République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Dr Yahia FARES de Médéa
Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique

Mémoire de Fin d'Etudes

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master en Mécatronique

Titre

Conception d'une machine d'essais miniature pour essais mécaniques sur matériaux composites

Préparé par : Imane CHERAIR
Fatma Zohra MAZOUNI

Dirigé par : Dr Nasreddine AMOURA
Dr Nacera CHERIET

Juin 2024

Dédicaces

Ce projet de fin d’études de master est dédié à mes parents, Bahia BEN KAIDALI ma mère et Slimane mon père, en reconnaissance de leur soutien constant. À mes sœurs, mon frère, à toute ma famille, à mes professeurs, à mon binôme et à tous mes amis, je leur adresse également cette dédicace. Enfin, je souhaite dédier ce travail à toutes les personnes qui me sont chères et que j'aime, avec mes meilleurs vœux de bonheur, de santé et de réussite.

Imane

Dédicaces

À mes parents, pour leur soutien indéfectible et leur encouragement constant tout au long de ce parcours académique.

À mes professeurs, pour leur expertise, leur guidance et leur inspiration qui ont façonné ma passion pour la science des matériaux.

À mes amis et camarades de classe, pour leur camaraderie et leur soutien moral durant les moments de doute et de challenge.

Et enfin, à tous ceux qui croient en l'importance de la recherche et de l'innovation, cette humble contribution leur est dédiée, avec l'espoir qu'elle puisse contribuer, ne serait-ce qu'un peu, à l'avancement de la science et de la technologie.

Fatima

Remerciements

Nous remercions « ALLAH », le tout puissant pour nous avoir donné le courage, la volonté et la force d'établir ce mémoire.

Nos encadrants, Dr. Nasreddine AMOURA et Dr Nacira CHERIET, pour avoir accepté avec bienveillance l'encadrement de ce mémoire. Nous les remercions pour l'aide précieuse et indéfectible qu'ils nous ont apportée, pour leur attention et pour la confiance qu'ils nous ont accordée durant toute la période de préparation de ce travail.

L'ensemble des employés de **SKE Berrouaghia**.

Tous les enseignants de L'**Université Yahia Farès de Médéa** qui ont participé à notre formation.

Toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

ملخص

هذا البحث لنيل درجة الماستر لتصميم وتطوير الة اختبار مصغرة مخصصة لتحديد خصائص المواد المركبة. تلعب هذه المواد دورا حيويا في مختلف القطاعات الصناعية بسبب خصائصها الميكانيكية الممتازة. تتطلب تعقيدات سلوكها الميكانيكي تحديدا دقيقا، خاصة من خلال اختبارات الشد والانحناء. تتمثل المشكلة الرئيسية في تصميم الة اختبار مناسبة لهذه المواد، مدمجة بأجهزة استشعار لقياسات دقيقة. تم التصميم باستخدام برنامج SolidWorks، وأظهرت النتائج المحصل عليها، سواء كانت رقمية او تجريبية، تطابقا خطيا جيدا بين القوة والتشوه.
الكلمات المفتاحية: المواد المركبة، اختبارات الشد، أجهزة مستشعر القوة والازاحة.

Résumé

Ce mémoire de master explore la conception et le développement d'une machine d'essais miniature dédiée à la caractérisation des matériaux composites. Ces matériaux jouent un rôle crucial dans divers secteurs industriels en raison de leurs propriétés mécaniques supérieures. La complexité de leur comportement mécanique nécessite une caractérisation minutieuse, notamment à travers des essais de traction. La problématique centrale consiste à concevoir une machine d'essais adaptée à ces matériaux, intégrant des capteurs pour des mesures précises. La conception est réalisée sous SolidWorks, et les résultats obtenus, bien numériques qu'expérimentaux, montrent une très bonne corrélation linéaire entre la force et la déformation.
Mots clés : Matériaux composites, Essais de traction, Capteurs de force et de déplacement.

Summary

This master's thesis explores the design and development of a miniature testing machine dedicated to the characterization of composite materials. These materials play a crucial role in various industrial sectors due to their superior mechanical properties. The complexity of their mechanical behaviour requires meticulous characterization, particularly through tensile tests. The central issue is to design a testing machine suitable for these materials, integrating sensors for precise measurements. The design is carried out using SolidWorks, and the results obtained, both numerical and experimental, show a very good linear correlation between force and deformation.
Keywords: Composite materials, Tensile testing, Force and displacement sensors.

Sommaire

Remerciements IV

Sommaire.....6

Liste des figures.....11

Liste des abréviations 13

Introduction générale.....6

1 Les matériaux composites.....15

1.1 Introduction.....16

1.2 Définition des composites.....16

1.3 Différents constituants des composites.....16

1.3.1 Les renforts.....17

1.3.2 Les matrices.....17

1.3.3 Les charges 17

1.4 Classification des composites 18

1.4.1 Classification suivant la forme des constituant 18

1.4.2 Classification selon la nature des constituants 19

1.5 Architecture des composites 20

1.5.1 Les stratifiés.....20

1.5.2 Matériaux sandwich.....21

1.6 Types de matériaux composites.....22

1.6.1 Composite à grande diffusion (GD) 22

1.6.2 Composite à haute performance (HP) 22

1.7 Essais mécaniques sur les composites 22

1.7.1 Le rôle des essais dans l'évaluation des propriétés mécaniques des composites 23

1.7.2 Machine universelle d'essai mécanique 23

1.8 Différents Essais mécaniques 24

1.9 Essai de flexion 24

1.9.2 Essai de traction 26

1.9.3 La courbe de traction 26

1.10 Mécanisme de déformation des composites 27

1.11 Niveaux d'observation de déformation dans les composites 27

1.12 Élasticité linéaire des solides 27

1.13 Module de Young 28

1.14 Conclusion 28

2 Les capteurs dans le domaine mécanique 30

2.1 Introduction 31

2.2 Définition des capteurs utilisés dans ce projet 31

2.3 Principaux types de capteurs ..... **Erreur ! Signet non défini.**

2.3.1 Capteur de force 31

2.3.2 Capteur de déplacement 34

2.4 La carte de commande Arduino 35

2.4.1 Définition de la carte Arduino 35
2.4.2 Domaines d'applications 36
2.4.3 La carte utilisée dans ce projet 36
2.5 Le logiciel IDE Arduino (Integrated Development Environment) 38
2.6 Les amplificateurs 39
2.6.1 Définition des amplificateurs 39
2.6.2 Principe de fonctionnement 39
2.6.3 Types d'amplificateurs 39
2.7 Conclusion du deuxieme chapitre 41
3 Conception et simulation numérique 42
3.1 Introduction 43
3.2 Le programme utilisé dans la conception de la machine d'essais 43
3.2.1 Définition de SolidWorks 43
3.2.2 Fonctionnement de SolidWorks 44
3.3 Stabilité mécanique en présence de forces externes 44
3.4 Raideur et rigidité des matériaux 44
3.5 Les contraintes 45
3.6 Conception des composants de la machine d'essais 45
3.6.1 Conception de châssis 46
3.6.2 Le moteur pas à pas 46
3.6.3 Conception du capteur de force 47

3.6.4 Conception du capteur de déplacement 47

3.6.5 Conception de support inférieure de moteur pas à pas 48

3.6.6 Conception de guide écrou 49

3.6.7 Conception de support supérieure 49

3.6.8 Conception de l'accouplement 49

3.6.9 Conception de la plaque de fixation 50

3.6.10 Conception de la tige de guidage 50

3.7 Simulation numérique 51

3.7.1 Simulation de châssis 52

3.8 Conclusion du troisième chapitre 54

4 Composants électriques essentiels et contrôle de mouvement 56

4.1 Introduction 57

4.2 Partie électronique : Les composants électriques utilisés dans notre projet 57

4.2.1 Moteur pas à pas : Définition et principes de fonctionnement 57

4.2.2 Drive 8825 ..... **Erreur ! Signet non défini.**

4.3 Module HX711 59

4.4 Plaque d'essais 59

4.5 Partie de programmation 60

4.5.1 Programme de calibration (ARDUINO) 60

4.5.2 Programme de capteur de force (ARDUINO) 61

4.5.3 Programme de capteur de déplacement (ARDUINO) 62

4.5.4 Programme de capteur de force et de déplacement (ARDUINO) 63

4.6 Installation finale de la machine de flexion 64

4.7 Prototypage d'un circuit de mesure de force et de déplacement avec Arduino Uno . 64

4.7.1 Composants du circuit 65

4.7.2 Connexions et fonctionnement du circuit 65

4.7.3 Fonctionnement du circuit 66

4.8 Conclusion du quatrième chapitre 66

Conclusion générale 68

Références bibliographiques 70

Annexes 73

Liste des figures

Figure 1-1 Différents types de fibres dans les matériaux composites.....17
Figure 1-2 Les types de renforts……...……..17
Figure 1-3 Stratifié unidirectionnel à plusieurs directions…….21
Figure 1-4 La forme d'un matériau sandwich…….…..22
Figure 1-5 Machine Universelle d'Essai Mécanique……..…23
Figure 1-6 Flexion trois points…….…..25
Figure 1-7 Flexion quatre points……25
Figure 1-8 Essai de Traction …….….26
Figure 1-9 Une courbe de traction…….26
Figure 1-1 Illustration de capteur…….…..31
Figure 1-2 Capteur de force……...……32
Figure 1-3 Circuits de mesure d'une jauge de contrainte……..33
Figure 1-4 Capteur de déplacement……...……34
Figure 1-5 ARDUINO UNO……..37
Figure 1-6 Architecture de carte ARDUINO UNO……..…….38
Figure 1-7 Interface du programme Arduino…….39
Figure 1-8 Les amplificateurs opérationnels…….40
Figure 1-9 Amplificateurs programmables avec Arduino…….…….41
Figure 3-2 Châssis de la machine de flexion…….46
Figure 3-3 Moteur pas à pas……..47
Figure 3-4 Capteur de force……...……47
Figure 3-5 Capteur de déplacement……..……48
Figure 3-6 Support de moteur pas à pas ……48
Figure 3-7 Ecrou de guidage…….49
Figure 3-8
Figure 3-9 Accouplement……..50
Figure 3-10 Plaque de fixation……..50
Figure 3-11 Tige de guidage……..……51
Figure 0-1 Le châssis en traction…….…….52
Figure 3-13 Etude statique sur le châssis…….……..53
Figure 4-1 Les phases d'un moteur pas à pas …….……57

Figure 4-2 Section transversale d’un moteur pas à pas
Figure 4-3 Module HX711……..……..59
Figure 4-4 Fils de connexion…….……59
Figure 4-5 Plaque d’essais…….60
Figure 4-6 Programme de calibrage (ARDUINO)…….60
Figure 4-7 Programme de capteur de force……...…….61
Figure 4-8 Programme de capteur de déplacement…….……..62
Figure 4-9 Programme de capteur de force et de déplacement…….63
Figure 4-10 La machine de flexion……..…….64

Liste des symboles

CMM : Composites Métalliques

CMC : Composites à Matrice Céramique

CMP : Composites à Matrice Polymère.

