesse du matériau. L'allongement à la rupture (ε_r) est la déformation au moment de la rupture, exprimée en pourcentage, et indique la ductilité du matériau. Le module d'élasticité (E) est la pente de la courbe contrainte-déformation dans la région élastique, représentant la rigidité du matériau.

En plus des mesures quantitatives, d'autres observations qualitatives, comme le comportement plastique du matériau et le point de rupture, sont notées. Ces observations aident à identifier les modes de rupture et les anomalies observées pendant le test.

1.2.3 Formes des Éprouvettes

Les éprouvettes de traction uniaxiale sont des échantillons de matériaux utilisés pour évaluer les propriétés mécaniques sous une charge de traction appliquée le long d'un seul axe. Ces essais de traction uniaxiale sont essentiels pour déterminer des caractéristiques telles que la résistance à la traction, le module d'élasticité, et l'allongement à la rupture, qui sont cruciales pour la conception et l'ingénierie des matériaux.

Il existe plusieurs types d'éprouvettes de traction, chacun conçu pour répondre à des normes spécifiques et pour tester différents matériaux. Les principaux types d'éprouvettes incluent les éprouvettes cylindriques et les éprouvettes plates. Les éprouvettes cylindriques, généralement utilisées pour les métaux et les alliages, sont faciles à fabriquer et à aligner pendant les essais. Les éprouvettes plates, en revanche, sont souvent utilisées pour les polymères et les composites en raison de leur capacité à représenter fidèlement les conditions de traitement et d'utilisation finales des matériaux.

Chaque type d'éprouvette est fabriqué selon des normes précises, comme les normes ASTM ou ISO, pour assurer la reproductibilité et la comparabilité des résultats. Le choix de l'éprouvette dépend du matériau testé, des propriétés à évaluer, et des conditions spécifiques de l'essai. En somme, les éprouvettes de traction uniaxiale jouent un rôle crucial dans l'évaluation des

performances des matériaux et dans le développement de nouveaux produits et technologies.

1.2.3.1 Éprouvette Cylindrique (ASTM A370)

Extrémité non filetée

Cette éprouvette est de forme cylindrique avec une section uniformément répartie sur toute la longueur de jauge, Ses dimensions sont spécifiées par la norme ASTM A370 et peuvent varier en fonction du matériau testé.[8]

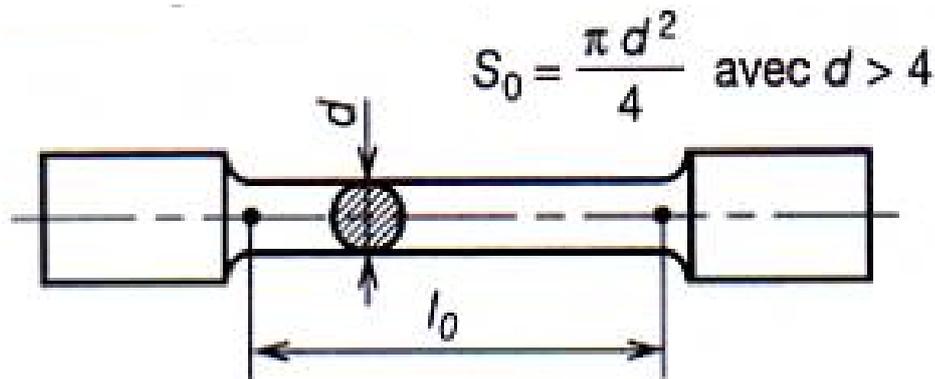


FIGURE 1.7 – Dimensions d'éprouvette Ronde standardisée

Une partie calibrée de longueur l_0 (mm) et de section S_0 (mm) est définie entre deux têtes d'amarrage. $l_0 = 5,65\sqrt{S_0}$

Extrémité filetée

Il s'agit d'un type d'échantillon dont les extrémités filetées peuvent être fixées à des pinces correspondantes d'appareils d'essai qui s'adaptent ses extrémités.[9]



FIGURE 1.8 – Éprouvette filetée

1.2.3.2 Barre de traction plate

Une barre de traction plate est une éprouvette rectangulaire généralement utilisée pour tester des tôles minces, l'éprouvette a fréquemment une épaisseur et une largeur homogènes, et la longueur de la section calibrée est souvent supérieure à celle d'une barre de traction ronde standard. Les éprouvettes de traction plates sont largement utilisées dans l'industrie aérospatiale pour tester les propriétés des composants en matière.[9]

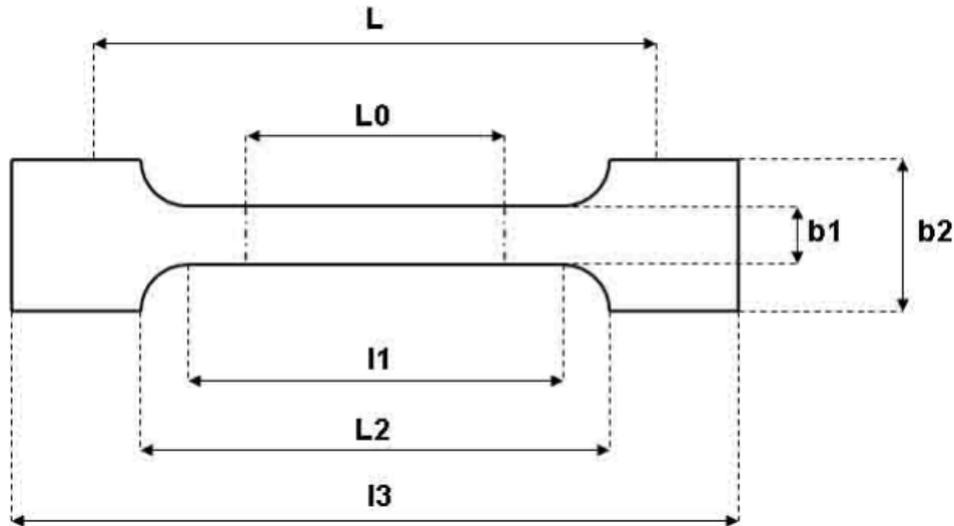


FIGURE 1.9 – Dimensions des éprouvettes pour essais de traction selon les normes [10]

- L_0 : Longueur de référence.
- L : Écartement entre outillages.
- l_1 : Longueur de la partie calibrée étroite
- L_2 : Écartement entre les parties parallèles larges
- l_3 : Longueur totale
- b_2 : Largeur dans la zone d'épaulement
- b_1 : Largeur dans la zone de la longueur de référence
- h : épaisseur de l'éprouvette

1.2.3.3 Éprouvette dogbone (ASTM D638)

Une éprouvette en forme de "dogbone" (ou os de chien) est un type de spécimen utilisé dans les essais de traction pour tester les propriétés mécaniques des matériaux, notamment les plastiques. L'ASTM D638 est une norme de l'American Society for Testing and Materials (ASTM) qui spécifie les méthodes d'essai pour la détermination des propriétés de traction des plastiques. L'éprouvette présente une section centrale réduite, ressemblant à un os de chien, permettant de concentrer les contraintes dans cette zone, assurant ainsi que la rupture se produit dans la section réduite et non aux extrémités ou aux points de fixation. Les dimensions exactes de l'éprouvette sont spécifiées par la norme ASTM D638 et varient selon le type de matériau et l'épaisseur de l'échantillon, avec plusieurs types décrits (Type I à Type V) ayant des dimensions spécifiques pour la longueur, la largeur et l'épaisseur. Principalement utilisée pour les plastiques, cette éprouvette peut également servir pour d'autres matériaux non métalliques.[11]

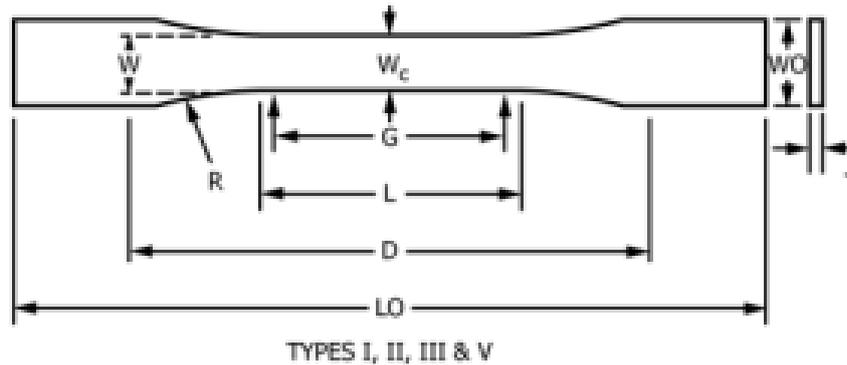


FIGURE 1.10 – Dimensions d'éprouvette dogbone standardisée

1.2.4 Exploitation des résultats d'essai d'une traction uniaxiale

L'obtention d'un diagramme contrainte-déformation implique une préparation minutieuse d'une éprouvette matériau à une taille et une forme standardisées, conformément aux normes d'essais applicables. L'éprouvette est ensuite soumise à une charge progressivement croissante à l'aide d'une machine d'essai telle qu'une machine d'essai universelle.[12]

Tout en appliquant la charge, la machine mesure la déformation résultante de l'échantillon et enregistre les données de charge et de déformation correspondantes. Ces données sont représentées sur l'axe vertical par la contrainte (la force par unité de surface) et sur l'axe horizontal par la déformation (déformation par unité de longueur).[12]

Il est essentiel de préparer et de manipuler correctement les éprouvettes tout au long du processus d'essai si l'on veut obtenir des résultats précis et fiables. Pour éviter les sources d'erreur potentielles, les facteurs tels que la géométrie de l'éprouvette ainsi que l'état de surface et la vitesse de chargement doivent être soigneusement contrôlés. En outre, il est crucial de garantir la répétabilité des résultats et de tenir compte de toute variabilité inhérente aux propriétés des matériaux.[12]

Les diagrammes contrainte-déformation des matériaux présentent une variabilité significative, et les résultats des tests de traction réalisés sur un même matériau peuvent différer en fonction de la température et de la vitesse de chargement dans l'éprouvette.

Néanmoins, ils peuvent être utilisés pour distinguer les matériaux en deux catégories générales : les matériaux ductiles et cassants.[13]

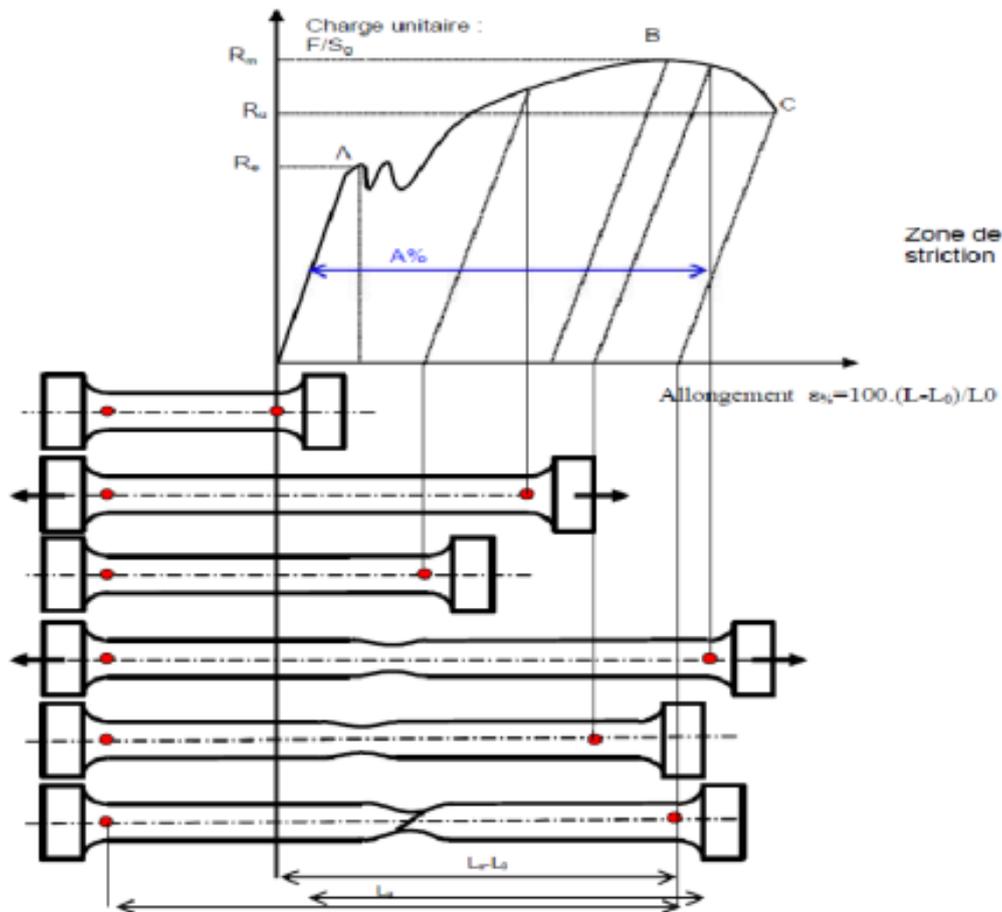


FIGURE 1.11 – Diagramme effort-déformation de la traction simple [14]

Interprétation : [14]

Sur un diagramme effort-déformation (Figure 2.12) , on observe pour les matériaux métalliques par exemple les phases successives suivantes :

Zone OA : domaine des déformations élastiques ou réversibles (zone parfois linéaire) si l'on cesse la charge, l'éprouvette retrouve ses dimensions initiales.

Zone AB : la déformation n'est plus complètement réversible. La déformation est plastique (ou permanente) homogène, appelée aussi déformation plastique répartie. Les allongements croissent plus vite que les charges. L'allongement a lieu avec une diminution régulière de la section tout au long de l'éprouvette.

Zone BC : la déformation plastique se localise dans une petite portion de l'éprouvette et n'est plus homogène, c'est la striction (on aboutit à la rupture en C). Les allongements croissent avec une diminution de la charge.

1.3 Les essais de traction bi-axiale

1.3.1 Introduction

Les essais de traction biaxiale impliquent l'application de contraintes dans deux directions perpendiculaires sur une même éprouvette, ce qui nécessite l'utilisation d'éprouvettes cruciformes (Figure 1.12). Pour obtenir des états de contrainte uniformes dans l'éprouvette, des forces de traction doivent être appliquées suivant deux sens opposés deux à deux. Plusieurs systèmes mécaniques sont utilisés pour cela, et il existe de nombreuses machines capables de réaliser des essais de traction biaxiale, chacune ayant ses avantages et inconvénients selon sa conception.

Le dispositif le plus simple conceptuellement est un système à 4 vérins ou actionneurs, comme celui développé à l'Université de Bruxelles Lecompte (Figure 1.13)[15]. Ce dispositif utilise un système de chargement hydraulique avec une capacité de 100 kN. Le champ de déformation de l'éprouvette est déterminé par corrélation d'images numériques. La figure 1.14 montre le dispositif utilisé à l'Université de Tokyo Kuwabara[16]. Ce dispositif intègre un système de type pantographe reliant les mors opposés, assurant que les actionneurs aient des déplacements opposés deux à deux. Le suivi de la déformation est effectué par mesure optique.

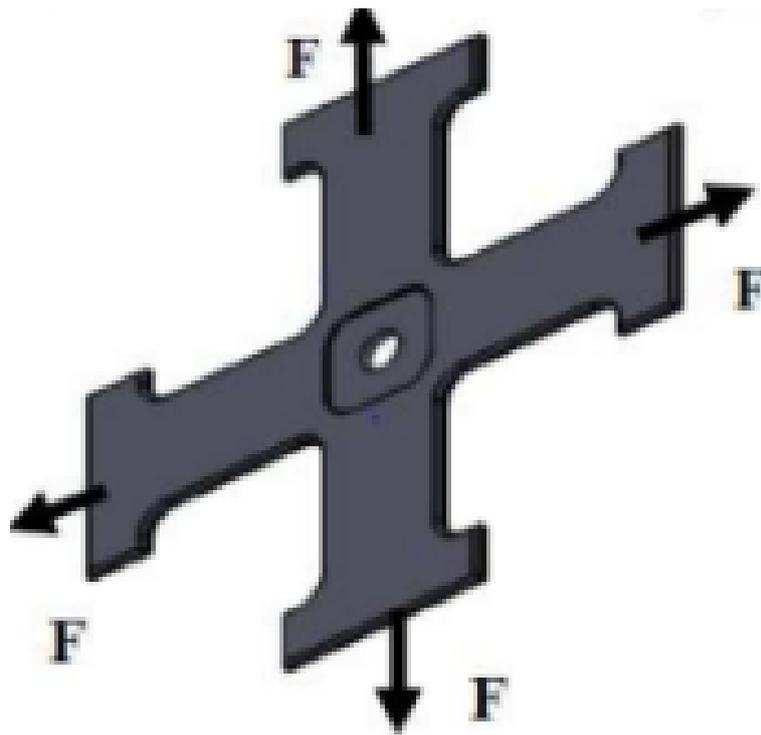


FIGURE 1.12 – Éprouvette cruciforme
[14]

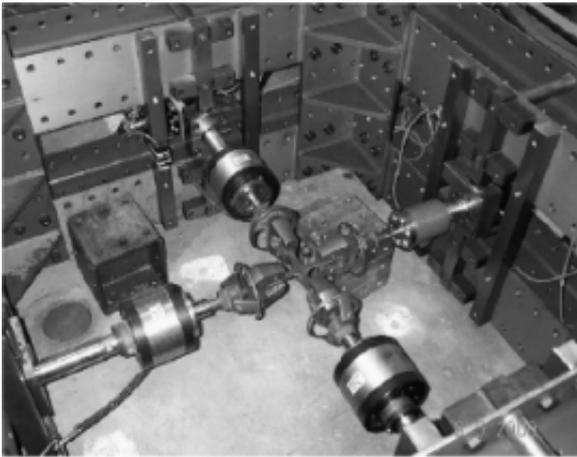


FIGURE 1.13 – Dispositif d'essais biaxiaux Lecomte

[15]

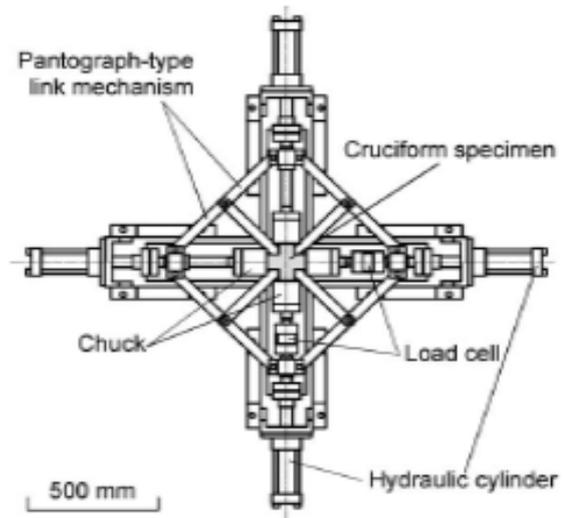


FIGURE 1.14 – Dispositif d'essais biaxiaux Kuwabara

[16]

1.3.2 État d'art des machines de traction biaxiaux

Les machines de traction biaxiale représentent une avancée significative dans le domaine des essais de matériaux et de structures, offrant des capacités de test plus complètes. Dans l'état de l'art actuel, ces machines se distinguent par plusieurs caractéristiques clés.

Les progrès technologiques ont permis le développement de différentes configurations, y compris les systèmes hydrauliques, électromécaniques et servo-hydrauliques. Ces variations offrent une gamme de choix aux chercheurs et aux ingénieurs, en fonction des besoins spécifiques des applications. En termes de capacité de charge, les machines modernes sont capables d'appliquer des forces considérables dans deux directions orthogonales, allant de charges relativement faibles à des forces extrêmement élevées, avec une précision impressionnante. Un aspect crucial de l'état de l'art est la sophistication des systèmes de contrôle et de mesure intégrés. Ces systèmes permettent une manipulation précise des charges, ainsi qu'une collecte de données en temps réel sur le comportement des matériaux. Grâce à des algorithmes avancés et à des logiciels spécialisés, les opérateurs peuvent programmer des essais complexes et analyser les résultats de manière approfondie.

Les machines de traction biaxiale se distinguent par leur flexibilité d'essai. Elles sont équipées de dispositifs de fixation et d'adaptateurs multiples, ce qui permet de tester une variété de matériaux et de structures dans des conditions représentatives de leur utilisation réelle. Cette polyvalence en fait des outils indispensables dans de nombreux domaines, de l'aérospatiale à l'industrie automobile en passant par le génie civil. La sécurité et la fiabilité sont également des préoccupations majeures dans l'état de l'art. Les fabricants intègrent des dispositifs de sécurité sophistiqués pour protéger les opérateurs et les équipements contre les accidents potentiels, tout en garantissant une fiabilité opérationnelle maximale.

L'innovation continue est une caractéristique essentielle de l'état de l'art des machines de traction biaxiale. Les fabricants s'efforcent constamment d'améliorer les performances, la précision et la convivialité de leurs produits, en utilisant les dernières avancées technologiques pour répondre aux besoins changeants des industries qu'ils desservent.

1.3.3 Les catégories des machines d'essai biaxiale

Les machines d'essai biaxiales en plan peuvent être classées en trois catégories : (i) les machines avec un actionneur, (ii) les machines avec deux actionneurs, et (iii) les machines avec quatre actionneurs.

Les machines avec un actionneur sont développées de manière à ce qu'une charge unique entraîne un état de contrainte biaxial dans l'éprouvette cruciforme. Ce type de machine nécessite un dispositif très spécifique. Bhatnagar et al.[17] ont développé un dispositif d'essai biaxial utilisant un actionneur unique pour les matériaux polymères. La configuration mécanique de la machine permet à une seule cellule de charge d'introduire différents ratios de test biaxial afin de générer toute combinaison dans l'espace de contrainte $\sigma_1 - \sigma_2$. L'objectif de l'utilisation d'un actionneur unique est de réduire les coûts par rapport aux machines à actionneurs multiples. Une validation expérimentale a été réalisée en utilisant la machine sur un polyamide à fibres courtes et des composites thermoplastiques renforcés de nanoparticules de PP.[17]

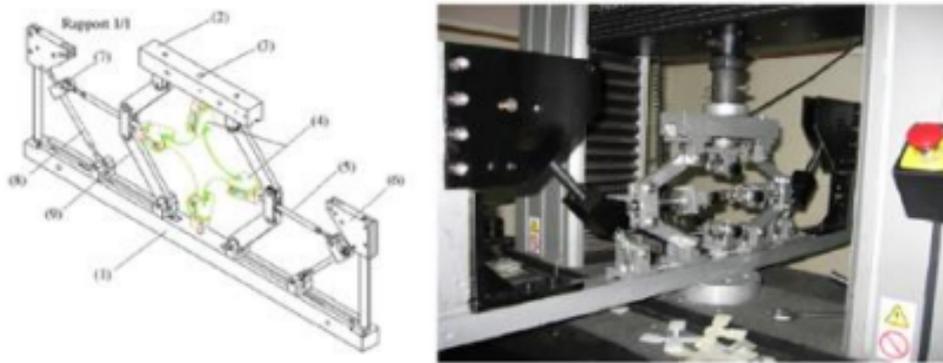


FIGURE 1.15 – Machines d'essai biaxiales avec un actionneur développées par Bhatnagar [17]

La machine avec deux actionneurs a été développée en introduisant un autre actionneur de charge perpendiculaire à celui d'un banc d'essai uniaxial. Le développement de cette machine visait à faire varier le rapport de contrainte biaxiale sans avoir besoin d'un équipement spécial. L'état de contrainte biaxiale était généré en fixant un côté des bras perpendiculaires et en effectuant la traction de l'autre côté. Cependant, le problème de ce type de machine était la flexion de l'éprouvette, ce qui produisait un état de contrainte indésirable. En 2000, Hoferlin et al.[18] ont fabriqué une machine d'essai biaxiale à partir d'une machine uniaxiale (Figure 1.16-a) avec une capacité de 250 kN en ajoutant un actionneur hydraulique amovible ayant une capacité de 25 kN. La machine a été testée sur une éprouvette cruciforme en acier. De plus, Lin et Ding [19] ont également ajouté un actionneur manuel à une machine uniaxiale Instron afin d'étudier la plastification des métaux en aluminium sous essai biaxial. Lin et Ding ont mentionné dans leur étude que la flexion de l'éprouvette peut être compensée verticalement à l'aide des ressorts montrés à la Figure 1.16-b, tandis que le mouvement horizontal n'est pas compensé.

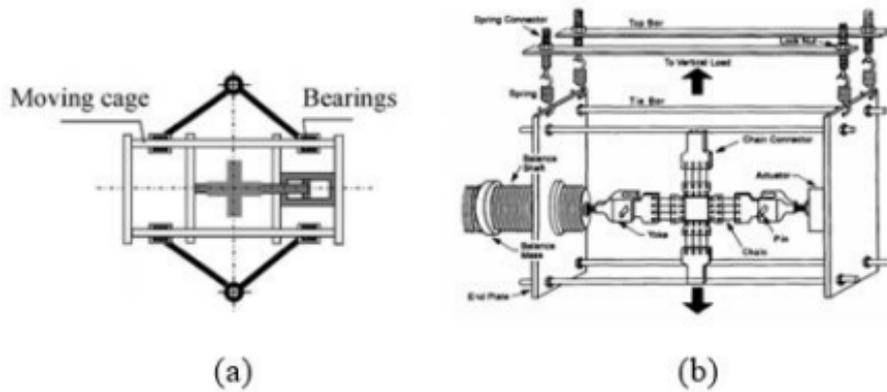


FIGURE 1.16 – Machines d’essai biaxiales avec deux actionneurs développées par : (a) Hoferlin [15] et (b) Lin [16]

Pour améliorer la fiabilité des tests (éviter les problèmes de flexion), une machine d’essai biaxiale avec quatre actionneurs hydrauliques a été construite. Ces machines contiennent généralement un système de contrôle en boucle fermée pour équilibrer les charges dans les quatre bras et ajuster l’échantillon au centre pendant le test. Deux types de cadres de machine ont été cités dans la littérature : les machines avec des cadres horizontaux et les machines avec des cadres verticaux. Makinde et al. [20] ont construit une machine d’essai biaxiale avec un cadre horizontal. Pour assurer une rigidité maximale du cadre proposé, une dalle en acier en forme de croix de 152 mm d’épaisseur a été soudée à une structure en poutre en I. Le bénéfice de l’utilisation d’une machine avec un cadre vertical est la facilité d’inspection des deux côtés de l’échantillon. La plupart des chercheurs ont utilisé des machines avec un cadre horizontal. Green et al. [21] ont utilisé la machine développée par Makinde (Figure 1.17) pour la caractérisation de l’alliage d’aluminium AA1145, la capacité de la machine est de 250 kN dans chaque bras de charge. Gower et Shaw [22] ont utilisé une machine d’essai biaxiale avec une capacité de 50 kN pour la caractérisation de laminés en plastique renforcé de fibre de carbone sous charge traction/traction. Certains chercheurs ont utilisé la machine d’essai triaxiale pour les tests de caractérisation biaxiale. La machine d’essai triaxiale (utilisée par Welsh et al. [23]–[24]), comme le montre la Figure 1.18, a une capacité de 94 kN dans chaque bras de charge, elle peut générer toute combinaison de tensions ou de compressions dans l’espace de contrainte $\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3$. Une autre machine d’essai triaxiale a été développée par une collaboration entre Schenk et LMT Cachan en France, la machine est composée de six actionneurs hydrauliques où la capacité de la machine dans le plan est de 100 kN (traction ou compression) tandis que la charge hors plan peut atteindre 250 kN [25].