E/S : Entrie/sortie

EEPROM : Mémoire morte programmable effaçable électriquement.

SRAM : Mémoire vive statique

TX/RX : Transmit/Receive

CAN : Convertisseur Analogique-Numérique

3D : Trois Dimensions

2D : Dimensions

CI : Circuits intégrés

σ : Contrainte

ε : Déformation

Δl : changement de longueur

K : Raideur

σ_{tr} : Contrainte de traction. [MPa]

σ_{e} : Limite élastique. [MPa]

κ : Facteur de jauge

R : Résistance électrique

E : Module de Young

Kgf : kilogramme-force

R_m : Résistance à la rupture

P: Charge [N]

Introduction générale

Introduction générale

Les matériaux composites occupent une place primordiale dans l'industrie contemporaine, bénéficiant de leurs caractéristiques distinctives et de leur adaptabilité à une multitude d'applications. Constitués de plusieurs phases distinctes, les rendant incontournables dans des secteurs tels que l'aérospatiale, l'automobile et la construction.

Cependant, la complexité de leur comportement mécanique nécessite une caractérisation minutieuse pour garantir leur performance et leur fiabilité dans des conditions d'utilisation réelles. Les essais mécaniques, notamment les essais de traction et de flexion, jouent un rôle crucial dans l'évaluation des propriétés des composites. Ces essais reposent sur l'utilisation de machines universelles d'essai mécanique, équipées de capteurs de force et de position, permettant de mesurer avec précision les charges appliquées et les déformations des échantillons.

De plus, cette recherche se concentre sur la conception et la réalisation d'une machine d'essai miniature spécialement dédiée à ces matériaux. Cette machine, capable d'effectuer des essais de traction et de flexion, est conçue pour offrir une solution pratique et précise pour la caractérisation mécanique des composites.

L'objectif principal de cette étude est de développer une machine d'essai miniature intégrant des capteurs de force et de position, afin de fournir des mesures exactes et fiables. En optimisant le processus de conception et d'utilisation de cette machine, nous visons à améliorer la qualité, la durabilité et la sécurité des produits fabriqués à partir de matériaux composites. La compréhension approfondie du comportement mécanique des composites, rendue possible par cette machine, contribuera ainsi à l'optimisation de leur conception et de leur application dans divers domaines industriels.

Chapitre I

Les matériaux composites

1.1 Introduction

Les composites, des matériaux hybrides résultant de l'association de deux ou plusieurs éléments distincts, ouvrent un vaste champ de possibilités dans diverses industries. Cette association synergique entre des constituants distincts offre des performances supérieures à celles de leurs composants individuels. Dans ce chapitre, nous explorerons en profondeur les composants, les classifications, l'architecture et les essais mécaniques des composites, ainsi que leurs mécanismes de déformation. Cette exploration approfondie nous permettra d'acquérir une meilleure compréhension de ces matériaux révolutionnaires, façonnant ainsi notre approche de la conception et de la construction.

1.2 Définition des composites

Un composite est un matériau résultant de l'association de deux ou plusieurs éléments distincts et non miscibles, chacun apportant des propriétés uniques. Cette combinaison permet de créer un matériau hétérogène et hautement anisotrope, dont les performances dépassent souvent celles de ses composants individuels. Contrairement aux alliages, les matériaux composites ne se mélangent pas chimiquement, mais sont plutôt associés de manière synergique pour exploiter au mieux les avantages de chaque matériau. Cette synergie permet d'atteindre des performances optimales en fonction des exigences spécifiques de chaque application [1].

1.3 Différents constituants des composites

Les différents constituants des composites comprennent généralement : les renforts, les matrices et les charges (Figure 1-1).

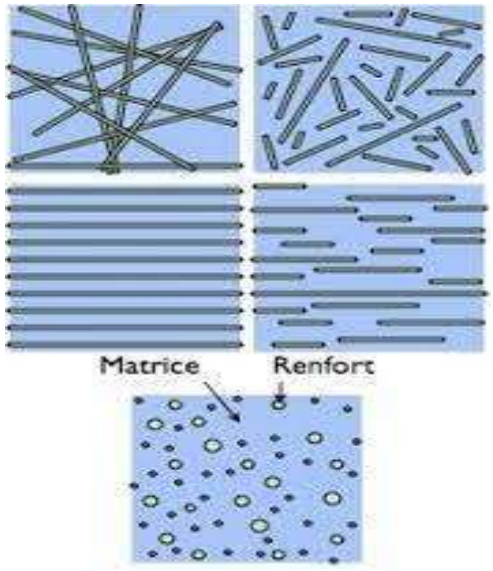


Figure 1-1 Différents types de fibres dans les matériaux composites.

1.3.1 Les renforts

Ils fournissent la résistance et la rigidité au composite. Les renforts peuvent être sous forme de fibres (comme la fibre de verre, la fibre de carbone, etc.) ou de particules (comme les particules de céramique) (Figure 1-2). Ils sont incorporés dans la matrice pour former la structure composite [1].



Figure 1-2 Les types de renforts

1.3.2 Les matrices

Elles servent de liant pour les renforts et transfèrent les charges entre eux. Les matrices peuvent être classées en deux types principaux : thermoplastiques et thermodurcissables. Les thermoplastiques sont des polymères qui peuvent être ramollis et refondus sous l'effet de la chaleur, tandis que les thermodurcissables subissent une réaction chimique irréversible lors du durcissement [1].

1.3.3 Les charges

Elles peuvent être ajoutées aux composites pour modifier certaines propriétés, telles que la conductivité électrique, la densité, ou pour réduire les coûts. Les charges peuvent être sous forme de particules minérales, de fibres courtes ou d'autres matériaux de remplissage [1].

1.4 Classification des composites

Cette section explore la classification des composites selon divers critères, notamment la forme et la composition de leurs constituants.

1.4.1 Classification suivant la forme des constituant

Dans cette sous-section, les composites sont classés selon la forme physique de leurs composants principaux [2].

1.4.1.1 Composites à fibres

Les matériaux composites renforcés par des fibres se composent de fibres dispersées dans une matrice. Ces fibres peuvent varier en longueur et en orientation et sont généralement plus robustes et rigides que la matrice les entourant. Les types de matériaux composites renforcés par des fibres comprennent [2] :

1.4.1.1.1 Composites à fibres de verre

Les fibres de verre sont des matériaux synthétiques principalement composés de verre, fabriqués en étirant du verre fondu en fines fibres. Utilisées dans diverses applications, elles sont appréciées pour leur résistance à la chaleur et à la corrosion, leur légèreté et leur transparence [2].

1.4.1.1.2 Composites à fibres de carbone

Les fibres de carbone sont des matériaux composites légers et rigides dérivés de polymères carbonés. Utilisées dans les secteurs aérospatial, automobile et sportif, elles allient résistance et légèreté, offrant une durabilité supérieure. Ces composites sont essentiels pour les composants structurels avancés [2].

1.4.1.1.3 Composites à fibres de d'aramide

Les fibres d'aramide, issues de polymères aromatiques, se distinguent par leur haute résistance, légèreté et stabilité thermique. Elles sont essentielles pour des applications critiques comme les gilets pare-balles, les équipements de protection et les câbles haute performance [2].

1.4.1.1.4 Composites à fibres de polymères

Ces composites utilisent des fibres de polymère comme le Kevlar ou l'aramide, offrant une résistance élevée à la traction et une grande capacité d'absorption d'énergie [2].

1.4.1.2 Composites à particules

Les composites à particules sont constitués de particules dispersées de manière aléatoire dans une matrice. Contrairement aux fibres, ces particules sont généralement de plus petite taille. Ce type de composite englobe divers matériaux caractérisés par cette structure particulière :

1.4.1.2.1 Composites renforcés par des particules

Les composites renforcés par des particules intègrent des particules dans une matrice pour améliorer les propriétés mécaniques telles que la dureté et la résistance à l'usure [3].

1.4.1.2.2 Composites à base de céramique

Ces composites incorporent des particules céramiques dans une matrice métallique ou polymère pour améliorer des caractéristiques comme la résistance à la chaleur et à l'usure [3].

1.4.2 Classification selon la nature des constituants

Cette classification des composites se base sur les matériaux qui les composent. Elle permet de considérer différents aspects tels que la nature des constituants et leurs propriétés [3].

1.4.2.1 Composites polymères

Les composites polymères sont des matériaux constitués de polymères, renforcés par des fibres ou des particules. Les polymères peuvent être thermoplastiques ou thermodurcissables. Leur composition chimique impacte les propriétés finales du composite, notamment la résistance, la ductilité et la température de transition vitreuse [3].

1.4.2.2 Composites métalliques (CMM)

Les composites métalliques combinent des métaux avec des fibres ou des particules céramiques pour améliorer leurs propriétés mécaniques, tout en préservant la conductivité électrique et thermique du métal [3].

1.4.2.3 Composites céramiques (CMC)

Les composites céramiques sont composés de matériaux céramiques principalement, souvent utilisés dans des applications à haute température ou nécessitant une résistance élevée à la corrosion et à l'usure. Ils intègrent des fibres ou des particules céramiques dans une matrice céramique ou métallique pour améliorer leurs propriétés [3].

1.4.2.4 Composites hybrides

Combinaison de plusieurs types de matériaux dans leur structure pour tirer parti des avantages de chaque composant. Par exemple, un composite hybride peut intégrer à la fois des fibres de carbone et des fibres de verre pour obtenir un équilibre entre résistance, légèreté et coût.