FIGURE 1.17 – Machines d’essai biaxiales avec quatre actionneurs développées par : (a) Makinde/Green [18] et (b) Gower [19]

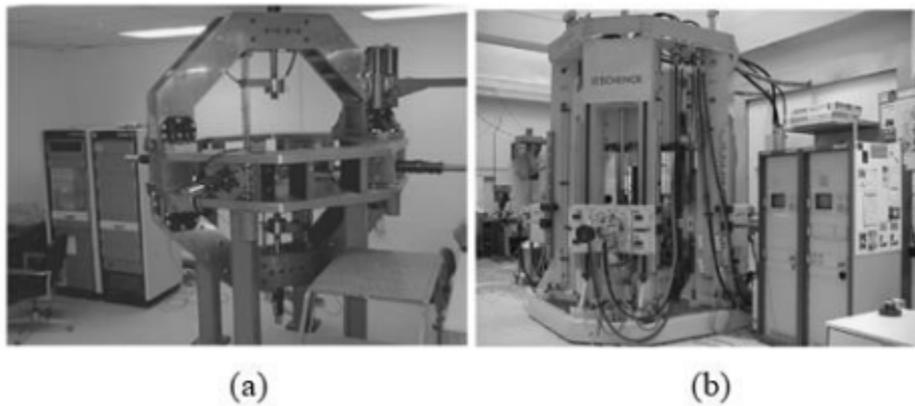


FIGURE 1.18 – Les machines d’essai triaxial développées par : (a) Welsh [20] et (b) ASTREE [22]

1.3.4 Principe de l’essai de traction biaxiale

L’essai de traction biaxial consiste à appliquer des forces de traction simultanément dans deux directions perpendiculaires sur un échantillon de matériau. Contrairement à l’essai de traction uniaxial, où la contrainte est appliquée dans une seule direction, l’essai biaxial permet d’étudier les interactions entre les contraintes dans deux directions différentes.

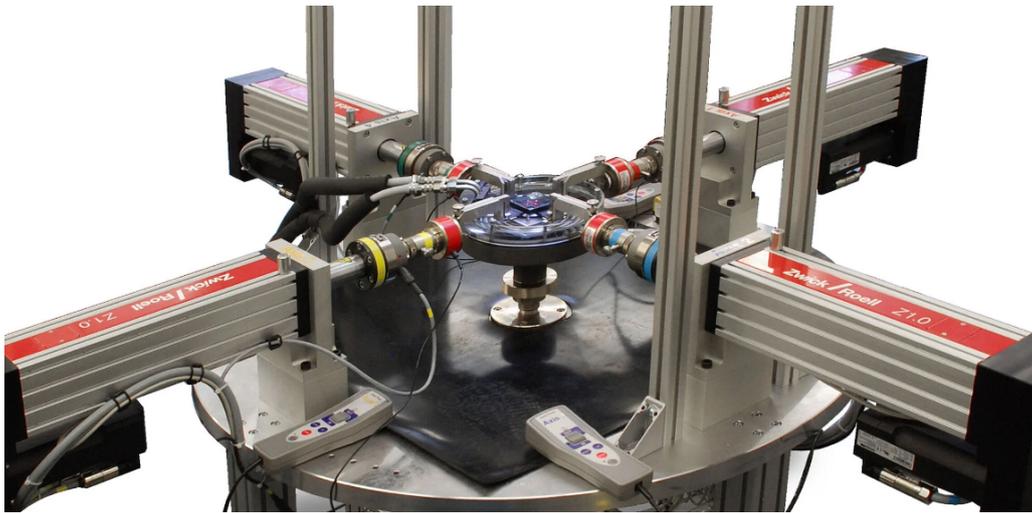


FIGURE 1.19 – Machine d’essai de traction biaxiale
[26]

1.3.5 Machine de traction bi-axiale

Une machine d’essai de traction bi-axiale, souvent appelée machine d’essai cruciforme, est un équipement de test mécanique utilisé pour évaluer les propriétés des matériaux sous des charges appliquées dans deux directions perpendiculaires. Contrairement aux essais de traction uniaxiaux traditionnels, cette méthode permet d’appliquer des forces de traction simultanément dans deux directions différentes, simulant ainsi des conditions de charge plus réalistes pour certaines applications industrielles.

La machine est équipée de quatre mors, pouvant être configurés pour s’adapter à différentes géométries d’échantillons. Chaque mors est relié à un actionneur contrôlé par un système de commande numérique, permettant un mouvement précis et indépendant dans chaque direction. Pour surveiller la déformation et la contrainte dans l’échantillon, la machine est également équipée de divers capteurs et jauges, notamment des extensomètres, des jauges de déformation, des caméras et des capteurs de force. Ces instruments fournissent des données en temps réel, permettant une analyse détaillée du comportement du matériau sous charge bi-axiale.

Les essais de traction bi-axiale sont cruciaux pour les matériaux utilisés dans des applications où des forces multiaxiales sont courantes, telles que dans l’aérospatial, l’automobile, et la biomécanique. Par exemple, les composants des avions, comme les ailes et les fuselages, subissent souvent des charges dans plusieurs directions. De même, les carrosseries et airbags automobiles doivent résister à des contraintes provenant de différentes directions, et les implants médicaux ainsi que les prothèses doivent être testés pour des charges multiaxiales afin de garantir leur performance et leur durabilité dans le corps humain.

Pour garantir des résultats fiables et reproductibles, il est essentiel de suivre des normes établies. Les normes ASTM E1012 et ISO 16842 fournissent des directives complètes pour la réalisation des essais de traction bi-axiale et l’interprétation des résultats. Les étapes clés incluent l’étalonnage régulier des machines pour assurer la précision des mesures, le contrôle strict des conditions d’essai telles que la température et la vitesse de déformation, et la préparation minutieuse des échantillons selon des spécifications précises. L’analyse des données recueillies doit utiliser des méthodes statistiques appropriées pour garantir la validité des résultats.

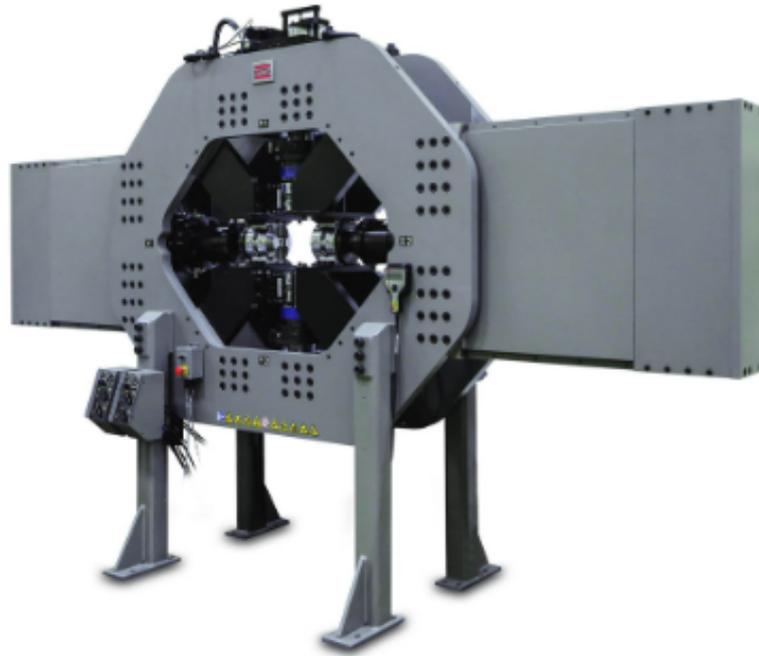


FIGURE 1.20 – Système intégré d’essais bi-axial planaire de grande capacité [27]

1.3.6 Éprouvette de traction bi-axiale

Une éprouvette de traction bi-axiale est un type spécifique d’éprouvette utilisé pour tester les propriétés mécaniques d’un matériau lorsqu’il est soumis à des forces de traction dans deux directions perpendiculaires. Ces tests sont cruciaux pour comprendre le comportement des matériaux sous des conditions de charge complexes, ce qui est essentiel pour des applications où les matériaux subissent des contraintes multiaxiales, comme dans les structures aéronautiques, les coques de navire, les structures de ponts, et diverses pièces industrielles.

1.3.7 Forme de l’éprouvette cruciforme

Les essais sur des échantillons cruciformes chargés biaxialement représentent une approche plus directe pour obtenir de véritables états de contrainte biaxiale et, par conséquent, cette méthode a largement été acceptée. Comme le suggèrent de nombreux chercheurs dans le domaine, un échantillon cruciforme idéal doit accomplir les caractéristiques suivantes : i) il doit être capable de générer un champ de contrainte/déformation biaxiale suffisamment large et homogène dans la zone de mesure, ii) la rupture doit se produire dans la zone de mesure prédéfinie, iii) le cruciforme doit accepter des ratios de charge biaxiale arbitraires pour générer une enveloppe de rupture complète (dans une plage souhaitée), iv) les couches testées et les couches de renforcement doivent être du même matériau, v) la transition entre la zone de mesure et les régions renforcées doit être suffisamment graduelle pour éviter des concentrations de contraintes indésirables, vi) le rayon de congé du cruciforme doit être aussi petit que possible afin de réduire les effets de couplage des contraintes, et vii) les mesures de contrainte dans la zone de test doivent être comparables aux valeurs nominales obtenues en divisant chaque charge appliquée par sa surface transversale correspondante. Bien que diverses géométries de cruciformes contenant une zone de mesure amincie au centre aient été proposées dans la littérature, aucune ne peut prétendre satisfaire pleinement les exigences ci-dessus en raison des difficultés inhérentes

aux essais biaxiaux. Un cruciforme avec une région centrale amincie et une série de bras séparés par des fentes est présenté à la Figure 1.21-a.

La configuration fendue permet de plus grandes déformations dans la section amincie, imposant ainsi la rupture à cet endroit. Néanmoins, le changement d'épaisseur peut induire des concentrations de contraintes indésirables qui conduisent généralement à une rupture prématurée en dehors de la zone de mesure. De plus, l'usinage intensif nécessaire pour l'amincissement est une caractéristique indésirable.

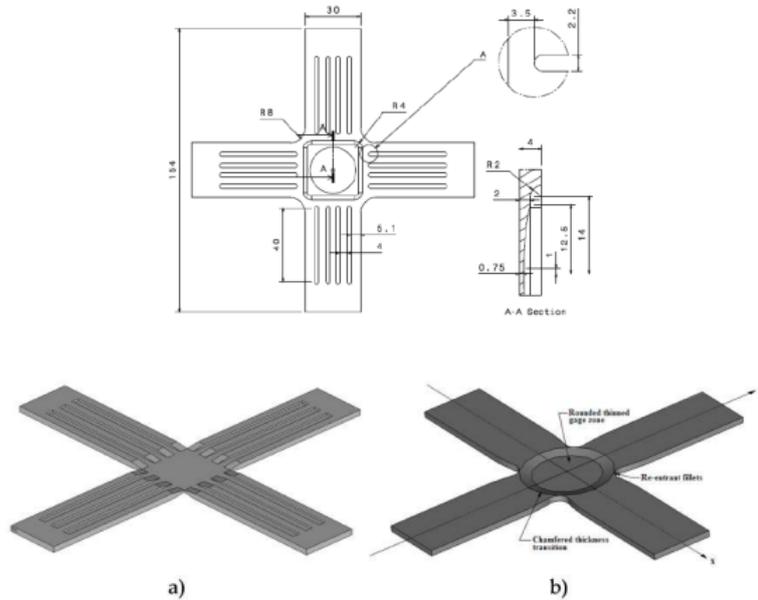


FIGURE 1.21 – Éprouvette cruciforme [28]

1.3.8 Quelques types des éprouvettes cruciformes

Les différents types d'éprouvettes cruciformes fréquemment utilisés sont présentés ci-dessous

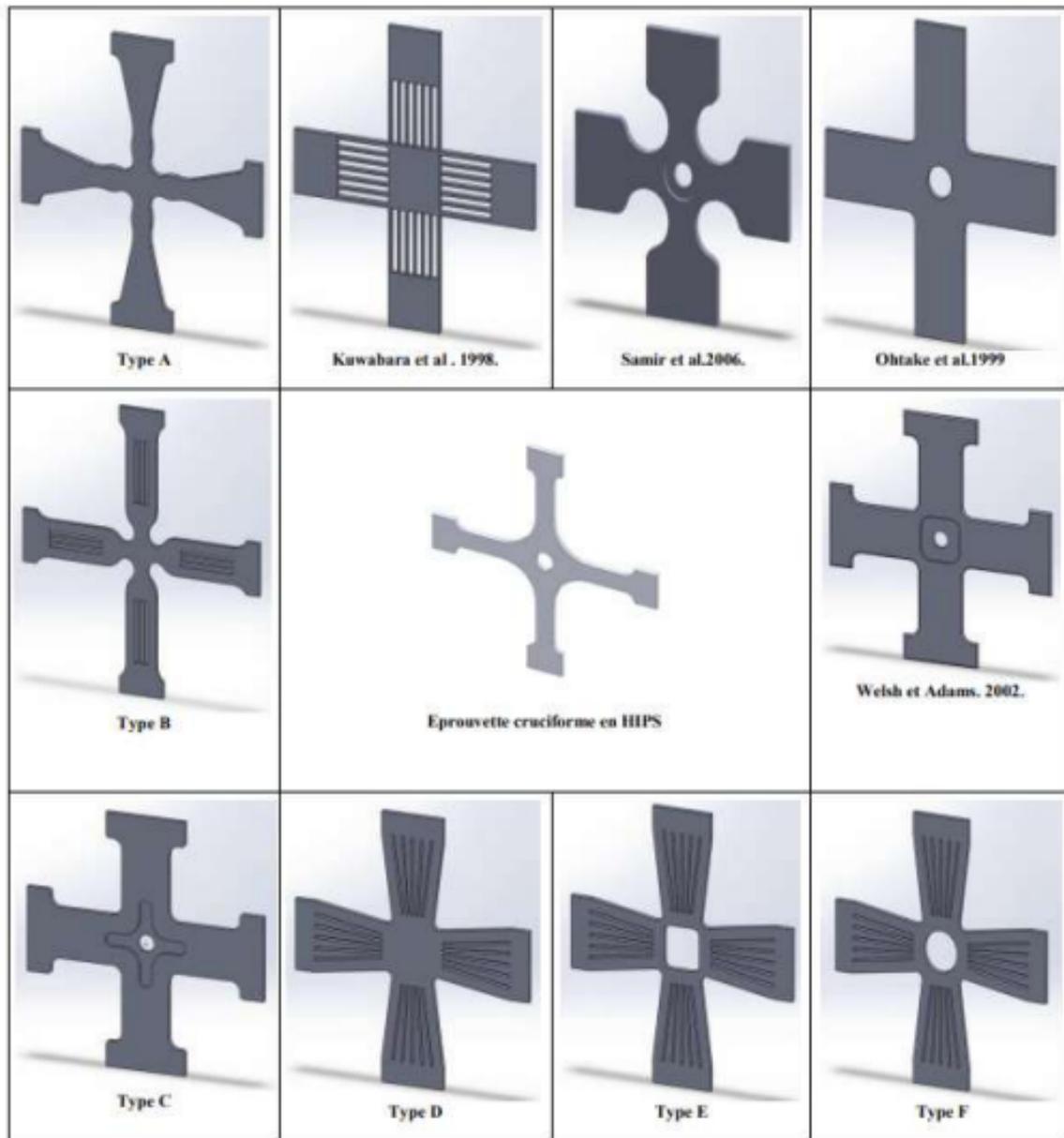


FIGURE 1.22 – Formes des éprouvettes fréquemment utilisées dans le champ de recherche [29]

Chapitre 2

Description de la machine de traction bi-axiale existante

2.1 Introduction

Le travail présenté dans ce chapitre repose sur l'étude et l'amélioration d'une machine de traction biaxiale initialement conçue par Saadouni[30] en premier et réalisée par GHADDAB et GUENDOZ dans le cadre de leur Projet de Fin d'Études (PFE)[31]. La machine de traction biaxiale est un outil essentiel pour l'évaluation des propriétés mécaniques des matériaux soumis à des contraintes multidirectionnelles. Comprendre ces propriétés est crucial pour diverses applications industrielles, allant de l'aérospatiale à l'ingénierie civile.

Le chapitre s'ouvre par une présentation détaillée de la machine de traction biaxiale, y compris les modifications apportées à sa structure de base. Cela inclut le changement du bâti de la machine pour améliorer sa robustesse, sa précision et alléger son poids, ainsi que la fabrication d'une table pour optimiser son fonctionnement. Ces améliorations visent à répondre aux exigences croissantes des tests de traction multidirectionnelle, où la précision et la fiabilité des mesures sont primordiales.

Ensuite, le chapitre se concentre sur une étude approfondie de la micro-machine à traction biaxiale, explorant ses composants fonctionnels et leurs propriétés techniques. Cette évaluation technique est essentielle pour comprendre les performances globales de la machine et identifier les domaines nécessitant des améliorations. Les aspects tels que la précision des capteurs, la capacité de charge, la stabilité structurelle et la compatibilité avec divers matériaux de test sont analysés en détail.

2.2 Présentation de notre machine

Une machine de traction biaxiale est un dispositif utilisé pour tester les propriétés mécaniques des matériaux en appliquant des charges dans deux directions perpendiculaires simultanément. La machine représentée sur l'image semble être conçue pour appliquer ces charges biaxiales à l'aide de quatre moteurs, chacun monté sur un des bras d'une structure en forme de croix.

La base de la machine est une plaque rigide en forme de croix, qui offre une grande stabilité et permet de répartir uniformément les forces appliquées par les moteurs. Chaque moteur est

monté à chaque extrémité des bras. Ces moteurs sont des moteurs électriques, capables de fournir des forces précises et contrôlées.

Chaque moteur est relié à un système de guidage linéaire, des vis à billes, qui permettent de translater les forces générées par les moteurs vers le centre de la machine, où se trouve l'échantillon à tester. Au centre de la machine, là où les bras se rejoignent, se trouve le support pour l'échantillon. Ce support est conçu pour maintenir fermement l'échantillon tout en permettant l'application de forces biaxiales. Il comporte également des capteurs pour mesurer les forces appliquées.

La machine est équipée d'un système de contrôle sophistiqué, permettant de régler avec précision les forces appliquées par chaque moteur. Ce système inclut des logiciels pour définir des profils de charge, enregistrer des données et analyser les résultats des tests. La présence de manivelles indique qu'il peut y avoir des ajustements manuels nécessaires pour calibrer la machine ou pour installer et retirer les échantillons.

En fonctionnement, un échantillon de matériau est fixé au centre de la machine, au niveau du support d'échantillon. Les moteurs sont activés pour appliquer des forces dans deux directions perpendiculaires. Ces forces peuvent être contrôlées de manière indépendante pour simuler des conditions de charge réelles. Les capteurs mesurent les forces appliquées et les déformations de l'échantillon. Ces données sont enregistrées et peuvent être analysées pour déterminer les propriétés mécaniques du matériau. Les résultats des tests sont utilisés pour évaluer la résistance, la ductilité, la rigidité et d'autres propriétés mécaniques du matériau sous des charges biaxiales.

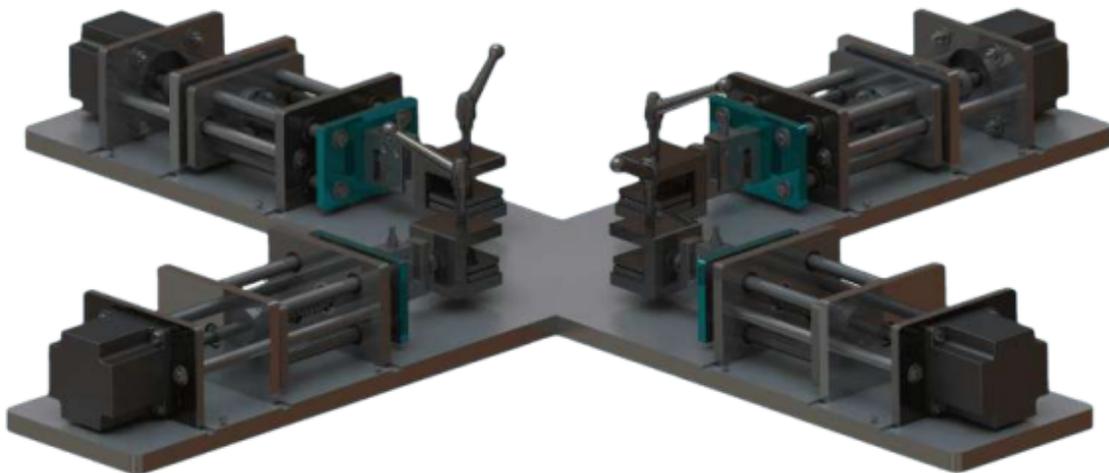


FIGURE 2.1 – Image de la machine de traction biaxiale avec l'ancien bâti

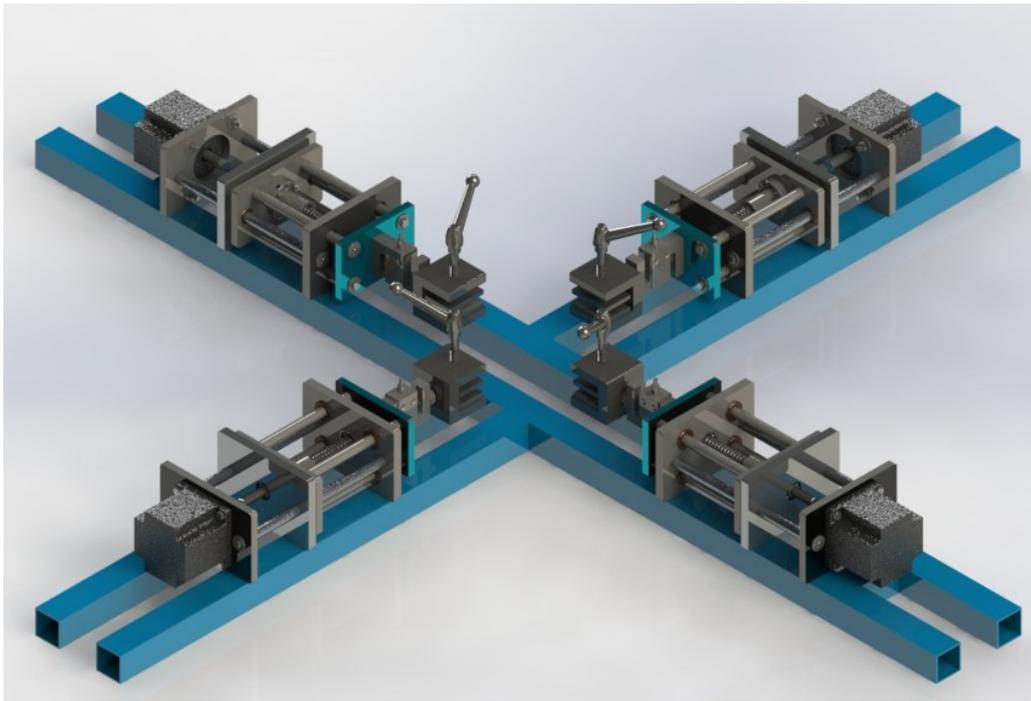


FIGURE 2.2 – Image de la machine de traction biaxiale avec le nouveau bâti

2.3 Présentation de système de traction

Le système de traction illustré utilise une vis à billes entraînée par un moteur pas à pas électrique pour convertir un mouvement rotatif en un mouvement linéaire précis. Le moteur électrique (pas à pas), fournit le mouvement rotatif, transmis à la vis à billes via un accouplement flexible qui compense les désalignements mineurs tout en maintenant une transmission efficace du couple. La rotation de la vis à billes entraîne le déplacement linéaire de la noix de vis à billes, ce qui est réalisé avec une friction minimale grâce aux billes roullantes, assurant ainsi une grande précision. La noix de vis à billes, fixée à l'élément mobile de l'assemblage roulements à billes et des axes de guidage, permet un mouvement fluide et précis.

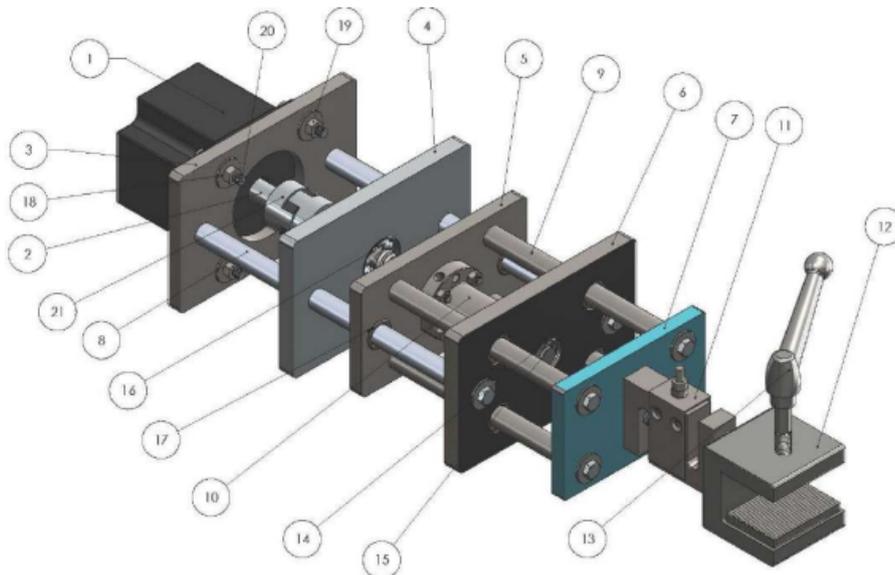


FIGURE 2.3 – Image descriptive des éléments de la machine

TABLE 2.1 – Les éléments constitutifs de la machine

Numérotation	composant	Quantité	Disponibilité du composant
1	Moteur pas à pas	4	Achetées
2	Arbre du moteur	4	intégrés avec le moteur
3	Plaques fixation du moteur	4	Usinées
4	Plaques de guidage	4	Usinées
5	Plaques de fixation d'écrous à billes	4	Usinées
6	Plaque à roulement	4	Usinées
7	Plaque fixation du capteur de force	4	Usinées
8	Tige de guidage	8	Usinées
9	Tige de traction	4	Usinées
10	Écrous à billes	4	Achetées
11	Capteurs de force	4	Achetées
12	mors	4	Usinées
13	Vis de pression	4	Usinées
14	Circlips	8	Achetées
15	Vis à billes	4	Achetées et Usinée
16	Roulements à billes	8	Achetés
17	Bagues en bronze	24	Usinées
18	Rondelles	68	Achetés
19	Écrous	40	Achetés
20	Boulons	68	Achetés
21	Accouplements	4	Usinés

2.4 Les modifications apportées sur la machine

2.4.1 Le bâti

Après une révision exhaustive de la conception précédente, plusieurs modifications ont été apportées pour répondre aux exigences spécifiques. En particulier, nous avons remplacé le bâti existant de la machine par une nouvelle structure en aluminium. Ce choix de matériau permet de réduire significativement le poids de la machine, facilitant ainsi son transport et sa manipulation.

Le nouveau bâti est conçu sous forme de squelettes d'aluminium avec des tubes carrés, ce qui non seulement contribue à la légèreté de l'ensemble, mais aussi sa flexibilité. De plus, cette structure est entièrement détachable, ce qui permet de démonter facilement la machine et de la déplacer d'un endroit à un autre selon les besoins opérationnels.

La conception optimisée en aluminium détachable garantit ainsi que la machine peut être transportée et réassemblée sans compromettre son intégrité structurelle ou son efficacité.

TABLE 2.2 – Les dimensions du tube carré

Dimensions	Valeur
Dimensions (côté x côté)	40 mm x 40 mm
Épaisseur de paroi	2 mm
Longueur totale	6 m
Alliage	aluminium 6063-T6
Poids de l'ancien bâti	102 Kg
Poids du nouveau bâti	5 Kg

TABLE 2.3 – Gamme de fabrication de Bâti

N° de phase	Désignation des Phases	Machine	Outil
1	Surfaçage	Fraiseuse à 3 axes	20mm CRB 4FL HGN
2	Perçage	Perceuse	Forêts

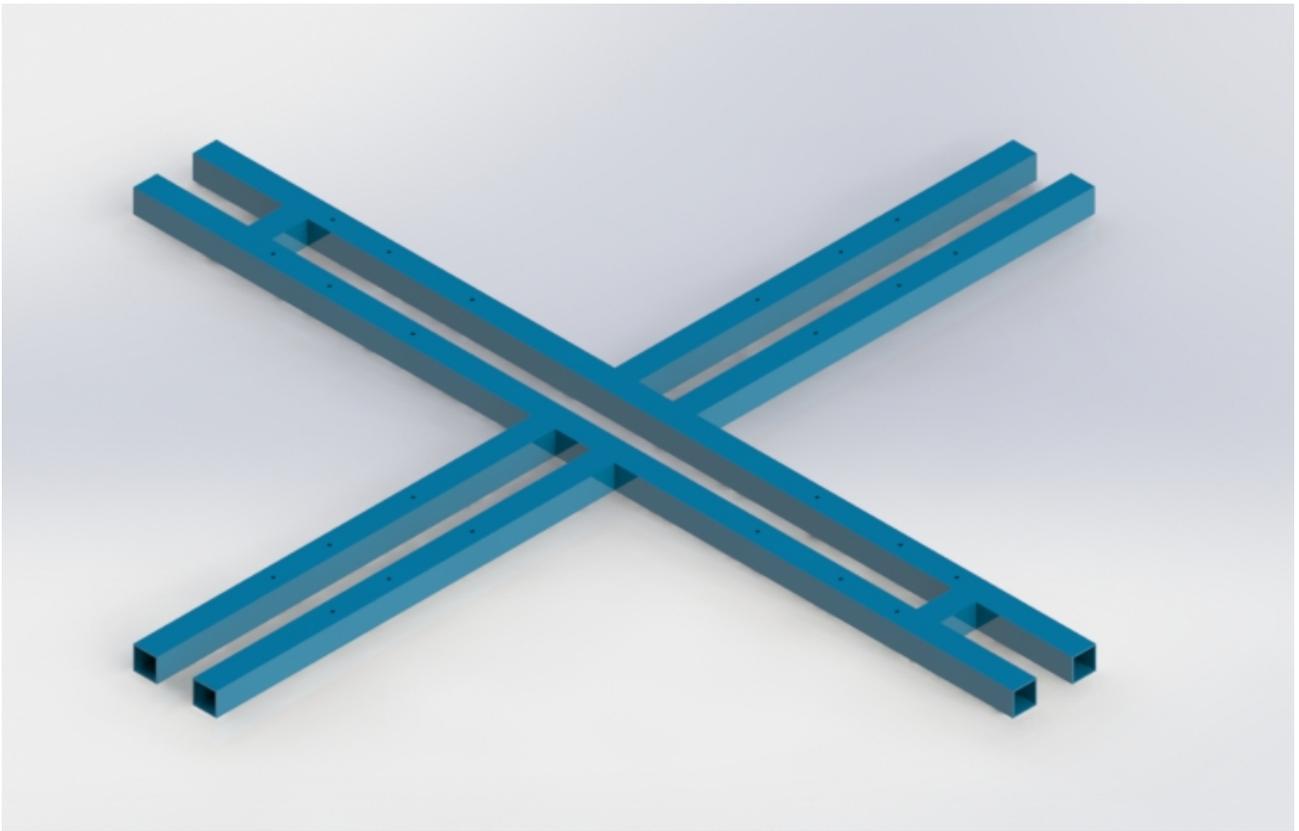


FIGURE 2.4 – Image de la conception du nouveau bâti



FIGURE 2.5 – Image réelle du nouveau bâti

2.4.2 La table

Pour optimiser le fonctionnement de la machine de traction biaxiale, nous avons fabriqué une table robuste et fonctionnelle. Cette table est construite avec des matériaux à haute résistance, comme de l'acier et de l'acier galvanisé, pour assurer une stabilité maximale et minimiser les vibrations pendant les tests. La surface de la table est parfaitement plane et nivelée pour garantir l'alignement correct des systèmes de guidage linéaire.



FIGURE 2.6 – Image de la conception de la Table

2.4.2.1 Procédures de la fabrication mécanique des composants de la table

1. Choix des matériaux pour les composants

Lors de la sélection des matériaux pour la fabrication des pièces de la table, nous avons opté pour l'acier S235 et l'acier galvanisé disponibles dans le département mécanique.

L'acier S235 se distingue par ses excellentes performances, sa grande résistance et sa ténacité, garantissant une durabilité et une fiabilité accrues. Quant à l'acier galvanisé, il offre une résistance à la corrosion, une solidité et une robustesse exceptionnelles, ce qui apporte une stabilité et une durabilité supplémentaires.

Nous avons utilisé l'acier galvanisé pour les pieds de la table. Ces pieds sont cylindriques, robustes et bien fixés au plateau, offrant ainsi une bonne stabilité à l'ensemble de la table. Pour les renforts et traverses, nous avons utilisé deux tubes en acier galvanisé, similaires à ceux des pieds, et deux tubes rectangulaires en acier S235. Sous le plateau, des renforts en tubes rectangulaires en acier S235 assurent une rigidité supplémentaire et préviennent les mouvements latéraux.

2. Fabrication de la table

Les pieds de la table

Nous avons fabriqué les pieds de notre table en utilisant un tube rond en acier galvanisé. Le tube a un diamètre extérieur de 50 mm , une épaisseur de 2,5 mm et une longueur initiale de 4 mètres. Nous avons mesuré et marqué le tube en quatre sections égales de 90 cm chacune. Utilisant une tronçonneuse a table TV300 , nous avons soigneusement découpé le tube aux marques, obtenant ainsi quatre pièces de 90 cm de long. Après la découpe, nous avons utilisé une meuleuse d'angle avec un disque abrasif pour surfacer les extrémités de chaque pièce, ce qui a permis de lisser les bords et d'assurer une finition uniforme et sécuritaire. Enfin, nous avons vérifié chaque pied pour nous assurer qu'il était parfaitement droit et que les extrémités étaient bien surfacées, prêtes pour l'assemblage de la table.



FIGURE 2.7 – Image de la conception du pied de la table

Les traverses

Nous avons fabriqué les traverses de notre table en utilisant un tube rond en acier galvanisé et un tube rectangulaire. Le tube rond en acier galvanisé avait un diamètre de 50 mm, une épaisseur de 2,5 mm et une longueur initiale de 4 mètres. Le tube rectangulaire en acier avait une hauteur de 40 mm, une largeur de 27 mm, une épaisseur de 2 mm et une longueur initiale de 4 mètres. Le processus détaillé que nous avons suivi est comme suit :

Nous avons mesuré et marqué le tube rond en deux sections égales de 1196 mm et le tube rectangulaire aussi en deux sections de 1154 mm. En utilisant une tronçonneuse, nous avons soigneusement découpé les tubes selon les marques. Après la découpe, nous avons utilisé une meuleuse d'angle avec un disque abrasif pour surfacer les extrémités de chaque pièce, ce qui a permis de lisser les bords et d'assurer une finition uniforme et sécuritaire. Nous avons également arrondi les extrémités des traverses pour qu'elles s'emboîtent correctement avec les pieds de la table. Enfin, nous avons vérifié chaque traverse pour nous assurer qu'elle était parfaitement droite et que les extrémités étaient bien surfacées et arrondies, prêtes pour l'assemblage de la table.

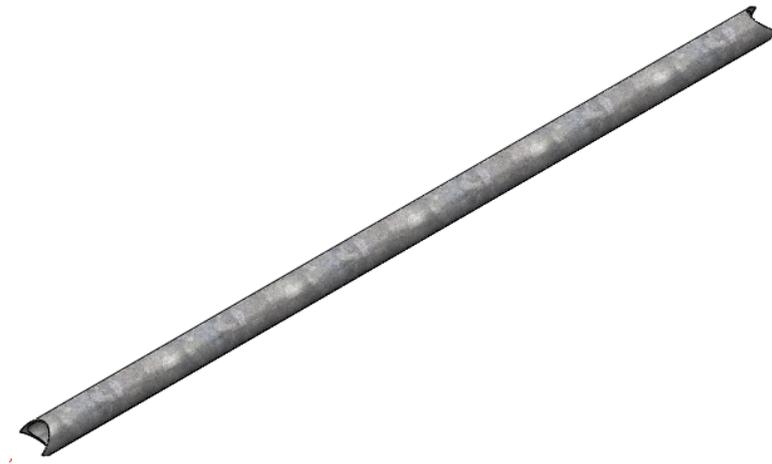


FIGURE 2.8 – Image de la conception de la traverse en acier galvanisé

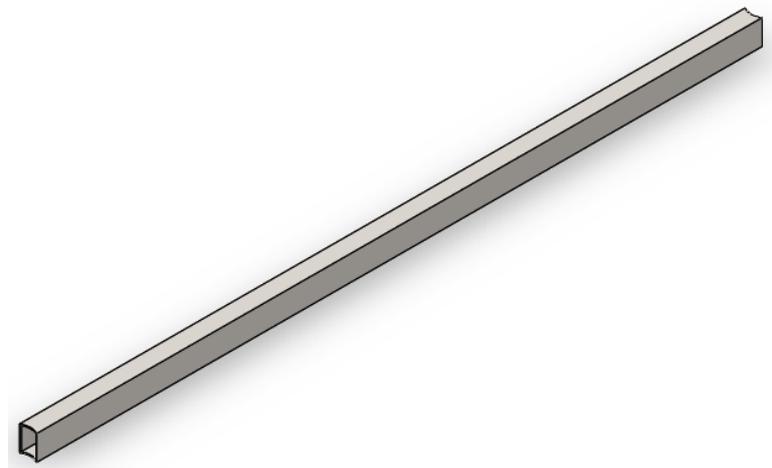


FIGURE 2.9 – Image de la conception de la traverse en acier S235

Les renforts

Pour fabriquer les renforts de la table, nous avons utilisé un tube rectangulaire en acier d'une hauteur de 40 mm, d'une largeur de 27 mm, d'une épaisseur de 2 mm et d'une longueur initiale de 4 mètres. Nous avons commencé par mesurer et marquer le tube selon les dimensions requises pour les renforts, puis nous avons découpé deux pièces égales de 1220 mm et deux pièces égales de 609,5 mm à l'aide d'une tronçonneuse. Après la découpe, chaque pièce a été inspectée pour vérifier les dimensions, puis surfacée à la meuleuse pour éliminer les bords rugueux et obtenir des surfaces lisses, prêtes pour l'assemblage. Les quatre pièces ont été disposées en forme de signe "+" et soudées ensemble pour créer une structure solide et stable. Une fois assemblé, le renfort en forme de "+" a été placé sous la tôle de la table pour fournir un renfort structurel supplémentaire, puis fixé en place à l'aide de soudures.

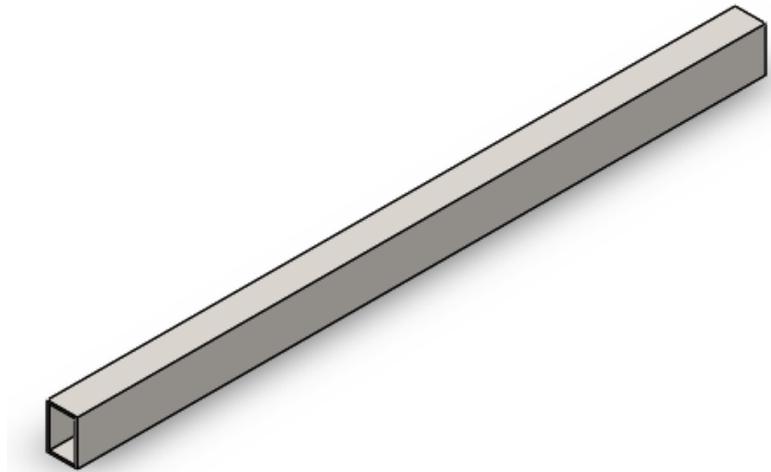


FIGURE 2.10 – Image de la conception du renfort

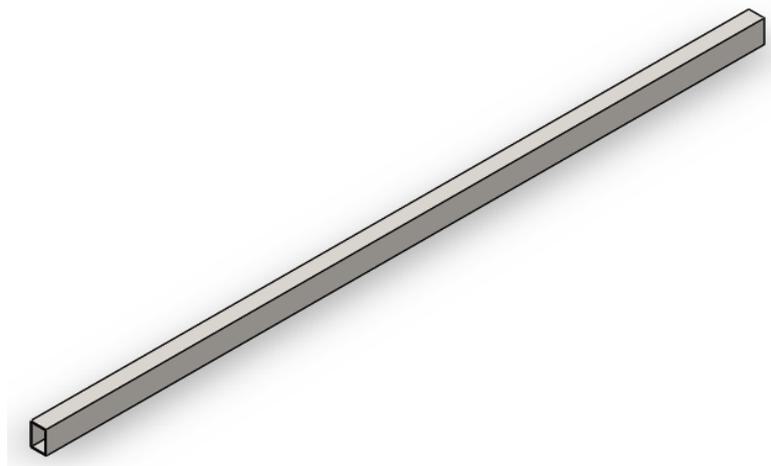


FIGURE 2.11 – Image de la conception du renfort

Le cadre de la table

Pour fabriquer le cadre de la table, nous avons utilisé un tube rectangulaire en acier qui a une hauteur de 40 mm, une largeur de 27 mm, une épaisseur de 2 mm . Nous avons commencé par mesurer et marquer les dimensions nécessaires, puis nous avons découpé le tube en quatre pièces de 1300 mm à l'aide d'une tronçonneuse. Pour garantir un assemblage précis, les extrémités des pièces ont été coupées à un angle de 45 degrés. Ensuite, nous avons surfacé tous les côtés des pièces découpées avec une meuleuse pour obtenir des surfaces lisses et planes, prêtes pour la soudure. Après cela, nous avons assemblé les pièces en formant un cadre rectangulaire et les avons soudées aux coins, en veillant à ce que les angles soient droits et les soudures solides. Pour finir, nous avons poncé légèrement les zones soudées pour enlever les éclats et obtenir une finition lisse.



FIGURE 2.12 – Image de la conception du tube utilisé pour fabriquer le cadre de la table

Le plateau

Pour fabriquer le plateau de la table, nous avons utilisé une tôle en acier d'une largeur de 1400 mm, d'une épaisseur de 3 mm et d'une longueur initiale de 2 mètres. Ensuite, à l'aide d'une Cisaille guillotine, nous avons soigneusement découpé la tôle en forme carrée de 1300 mm, en veillant à la précision de la découpe pour garantir des bords réguliers. Une fois la découpe terminée, nous avons procédé au surfacage de tous les côtés du plateau pour éliminer les aspérités et obtenir une finition lisse. Pour ce faire, nous avons utilisé des outils tels qu'une ponceuse ou une lime, assurant ainsi des bords uniformes et sans bavures.

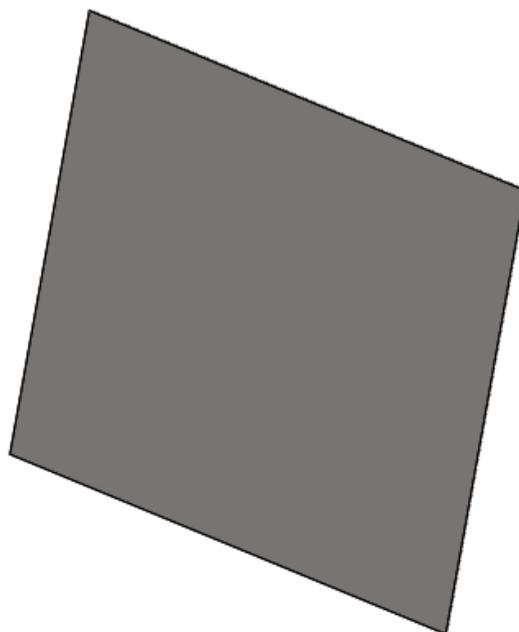


FIGURE 2.13 – Image de la conception du plateau

3. Le montage

Une fois l'usinage des pièces terminé et les dimensions conformes aux spécifications du dessin, nous procédons à l'assemblage de la table par soudage . Voici les étapes optimisées pour le montage :

Préparation des pièces : Nous avons nettoyé soigneusement toutes les pièces usinées pour éliminer toute saleté, huile ou autres contaminants.

Alignement des pièces : Nous avons disposé les pièces selon le schéma de montage et vérifié leur alignement avec précision.

Soudage final : Nous avons effectué le soudage complet des pièces en suivant les normes de soudage appropriées pour garantir des joints solides et durables.

Inspection : Nous avons contrôlé la qualité des soudures et nous sommes assurés que l'assemblage respecte les spécifications techniques.

Ajustements finaux : Nous avons effectué des ajustements pour parfaire l'assemblage de la table.



FIGURE 2.14 – Montage de la Table

Nous avons utilisé un anti-rouille de protection. Cette substance est appliquée avant la peinture pour protéger le métal contre la corrosion.



FIGURE 2.15 – La table avec une couche d’antirouille



FIGURE 2.16 – La table après la peinture

2.4.3 Le support de caméra

La machine intègre une caméra pour la corrélation numérique d’image et obtenir ainsi les déformations. Cette caméra repose sur un support dont la conception est comme suit. Pour fabriquer le support de la caméra, un ensemble complet de pièces, comme détaillé dans le tableau, a été fabriqué en utilisant les imprimantes 3D Creality CR10 et Ender 3, avec une précision de

$\pm 0,4$ mm . Le processus a commencé par la création de modèles 3D détaillés à l'aide de Solid-Works, un logiciel de CAO. Ces modèles ont ensuite été exportés sous forme de fichiers STL, qui ont ensuite été importés dans Cura, un logiciel de découpe, pour générer le code G nécessaire pour les imprimantes 3D. Le matériau choisi pour l'impression 3D était le PLA (acide polylactique), un thermoplastique biodégradable et respectueux de l'environnement, connu pour sa facilité d'utilisation et ses bonnes propriétés mécaniques. Le processus d'impression impliquait de superposer méticuleusement le PLA pour former les formes désirées, une tâche qui nécessitait plusieurs heures pour être achevée en raison de la complexité et de la précision requises pour chaque pièce.

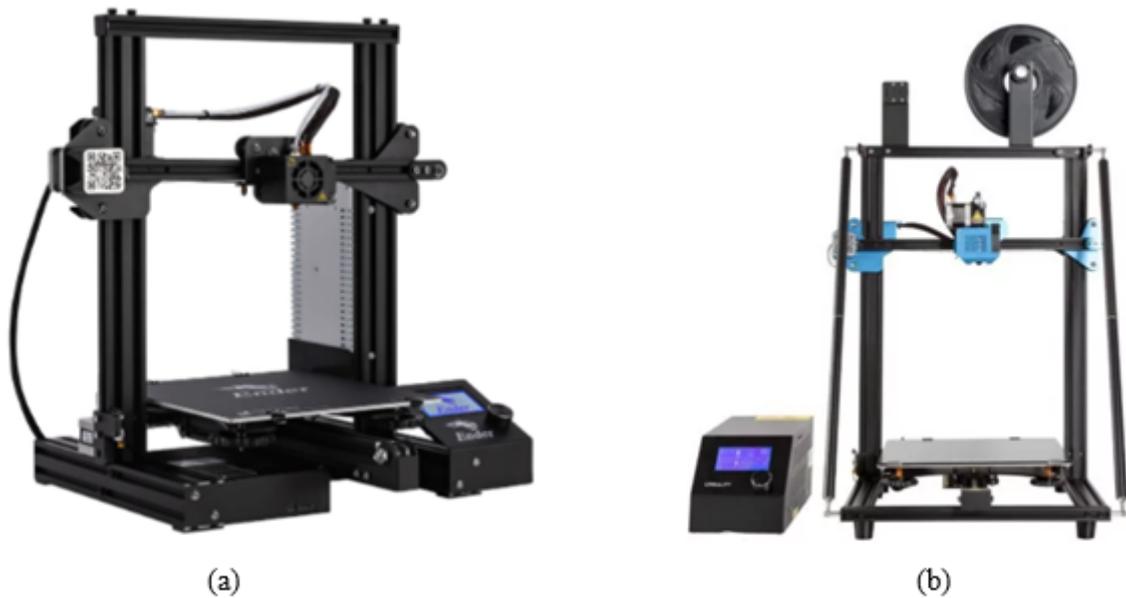


FIGURE 2.17 – Imprimante 3D (a) Ender 3 (b) Creality 10

TABLE 2.4 – Les composants du support de la caméra

Désignation	Illustration	Description
Le Support de caméra		Ce support est conçu pour maintenir la caméra en place, offrant une stabilité et une flexibilité d'orientation.
La boîte à lumière		Cette boîte est utilisée pour contenir des sources de lumière (des LED).
La coulisseau		La coulisseau est un élément mécanique qui permet le mouvement linéaire. Nous allons l'utiliser pour obtenir des ajustements précis de position.
Le montant de support		Le montant de support Il assure la stabilité, permet l'ajustement de la hauteur et sert de point de fixation pour d'autres composants comme la coulisseau et le support de caméra.

Nous avons initialement prévu d'utiliser un coulisseau et un montant de support de caméra. Cependant, après avoir examiné les options disponibles, nous avons découvert que le support de comparateur disponible dans notre département convient mieux à nos besoins. Contrairement au coulisseau et au montant de support, le support de comparateur possède un aimant dans sa base, ce qui nous permet de le fixer plus facilement à la table.

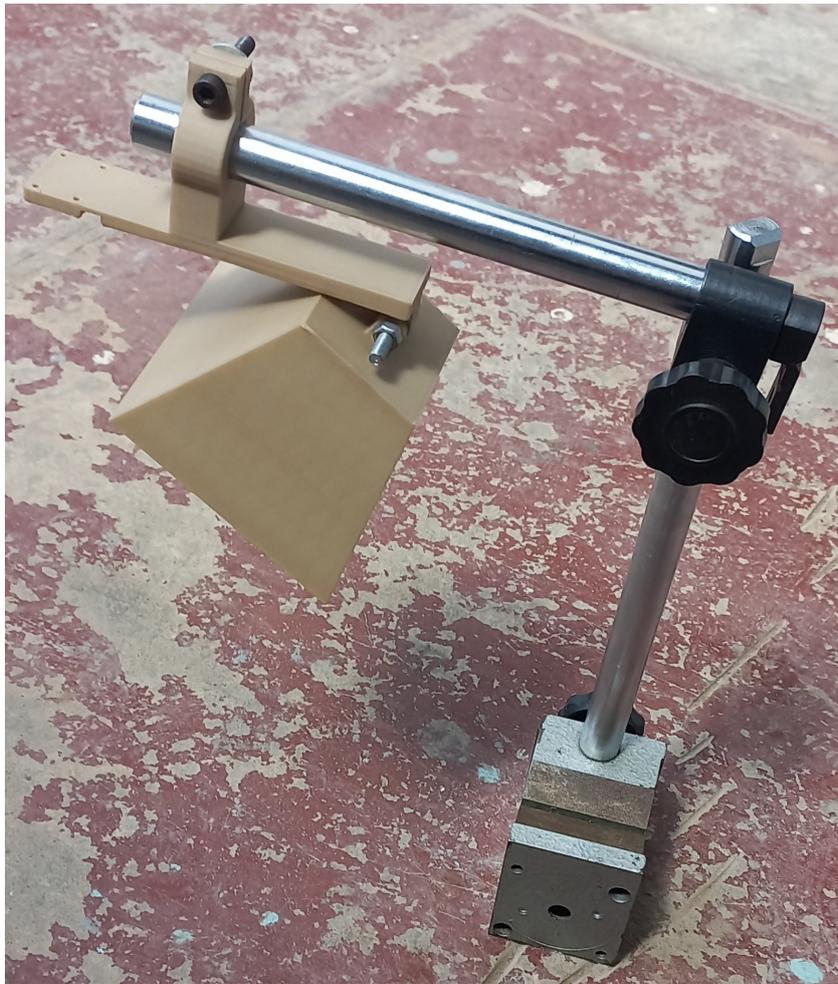


FIGURE 2.18 – Image réelle du support de la caméra en utilisant un support de comparateur

2.5 Conclusion

En conclusion, ce chapitre offre une présentation détaillée de la machine de traction biaxiale et de son système de traction, en mettant en lumière les améliorations apportées pour optimiser son fonctionnement. La machine, est décrite avec ses caractéristiques essentielles et ses composants principaux. Le système de traction, élément crucial de la machine, est également expliqué en détail, soulignant les mécanismes et technologies employés pour garantir une performance optimale. Des modifications structurelles ont été effectuées, notamment sur le bâti pour alléger sa structure et sur la table pour améliorer sa stabilité . L'intégration d'un support de caméra conçu par impression 3D illustre une approche innovante, offrant flexibilité et stabilité . Ainsi, ce chapitre met en avant les améliorations méthodiques apportées à la machine de traction biaxiale, avec un accent particulier sur l'innovation et l'optimisation de la performance mécanique.

Chapitre 3

Automatisation et Instrumentation de la Machine de Traction Biaxiale

3.1 Introduction

Ce chapitre présente en détail les composants nécessaires et les méthodes avancées de communication et de mesure. Il met en lumière l'interaction complexe entre ces composants pour automatiser et instrumenter de manière efficace la machine de traction biaxiale.

3.2 Les composants nécessaires pour automatiser la machine

3.2.1 Les moteurs pas à pas

En raison de sa construction, de son fonctionnement et de ses caractéristiques inhabituels, il est difficile de définir un moteur pas à pas. La meilleure approche semble être de donner la définition fournie dans les spécifications de la norme britannique [32] : "Un moteur pas à pas est un moteur à courant continu sans balais dont le rotor tourne par incréments angulaires discrets lorsque les enroulements du stator sont alimentés de manière programmée. La rotation se produit en raison de l'interaction magnétique entre les pôles du rotor et les pôles des enroulements du stator alimentés séquentiellement. Le rotor n'a pas d'enroulements électriques, mais possède des pôles saillants et/ou magnétisés."

D'après cette définition, il est clair qu'un moteur pas à pas est un actionneur numérique dont l'entrée se fait sous la forme d'une alimentation programmée des enroulements du stator et dont la sortie se fait sous la forme d'une rotation angulaire discrète. Il est donc idéalement adapté pour être utilisé comme actionneur dans les systèmes de contrôle informatisés, les systèmes de contrôle numérique, etc. Les systèmes de contrôle utilisant des moteurs pas à pas comme actionneurs sont connus sous le nom de systèmes de contrôle de mouvement incrémental (IMCS).