1.4.2.5 Nanocomposites

Incorporation de nanoparticules dans leur matrice pour améliorer certaines propriétés, telles que la résistance mécanique, la conductivité électrique ou thermique, et la résistance à l'abrasion. Ces nanomatériaux peuvent être des nanotubes de carbone, des nanoparticules de céramique, ou d'autres nanostructures.

1.5 Architecture des composites

1.5.1 Les stratifiés

La stratification est une structure couramment rencontrée dans les pièces composites. Dans un stratifié, les fibres sont agencées en couches fines, appelées plis, qui sont empilées les unes sur les autres (Figure 1-3). Chaque pli, d'une épaisseur de quelques dixièmes de millimètre, contient des renforts disposés de manière plane. Après la mise en forme, ces couches sont liées entre elles par l'intermédiaire de la matrice, créant ainsi une structure composite résistante. Les stratifiés permettent une grande flexibilité dans la conception, car l'orientation des fibres dans chaque pli peut être ajustée pour répondre aux exigences spécifiques de résistance et de rigidité [4].

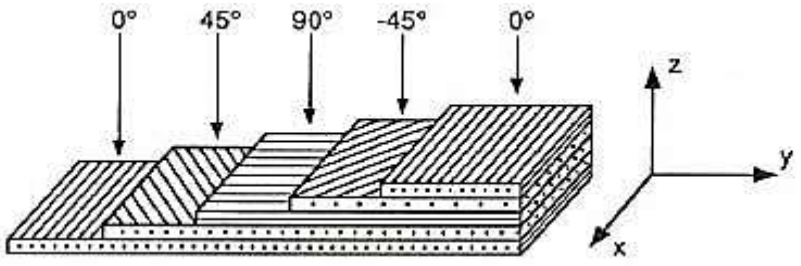


Figure 1-3 Stratifié unidirectionnel à plusieurs directions

1.5.2 Matériaux sandwich

Les pièces composites tissées ou stratifiées sont généralement minces et résistent efficacement aux sollicitations dans leur plan (sollicitations en membrane) mais moins bien aux sollicitations hors plan (flexion et traction) (Figure 1-4). Pour améliorer la rigidité en flexion et en traction, une technique couramment utilisée est celle des structures en sandwich. Cette technique consiste à coller deux peaux minces mais résistantes (généralement stratifiées) sur une âme épaisse mais légère, comme une mousse de polymère ou une structure en nid d'abeilles, à l'aide d'adhésifs. Les matériaux sandwich combinent ainsi la résistance et la rigidité des peaux avec la légèreté de l'âme, créant des structures à la fois robustes et légères, idéales pour des applications nécessitant une haute performance mécanique et un poids réduit [5].

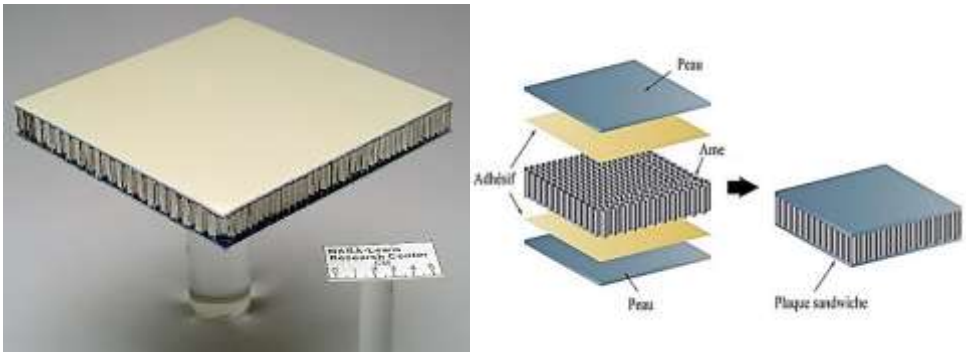


Figure 1-4 La forme d'un matériau sandwich

1.6 Types de matériaux composites

En fonction de leurs caractéristiques, de leurs applications et de leurs performances, on distingue généralement deux grandes familles de matériaux composites :

1.6.1 Composite à grande diffusion (GD)

Cette catégorie se caractérise par une large utilisation dans l'industrie en raison de leur polyvalence et de leur coût relativement bas. Les critères de classification incluent l'utilisation prédominante de fibres de verre associées à des résines polyester insaturées ou phénoliques, ainsi que leur application dans des secteurs tels que l'automobile, le ferroviaire et la construction électrique [6].

1.6.2 Composite à haute performance (HP)

Cette catégorie se distingue par l'utilisation de résines époxydes renforcées par des fibres de verre, de carbone ou d'aramide. Les critères de classification incluent les propriétés mécaniques supérieures de ces composites par rapport aux composites conventionnels, ainsi que leur utilisation dans des industries exigeantes telles que l'aérospatiale, le spatial et l'industrie sportive [6].

1.7 Essais mécaniques sur les composites

Les essais en mécanique visent à évaluer la capacité des structures à résister à différentes charges, en intégrant les lois de comportement des matériaux. Ils sont essentiels pour garantir la performance et la fiabilité des composites, notamment en déterminant des propriétés telles que la limite d'élasticité et la résistance à la fatigue. Ces essais, adaptés aux spécificités des

composites, favorisent leur utilisation dans divers secteurs industriels et contribuent à l'innovation technologique [7].

1.7.1 Le rôle des essais dans l'évaluation des propriétés mécaniques des composites

Les essais mécaniques sont essentiels pour évaluer les matériaux composites, en analysant leur robustesse, leur fiabilité et leur performance sous diverses contraintes. Ces tests permettent de comprendre le comportement des composites dans des conditions réelles d'utilisation, garantissant ainsi leur conformité aux normes de qualité et de sécurité. En assurant une performance optimale, les essais mécaniques contribuent à la sécurité des utilisateurs et à l'efficacité des produits dans diverses applications industrielles.

1.7.2 Machine universelle d'essai mécanique



Figure 1-5 Machine Universelle d'Essai Mécanique

La machine universelle d'essai mécanique est un dispositif essentiel dans l'ingénierie, la recherche et l'industrie (Figure 1-5). Elle offre une polyvalence et une précision permettant d'évaluer diverses propriétés mécaniques des matériaux. Cette polyvalence en fait un outil indispensable dans de nombreux secteurs industriels [8].

- **Polyvalence** : La machine universelle d'essai mécanique est conçue pour effectuer différents types d'essais, offrant ainsi une gamme complète de fonctionnalités pour caractériser les propriétés mécaniques des matériaux avec précision et fiabilité [8].
- **Matériaux** : Adaptée à une large gamme de matériaux tels que les métaux, les polymères, les composites, les céramiques, elle est un outil polyvalent et indispensable dans de nombreuses industries [8].

- **Applications** : Utilisée dans divers secteurs industriels tels que l'ingénierie, l'aérospatiale, l'automobile, elle évalue la qualité et les performances des matériaux utilisés.
- **Mesure de propriétés** : Elle permet de mesurer des propriétés mécaniques telles que la résistance à la traction, la limite d'élasticité, la résilience, fournissant des données essentielles pour évaluer les performances des matériaux et garantir leur conformité aux normes requises.

1.8 Différents Essais mécaniques

1.9 Essai de flexion

L'essai de flexion est une méthode utilisée pour évaluer la rigidité et la résistance à la flexion d'un échantillon de composite en appliquant une force perpendiculaire à son axe. Il existe principalement deux types d'essais de flexion : la flexion trois points et la flexion quatre points.

1.9.1.1 Flexion trois points

L'échantillon est soutenu par deux points espacés et une charge est appliquée au centre. Cette configuration crée une zone de traction en dessous du point de charge et une zone de compression au-dessus, permettant de mesurer la résistance du matériau à la flexion (Figure 1-6) [9].



Figure 1-6 Flexion trois points

1.9.1.2 Flexion quatre points

Deux charges sont appliquées symétriquement à une distance spécifique des points de soutien, répartissant la charge de manière plus uniforme sur l'échantillon. Cette méthode réduit les effets de bord et fournit une évaluation plus précise des propriétés de flexion, en éliminant les concentrations de contrainte locales (Figure 1-7) [9].



Figure 1-7 Flexion quatre points

1.9.2 Essai de traction

L'essai de traction mesure la résistance et la ténacité d'un composite en appliquant une force jusqu'à sa rupture (Figure 1-8). Il évalue la capacité du matériau à supporter des charges de traction, fournissant des données cruciales sur ses propriétés mécaniques et sa performance en conditions réelles [9].

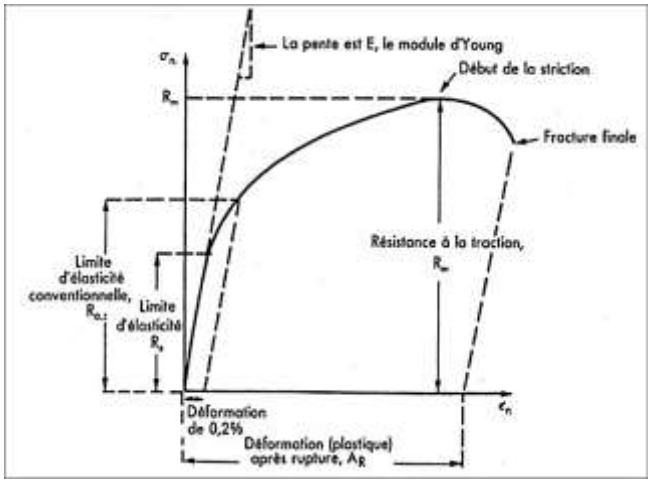


Figure 1-8 Essai de Traction

1.9.3 La courbe de traction

La courbe de traction représente la relation entre la contrainte appliquée à un matériau et la déformation qu'il subit. Elle comporte plusieurs phases clés (Figure 1-9):

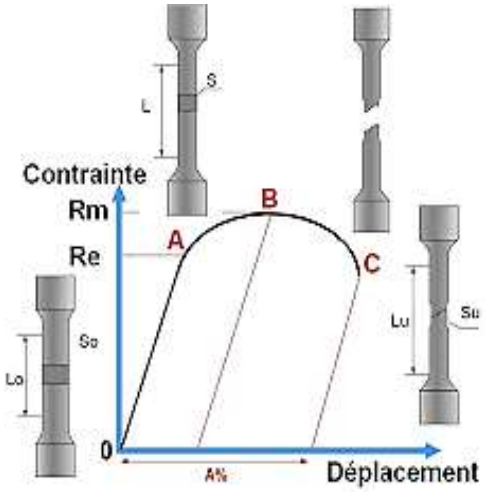


Figure 1-9 Une courbe de traction

- **Zone élastique :** Au début de la courbe, le matériau subit une déformation élastique, où la déformation est réversible. La relation entre la contrainte et la déformation est linéaire, caractérisée par le module d'élasticité du matériau.
- **Point de limite élastique :** Marque la fin de la zone élastique. Au-delà de ce point, le matériau entre en déformation plastique, où la déformation devient irréversible.
- **Déformation plastique :** Le matériau continue à se déformer avec une augmentation de la contrainte, mais de manière non linéaire. La contrainte nécessaire pour continuer la déformation augmente progressivement.
- **Point de limite de résistance :** Indique la fin de la déformation plastique. Le matériau atteint sa limite de résistance maximale.
- **Rupture :** La courbe culmine avec la rupture du matériau, marquée par une diminution soudaine de la contrainte accompagnée d'une déformation catastrophique.