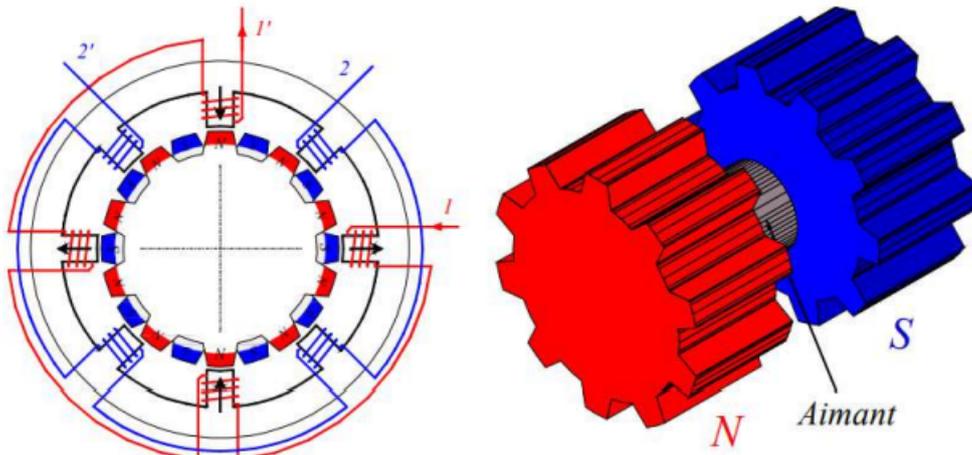


FIGURE 3.1 – Moteur pas à pas hybride
[33]

La sélection d'un modèle de moteur pas à pas pour une micromachine de traction biaxiale doit tenir compte de nombreux critères, dont la disponibilité des composants. Dans notre cas, nous disposons déjà du moteur dans notre département, ce qui représente un atout majeur en assurant une acquisition et un remplacement rapides des pièces nécessaires. De plus, il nous fournit le couple désiré à un coût réduit.

Voici les spécifications techniques de moteur pas pas (86BHH76-400B-35J) [34] :

- **Entreprise de fabrication** : Changzhou Chuangwei Motor and Electric Apparatus
- **Type** : moteur pas à pas hybride

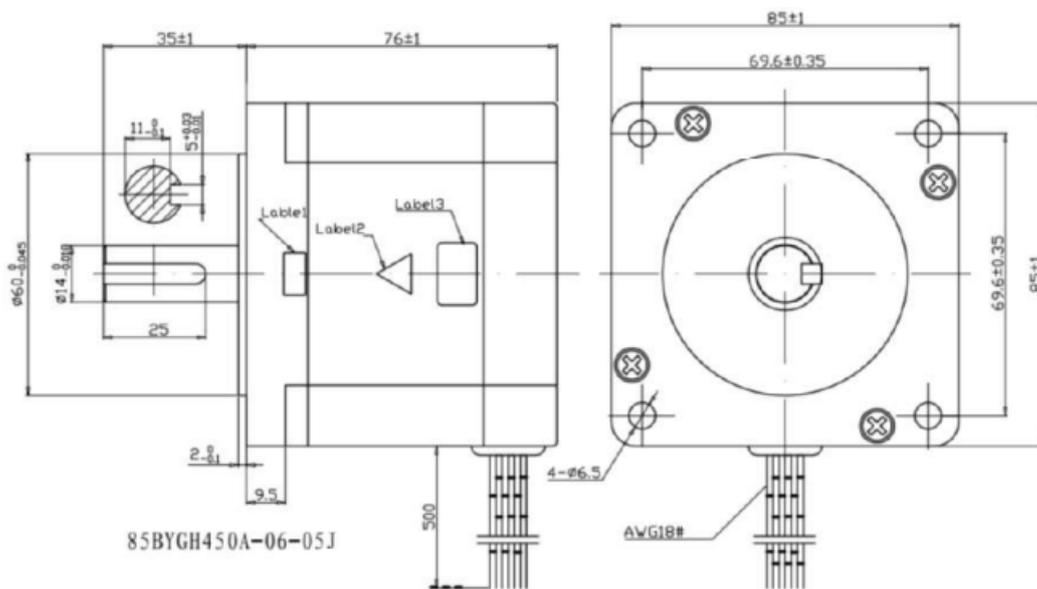


FIGURE 3.2 – Schéma géométrique illustrant le moteur pas à pas (86BHH76-400B-35J) fabriqué par CW-motor

[34]



FIGURE 3.3 – Moteur pas à pas (86BHH76-400B-35J) fabriqué par CW-motor

- **Modèle de moteur** : 86BHH76-400B-35J
- **Nombre des phases** : 2
- **Pas d'angle** : $1.8^\circ \pm 5$
- **Tension (Volt)** : 1.68 VDC
- **Courant (Ampère)** : 4
- **Résistance (Ω)** : 0.42 ± 10
- **Inductance (mH)** : 2.2 ± 20
- **Couple (kg.cm)** : 30 (2.942 N.m)
- **Température ambiante ($^\circ\text{C}$)** : - 20 jusqu' 50
- **Humidité ambiante** : 15 % jusqu' 95 %
- **Diamètre de bride (mm)** : 60
- **Diamètres d'arbre (mm)** : 14
- **Longueur d'arbre (mm)** : 35
- **Masse de moteur (kg)** : approximativement 1.23

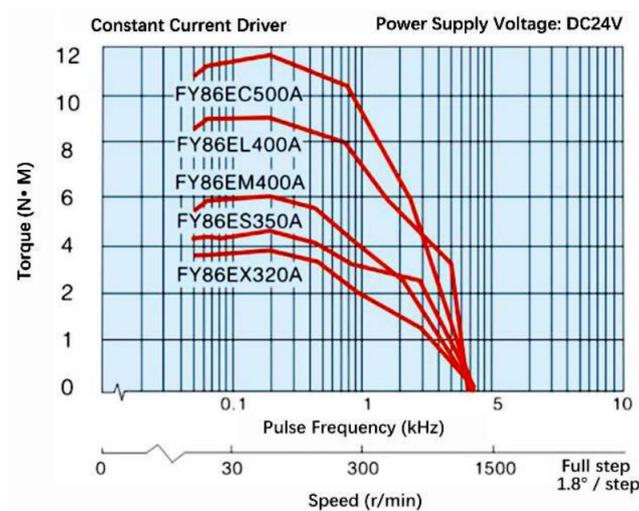


FIGURE 3.4 – Couple mécanique en fonction de la fréquence de rotation [35]

3.2.1.1 Avantages et Inconvénients du moteur pas à pas 86BHH76-400B-35J

- **Avantages**
 - **Précision élevée** : Positionnement précis avec des pas de 1,8°.
 - **Couple élevé à basse vitesse** : Utile pour l'automatisation et la robotique.
 - **Contrôle en boucle ouverte** : Simplicité de contrôle et réduction des coûts.
 - **Compact et puissant** : Adapté aux espaces limités.
 - **Coût abordable** : Moins cher que les servomoteurs, peu d'entretien, longue durée de vie.
- **Inconvénients**
 - **Résonance et vibrations** : Affecte les performances.
 - **Performance à grande vitesse limitée** : Due à l'inductance et l'impédance.
 - **Consommation d'énergie élevée** : Même à l'arrêt.
 - **Contrôle complexe** : Nécessite des circuits précis et une optimisation complexe.
 - **Inefficacité à faible charge** : Augmente la consommation d'énergie.

3.2.2 Driver contrôle

Le contrôle du moteur se fait via son driver, qui est un composant électronique essentiel permettant de gérer le fonctionnement d'un moteur pas à pas. Il fournit les signaux nécessaires pour contrôler les enroulements du moteur afin de produire des mouvements précis. Voici une explication détaillée :

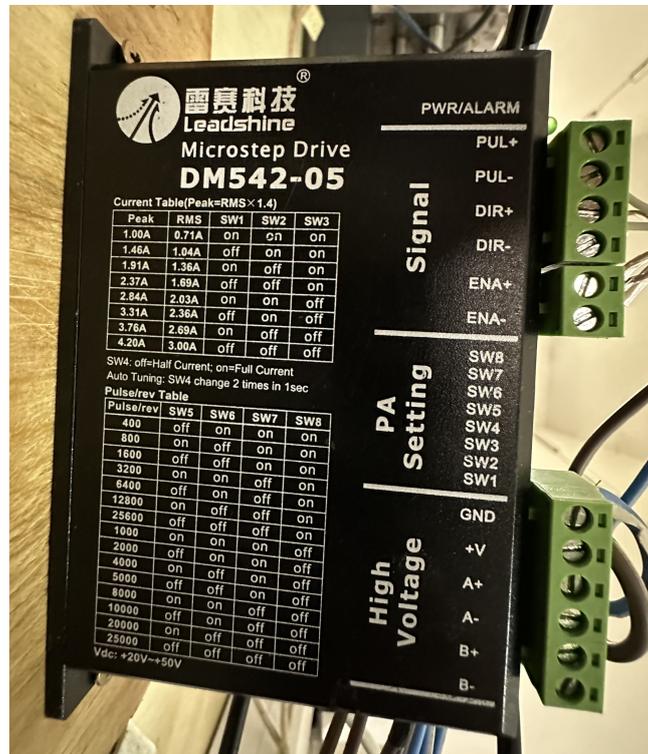


FIGURE 3.5 – Le driver contrôle DM542-05

3.2.2.1 Fonctionnalités principales d'un driver de contrôle pour moteur pas à pas

1. Gestion des impulsions :

- Le driver reçoit des impulsions (pulses) de l'unité de contrôle (comme un microcontrôleur ou un ordinateur).
- Chaque impulsion correspond à un pas du moteur.

2. Contrôle de la direction :

- Le driver reçoit un signal de direction pour déterminer le sens de rotation du moteur (horaire ou antihoraire).

3. Amplification de courant :

- Le driver amplifie le signal de commande pour fournir le courant nécessaire aux enroulements du moteur.
- Cette amplification permet de contrôler des moteurs de différentes tailles et puissances.

4. Microstepping :

- Les drivers avancés permettent le microstepping, une technique qui divise chaque pas du moteur en plusieurs sous-pas.
- Cela améliore la précision et la fluidité du mouvement.

5. Protection :

- Les drivers incluent des protections contre les surintensités, les surtensions, les surchauffes, et les courts-circuits pour protéger le moteur et le driver lui-même.

3.2.2.2 Fonctionnement

1. Entrées du driver :

- **Step** : Signal d'impulsion pour chaque pas.
- **Dir** : Signal pour la direction de rotation.
- **Enable** : Signal pour activer ou désactiver le moteur.

2. Sorties du driver :

- Les sorties sont connectées aux enroulements du moteur pas à pas, fournissant le courant nécessaire pour créer le champ magnétique qui entraîne le rotor.

3.2.3 Capteur de fin de course

Un capteur de fin de course est un dispositif utilisé pour détecter la position finale ou les limites de mouvement d'un mécanisme mobile, tel qu'un moteur ou une machine. Ces capteurs jouent un rôle crucial dans de nombreuses applications industrielles et robotiques pour garantir la sécurité, la précision et le contrôle des mouvements. Voici une explication détaillée :

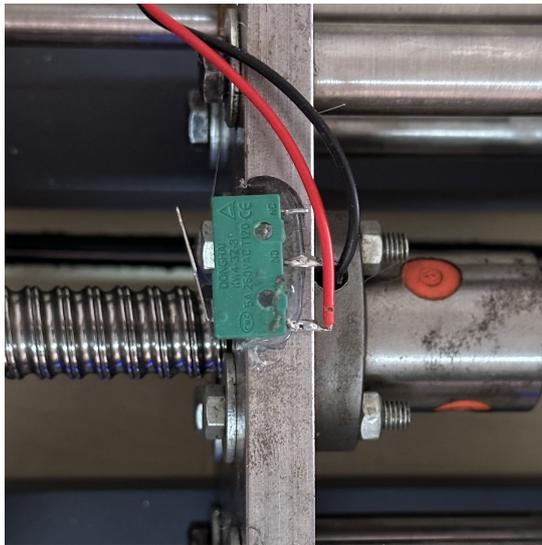


FIGURE 3.6 – Capteur de fin de course

3.2.3.1 Fonctionnalités principales d'un capteur de fin de course

1. Détection de position :

Le capteur détecte lorsque une partie mobile atteint une position prédéfinie, comme l'extrémité d'un rail ou une position limite.

2. Signal de contrôle :

Lorsqu'une position limite est atteinte, le capteur envoie un signal au système de contrôle pour arrêter, ralentir ou inverser le mouvement du moteur ou de la machine.

3. Protection :

Les capteurs de fin de course protègent les machines et les opérateurs en empêchant le mouvement au-delà des limites sécurisées, réduisant ainsi le risque de dommages ou d'accidents.

3.2.3.2 Fonctionnement

1. **Installation** : Un capteur de fin de course est installé à la position limite souhaitée sur une machine.
2. **Activation** : Lorsque la partie mobile de la machine atteint cette position, le capteur est activé (par contact physique, interruption d'un faisceau lumineux, changement de champ magnétique, etc.).
3. **Signal** : Le capteur envoie un signal au système de contrôle (PLC, microcontrôleur, etc.), qui prend les mesures appropriées (arrêt du moteur, changement de direction, etc.).

Pour notre machine, nous avons besoin de ce capteur pour définir le départ de course et également comme mesure de sécurité afin de protéger notre équipement et pour assurer son bon fonctionnement on a besoin de résistances qui sont nécessaires pour protéger le circuit contre les surtensions et pour garantir que l'entrée du circuit de commande est dans un état défini (pull-down) lorsque le capteur n'est pas actionné.

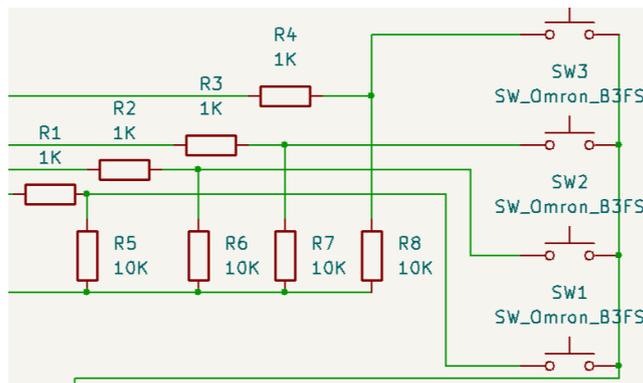


FIGURE 3.7 – Schéma électrique de pull-down

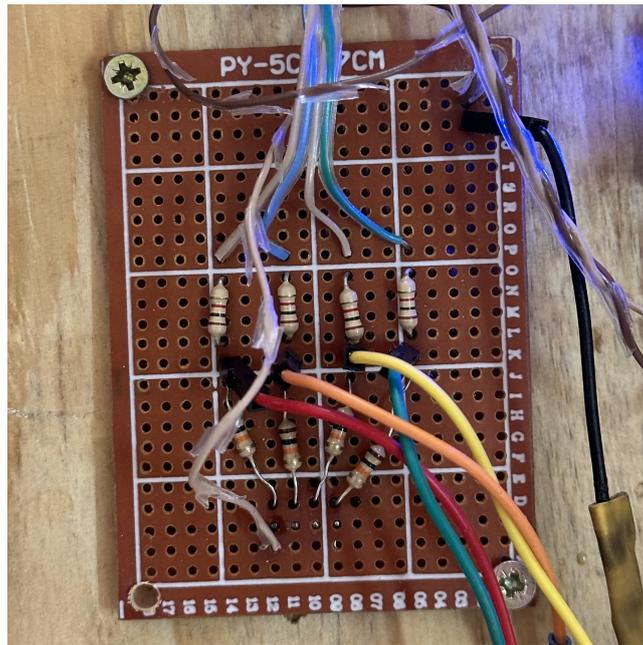


FIGURE 3.8 – Les résistances de pull-down

3.2.4 Un convertisseur buck

Un convertisseur buck, également connu sous le nom de convertisseur abaisseur, est un type de régulateur de tension à découpage qui convertit une tension d'entrée plus élevée en une tension de sortie plus basse de manière efficace. Il utilise des composants électroniques tels qu'un transistor de commutation, une diode, un inducteur et un condensateur pour abaisser la tension tout en augmentant le courant de sortie. La régulation de la tension de sortie est réalisée en contrôlant le rapport cyclique (duty cycle) du signal de commande du transistor de commutation. Les convertisseurs buck sont largement utilisés dans les alimentations pour appareils électroniques, les systèmes embarqués, les applications automobiles et les dispositifs d'éclairage LED en raison de leur haute efficacité et de leur capacité à fournir une tension stable et régulée.

Pour notre machine, nous avons besoin de deux convertisseurs buck avec des spécifications précises :

1. Le premier convertisseur buck doit alimenter les capteurs de force et les LEDs. Il doit être capable de gérer une entrée de 24V et de fournir une sortie de 12V.

2. Le second convertisseur buck est destiné à alimenter le Raspberry Pi 4. Celui-ci doit accepter une entrée de 12V et fournir une sortie de 5.1V.

Ces convertisseurs sont essentiels pour assurer le bon fonctionnement et l'alimentation stable de nos composants électroniques.

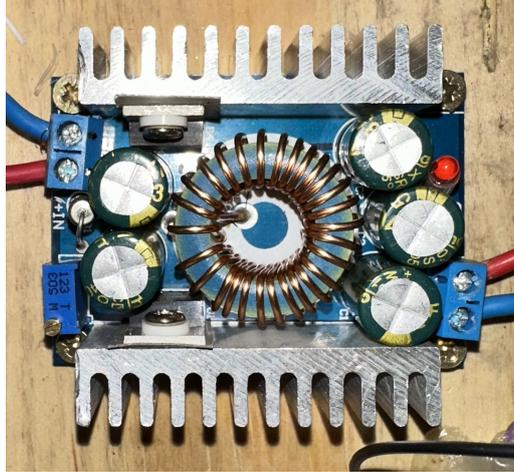


FIGURE 3.9 – Convertisseur buck 24/12v

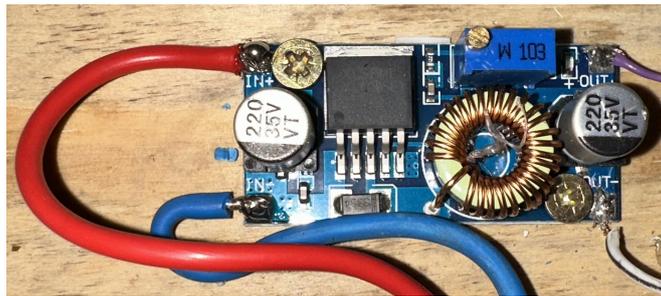


FIGURE 3.10 – Convertisseur buck 12/5.1v

3.2.4.1 Avantages

1. **Haute efficacité :**

Les convertisseurs buck peuvent atteindre des efficacités de plus de 90 %, car ils régulent la tension en commutant entre des états de faible et de haute énergie, minimisant les pertes.

2. **Taille compacte :**

Grâce à leur efficacité élevée, les convertisseurs buck nécessitent des dissipateurs de chaleur plus petits, ce qui permet une conception plus compacte.

3. **Faible chaleur dissipée :**

Moins de perte d'énergie signifie moins de chaleur générée, réduisant ainsi les besoins de refroidissement.

3.2.5 Alimentation à découpage

Une alimentation à découpage à trois sorties, délivrant chacune 24 V et 10 A, est un dispositif électronique très efficace et polyvalent utilisé dans diverses applications. Sa fonction première est de convertir l'énergie électrique à haute fréquence en courant continu régulé. Équipée de circuits de régulation de tension, cette alimentation maintient une tension de sortie stable de 24 V malgré les variations de la tension d'entrée, des conditions de charge et des facteurs environnementaux. Grâce à ses multiples canaux de sortie, elle permet d'alimenter simultanément différents composants ou sous-systèmes. La capacité de courant de 10A par canal de l'alimentation garantit un fonctionnement sûr sans dépasser les limites de conception. Son rendement élevé, obtenu grâce à des dispositifs de commutation à semi-conducteurs, minimise le gaspillage d'énergie et maximise la rentabilité. L'inclusion de fonctions de protection, telles que la protection contre les surtensions, les surintensités, les courts-circuits et la protection thermique, garantit la sécurité de l'alimentation et des appareils connectés. Des mécanismes de refroidissement adéquats, tels que des ventilateurs et des dissipateurs de chaleur, facilitent la dissipation de la chaleur. Les applications courantes de cette alimentation sont l'automatisation industrielle, la robotique, les télécommunications et les systèmes d'éclairage LED. Le respect des normes de sécurité et des directives du fabricant lors de l'installation et du câblage est essentiel pour obtenir des performances optimales [36] .



FIGURE 3.11 – Alimentation à découpage

3.2.6 Camera raspberry pi v2

Pour assurer le traitement numérique d'image, une camera est nécessaire . La caméra Raspberry Pi v2 est un module caméra conçu spécifiquement pour les ordinateurs Raspberry Pi, offrant des fonctionnalités avancées pour la capture d'images et de vidéos. Voici une présentation détaillée de ce module [37] :

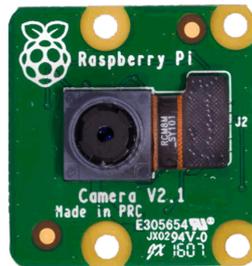


FIGURE 3.12 – Camera raspberry pi v2
[38]

3.2.6.1 Caractéristiques principales

1. Capteur d'image :

Utilise un capteur Sony IMX219, qui est un capteur de 8 mégapixels.

2. Résolution :

Capture des images fixes à une résolution maximale de 3280 x 2464 pixels. Enregistrement vidéo en 1080p à 30 images par seconde, 720p à 60 images par seconde, et 480p à 90 images par seconde.

3. Lentille :

Objectif à focale fixe avec une ouverture de $f/2.0$. Angle de vision de 62,2 degrés en diagonale.

4. Compatibilité :

Compatible avec tous les modèles de Raspberry Pi grâce au connecteur CSI (Camera Serial Interface).

5. Dimensions :

Compacte et légère, mesurant environ 25 mm x 23 mm x 9 mm.

6. Interfaces :

Connecteur plat pour une connexion directe au port CSI du Raspberry Pi.

3.2.6.2 Pourquoi la camera de raspberry pi v2 ?

Pour mesurer la déformation de l'éprouvette, nous avons rencontré un problème. Initialement, nous avons prévu d'utiliser des capteurs de distance, mais nous nous sommes rendu compte qu'il était impossible de mesurer la déformation à l'endroit souhaité. Nous avons alors envisagé d'utiliser des extensomètres, mais notre budget ne nous permettait pas de les acheter, Nous avons donc décidé d'utiliser une caméra pour capturer les déformations au cours des tests.

Nous avons choisi la caméra Raspberry Pi v2 en raison de sa qualité d'image, de sa compatibilité avec le Raspberry Pi 4, et de sa capacité à nous fournir la précision de déformation

souhaitée.

De plus, elle nous offre la possibilité de réaliser des mesures de déformation par corrélation d'images.

3.2.6.3 Le traitement d'image

La détection des cercles dans un flux d'images peut être réalisée efficacement en utilisant la bibliothèque OpenCV avec le langage Rust. Cette méthode combine les capacités puissantes de traitement d'images d'OpenCV avec les avantages de performance et de sécurité de Rust.

La détection des cercles consiste à identifier et analyser des régions distinctes dans une image qui se distinguent par des propriétés telles que la luminosité ou la couleur par rapport aux zones environnantes. En configurant un dispositif ou un flux de capture vidéo, chaque image peut être traitée en temps réel. Pour simplifier le processus de détection, l'image est convertie en niveaux de gris, puis un SimpleBlobDetector est utilisé pour identifier les cercles.

```
let mut detector = SimpleBlobDetector::create(params).unwrap();
detector.set_params(params).unwrap();
detector.detect_def(&frame, &mut keypoints).unwrap();
```

Les cercles détectés, représentant des points clés importants, peuvent être mis en évidence et visualisés sur l'image pour une analyse plus approfondie. Cette technique est particulièrement utile pour des applications comme le suivi d'objets, l'extraction de caractéristiques et la segmentation d'images, offrant une méthode robuste pour des projets de vision en temps réel.

3.2.7 Raspberry pi 4

Le Raspberry Pi 4 est un ordinateur monocarte développé par la Fondation Raspberry Pi. C'est un appareil puissant et polyvalent qui peut être utilisé pour une large variété de tâches, y compris la robotique, les centres multimédia et même l'informatique de bureau basique.

Voici une explication détaillée [39] :



FIGURE 3.13 – Raspberry pi 4

3.2.7.1 Caractéristiques principales

1. Processeur :

- **CPU** : Broadcom BCM2711, quad-core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC @ 1.5GHz.

2. Mémoire (RAM) :

- **Options disponibles** : 2GB, 4GB, 8GB LPDDR4-3200 SDRAM.

3. Graphiques :

- **GPU** : VideoCore VI, capable de décoder la vidéo H.265 (4Kp60) et de supporter OpenGL ES 3.0.

4. Connectivité :

- **Wi-Fi** : 802.11ac wireless (2.4GHz et 5.0GHz).
- **Bluetooth** : 5.0, BLE.
- **Ethernet** : Gigabit Ethernet.

5. Ports :

- **USB** : 2 x USB 3.0 ports, 2 x USB 2.0 ports.
- **HDMI** : 2 x Micro HDMI ports supportant jusqu'à 4Kp60.
- **CSI** : 2 x connecteurs CSI (Camera Serial Interface) pour les modules caméra.
- **DSI** : 1 x connecteur DSI (Display Serial Interface) pour les écrans tactiles.
- **GPIO** : 40-pin GPIO header, entièrement compatible avec les précédentes versions de Raspberry Pi.

6. Stockage :

- **Carte MicroSD** : Slot pour carte MicroSD pour le système d'exploitation et le stockage des données.
- **USB boot** : Capacité de démarrer à partir de dispositifs USB.

7. Alimentation :

- **Connecteur USB-C** : Alimentation via connecteur USB-C, nécessitant une alimentation de 5V/3A.

8. Audio :

- **Sortie audio** : Port combiné 3.5mm audio et vidéo, sortie HDMI.

3.2.7.2 Pourquoi le Raspberry Pi 4 ?

Nous avons utilisé le Raspberry Pi 4 parce qu'il dispose de 4 entrées USB, d'un microprocesseur au lieu d'un microcontrôleur, et d'un module WiFi pour que nous puissions nous y connecter sans fil. Nous prévoyons de le contrôler via WiFi à l'aide d'une interface graphique. Nous pouvons installer Linux (Raspbian), ce qui nous donne accès à une variété de programmes et de bibliothèques, ce qui explique pourquoi nous utilisons le Raspberry Pi plutôt que d'autres cartes.

Il dispose d'un microprocesseur capable d'effectuer des calculs rapides pour capturer des images à partir de la caméra vidéo, et ses 2 Go de RAM sont largement suffisants pour gérer tout cela et faire fonctionner le serveur WebSocket.

3.2.7.3 Communication avec le raspberry pi 4

Nous avons besoin d'un serveur web capable d'envoyer des notifications chaque fois qu'un événement se produisait, donc nous avons utilisé les WebSockets. Pour cela, nous avons lancé un serveur WebSocket sur le Raspberry Pi en utilisant le langage Rust car c'est un langage sûr en mémoire, rapide et bas niveau (permet de communiquer directement avec le processeur et la RAM).

Le serveur WebSocket est responsable de la communication bidirectionnelle en temps réel entre le Raspberry Pi et l'interface utilisateur (UI). Il gère les commandes provenant de l'UI et renvoie les valeurs des jauges de force ainsi que les événements des interrupteurs de fin de course lorsqu'ils se produisent.

```
// #[tokio::main]
#[tokio::main(flavor = "multi_thread")]
async fn main() -> Result<(), IoError> {
    let state = PeerMap::new(Mutex::new(HashMap::new()));
    CameraService::init(state.clone());
    let addr = "0.0.0.0:4001";
    let listener = TcpListener::bind(&addr).await?;
    println!("Listening on: {}", addr);
    while let Ok((stream, addr)) = listener.accept().await {
        tokio::spawn(accept_connection(state.clone(), stream, addr));
    }
    Ok(())
}
```

Le serveur sur le Raspberry Pi est également responsable de l'initiation de la caméra avec l'aide de la bibliothèque OpenCV, afin de capturer les images et de les envoyer à l'UI via WebSocket pour qu'elles soient traitées et utilisées pour la reconnaissance d'images afin d'identifier le déplacement en temps réel.

```
let mut cam: VideoCapture = VideoCapture::new(index: 0, api_preference: videoio::CAP_ANY).unwrap();
```

De plus, le serveur est chargé de piloter les moteurs en envoyant des signaux PWM aux moteurs selon les commandes reçues de l'UI.

Ainsi, le Raspberry Pi agit comme un intermédiaire pour permettre à l'UI de communiquer avec le matériel (moteurs, jauges de force, caméra).

Lors du démarrage du Raspberry Pi, le serveur se lance automatiquement grâce à une fonctionnalité appelée autostart, et chaque fois qu'une erreur survient et que le serveur s'arrête, il se recharge automatiquement. Cela garantit que le serveur (Raspberry Pi) reste toujours fiable et opérationnel.

3.2.8 Capteur de force

Pour la mesure des forces, nous avons opté pour un capteur de force de type S, souvent appelé cellule de charge en S, est un dispositif de mesure utilisé pour déterminer des forces de traction ou de compression. Sa forme en S est caractéristique, permettant un montage facile et une intégration dans diverses applications industrielles et de recherche.

Voici quelques caractéristiques typiques d'un capteur de force de type S :

- **Construction robuste** : Généralement fabriqué en acier inoxydable ou en alliages d'aluminium pour résister à des environnements difficiles.
- **Plage de mesure** : Disponible en différentes capacités, allant de quelques kilogrammes à plusieurs tonnes.
- **Précision** : Haute précision avec des erreurs souvent inférieures à 0,1% de la pleine échelle.
- **Compatibilité** : Facile à intégrer avec d'autres équipements de mesure et de contrôle, souvent avec des interfaces analogiques ou numériques.
- **Applications** : Utilisé dans des balances industrielles, des systèmes de pesage de réservoirs, des bancs d'essai, et des dispositifs de test de matériaux.

3.2.8.1 Principe de fonctionnement

Les capteurs de force type S sont constitués d'un corps en acier inoxydable en forme de "S". Lorsqu'une force est appliquée sur le capteur, elle provoque une déformation du corps, ce qui modifie la résistance électrique d'une jauge de contrainte collée à sa surface. Cette variation de résistance est ensuite convertie en un signal électrique proportionnel à la force appliquée.

Pour notre machine, nous avons utilisé le modèle HK-5K dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau ci-dessous.

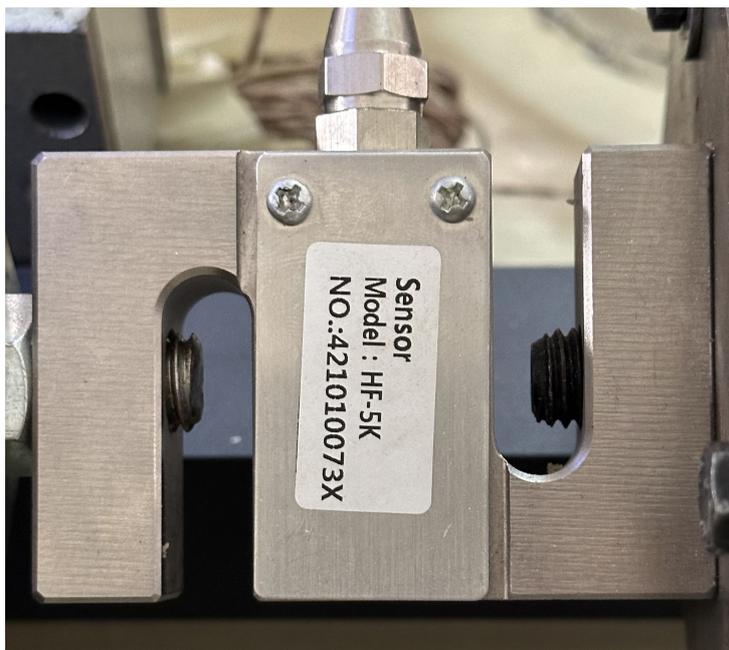


FIGURE 3.14 – Capteur de force HF-5K

TABLE 3.1 – Caracteristiques du capteur HF-5K

[40]

Modèle	HF-5K
Valeur de charge maximale	5000N 500kg 1100Lb
Valeur de division de charge	1N 0.1kg 0.1lb
Structure du capteur	Capteur Externe
Précision	$\pm 0.1\%$
Interface de données	RS 232 prise à neuf trous
Alimentation	7.2V 1.2V \times 6 batteries NiMH
Temps de charge	4 ~ 6 heures
Durée continue d'utilisation de la batterie	Environ 15 heures
Durée de vie de la batterie	≥ 300 fois
Chargeur	Entrée : AC 100-240V 50HZ Sortie : DC 12V 500mA
Température de fonctionnement	5°C ~ 35°C
Température de transport	-10°C ~ 60°C
Humidité relative	15% ~ 80%RH
Conditions de travail	Pas d'hypocentre ni de milieu corrosif



FIGURE 3.15 – Décodeur du capteur HF-5K

3.2.8.2 Communication avec le capteur

Pour obtenir le flux de données en temps réel des jauges sans utiliser le logiciel du fabricant, il a été nécessaire de comprendre la manière dont ce logiciel communique avec les jauges. Les jauges en question utilisent un port de sortie RS-232, lequel emploie un protocole de communication sériel. En conséquence, nous avons employé une technique pour intercepter cette communication, communément appelée "man-in-the-middle attack". Cette méthode agit comme un relais entre la jauge et l'interface utilisateur du logiciel original, nous permettant ainsi de surveiller les données transférées. Grâce à cela, nous avons pu identifier les commandes nécessaires pour commencer à recevoir les données brutes.

```
startRecive() {  
    this.write('e', 'ascii');  
}
```

Par la suite, il a été impératif de décoder les données hexadécimales en flux continu reçues des jauges. Pour ce faire, nous avons mis en correspondance ces données avec les valeurs réelles des jauges afin de les décoder. Au cours de ce processus, nous avons découvert que certaines adresses ne sont pas utilisées, tandis que d'autres servent à signaler la valeur et d'autres encore à indiquer la valeur réelle.

3.3 Les technologies utilisée

Nous avons utilisé une variété de langages de programmation dans notre projet :

3.3.1 JavaScript(Node Js)

Nous avons utilisé Node.js pour le serveur WebSocket afin de jouer le rôle de middleware pour l'interface utilisateur pour contrôler les moteurs matériels et obtenir également des informations de celui-ci (capteurs de force, interrupteurs de fin de course).

3.3.2 Rust

Nous avons utilisé Rust ici pour le traitement du flux d'images provenant de la caméra, ainsi que pour capturer les images à l'aide d'OpenCV depuis la caméra sur le RPI 4.

3.3.3 Flutter

Nous avons utilisé le framework Flutter pour construire notre interface utilisateur et pour se connecter au serveur WebSocket en tant que client, et cette interface utilisateur agit comme un panneau de contrôle pour la machine.

3.3.4 Raspbian(Linux)

Raspbian est un système d'exploitation basé sur Debian, optimisé pour le Raspberry Pi. Il offre un environnement léger et convivial, adapté aux ressources limitées du Pi, avec une gamme de logiciels préinstallés, y compris des outils de développement. Idéal pour l'éducation, le prototypage et les projets de loisirs, il prend en charge de nombreux périphériques et extensions, permettant l'utilisation de diverses technologies, langages de programmation et bibliothèques sur le Raspberry Pi.

3.4 Schémas électrique de la machine

Les schémas électriques sont essentiels pour comprendre et manipuler les circuits et les systèmes électriques de notre machine. Ils offrent une représentation visuelle des composants électriques et des connexions entre eux, facilitant ainsi le diagnostic, la maintenance et la réparation de la machine.

Voici les schémas électrique de notre machine :

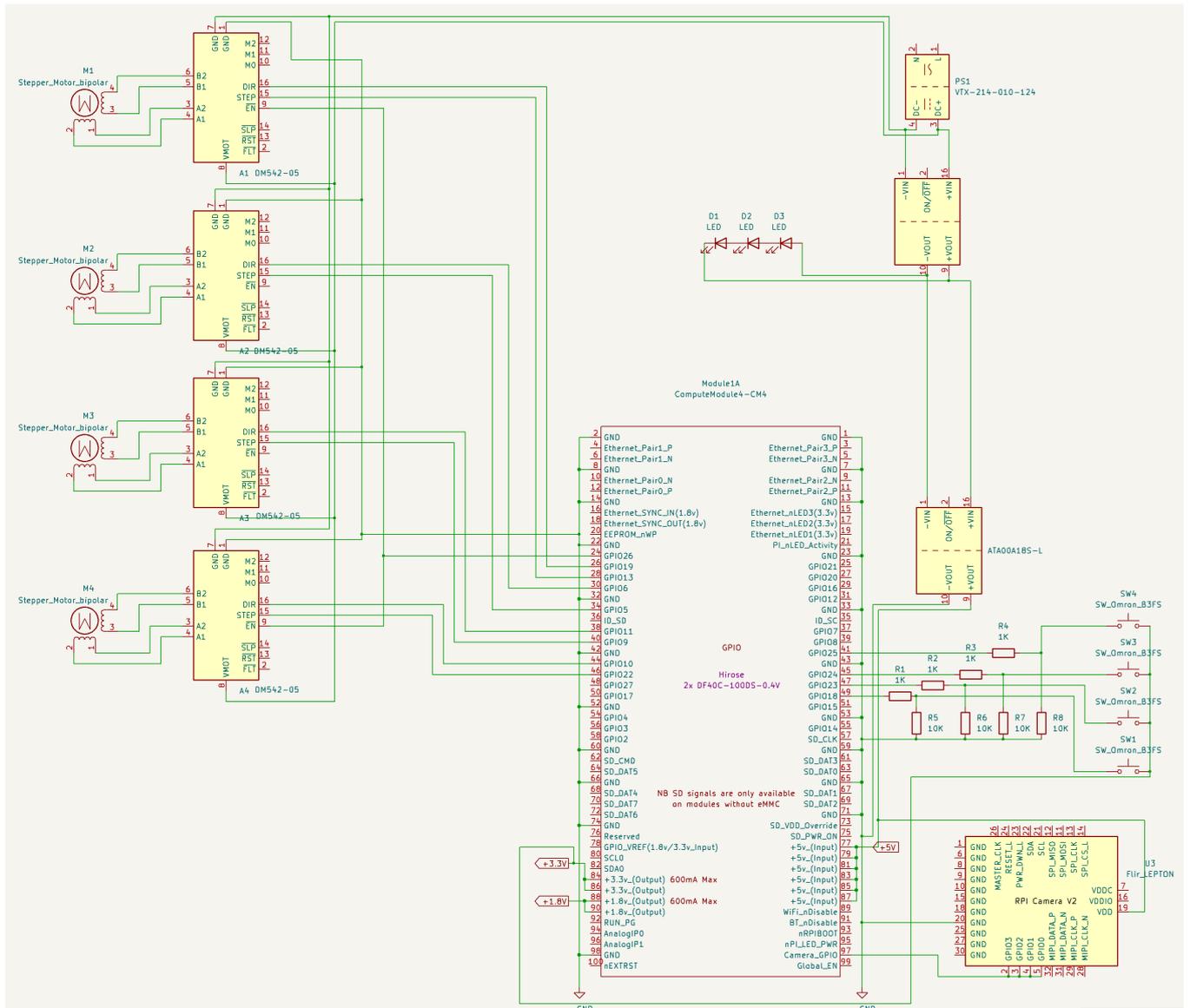


FIGURE 3.16 – Schéma électrique de la machine

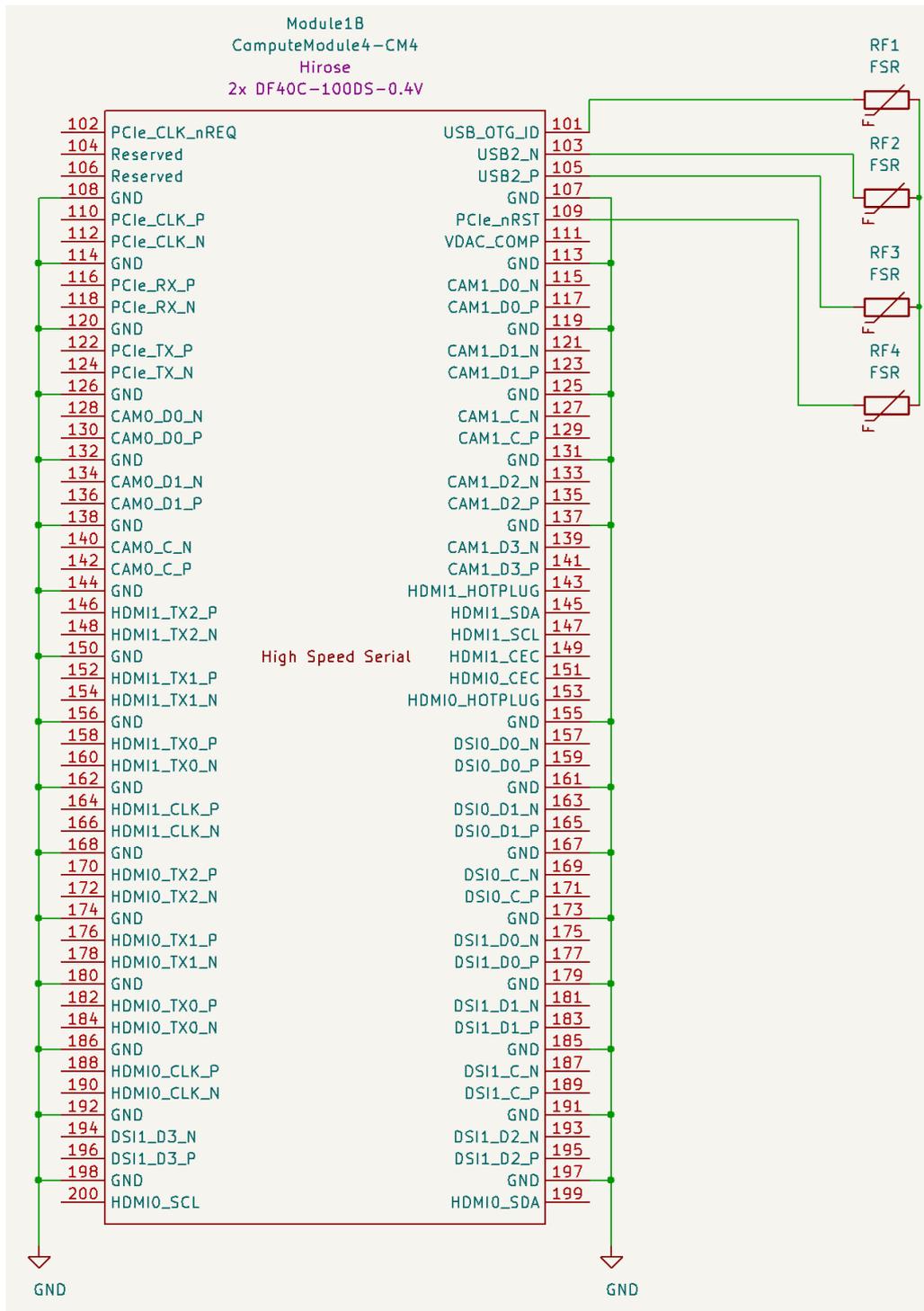


FIGURE 3.17 – Schéma électrique des capteurs de force

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les divers composants et technologies utilisés pour l'automatisation et l'instrumentation de la machine de traction biaxiale. Nous avons abordé en détail le traitement d'image avec OpenCV et Rust pour la détection des cercles, ainsi que les caractéristiques et les raisons du choix du Raspberry Pi 4 comme carte de notre système. Nous avons également discuté de l'intégration et de la communication des capteurs de force de type S, ainsi que les technologies de programmation utilisées dans notre projet. Pour la mesure des déformation, nous avons opté pour une analyse par corrélation d'image numérique. Ceci permet d'avoir directement la mesure sur les éprouvettes. Enfin, les schémas électriques fournis offrent une vision claire des connexions et des composants impliqués.

Chapitre 4

Essai et Résultats de la Machine de Traction Biaxial

4.1 Introduction

L'essai de la machine de traction biaxial est une étape cruciale pour garantir son bon fonctionnement et sa précision. Ce chapitre décrit les procédures expérimentales, les protocoles d'essai, et les résultats obtenus pour valider la performance de la machine en mesurant les forces et les déformations.

4.2 Description de la Machine de Traction Biaxial

La machine de traction biaxiale réalisée est un dispositif avancé qui peut appliquer des forces dans deux directions perpendiculaires en même temps. Elle est équipée de capteurs de force et d'une caméra pour capturer les déformations, ainsi que d'un système de contrôle automatisé pour gérer les cycles de charge.



FIGURE 4.1 – Montage final de la machine de traction biaxiale

4.3 Essai de traction biaxial

L'essai biaxial implique l'application de forces contrôlées sur les échantillons dans deux directions perpendiculaires. Les étapes de la procédure d'essai sont les suivantes :

1. Préparation de l'échantillon.
2. Installation de l'échantillon sur la machine de traction.
3. Application des charges biaxiales en augmentant progressivement les forces jusqu'à la rupture.
4. Enregistrement des données de force et de déplacement (contrainte-déformation).

4.3.1 Matériaux et Méthodes

4.3.1.1 Matériau Utilisé

Le matériau utilisé pour les essais est un échantillon de caoutchouc naturel, présentant un comportement hypersélastique. Les échantillons ont été préparés selon les dimensions standard pour les essais de traction, en assurant des surfaces et des épaisseurs uniformes

4.3.1.2 Préparation des Échantillons

Les dimensions de notre éprouvette sont les suivantes :

- **Longueur** : 180 mm
- **Largeur** : 56 mm
- **Épaisseur** : 4 mm , 6 mm et 8 mm

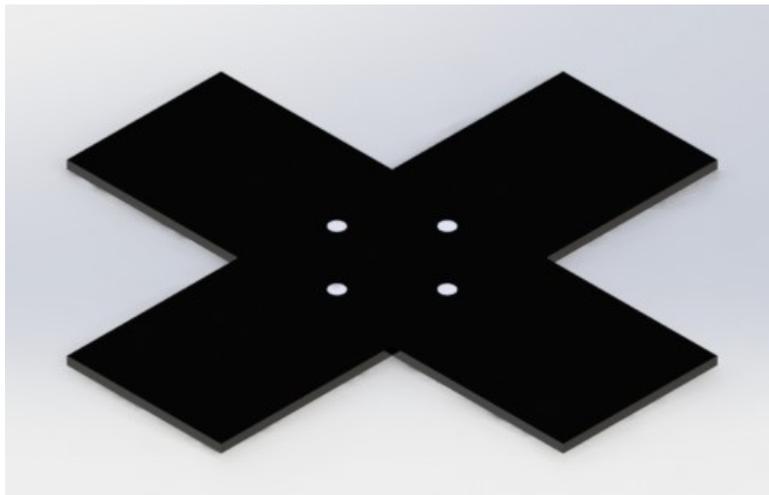


FIGURE 4.2 – Image de la conception de l'éprouvette



FIGURE 4.3 – Image réelle de l'éprouvette

4.3.2 Réalisation des essais et analyse des résultats

4.3.2.1 Présentation de l'interface graphique d'accueil

L'interface graphique d'accueil pour la machine de traction biaxiale est développée par nous pour offrir une interaction intuitive et efficace aux utilisateurs, facilitant ainsi le contrôle et la surveillance des essais de traction biaxiale. Cette interface permet aux opérateurs de configurer les paramètres d'essai, de surveiller les données en temps réel et de générer des rapports de résultats détaillés.

Voici une explication détaillée des fenêtres de l'interface graphique :

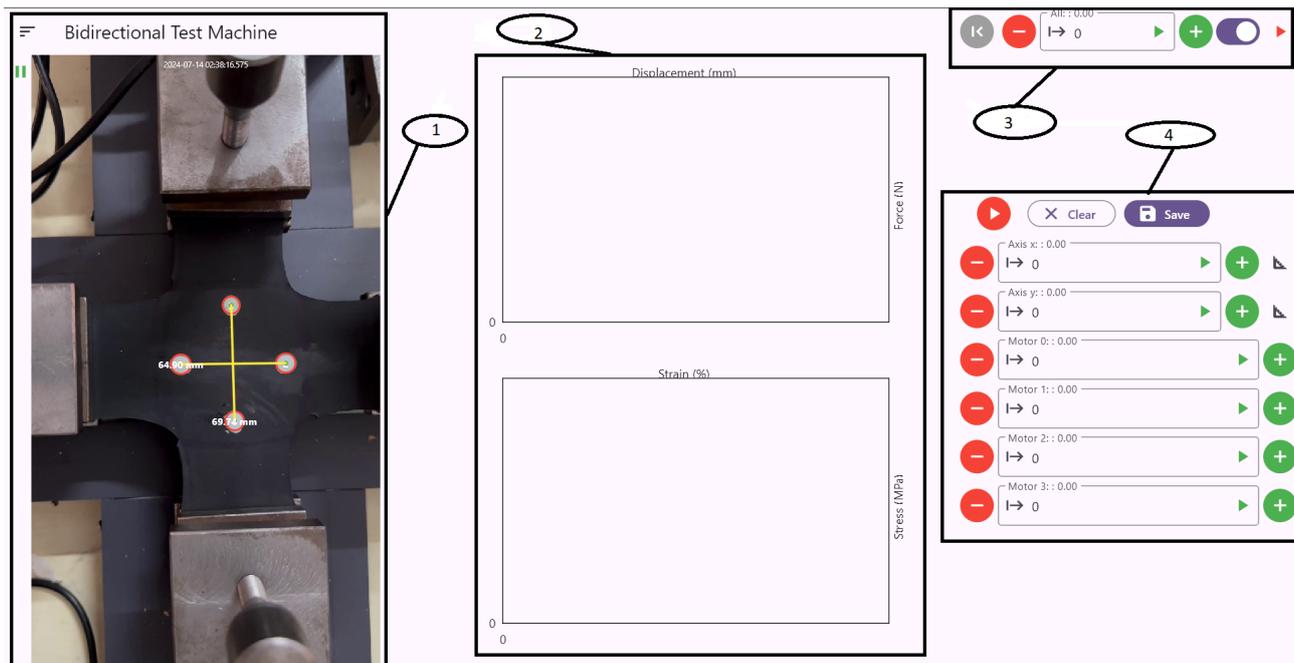


FIGURE 4.4 – Fenêtre principale

La fenêtre principale se compose de 4 parties importantes.

1. La première partie est consacrée à la visualisation de la caméra.
2. La deuxième partie est dédiée à l'affichage des courbes caractéristiques.
3. La troisième partie permet de commander simultanément les moteurs, de se connecter au serveur du Raspberry Pi via Wi-Fi, ainsi que d'alimenter et de désalimenter les moteurs.
4. La quatrième partie sert à lancer et à sauvegarder les tests. Elle permet également de commander chaque moteur ou chaque axe indépendamment.