1.10 Mécanisme de déformation des composites

Le mécanisme de déformation des composites est complexe et influencé par les matériaux, la géométrie et les conditions environnementales. Il inclut la microfissuration, la délamination, la rupture des fibres, la décohésion, la fissuration interfaciale et les effets de fatigue. Ces mécanismes dégradent les propriétés mécaniques, affectant la rigidité, la résistance et l'intégrité structurale du composite [10].

1.11 Niveaux d'observation de déformation dans les composites

La déformation des composites peut être observée à différents niveaux, de l'échelle macroscopique à l'échelle nanoscopique. Cela inclut l'observation globale de la déformation de la structure, l'examen des dommages internes à l'aide de techniques d'imagerie avancées, et l'observation des constituants individuels du composite à l'échelle microscopique. Ces niveaux d'observation permettent une analyse complète de la déformation, facilitant ainsi la compréhension des mécanismes sous-jacents [11].

1.12 Élasticité linéaire des solides

Lorsqu'un corps solide est soumis à des forces extérieures, il peut se déplacer et/ou se déformer. Un solide est qualifié d'élastique si, comme le suggère l'intuition, il reprend spontanément sa forme initiale lorsque les contraintes extérieures sont supprimées. Ainsi, les déformations des solides élastiques sont par définition réversibles. De plus, nous supposerons que l'état naturel

d'un solide élastique, c'est-à-dire son état en l'absence de toute force extérieure, est caractérisé par une forme bien déterminée ainsi que par l'annulation de toutes les contraintes internes [12].

La théorie de l'élasticité étudie les déformations et les contraintes dans un solide soumis à des forces extérieures. Nous adopterons les hypothèses suivantes :

- Le matériau est homogène, c'est-à-dire qu'il possède les mêmes propriétés en tout point.
- Le matériau est isotrope, ce qui signifie qu'en un point donné, il a les mêmes propriétés dans toutes les directions.
- Le comportement du matériau est linéaire, impliquant que les relations entre les contraintes et les déformations sont linéaires.
- Le matériau est élastique, ce qui signifie que le solide reprend sa forme initiale dès que les forces appliquées sont supprimées.

1.13 Module de Young

Le module de Young est une caractéristique essentielle des matériaux qui mesure leur rigidité en réponse à des contraintes uniaxiales. Il représente le rapport de la contrainte appliquée sur le matériau à la déformation résultante dans la direction de la force appliquée. Mathématiquement, il est défini par la formule :

$$\boldsymbol{E = \frac{\sigma}{\varepsilon}}$$

Où $\boldsymbol{\sigma}$ représente la contrainte (force par unité de surface) et $\boldsymbol{\varepsilon}$ la déformation (changement de longueur par unité de longueur). Ce concept est fondamental dans la mécanique des solides, car il permet de prédire comment un matériau réagira à une charge appliquée en termes de résistance à la déformation élastique. Le module de Young varie d'un matériau à l'autre en fonction de sa structure atomique, de sa composition chimique et de son état de contrainte, ce qui en fait une propriété clé pour la conception et l'ingénierie des structures. Sa mesure expérimentale se fait généralement à l'aide de tests de traction ou de compression [12].

1.14 Conclusion

Ce chapitre fournit une vue d'ensemble approfondie et structurée des composites, mettant en lumière leur importance dans l'ingénierie moderne et soulignant la nécessité d'une évaluation

rigoureuse et d'une compréhension approfondie pour leur utilisation efficace dans une gamme diversifiée d'applications industrielles.

Chapitre II

Les capteurs dans le domaine mécanique

2.1 Introduction

Les capteurs sont essentiels dans divers domaines tels que l'industrie, la recherche scientifique, et les services, permettant la surveillance de paramètres physiques comme la température, la force, la position, la vitesse, et la luminosité. Ce chapitre explore les capteurs utilisés dans notre projet, en détaillant leur définition, types, et fonctionnement.

Nous examinerons les principaux types de capteurs, comme les capteurs de force et de déplacement, en expliquant leurs principes de fonctionnement et leurs caractéristiques de performance. Ensuite, nous aborderons la carte de commande Arduino, son architecture, son logiciel de développement IDE et ses multiples applications. Enfin, nous discuterons des amplificateurs, leur rôle crucial dans l'amplification des signaux des capteurs et leurs différentes typologies.

2.2 Définition des capteurs utilisés dans ce projet

Les capteurs jouent un rôle essentiel dans de nombreux domaines tels que l'industrie, la recherche scientifique (Figure 1-1), où il est nécessaire de surveiller divers paramètres physiques tels que la température, la force, la position, la vitesse et la luminosité. Un capteur est un composant fondamental permettant de détecter ces grandeurs physiques. Il agit comme un dispositif d'échantillonnage qui convertit une grandeur physique en une autre de nature différente, souvent de nature électrique. Les informations ainsi obtenues sont représentatives de la grandeur mesurée et peuvent être utilisées à des fins de mesure ou de contrôle [13].

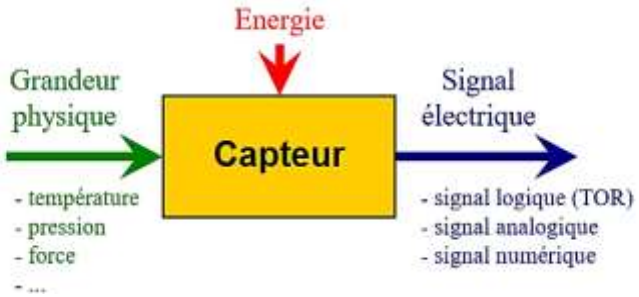


Figure 1-1 Illustration de capteur

2.3 Capteurs utilisés dans ce projet

2.3.1 Capteur de force

Un capteur de force est un dispositif conçu pour mesurer la force appliquée à un objet ou à une structure. Il fonctionne en convertissant la pression, la déformation mécanique ou une autre forme d'énergie en un signal électrique proportionnel à la force exercée. Les capteurs de force sont utilisés dans diverses applications industrielles, scientifiques et commerciales, offrant une précision et une sensibilité adaptées à divers besoins de mesure de force (Figure 1-2) [14].



Figure 1-2 Capteur de force

2.3.1.1 Principe de fonctionnement

Un capteur de force opère en détectant et en mesurant les déformations induites par une force appliquée sur un élément sensible intégré au dispositif. Fondamentalement, cet élément sensible, qui peut prendre diverses formes telles qu'une jauge de contrainte, un ressort ou un diaphragme, réagit aux contraintes mécaniques générées par la force exercée. Lorsque la force agit sur le capteur, l'élément sensible subit une déformation proportionnelle à l'intensité de la force. Cette déformation modifie les propriétés électriques ou mécaniques de l'élément sensible, permettant ainsi la transduction du signal. Par exemple, dans le cas d'une jauge de contrainte, la déformation entraîne une variation de la résistance électrique. Le capteur convertit ensuite cette déformation mécanique en un signal électrique mesurable. Ce signal est alors traité électroniquement et converti en une valeur de force correspondante. Cette valeur peut être affichée sur un écran, enregistrée pour une analyse ultérieure ou utilisée pour réguler un système en temps réel, selon les exigences de l'application. En somme, le capteur de force joue un rôle essentiel en permettant la conversion précise des forces physiques en signaux électriques mesurables, facilitant ainsi une large gamme d'applications dans divers domaines de l'ingénierie et de la technologie.

2.3.1.2 Jauges de contrainte

Les capteurs de contrainte, aussi appelés jauges de contrainte, mesurent les changements de déformation ou de contrainte dans un matériau. Ils utilisent des fils minces ou des feuilles métalliques fixés à la surface du matériau pour détecter ces changements. Lorsque le matériau se déforme sous l'effet d'une force, la résistance électrique des fils ou des feuilles varie proportionnellement à la déformation, ce qui permet de mesurer la quantité de contrainte appliquée. Ces capteurs sont utilisés dans diverses applications telles que la surveillance de charge, la pesée, la détection de force et la mesure de pression (Figure 1-3) [15].

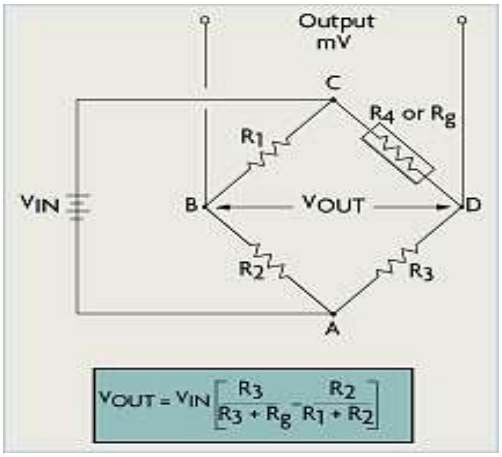


Figure 1-3 Circuits de mesure d'une jauge de contrainte

2.3.1.2.1 Fonctionnement et Calibration de la Jauge de Contrainte

La jauge de contrainte est un capteur largement utilisé pour mesurer les contraintes mécaniques. Son principe de fonctionnement repose sur la déformation mécanique d'un matériau conducteur sous contrainte, ce qui modifie sa résistance électrique. Cette variation de résistance est mesurée précisément à l'aide d'un circuit électrique dédié. La précision des mesures dépend de la qualité de la jauge de contrainte, de son installation et de sa calibration. Une calibration correcte est essentielle pour obtenir des mesures précises et fiables, en établissant une corrélation précise entre la déformation du matériau et la résistance électrique mesurée. Cela permet d'assurer l'exactitude des données obtenues, répondant ainsi aux exigences spécifiques de chaque application, qu'il s'agisse de contrôle de structures, d'instrumentation médicale ou d'autres domaines nécessitant une mesure de contrainte précise [15].