FIGURE 4.5 – Fenêtre pour la visualisation des forces

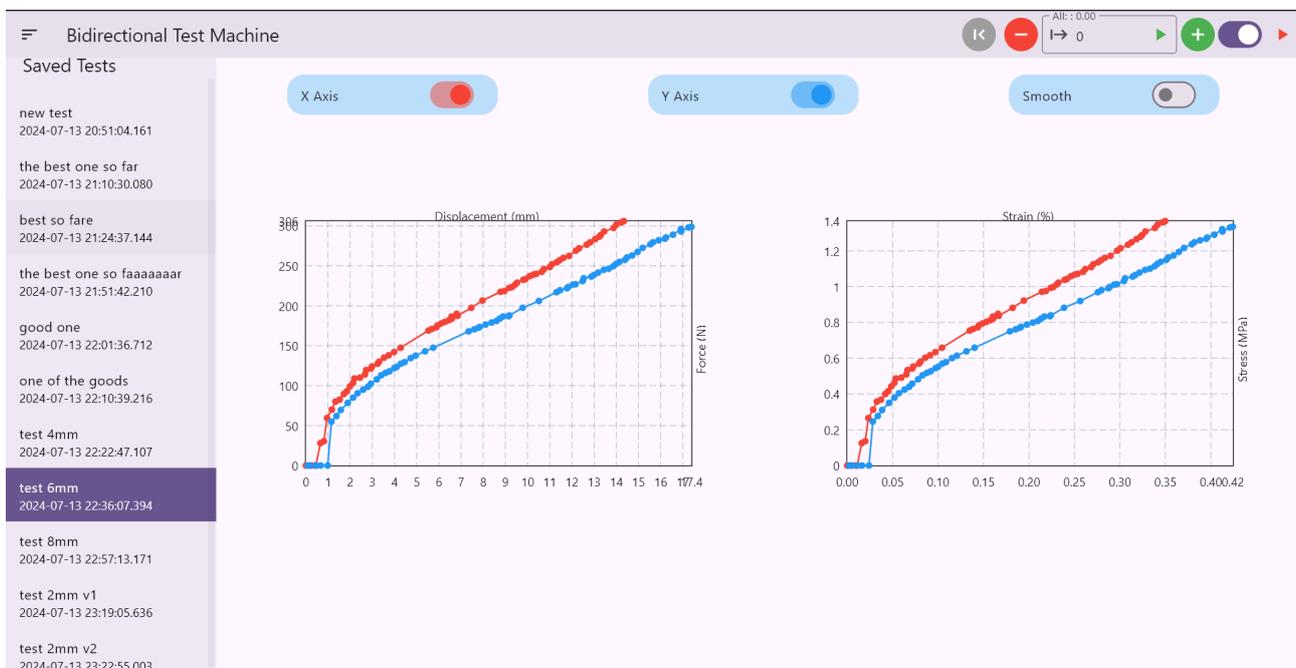


FIGURE 4.6 – Fenêtre pour l'affichage des testes sauvegardés

4.3.2.2 Résultats

Après avoir effectué des essais de traction biaxiale sur notre machine , nous avons obtenu les résultats suivants :

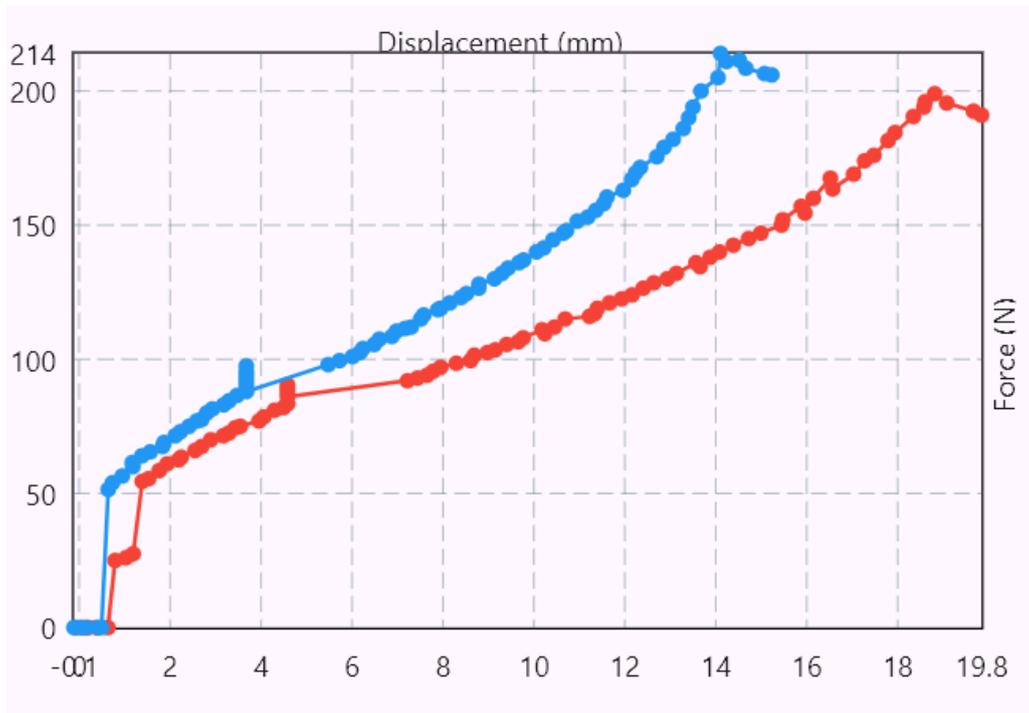


FIGURE 4.7 – Courbe de force-déplacement pour l'éprouvette de 4mm d'épaisseur

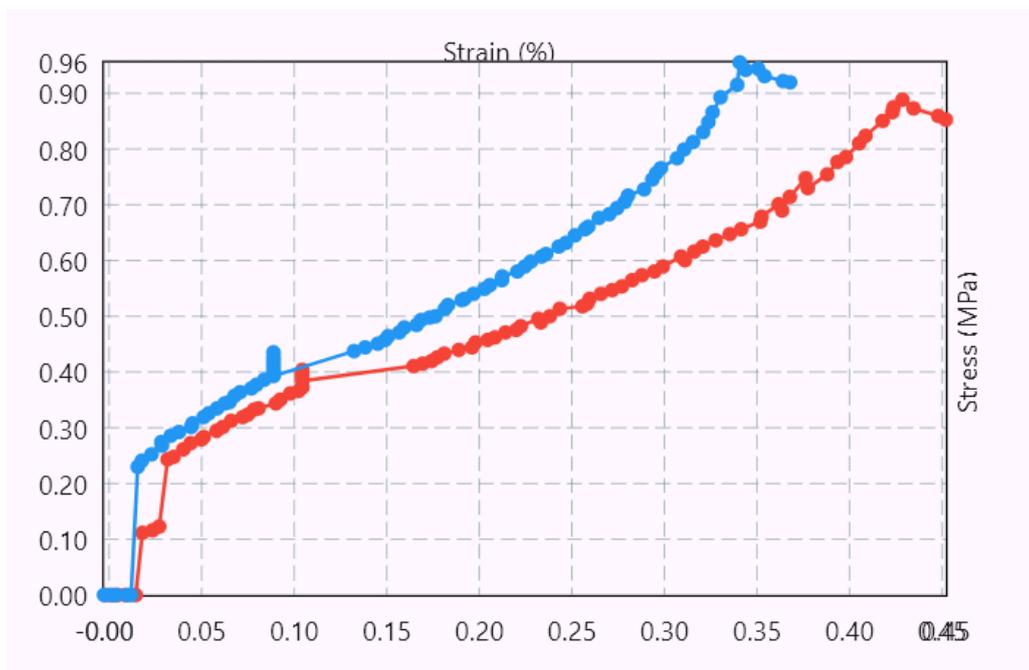


FIGURE 4.8 – Courbe de contrainte-déformation pour l'éprouvette de 4mm d'épaisseur

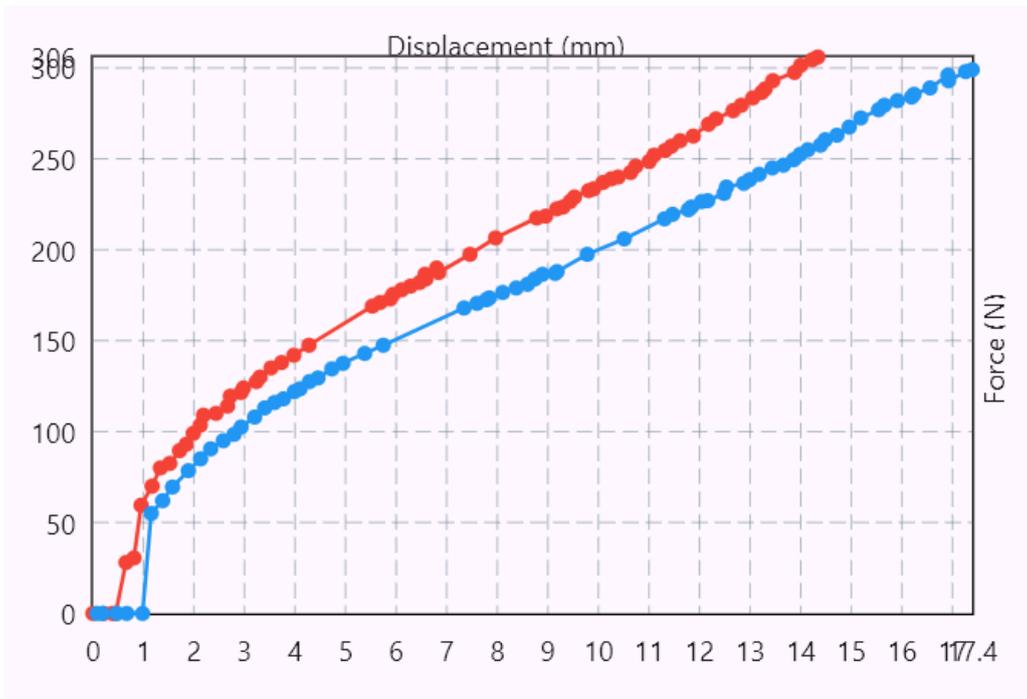


FIGURE 4.9 – Courbe de force-déplacement pour l'éprouvette de 6mm d'épaisseur

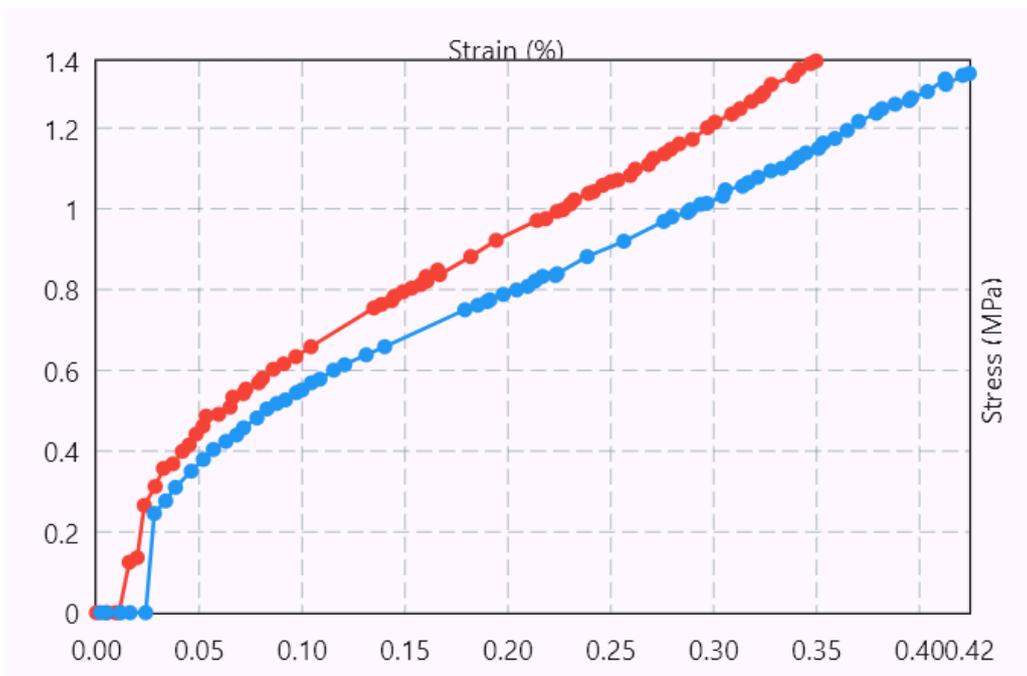


FIGURE 4.10 – Courbe de contrainte-déformation pour l'éprouvette de 6mm d'épaisseur

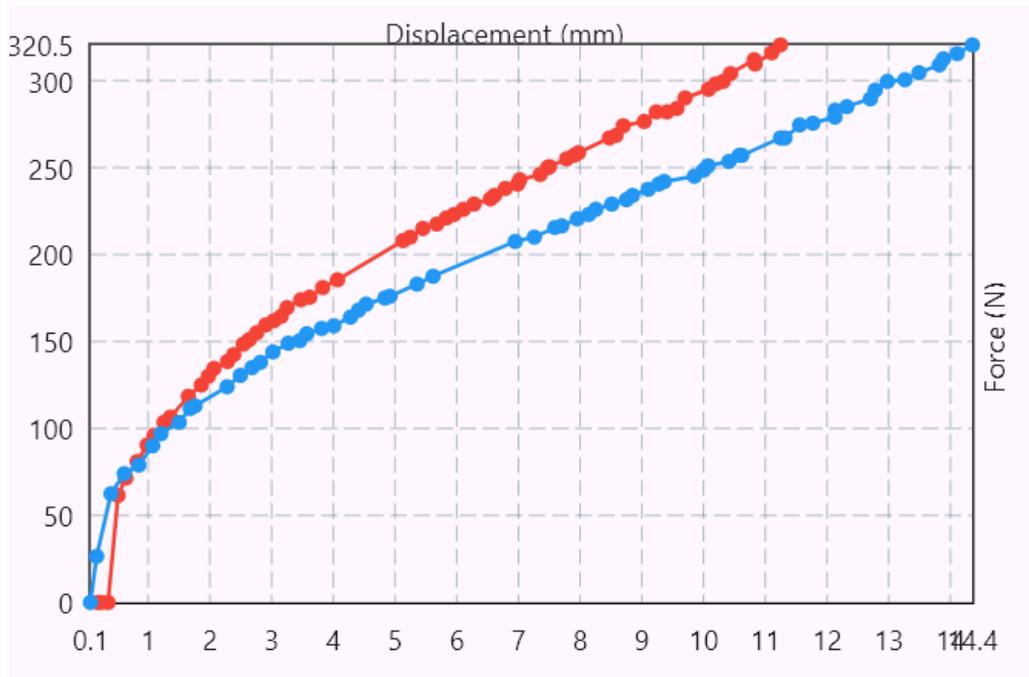


FIGURE 4.11 – Courbe de force-déplacement pour l'éprouvette de 8mm d'épaisseur

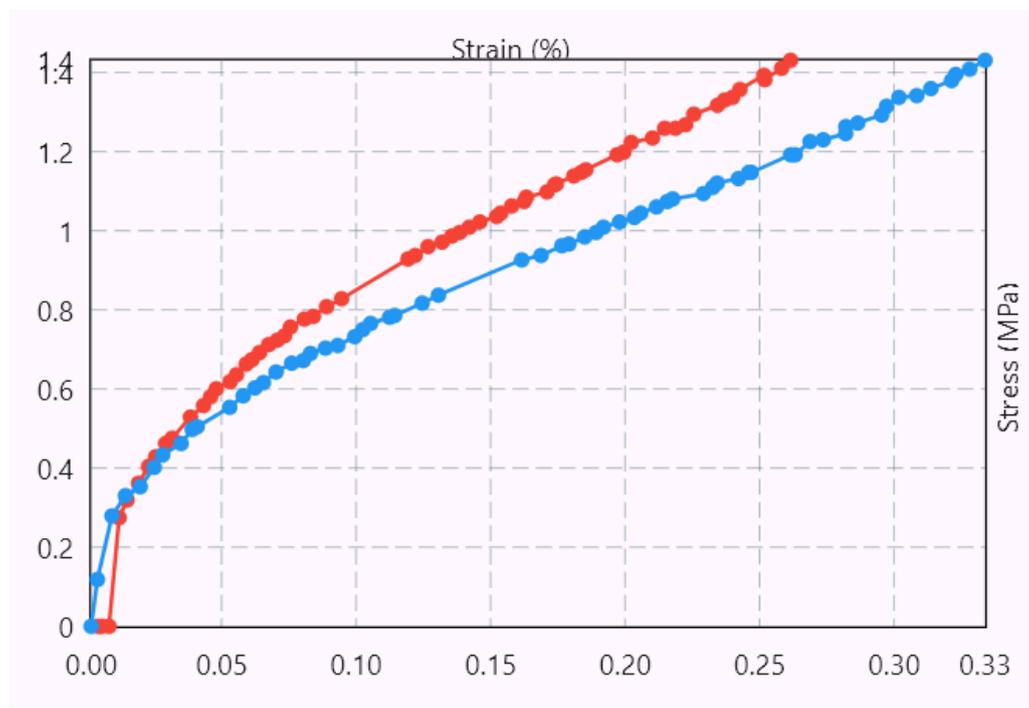


FIGURE 4.12 – Courbe de contrainte-déformation pour l'éprouvette de 8mm d'épaisseur

4.3.3 Analyse des résultats

Après avoir effectué plusieurs essais sur l'échantillon du caoutchouc et analysé les résultats obtenus, nous avons constaté que :

- **Le caoutchouc possède une région élastique non linéaire**
 - La courbe de contrainte-déformation du caoutchouc montre une augmentation non linéaire de la contrainte à la déformation dès que le caoutchouc commence à être déformé.

- Cette non-linéarité est due à la structure moléculaire du caoutchouc, permettant des déformations importantes.
- **Le caoutchouc subit des déformations significatives.**
 - Le caoutchouc peut subir des déformations élastiques très grandes.
 - Il peut s'étirer considérablement avant de se rompre et revenir à sa forme originale une fois la contrainte relâchée.
- **Le caoutchouc a un comportement hyper-élastique**
- **Le capteur de force a une sensibilité de 1N mais présente un décalage du zéro de 50N, ce qui explique le saut à l'origine**

4.4 Conclusion

L'essai de la machine de traction biaxiale a permis de confirmer ses capacités à appliquer des forces dans deux directions perpendiculaires de manière contrôlée et précise. Les résultats des essais montrent que le caoutchouc naturel, utilisé comme matériau de test, présente des comportements conformes aux propriétés attendues du caoutchouc. Cela valide la performance de la machine de traction biaxiale pour des applications futures dans le domaine des matériaux élastomères. Avec l'optimisation du code, la machine pourra offrir une précision encore meilleure, permettant des analyses plus détaillées et fiables des propriétés des matériaux testés

Conclusion générale

Le mémoire intitulé « Instrumentation et automatisation de la machine de traction bi-axiale et validation » explore en profondeur le développement et la mise en œuvre d'une machine automatisée d'essai de traction bi-axiale. Ce projet a permis d'acquérir plusieurs compétences professionnelles, notamment l'utilisation des imprimantes 3D et le découpage par laser, ainsi que des outils de conception assistée par ordinateur (CAO/FAO). L'outil KiCad a été utilisé avec succès pour la conception électronique, générant des schémas précis et des circuits imprimés optimisés, facilitant ainsi l'intégration harmonieuse des systèmes de contrôle et de communication.

L'application de Flutter et Node.js pour le développement logiciel a permis de créer des interfaces utilisateur intuitives et réactives, ainsi que des applications serveur robustes pour la gestion et le contrôle à distance des équipements. L'aboutissement de ce mémoire représente une avancée significative dans le domaine des essais de traction bi-axiale automatisés. Les compétences techniques acquises tout au long du projet ont été cruciales pour son succès, notamment l'automatisation.

Un aspect clé de l'automatisation est le mécanisme de retour automatique de la partie mobile, qui élimine les risques de collision. Ce mécanisme supprime la nécessité d'une intervention manuelle pour repositionner la pièce, en la ramenant automatiquement à sa position d'origine une fois le test terminé. La machine utilise des systèmes de contrôle avancés, des capteurs et des actionneurs sophistiqués, ainsi qu'une commande de moteur pas à pas précise, synchronisée avec un Raspberry Pi 4 et une caméra.

La machine peut réaliser des tractions monoaxiale, biaxiale et équilibaxiale. L'acquisition des forces et déplacement peut fournir des courbes de comportement du matériau. La machine peut générer une courbe caractéristique du matériau dans l'espace $(\sigma_1 - \sigma_2)$.

Pour l'avenir, plusieurs améliorations peuvent être envisagées pour optimiser davantage la machine de traction bi-axiale. Il serait bénéfique d'augmenter la course de la machine pour élargir les possibilités de tests. De plus, remplacer les capteurs de force actuels par des capteurs plus sensibles permettrait d'obtenir des mesures encore plus précises. Une autre amélioration potentielle est le remplacement des moteurs pas à pas par des servomoteurs ou des vérins pour générer plus de force. L'intégration d'extensomètres permettrait de mesurer les déformations avec une plus grande précision. Enfin, l'optimisation du code de la caméra pour améliorer la détection des cercles et augmenter la précision, ainsi que pour calculer la déformation par corrélation d'image, représenterait une avancée significative. Ces améliorations contribueraient à renforcer les capacités de la machine et à élargir son champ d'application, faisant ainsi progresser le domaine des essais de traction bi-axiale automatisés.

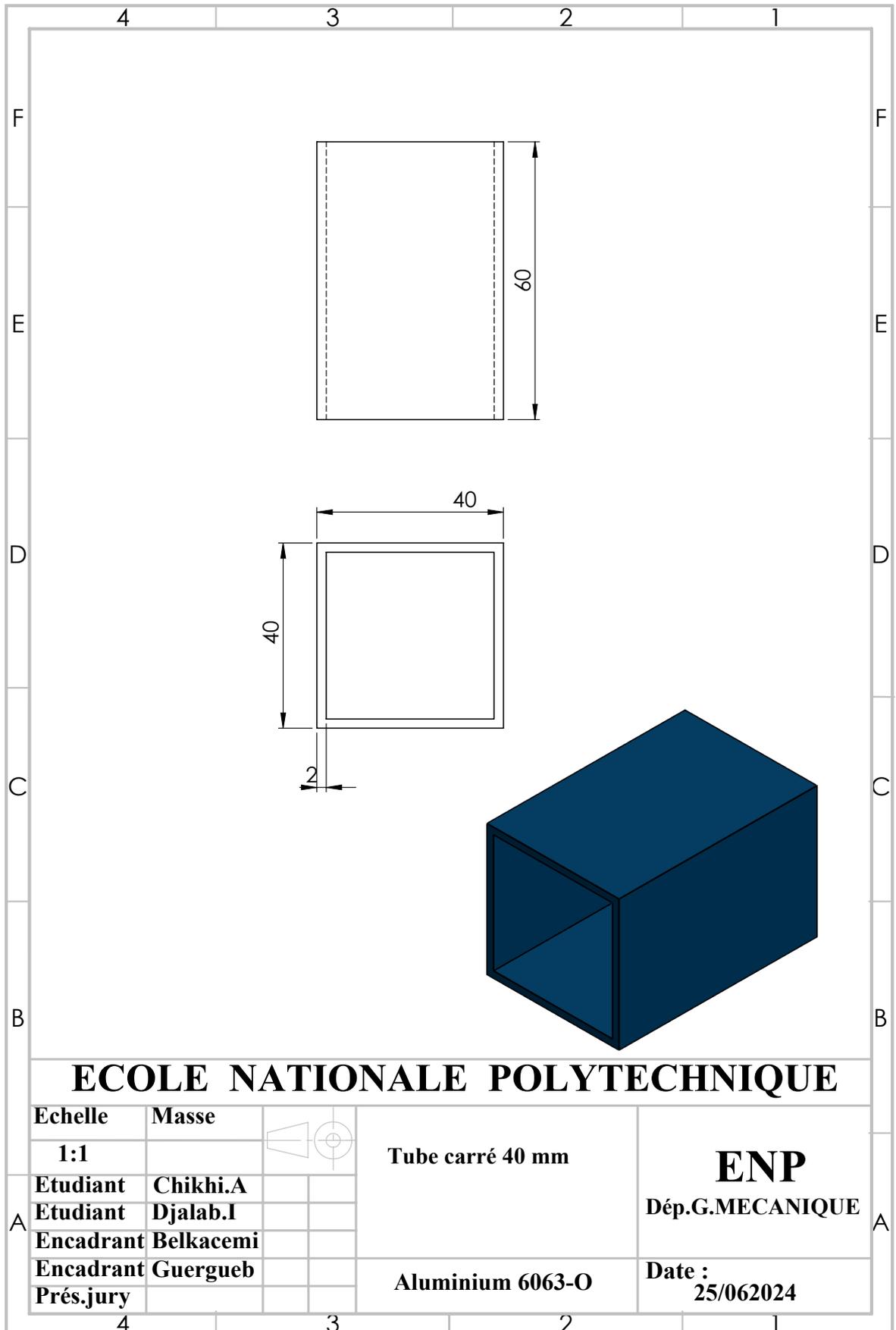
Bibliographie

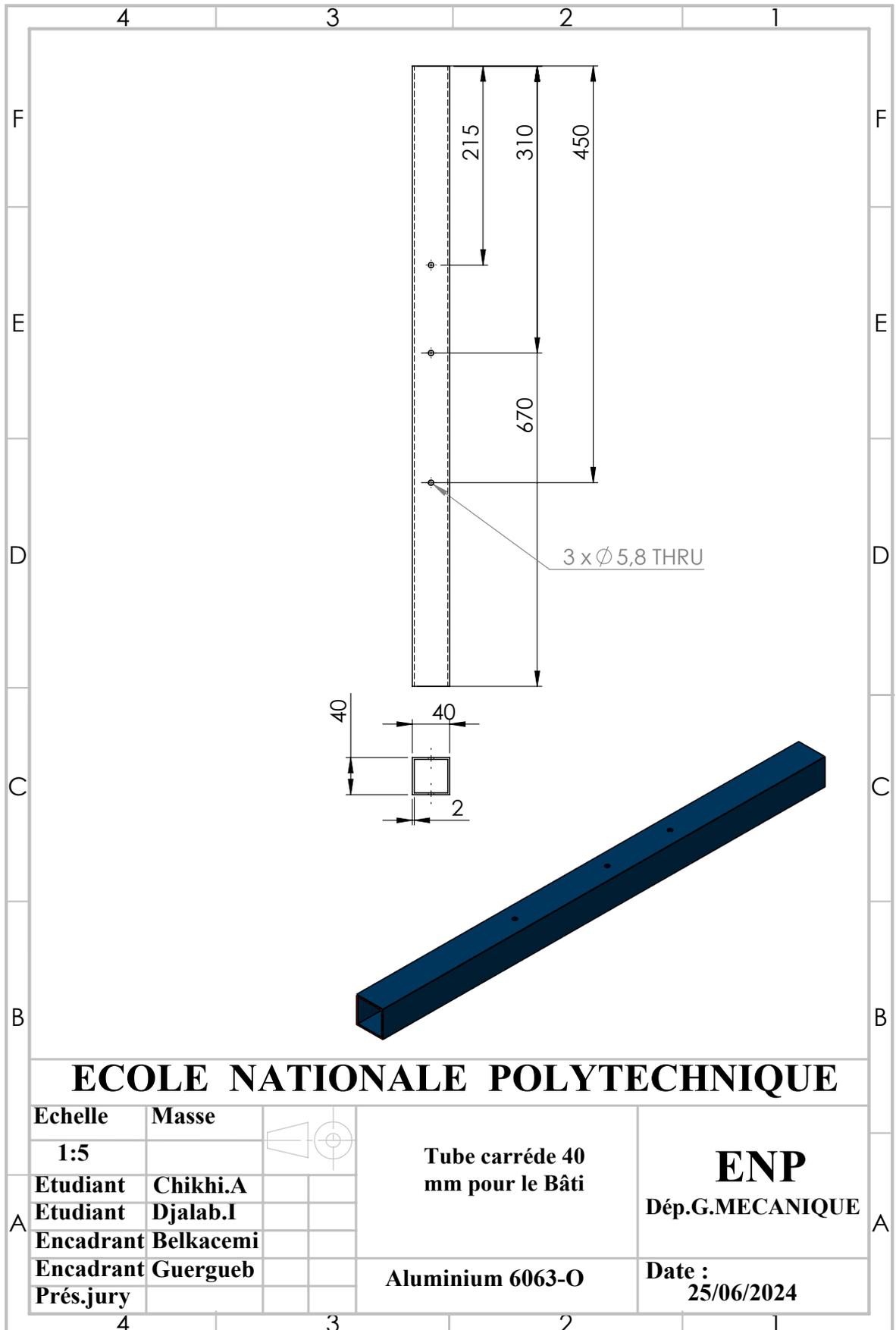
- [1] L. Benabou, L. Nhat, and Q. B. Tao. Étude de la tenue à la rupture d'un nouvel alliage de brasure sans plomb pour les applications d'électronique de puissance, August 2017.
- [2] Machines d'essais de traction pour applications statiques. <https://www.zwickroell.com/fr/produits/machines-dessais-des-materiaux-statiques/machines-traction-pour-applications-statiques/machines-dessais-de-traction/> [Consulté le 05/03/2024].
- [3] Mts. www.mts.com [Consulté le 20/03/2024].
- [4] Astm international (american society for testing and materials) standards for mechanical testing, such as astm e8 and astm d638.
- [5] W.D. Callister and D.G. Rethwisch. *Materials Science and Engineering : An Introduction*. John Wiley and Sons, 10th edition, 2018.
- [6] Tensile testing machine for high test loads from 330 kn. <https://www.pharmaceutical-tech.com/products/zwickroell-pvt-ltd/tensile-testing-machine-for-high-test-loads-from-330-kn> [Consulté le 05/04/2024].
- [7] Imen Elkhaldi-Mkaouar. Application de la différenciation automatique pour l'identification, l'optimisation et l'étude de sensibilité dans quelques problèmes mécaniques. 2012.
- [8] Astm a370-21, standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products.
- [9] Astm e8/e8m-21, standard test methods for tension testing of metallic materials, 2021.
- [10] Dimensions éprouvettes essais de traction. <http://www.atomer.fr/1/1dimensions-eprouvettes-essais-de-traction.html> [Consulté le 05/03/2024].
- [11] Astm d638-14, standard test method for tensile properties of plastics.
- [12] G. Dieter. *Mechanical Metallurgy*. McGraw Hill, New York, 3rd edition, 1988.
- [13] F. P. Beer, E. R. Johnston, J. T. DeWolf, and D. F. Mazurek. *Mechanics of Materials*. McGraw-Hill, 8th edition, 2020.
- [14] L. Rassoul and M. Ferhi. Etude, conception et fabrication d'un dispositif d'essais en traction biaxiale sur éprouvettes cruciformes. <https://dl.ummtto.dz/bitstream/handle/ummtto/3977/Rassoul%2C%20L.%20Ferhi%2C%20M..pdf?sequence=1>, 2016. [Consulté le 07/04/2024].
- [15] Lecompte et al. Dispositif d'essais biaxiaux, 2007.
- [16] Kuwabara et al. Dispositif d'essais biaxiaux, 1998.
- [17] N. Bhatnagar, R. Bhardwaj, P. Selvakumar, and M. Brieu. Development of a biaxial tensile test fixture for reinforced thermoplastic composites. *Polymer Testing*, 26(2) :154–161, April 2007.
- [18] E. Hoferlin, A. V. Bael, P. V. Houtte, G. Steyaert, and C. D. Maré. The design of a biaxial tensile test and its use for the validation of crystallographic yield loci.

- Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 8(4) :423–433, July 2000.
- [19] S. B. Lin and J. L. Ding. Experimental study of the plastic yielding of rolled sheet metals with the cruciform plate specimen. *International Journal of Plasticity*, 11(5) :583–604, January 1995.
- [20] A. Makinde, L. Thibodeau, and K. W. Neale. Development of an apparatus for biaxial testing using cruciform specimens. *Experimental Mechanics*, 32(2) :138–144, June 1992.
- [21] D. E. Green, K. W. Neale, S. R. MacEwen, A. Makinde, and R. Perrin. Experimental investigation of the biaxial behaviour of an aluminum sheet. *International Journal of Plasticity*, 20(8–9) :1677–1706, August 2004.
- [22] M. R. L. Gower and R. M. Shaw. Towards a planar cruciform specimen for biaxial characterisation of polymer matrix composites. *Applied Mechanics and Materials*, 24–25 :115–120, June 2010.
- [23] J. S. Welsh and D. F. Adams. Development of an electromechanical triaxial test facility for composite materials. *Experimental Mechanics*, 40(3) :312–320, September 2000.
- [24] J. S. Welsh, J. S. Mayes, C. T. Key, and R. N. McLaughlin. Comparison of mct failure prediction techniques and experimental verification for biaxially loaded glass fabric-reinforced composite laminates. *Journal of Composite Materials*, 38(24) :2165–2181, December 2004.
- [25] C. Doudard, M. Poncelet, S. Calloch, C. Boue, F. Hild, and A. Galtier. Determination of an hcf criterion by thermal measurements under biaxial cyclic loading. *International Journal of Fatigue*, 29(4) :748–757, April 2007.
- [26] Essai bi-axial et tri-axial biomateriaux. <https://www.zwickroell.com/fr/secteurs-dactivite/medicalpharma/biomateriaux-et-recherche-clinique/essai-bi-axial-et-tri-axial-biomateriaux/> [Consulté le 09/04/2024].
- [27] Planar. <https://www.jddvorak.cz/planar> [Consulté le 10/04/2024].
- [28] H. Elizalde R. Ramirez D. A. A. Escárpita, D. Cárdenas and O. Probst. Biaxial tensile strength characterization of textile composite materials. In *N. Hu (Ed.)*. Rijeka, 2012.
- [29] D. A. A. Escárpita, D. Cárdenas, H. Elizalde, R. Ramirez, and O. Probst. Biaxial tensile strength characterization of textile composite materials. <https://doi.org/10.5772/48105>, 2012 [Consulté le 12/04/2024].
- [30] S. Issam. Etude et conception d’une micromachine de traction bi-axiale automatisée. <http://repository.enp.edu.dz/xmlui/handle/123456789/6023>, 2020 [Consulté le 12/04/2024].
- [31] G. Anis and G. Aissa. Réalisation d’une micro-machine de traction biaxiale automatisée. <http://repository.enp.edu.dz/jspui/handle/123456789/10967>, 2023.
- [32] British Standards Institution. *British Standard Specification No. BS5000, Part 60*. British Standards Institution, 1982.
- [33] Automatisation et instrumentation des machines de traction biaxiales. <https://slideplayer.fr/slide/9556828/>.
- [34] CW Motor. 62 series motor. <https://en.cwmotor.cn/product/62.html>, 2024 [Consulté le 26/05/2024].
- [35] Nema 34 stepper motor specifications. <https://www.ato.com/Content/doc/nema-34-stepper-motor-specs.pdf>.
- [36] J. A. Smith. Advances in switching power supply technology. *Journal of Power Electronics*, 10(3) :123–145, 2018.

- [37] Kt 8-30 vdc datasheet. <https://www.farnell.com/datasheets/2056179.pdf?ga=1.152577328.880870297.1479740269>[Consulté le 02/06/2024].
- [38] SAMM Market. Raspberry pi camera v2. <https://market.samm.com/raspberry-pi-camera-v-2>, 2024 [Consulté le 02/07/2024].
- [39] Raspberry pi 4 model b datasheet. <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-datasheet.pdf> [Consulté le 12/06/2024].
- [40] KBD Tool. Digital force gauge hf model. <https://www.kbdtool.com/Digital-Force-Gauge-HF-Model-pd43571682.html>, 2024 [Consulté le 11/06/2024].

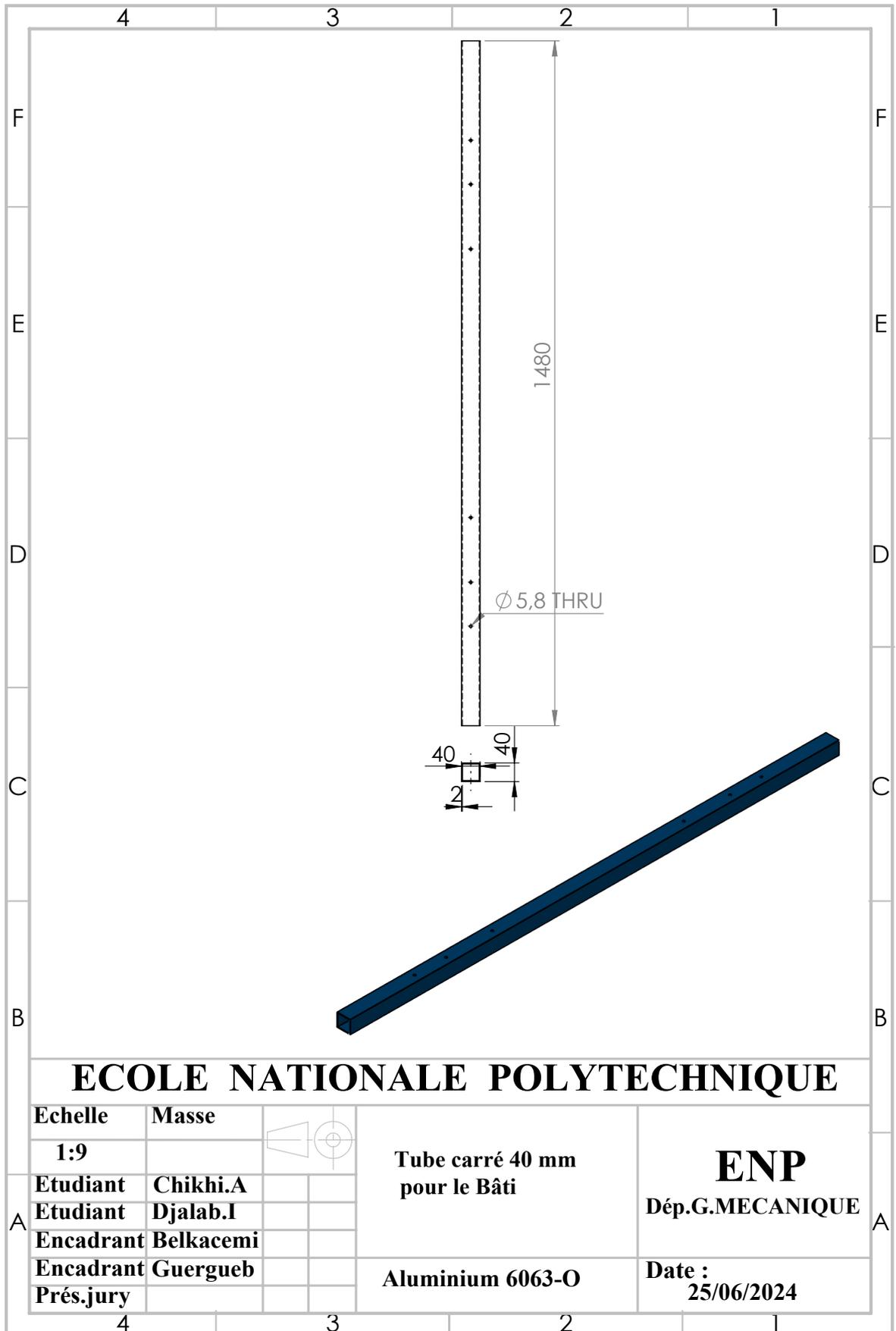
Annexe A





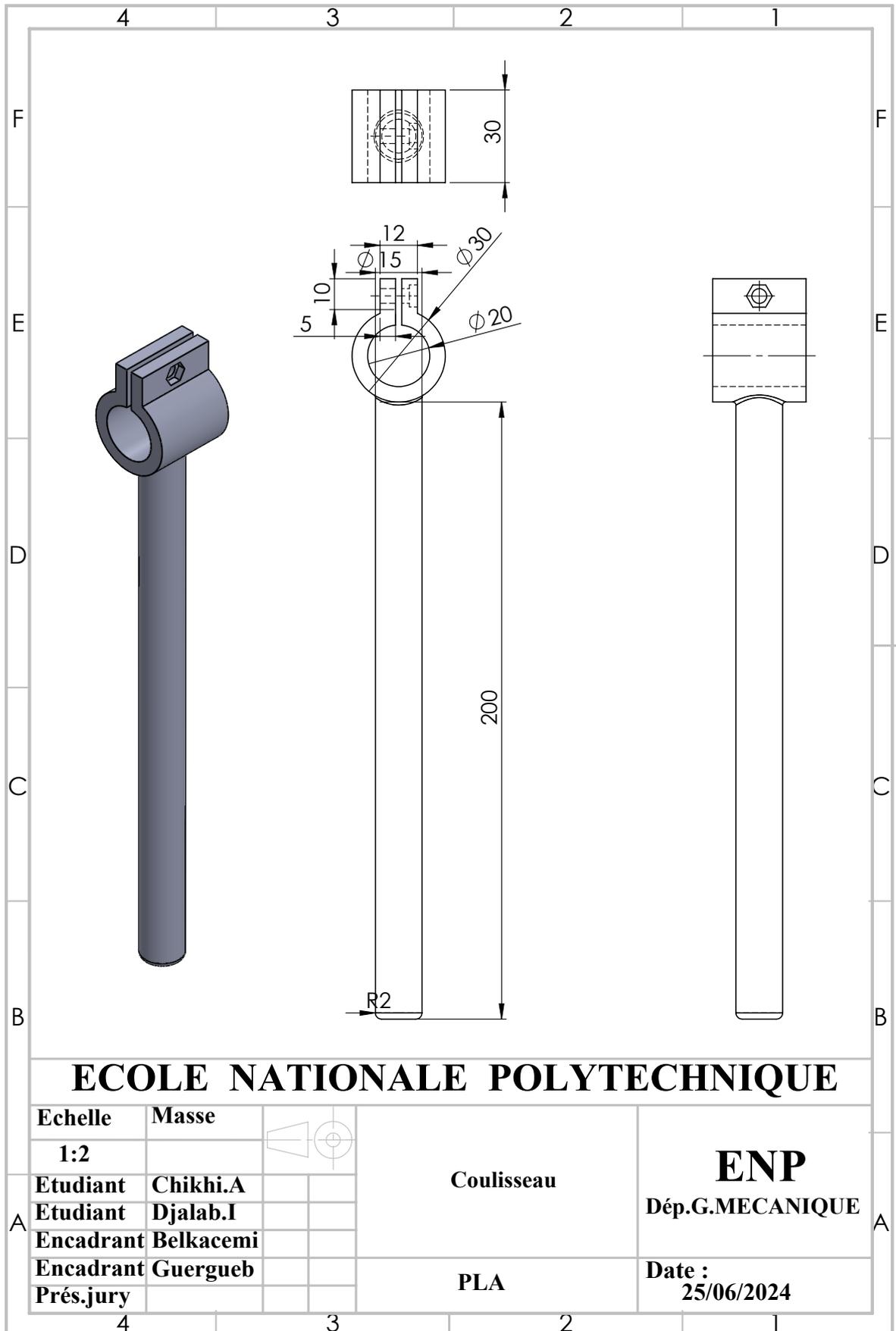
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

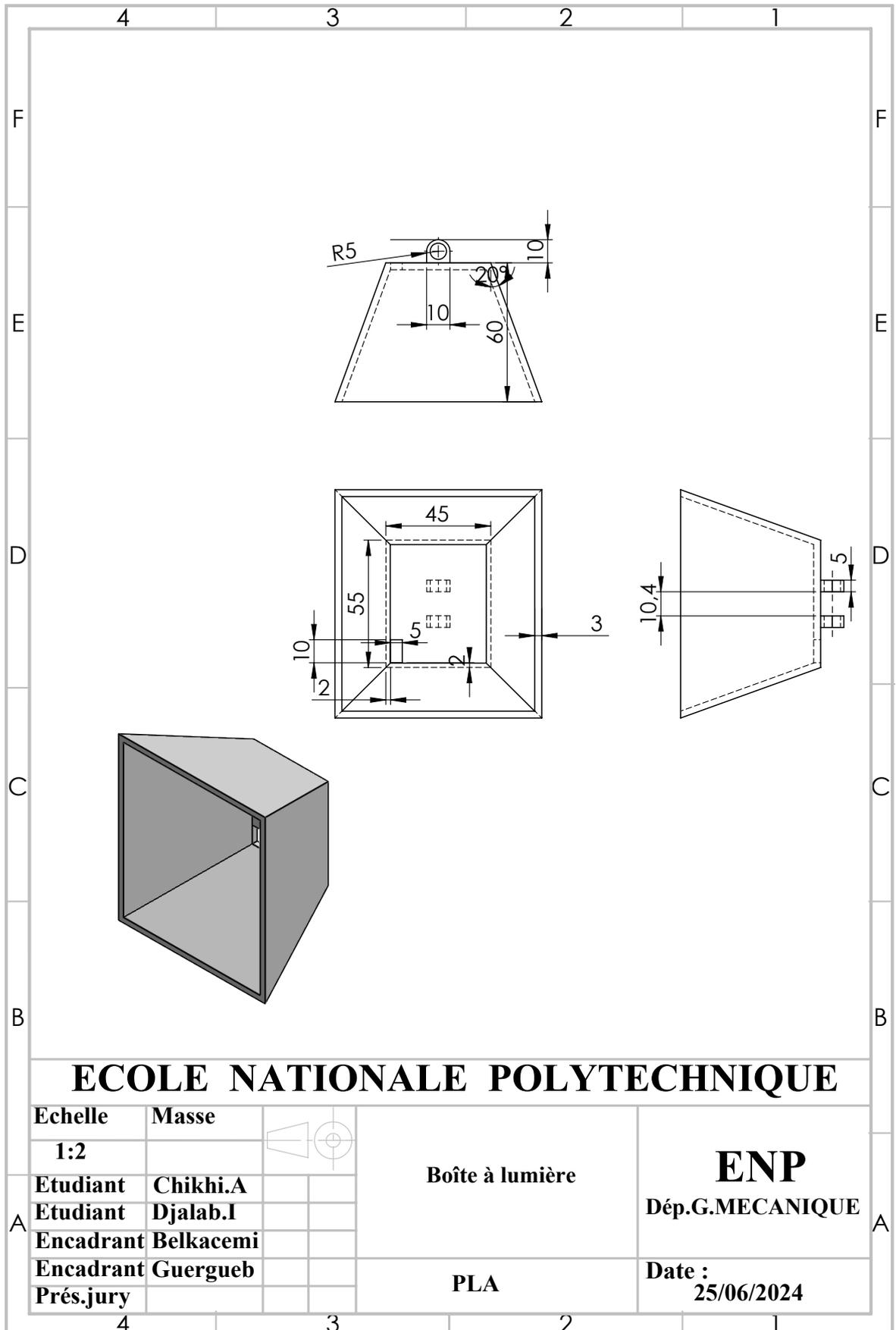
Echelle	Masse		Tube carré de 40 mm pour le Bâti	ENP Dép.G.MECANIQUE
1:5				
Etudiant	Chikhi.A			
Etudiant	Djalab.I			
Encadrant	Belkacemi			
Encadrant	Guergueb			
Prés.jury			Aluminium 6063-O	Date : 25/06/2024



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

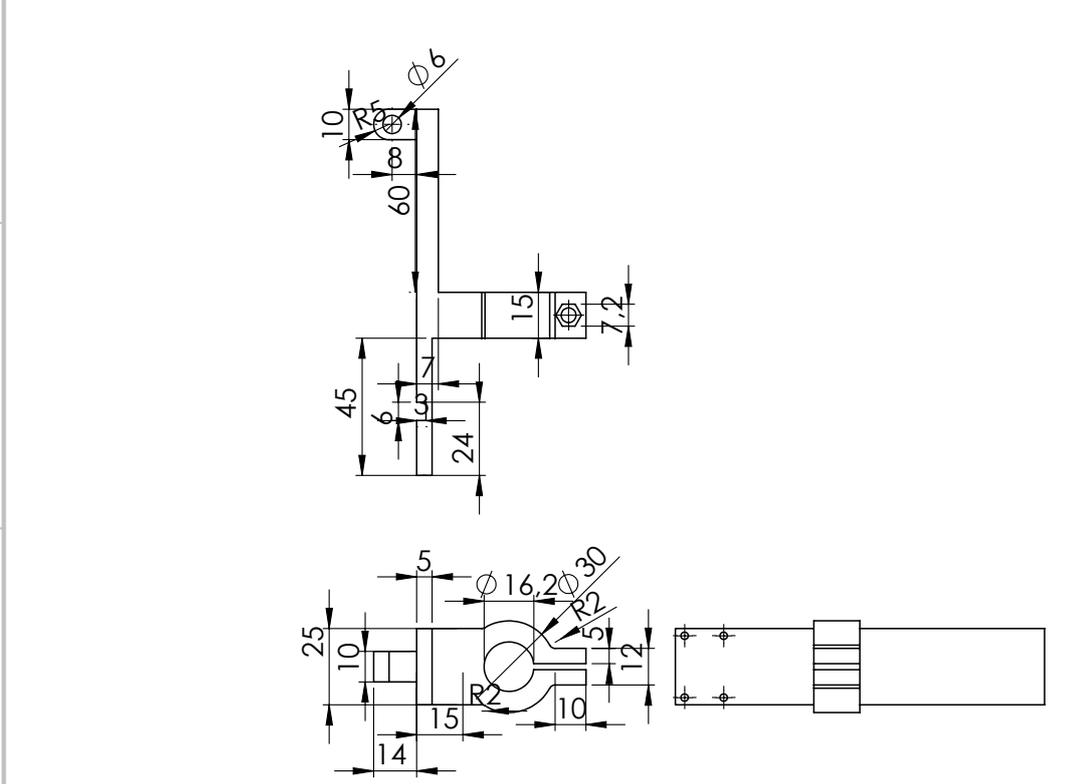
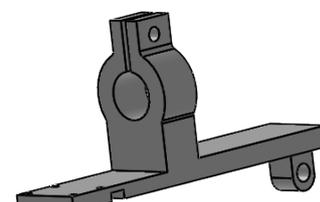
Echelle	Masse			
1:9			Tube carré 40 mm pour le Bâti	ENP Dép.G.MECANIQUE
Etudiant	Chikhi.A			
Etudiant	Djalab.I			
Encadrant	Belkacemi			
Encadrant	Guergueb			
Prés.jury			Aluminium 6063-O	Date : 25/06/2024

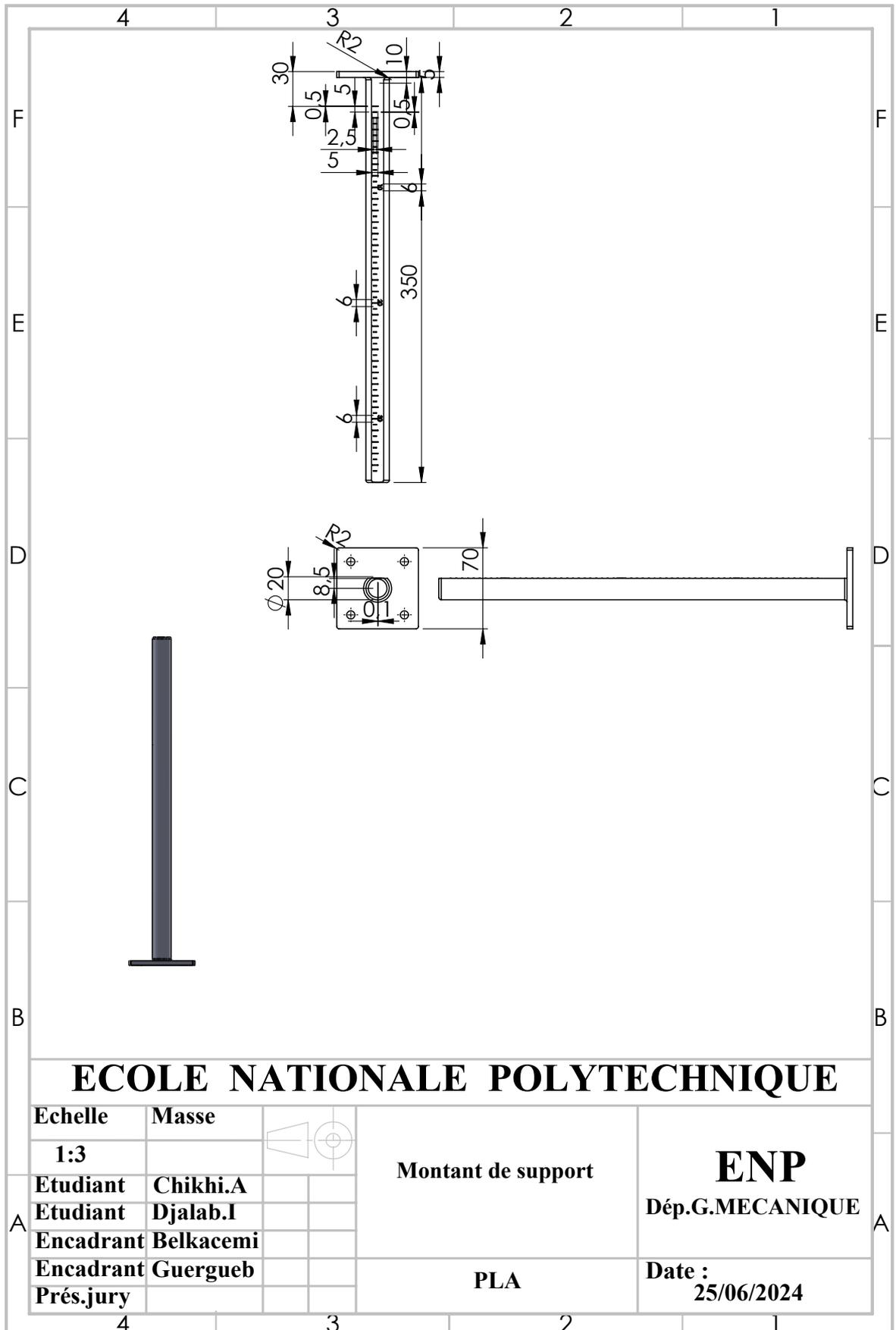




ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

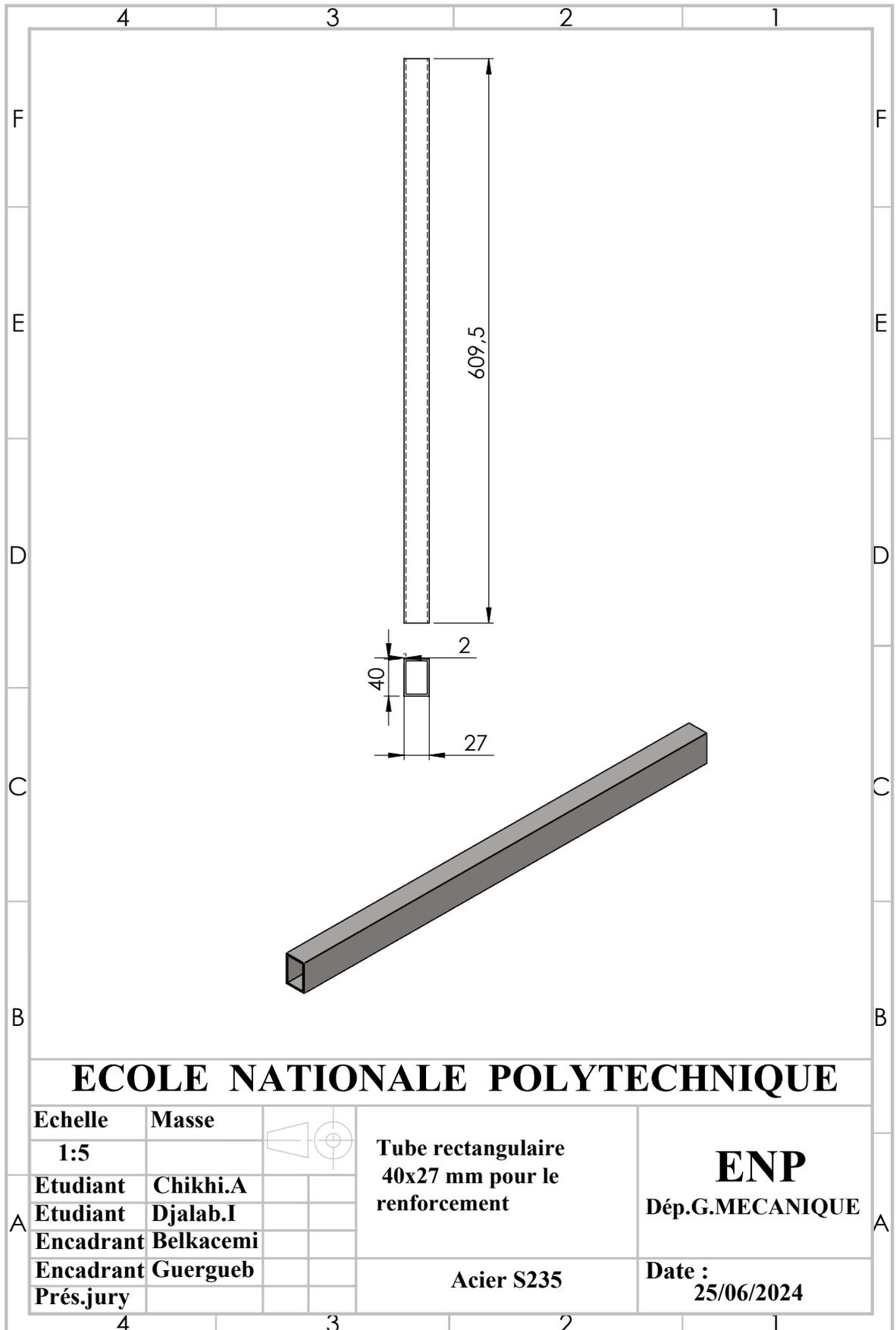
Echelle	Masse			
1:2			Boîte à lumière	ENP
Etudiant	Chikhi.A			Dép.G.MECANIQUE
Etudiant	Djalab.I			
Encadrant	Belkacemi			
Encadrant	Guergueb		PLA	Date :
Prés.jury				25/06/2024

	4	3	2	1																										
F				F																										
E				E																										
D				D																										
C				C																										
B				B																										
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE																														
A	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 25%;">Echelle</td> <td style="width: 25%;">Masse</td> <td style="width: 25%; text-align: center;">  </td> <td rowspan="2" style="text-align: center; vertical-align: middle;">Support de caméra</td> <td rowspan="2" style="text-align: center; vertical-align: middle;"> ENP Dép.G.MECANIQUE </td> </tr> <tr> <td>1:2</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Etudiant</td> <td>Chikhi.A</td> <td></td> <td rowspan="5" style="text-align: center; vertical-align: middle;">PLA</td> <td rowspan="5" style="text-align: center; vertical-align: middle;"> Date : 25/06/2024 </td> </tr> <tr> <td>Etudiant</td> <td>Djalab.I</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Encadrant</td> <td>Belkacemi</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Encadrant</td> <td>Guergueb</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Prés.jury</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	Echelle	Masse		Support de caméra	ENP Dép.G.MECANIQUE	1:2			Etudiant	Chikhi.A		PLA	Date : 25/06/2024	Etudiant	Djalab.I		Encadrant	Belkacemi		Encadrant	Guergueb		Prés.jury			4	3	2	1
Echelle	Masse		Support de caméra	ENP Dép.G.MECANIQUE																										
1:2																														
Etudiant	Chikhi.A		PLA	Date : 25/06/2024																										
Etudiant	Djalab.I																													
Encadrant	Belkacemi																													
Encadrant	Guergueb																													
Prés.jury																														



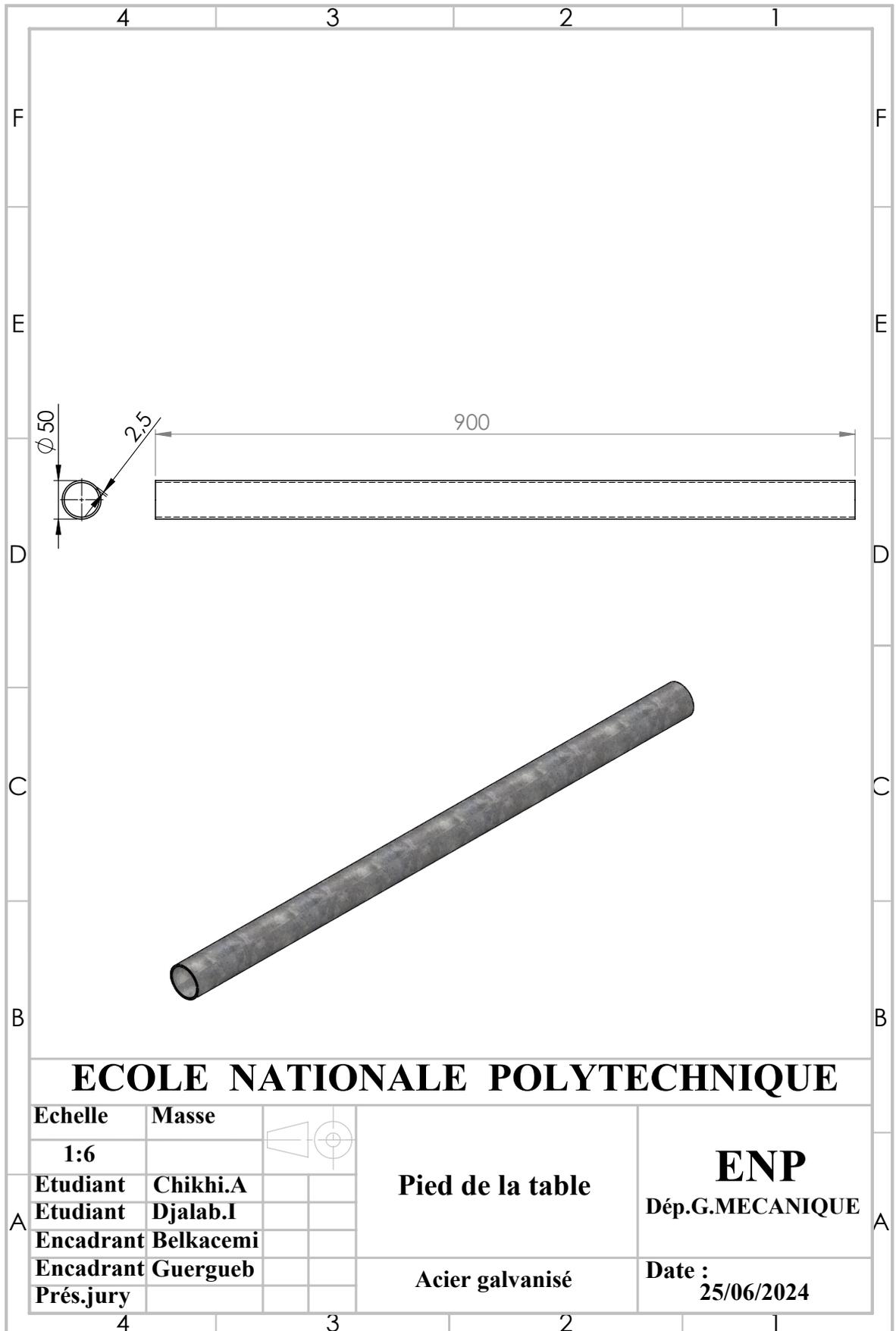
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse			
1:3			Montant de support	ENP Dép.G.MECANIQUE
Etudiant	Chikhi.A			
Etudiant	Djalab.I			
Encadrant	Belkacemi			
Encadrant	Guergueb		PLA	Date : 25/06/2024
Prés.jury				



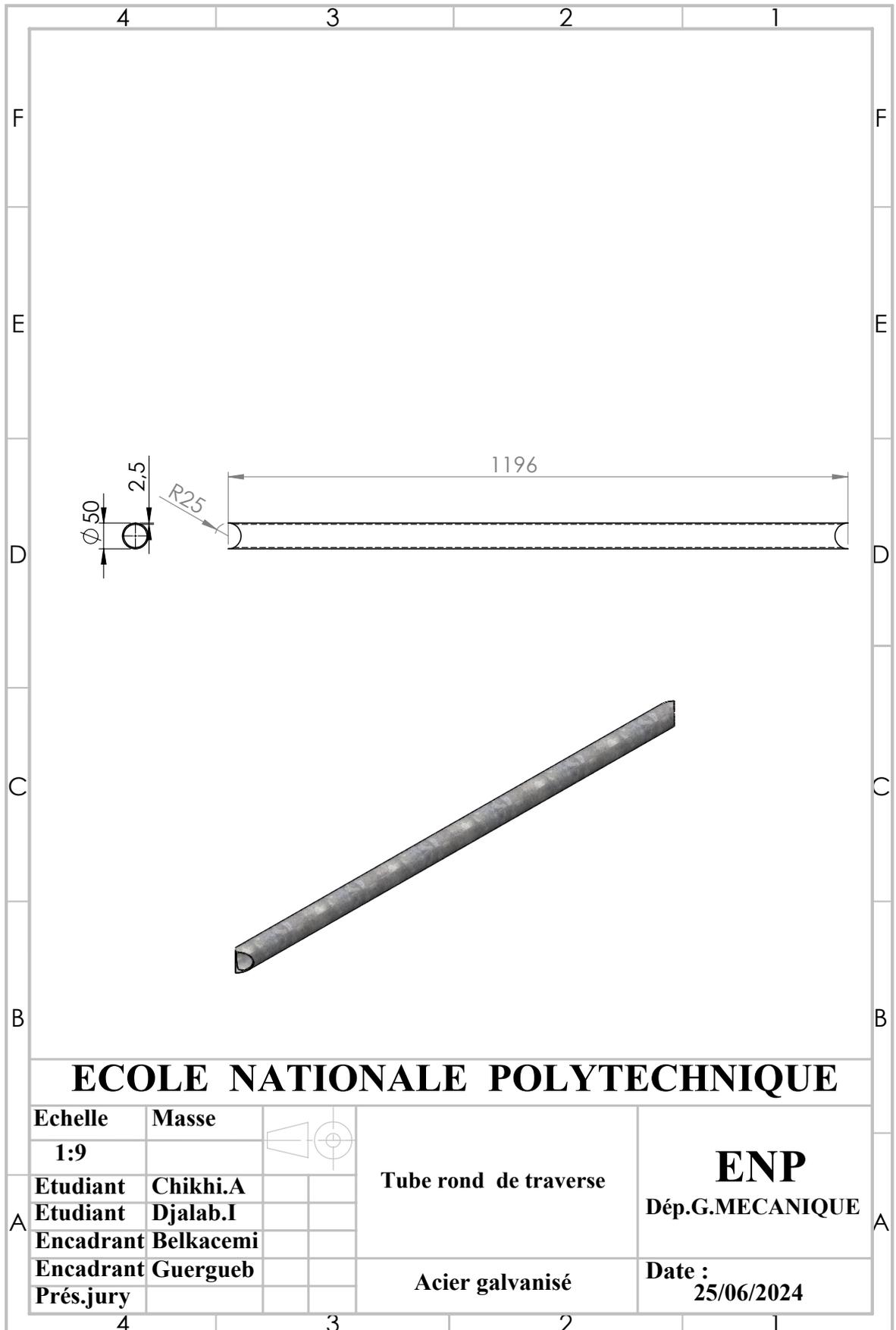
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse				Tube rectangulaire 40x27 mm pour le renforcement	ENP Dép.G.MECANIQUE
1:5						
Etudiant	Chikhi.A					
Etudiant	Djalab.I					
Encadrant	Belkacemi					
Encadrant	Guergueb					
Prés.jury					Acier S235	Date : 25/06/2024



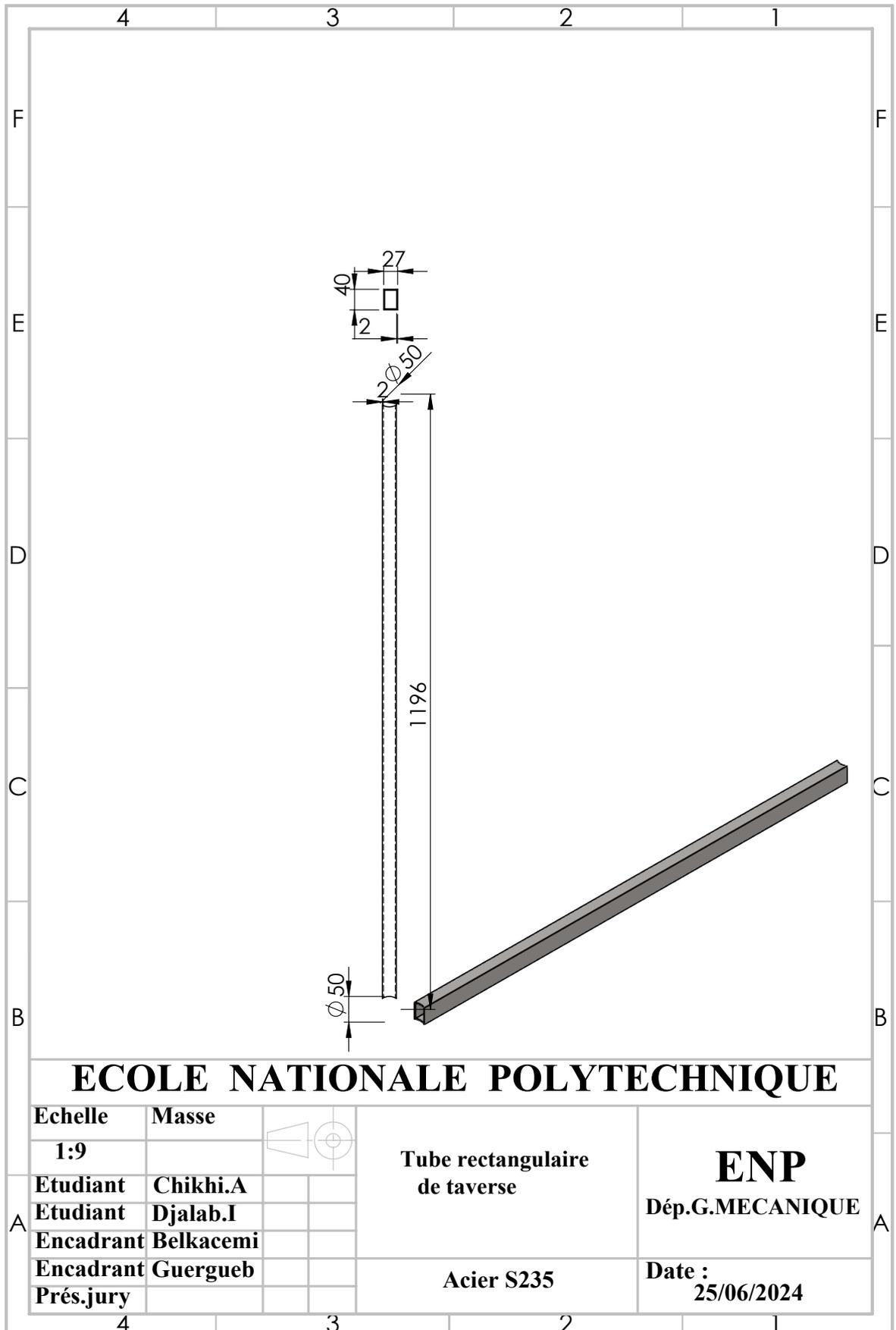
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

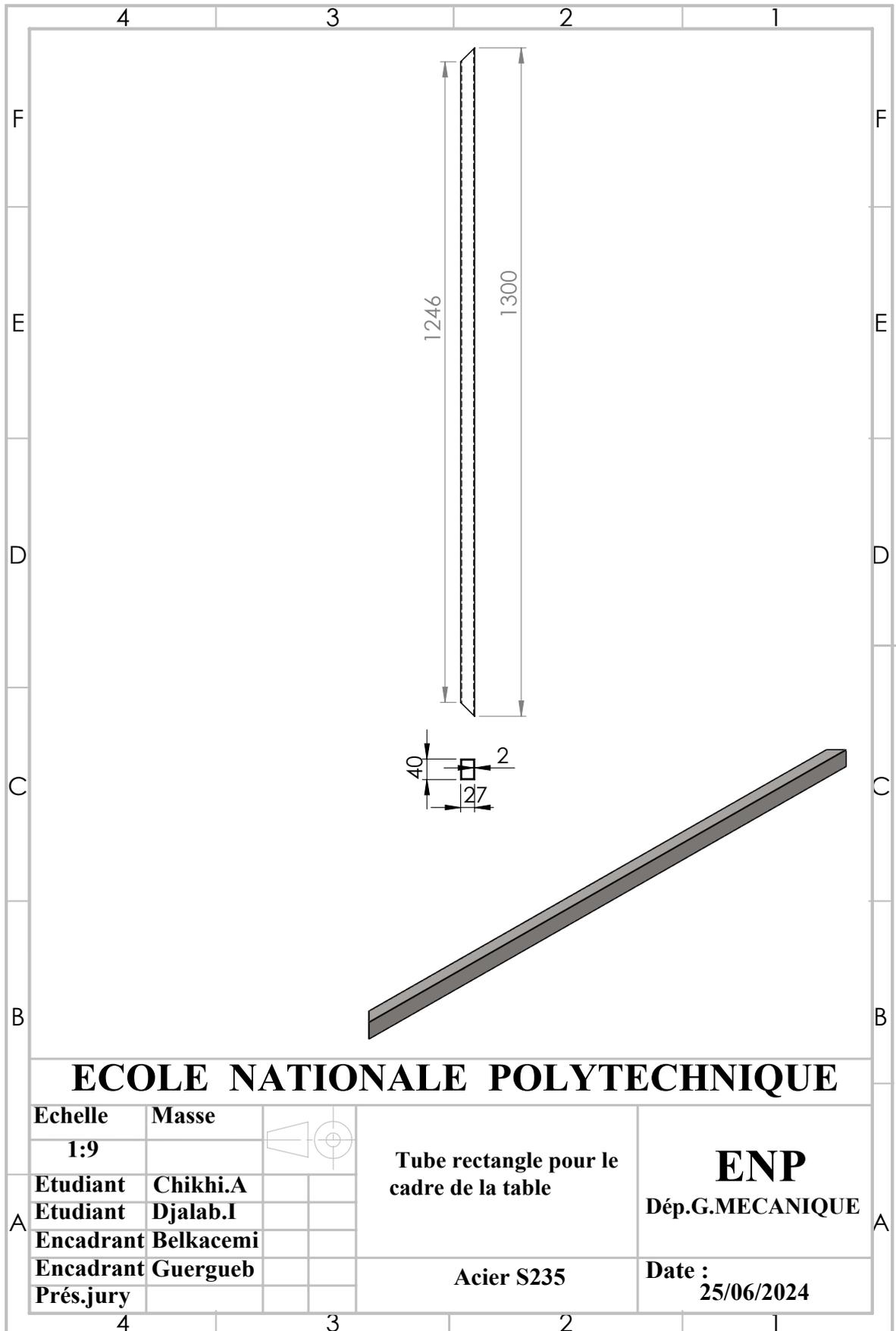
Echelle	Masse		Pied de la table	ENP Dép.G.MECANIQUE
1:6				
Etudiant	Chikhi.A		Acier galvanisé	Date : 25/06/2024
Etudiant	Djalab.I			
Encadrant	Belkacemi			
Encadrant	Guergueb			
Prés.jury				



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

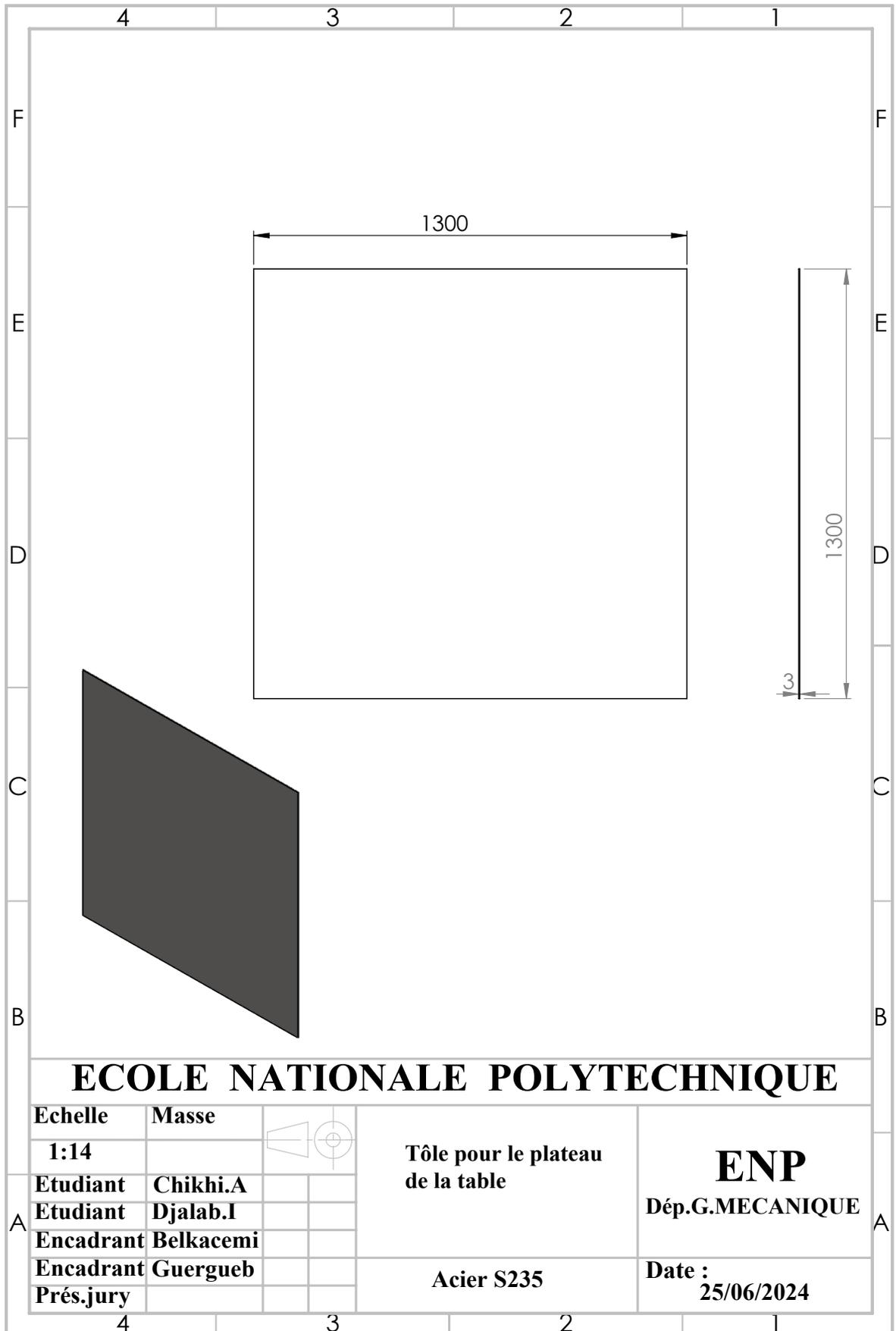
A	Echelle	Masse		Tube rond de traverse Acier galvanisé	ENP Dép.G.MECANIQUE Date : 25/06/2024
	1:9				
	Etudiant	Chikhi.A			
	Etudiant	Djalab.I			
	Encadrant	Belkacemi			
	Guergueb				
	Prés.jury				





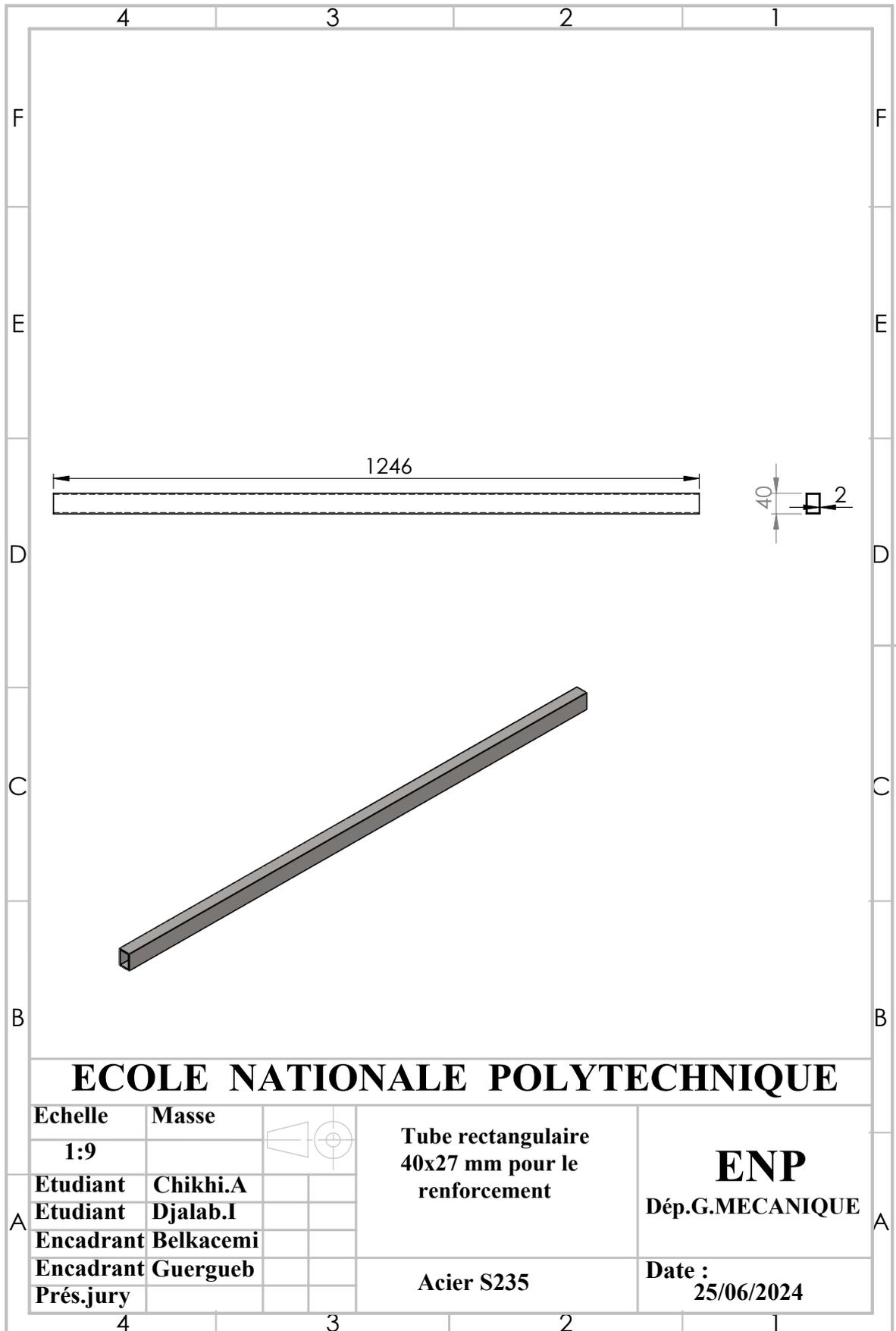
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse				Tube rectangle pour le cadre de la table	ENP Dép.G.MECANIQUE
1:9						
Etudiant	Chikhi.A					
Etudiant	Djalab.I					
Encadrant	Belkacemi					
Encadrant	Guergueb					
Prés.jury					Acier S235	Date : 25/06/2024



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse		Tôle pour le plateau de la table	ENP Dép.G.MECANIQUE
1:14				
Etudiant	Chikhi.A		Acier S235	Date : 25/06/2024
Etudiant	Djalab.I			
Encadrant	Belkacemi			
Encadrant	Guergueb			
Prés.jury				



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse			Tube rectangulaire 40x27 mm pour le renforcement	ENP Dép.G.MECANIQUE
1:9					
Etudiant	Chikhi.A			Acier S235	Date : 25/06/2024
Etudiant	Djalab.I				
Encadrant	Belkacemi				
Encadrant	Guergueb				
Prés.jury					

Annexe B

SolidWorks est une application de conception et d'ingénierie assistées par ordinateur de modélisation solide, publiée par Dassault Systèmes. Selon l'éditeur, plus de deux millions d'ingénieurs et de concepteurs dans plus de 165 000 entreprises utilisaient SolidWorks en 2013.

KiCad est un logiciel gratuit de conception électronique pour dessiner des schémas électroniques et concevoir des circuits imprimés. KiCad est publié sous la licence GNU GPL.

Flutter est un kit de développement d'interface utilisateur open-source créé par Google. Il est utilisé pour développer des applications multiplateformes pour Android, iOS, Linux, macOS, Windows, Google Fuchsia et le Web à partir d'une base de code unique. Décrit pour la première fois en 2015, Flutter a été publié en mai 2018.

Node Js est une plateforme opensource en JavaScript, orientée vers les applications réseau événementielles hautement concurrentes qui doivent pouvoir évoluer. Il utilise la machine virtuelle V8, la bibliothèque libuv pour sa boucle d'événements et implémente les spécifications Common JS sous licence MIT.

WebSocket est un protocole de communication informatique, fournissant des canaux de communication duplex intégral sur une connexion TCP unique. Le protocole WebSocket a été normalisé par l'IETF dans la RFC 6455 en 2011. La spécification d'API actuelle permettant aux applications Web d'utiliser ce protocole est appelée WebSockets.