2.3.1.3 Caractéristiques pour évaluer les performances d'un capteur de force

- **Alimentation :** La tension ou le courant électrique requis pour alimenter le capteur. Il peut s'agir de batteries, d'une source d'alimentation externe ou d'une alimentation intégrée.
- **Consommation maxi :** La consommation d'énergie maximale du capteur lorsqu'il fonctionne à pleine capacité. Cela donne une indication de la charge électrique maximale que le capteur peut demander à son alimentation.
- **Plage de mesure :** C'est la gamme de valeurs de force que le capteur peut mesurer de manière fiable. Cette plage est généralement exprimée en unités de force telles que les newtons (N) ou les kilogrammes-force (kgf).
- **Dimensions** : Les dimensions physiques du capteur, telles que sa longueur, sa largeur et sa hauteur. Cela permet de déterminer l'encombrement du capteur et son intégration potentielle dans un système ou un dispositif.

2.3.2 Capteur de déplacement

Un capteur de déplacement mesure les variations de position ou de déplacement d'un objet par rapport à une référence fixe ou mobile (Figure 1-4). Utilisés dans divers domaines comme la robotique, l'automatisation industrielle et les véhicules autonomes, ces capteurs surveillent et contrôlent les mouvements. Ils emploient différentes technologies, telles que les capteurs optiques, magnétiques, à ultrasons, inductifs, capacitifs, à fil tendu et à effet Hall, pour mesurer avec précision les déplacements linéaires, angulaires ou multidimensionnels, fournissant des données en temps réel sur la position, la vitesse et l'accélération [16].



Figure 1-4 Capteur de déplacement

2.3.2.1 Principe de fonctionnement

Les capteurs de déplacement utilisent différents principes pour mesurer les variations de position, adaptés à des applications spécifiques. Les capteurs optiques mesurent la lumière réfléchie ou transmise, les capteurs magnétiques détectent les variations de champ magnétique, et les capteurs à ultrasons calculent la distance par le temps de retour des ondes sonores. Les capteurs inductifs et capacitifs analysent les changements d'inductance ou de capacité électrique. Les capteurs à fil tendu mesurent la tension ou la déformation d'un fil, tandis que les capteurs à effet Hall détectent les variations de champ magnétique. Le choix du capteur dépend des exigences en précision, plage de mesure et environnement d'utilisation.

2.3.2.2 Caractéristiques pour évaluer les performances d'un capteur de déplacement

- **Alimentation :** C'est la tension ou la plage de tensions requise pour alimenter le capteur. Assurez-vous de fournir une tension d'alimentation conforme aux spécifications du capteur pour un fonctionnement correct.
- **Consommation maxi :** C'est la consommation électrique maximale du capteur lorsqu'il est utilisé à pleine charge ou dans des conditions de fonctionnement maximales. Il est important de s'assurer que votre source d'alimentation peut fournir suffisamment de courant pour répondre à cette consommation maximale.
- **Consommation au repos :** C'est la consommation électrique du capteur lorsque celui-ci est en veille ou au repos, c'est-à-dire lorsqu'il n'est pas activement sollicité pour mesurer le déplacement. Cette caractéristique est importante pour optimiser la durée de vie de la batterie dans les applications alimentées par batterie.
- **Plage de mesure :** C'est la gamme de valeurs de déplacement que le capteur est capable de mesurer. Il est important que la plage de mesure soit adaptée aux besoins spécifiques de l'application.

2.4 La carte de commande Arduino

2.4.1 Définition de la carte Arduino

La carte Arduino est une carte électronique programmable open source qui vous permet de contrôler des appareils physiques et de créer des projets interactifs à l'aide de capteurs et d'actionneurs. Il a été développé en Italie en 2005 par un groupe de chercheurs qui souhaitaient créer une plateforme facile à utiliser pour les artistes, les designers et les passionnés d'électronique.

La carte Arduino est équipée d'un microcontrôleur et d'un ensemble de broches d'entrée/sortie (E/S) qui connectent des capteurs, des actionneurs et d'autres composants électroniques. Programmé à l'aide d'une version simplifiée du langage de programmation C++, il dispose d'un environnement de développement intégré (IDE) qui permet de compiler et de charger du code sur la carte.

Chaque Arduino contient un régulateur +5 V et un quad oscillateur 16 MHz (ou un résonateur céramique sur certains modèles). Pour programmer cette carte nous utilisons le logiciel Arduino IDE [17].

2.4.2 Domaines d'applications

Arduino est largement utilisé dans de nombreux domaines d'application en raison de sa polyvalence, de sa facilité d'utilisation et de sa flexibilité. Voici quelques-uns des principaux domaines où Arduino est fréquemment utilisé [18]:

- Prototypage électronique.
- Art interactif et création numérique.
- Électronique industrielle et embarquée.
- Jeux électroniques.
- Instruments de musique électroniques.
- Domotique.
- Robotique.
- Modélisme.
- Education et apprentissage, Etc.

2.4.3 La carte utilisée dans ce projet

2.4.3.1 La carte Arduino UNO

L'Arduino Uno utilise un microcontrôleur ATmega328 (Figure 1-5), similaire aux derniers modèles Duemilanove. Cependant, contrairement à ce dernier qui utilisait une puce FTDI pour la programmation via un connecteur USB, l'Uno utilise une puce ATmega8U2 programmée comme convertisseur série.



Figure 1-5 ARDUINO UNO

2.4.3.2 Architecture d'Arduino UNO

- **Bouton de reset :** Permet de redémarrer le code téléchargé sur l'Arduino en cas de problème.
- **Port USB :** Utilisé pour la programmation de la carte et comme source d'alimentation alternative.
- **Connecteur d'alimentation :** Permet d'alimenter la carte avec une tension externe de 7 à 12 V, régulée à 5 V.
- **LED intégrées :** Indiquent l'activité de transmission/réception de données (TX/RX) et l'état de l'alimentation.
- **LED d'indication ON :** Cette LED indique que l'Arduino est alimenté.
- **Broches d'Entrées/Sorties numériques :** Utilisées pour interagir avec le monde extérieur en entrée ou en sortie, avec six d'entre elles supportant la modulation PWM.
- **Broches TX/RX :** Utilisées pour la communication série avec d'autres périphériques.
- **Broches d'alimentation :** Utilisées pour fournir de l'alimentation à d'autres composants ou circuits.
- **Broches analogiques :** Utilisées pour lire les valeurs analogiques provenant de capteurs.

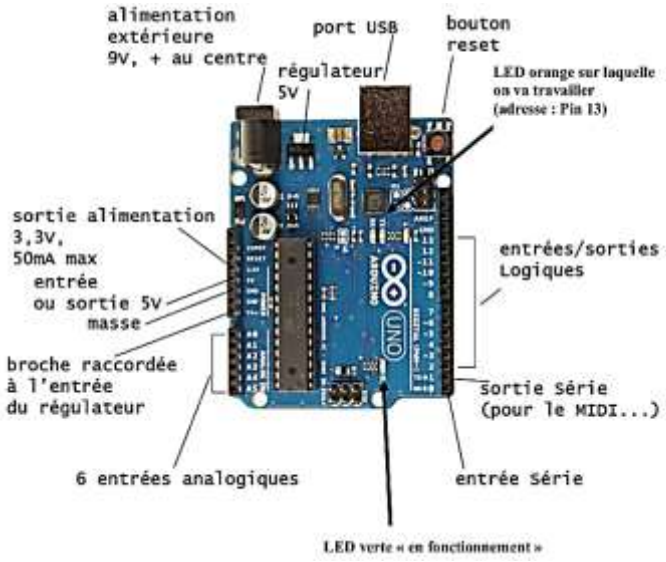


Figure 1-6 Architecture de carte ARDUINO UNO

2.4.3.3 Pourquoi opter pour l'Arduino Uno pour les projets électroniques ?

La carte Arduino Uno offre une solution polyvalente et abordable pour modéliser des objets connectés et intégrer une variété de capteurs. Grâce à sa facilité d'utilisation et à sa compatibilité avec de nombreux shields, l'Arduino Uno permet d'étendre facilement les fonctionnalités du projet. Sa capacité d'évolution en fait un choix judicieux pour une large gamme d'applications électroniques, des plus simples aux plus complexes.

2.5 Le logiciel IDE Arduino (Integrated Development Environment)

L'IDE Arduino est un logiciel open-source conçu pour simplifier la programmation des cartes Arduino. Avec une interface conviviale, un éditeur de code intégré et une vaste bibliothèque de fonctions prédéfinies, il offre un environnement de développement complet pour les projets électroniques. Grâce à ses outils de compilation et de téléversement, ainsi qu'à ses ressources de documentation et de support, l'IDE Arduino est un outil essentiel pour les développeurs, débutants comme expérimentés, dans la création et la réalisation de projets avec les cartes Arduino (Figure 1-7) [19].

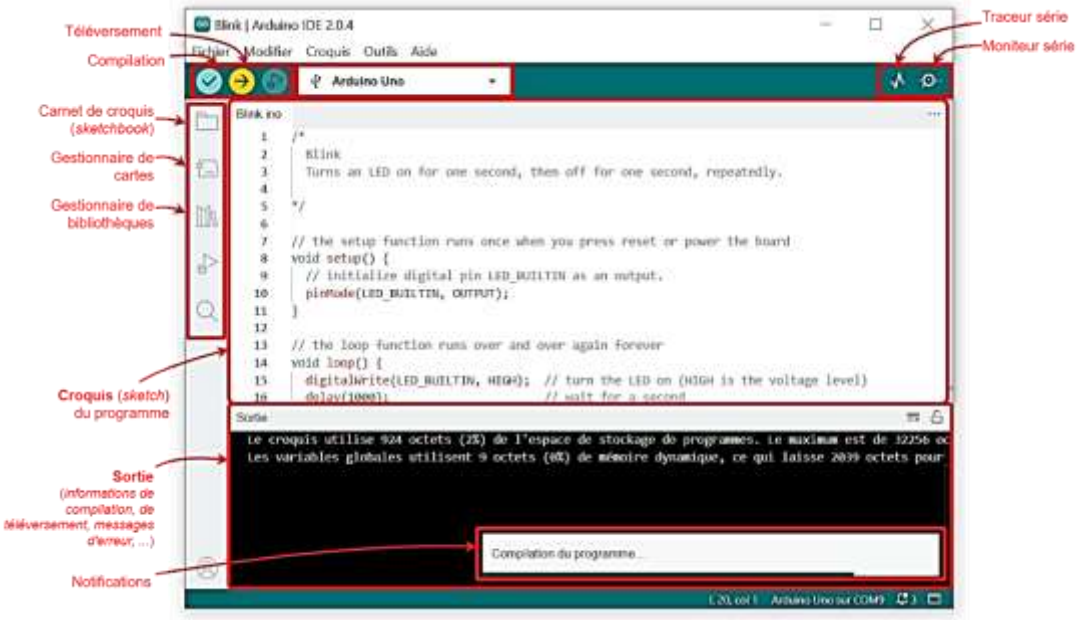


Figure 1-7 Interface du programme Arduino

2.6 Les amplificateurs

2.6.1 Définition des amplificateurs

Les signaux électriques des capteurs comme les thermocouples ou les ponts de mesure sont généralement faibles et nécessitent une amplification pour une précision optimale. Cependant, cette amplification doit être sélective pour ne cibler que le signal utile. Souvent, ce signal est accompagné de parasites et de tensions de mode commun, nécessitant une amplification sélective pour éliminer les signaux indésirables et ne conserver que le signal du capteur [20].

2.6.2 Principe de fonctionnement

Un amplificateur électronique utilise des composants actifs, tels que des transistors ou des tubes électroniques, pour augmenter la puissance électrique du signal d'entrée. Ces composants contrôlent le courant de sortie en fonction d'une grandeur électrique (courant ou tension) représentant le signal à amplifier. Le courant de sortie provient de l'alimentation de l'amplificateur. En fonction de leur configuration, les composants actifs permettent d'augmenter la tension et/ou le courant du signal d'entrée [21].

2.6.3 Types d'amplificateurs

2.6.3.1 Les amplificateurs intégrés

Les amplificateurs intégrés sont des amplificateurs sous forme de circuits intégrés (CI). Un CI est un composant miniaturisé qui peut reproduire plusieurs fonctions électroniques complexes, facilitant ainsi son utilisation. Les CI contiennent principalement des transistors, des diodes, des résistances, des condensateurs, et plus rarement des inductances en raison de leur difficulté de miniaturisation [21].

2.6.3.2 Les amplificateurs opérationnels

Les amplificateurs opérationnels (aussi appelés ampli-op ou AO) ont été initialement conçus pour réaliser des opérations mathématiques en utilisant la tension comme représentation d'une autre grandeur. Utilisés dans les calculateurs analogiques (Figure 1-8), ils modélisent des opérations telles que l'addition, la soustraction, l'intégration et la dérivation. En pratique, les amplificateurs opérationnels sont très polyvalents et peuvent être utilisés dans diverses applications. Ils sont constitués de transistors, de tubes électroniques ou d'autres composants amplificateurs, et peuvent être implémentés dans des circuits discrets ou intégrés [21].

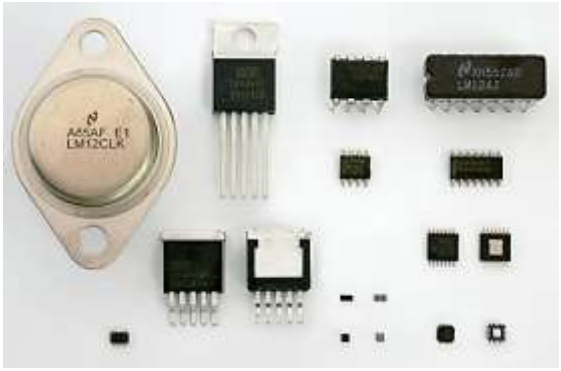


Figure 1-8 Les amplificateurs opérationnels

2.6.3.3 Les amplificateurs d'instrumentation

Les amplificateurs d'instrumentation sont généralement construits à partir de plusieurs amplificateurs opérationnels, ce qui améliore leurs caractéristiques intrinsèques telles que l'offset, la dérive, le bruit d'amplification, le gain en boucle ouverte, le taux de réjection du mode commun et l'impédance d'entrée. Ils sont couramment utilisés dans les systèmes de mesure et les applications médicales pour amplifier les signaux faibles provenant de capteurs [21]

2.6.3.4 Les amplificateurs programmables

Les amplificateurs programmables permettent de régler le gain à distance via une liaison filaire (Figure 1-9), contrairement aux amplificateurs classiques qui nécessitent un réglage manuel. Ces amplificateurs sont utilisés dans les systèmes automatisés et les environnements où un ajustement fréquent du gain est nécessaire [21].

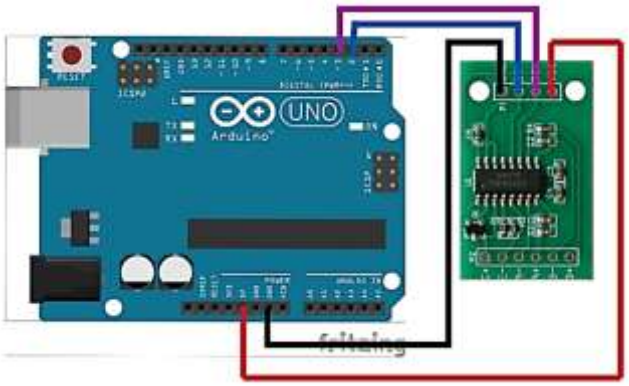


Figure 1-9 Amplificateurs programmables avec Arduino

2.7 Conclusion

Ce chapitre explore les capteurs, les cartes Arduino et les amplificateurs, éléments fondamentaux en électronique. Il détaille le fonctionnement, les caractéristiques et les applications des capteurs de force et de déplacement. En mettant en lumière l'importance de ces composants, il offre un aperçu précieux pour la conception et la mise en œuvre de projets électroniques innovants.

Chapitre III

Conception et simulation numérique

3.1 Introduction

SolidWorks offre une multitude de fonctionnalités, notamment la modélisation 2D et 3D, le développement de produits, la vérification de la conception, la gestion de bibliothèques de fichiers 3D, la création de mises en plan détaillées, ainsi que la génération d'images et d'animations d'objets en 3D. Il permet également d'estimer les coûts de fabrication, offrant ainsi une solution complète pour la conception et le développement de produits.

Dans ce chapitre, nous allons explorer en détail le fonctionnement de SolidWorks, en mettant l'accent sur la conception paramétrique et les outils de simulation et d'analyse offerts par le logiciel. Nous présenterons également les plans des composants d'une machine d'essais que nous avons conçus à l'aide de SolidWorks, illustrant ainsi ses capacités et ses applications pratiques.

3.2 Le programme utilisé dans la conception de la machine d'essais

3.2.1 Définition de SolidWorks

SolidWorks est un logiciel de conception assistée par ordinateur, appartenant à la société Dassault Systèmes. Il utilise le principe de conception paramétrique et génère trois types de fichiers interconnectés : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ainsi, toute modification apportée à l'un de ces fichiers est automatiquement reflétée dans les autres. Le fondateur, Jon Hirschtick, a initié le développement de SolidWorks en 1993 avec une équipe de développeurs dans le but de rendre la CAO plus accessible. La première version du logiciel a été lancée en 1995, et en 1997, Dassault Systèmes est devenue l'actionnaire principal, poursuivant le développement de l'outil. SolidWorks permet de réaliser de la modélisation 2D et 3D. Ce logiciel de CAO est réputé pour sa simplicité d'utilisation et son caractère intuitif. Il offre diverses fonctionnalités, notamment la conception précise d'objets en 3D, le développement de produits, la vérification de la conception, la gestion de bibliothèques de fichiers 3D, la création de mises en plan 2D, la génération d'images et d'animations d'objets 3D, ainsi que l'estimation des coûts de fabrication [22].

3.2.2 Fonctionnement de SolidWorks

SolidWorks fonctionne sur la base de la conception paramétrique, permettant aux utilisateurs de créer des modèles 3D en définissant des paramètres et des dimensions spécifiques. Les pièces sont créées à partir de formes de base et modifiées selon les besoins. Les relations et contraintes entre les éléments assurent la cohérence du modèle. Les pièces peuvent être assemblées pour former des ensembles complexes, avec des fonctionnalités d'assemblage avancées. Le logiciel permet également de créer des mises en plan détaillées pour la fabrication et l'assemblage. En outre, SolidWorks offre des outils de simulation et d'analyse pour tester la performance des modèles. En somme, il permet de créer, assembler, documenter et analyser des modèles 3D pour diverses applications [22].

3.3 Stabilité mécanique en présence de forces externes

Dans le cadre de la stabilité mécanique, la loi fondamentale de la dynamique révèle que pour qu'un corps soit en équilibre statique, la somme des forces et des moments résultants des forces externes doit être nulle, exprimée par les équations :

$$\sum \vec{F} = 0 \quad \sum \vec{M} = 0$$

- Lorsque le nombre d'efforts externes équivaut au nombre d'équations disponibles, le corps est en état d'équilibre isostatique. Et les efforts sont entièrement déterminés par ces équations.
- Cependant, si le nombre d'efforts externes dépasse le nombre d'équations, le système entre dans un état d'équilibre hyperstatique. La détermination précise des efforts nécessite de prendre en considération la déformation du milieu, conduisant ainsi à la formulation d'équations complémentaires [23].

3.4 Raideur et rigidité des matériaux

Lorsqu'un corps est soumis à une sollicitation, il ne peut y résister qu'en se déformant. L'essai de traction permet de déterminer la raideur $\boldsymbol{K}$ de l'éprouvette, définie comme le rapport entre la force de traction $\boldsymbol{F}$ et l'allongement $\boldsymbol{\Delta l}$ résultant. La raideur $\boldsymbol{K}$ tient compte à la fois de la géométrie de l'éprouvette et de la rigidité intrinsèque du matériau.

L'expérience a montré que pour obtenir le même allongement Δl de deux éprouvettes du même matériau [24].

3.5 Les contraintes

La contrainte est la force appliquée par unité de surface sur un matériau. Lorsque cette force dépasse la résistance du matériau, il se déforme, pouvant changer de forme ou de volume. Il existe trois types principaux de déformations : élastique, plastique et cassante. Initialement, lors d'une déformation élastique, le matériau retrouve sa forme et son volume initiaux une fois la contrainte relâchée. Cette déformation élastique est réversible et suit une relation linéaire entre contrainte et déformation. Cependant, au-delà de la limite d'élasticité, le matériau subit une déformation plastique ou cassante, où la relation entre contrainte et déformation devient non linéaire. En cas de déformation plastique, le matériau peut être déformé de manière permanente jusqu'à atteindre son point de rupture, tandis qu'en cas de déformation cassante, le matériau se brise. À des taux de contraintes très élevés, la déformation plastique peut être minimale ou inexistante (Figure 3-1) [25].

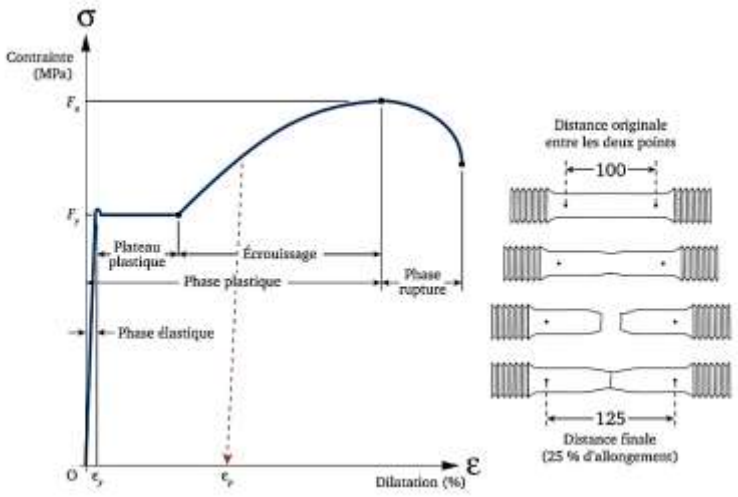


Figure 3-1 Analyse de la relation contrainte-déformation pour un alliage métallique

3.6 Conception des composants de la machine d'essais

Nous allons présenter dans ce titre les plans que nous avons conçus à l'aide de SolidWorks. Les mise en plan sont disponibles dans l'annexe, à laquelle vous pouvez vous référer.

3.6.1 Conception de châssis

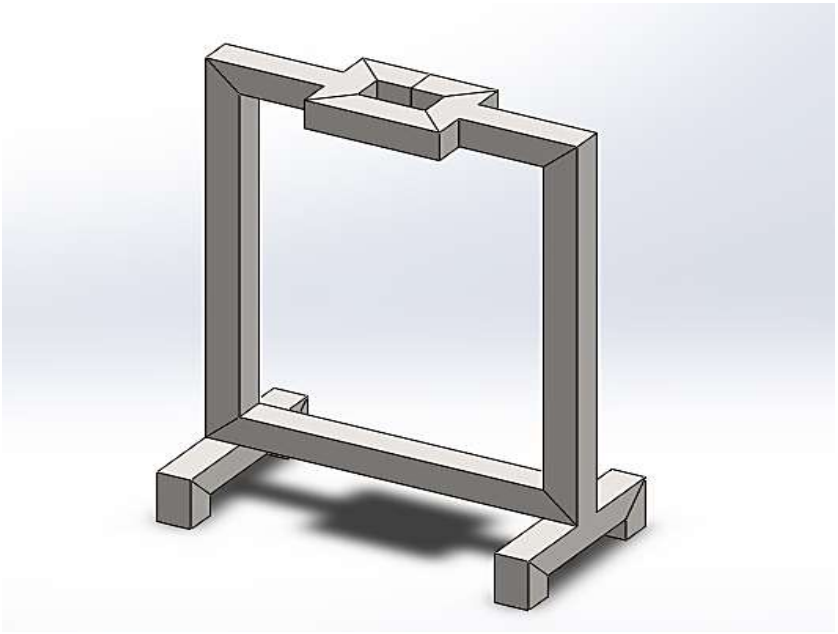


Figure 3-2 Châssis de la machine de flexion

Dans SolidWorks, le châssis est une structure de support utilisée pour encadrer ou soutenir des composants dans une conception (Figure 3-2).

- Masse : 100 Kg

3.6.1.1 Propriétés du matériau

- Matériau : Aluminium
- Limite d'élasticité : 245 MPa
- Limite de traction : 390 MPa

3.6.2 Le moteur pas à pas

La conception d'un moteur pas à pas sur SolidWorks implique la création d'un modèle 3D du moteur, son analyse pour évaluer ses performances, et la génération de la documentation technique pour la fabrication (Figure 3-3).



Figure 3-3 Moteur pas à pas

3.6.3 Conception du capteur de force

La conception d'un capteur de force sur SolidWorks consiste à modéliser en 3D le capteur, analyser ses contraintes et déformations (Figure 3-4).

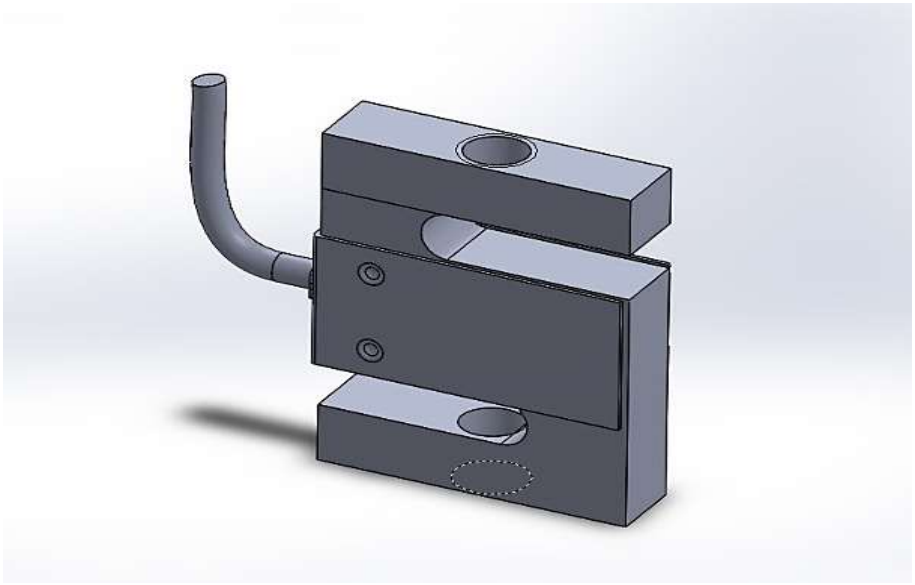


Figure 3-4 Capteur de force

- Charge maximale : 100 Kg

3.6.4 Conception du capteur de déplacement

La conception d'un capteur de déplacement dans SolidWorks comprend la modélisation 3D du capteur (Figure 3-5).

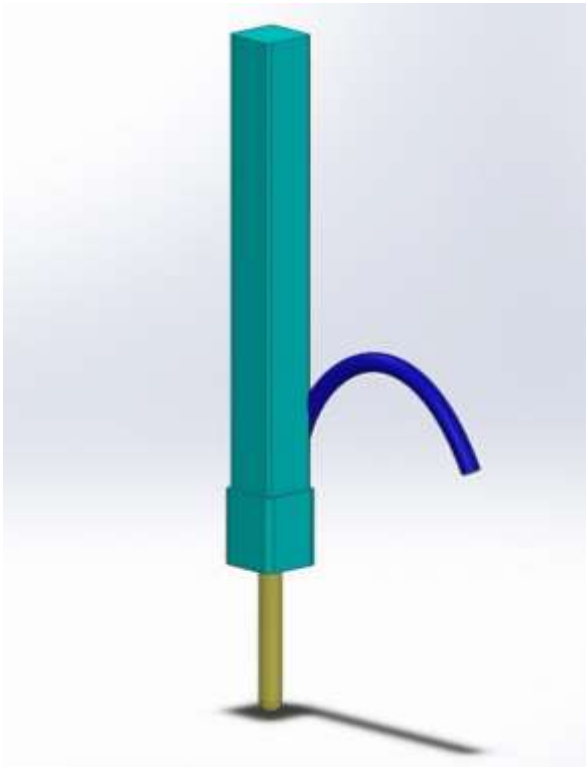


Figure 3-5 Capteur de déplacement

3.6.5 Conception de support inférieure de moteur pas à pas

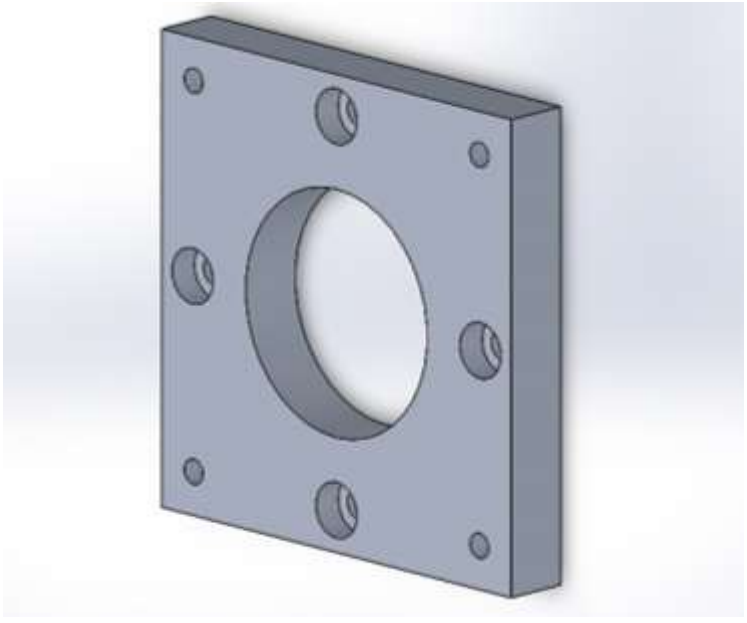


Figure 3-6 Support de moteur pas à pas

3.6.6 Conception d'écrou de guidage

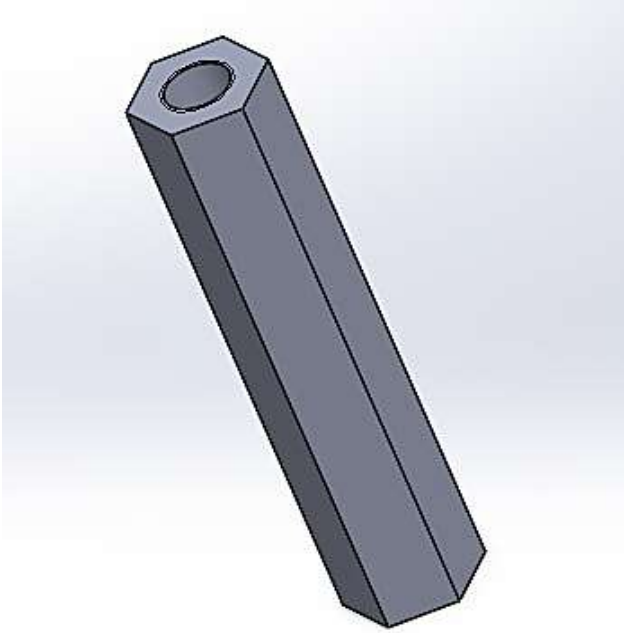


Figure 3-7 Ecrou de guidage

3.6.7 Conception de mâchoires

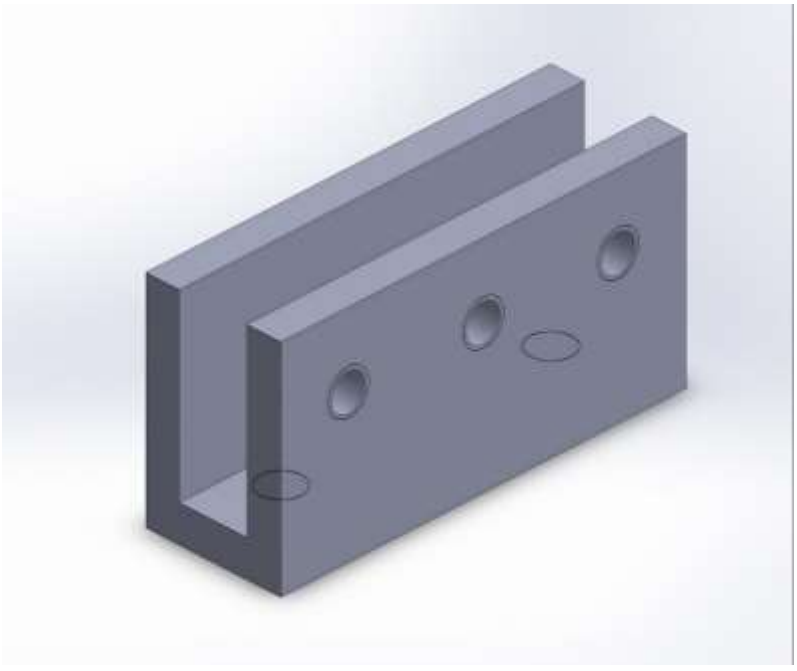


Figure 3-8 Mâchoire

3.6.8 Conception de l'accouplement

L'accouplement est utilisé pour relier l'arbre du moteur pas à pas à un autre arbre, facilitant ainsi la transmission du couple et de la rotation. Il permet de transférer le mouvement généré par le moteur pas à pas vers la charge à entraîner (Figure 3-9).



Figure 3-9 Accouplement

3.6.9 Conception de la plaque de fixation

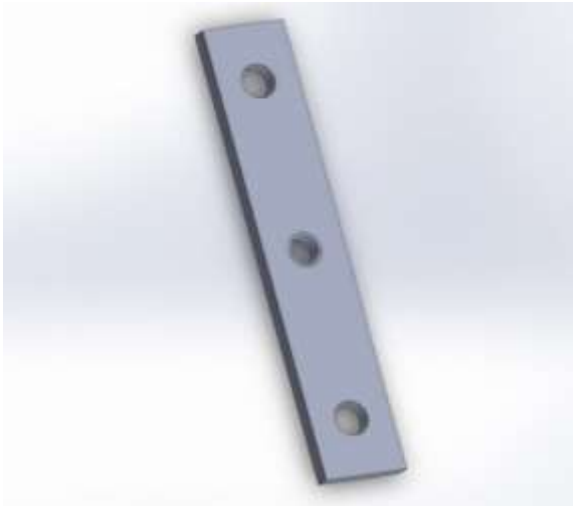


Figure 3-10 Plaque de fixation

3.6.10 Conception de la tige de guidage

La tige de guidage, essentielle pour fixer solidement la plaque de fixation, assure un alignement précis et une stabilité optimale (Figure 3-11)

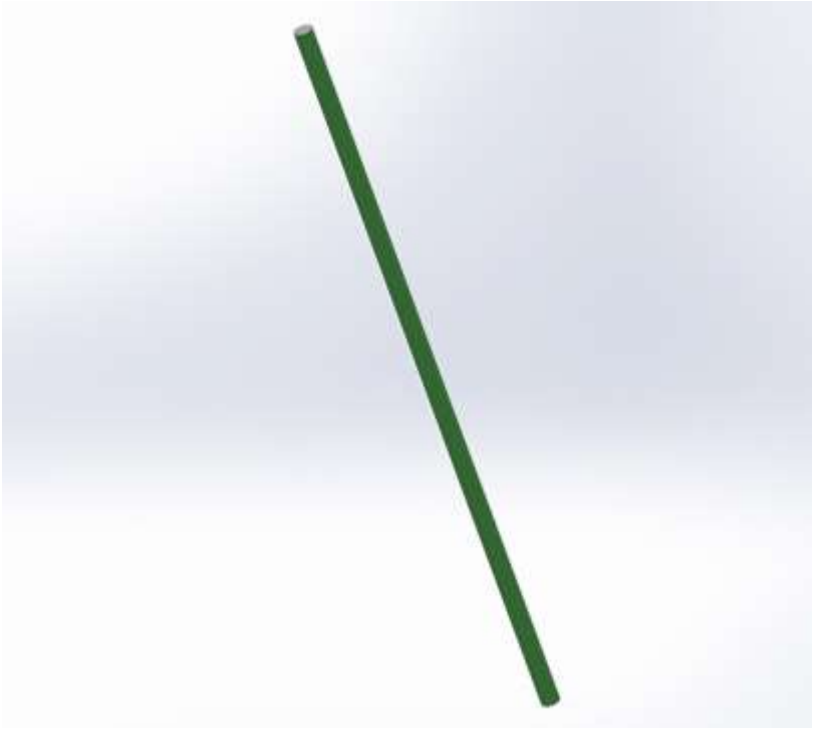


Figure 3-11 Tige de guidage

3.7 Simulation numérique

La simulation numérique est une technique essentielle dans le domaine de l'ingénierie et de la conception. Plusieurs programmes de simulation, tels qu'Ansys et SolidWorks, permettent d'analyser chaque composant d'un système pour étudier son comportement et sa capacité d'endurance. Pour notre projet, nous avons opté pour le programme SolidWorks afin de simuler la base et les différentes pièces de notre machine.

3.7.1 Simulation de châssis

3.7.1.1 Châssis en traction

Dans notre analyse, nous avons pris en compte le diamètre de traction car il s'agit du plus grand diamètre. Nous avons effectué une simulation de traction en utilisant les points d'ancrage comme supports fixes. La force de traction a été appliquée à la colonne, et les résultats sont présentés dans l'image suivante.

Nous avons étudié la simulation de châssis en traction en utilisant les points d'ancrage comme supports fixes. La force possible a été appliquée à la base de la colonne. Les résultats observés dans l'image suivante reflètent les effets de cette force sur le châssis, en prenant en compte le diamètre de traction comme paramètre principal, car c'est le plus grand. Cette méthode nous permet d'analyser avec précision les performances et les contraintes subies par le châssis sous l'effet de la force appliquée.

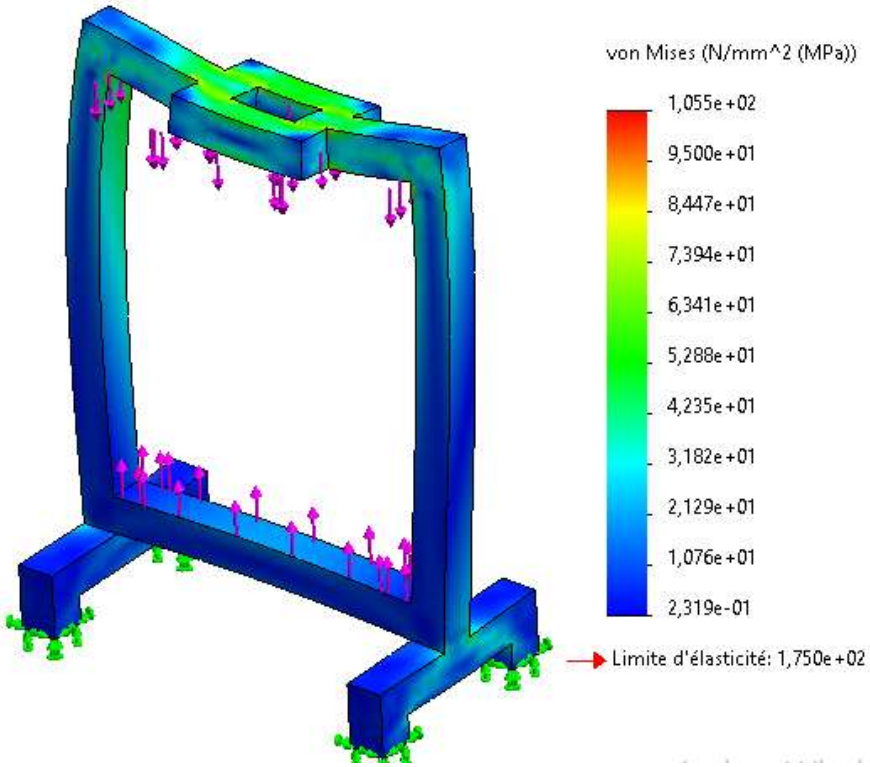


Figure 3-12 Le châssis en traction

Comportement du cadre sous une charge statique de : 2000 N

Contrainte équivalente maximale : 105.5 MPa

3.7.1.1.1 Etude statique

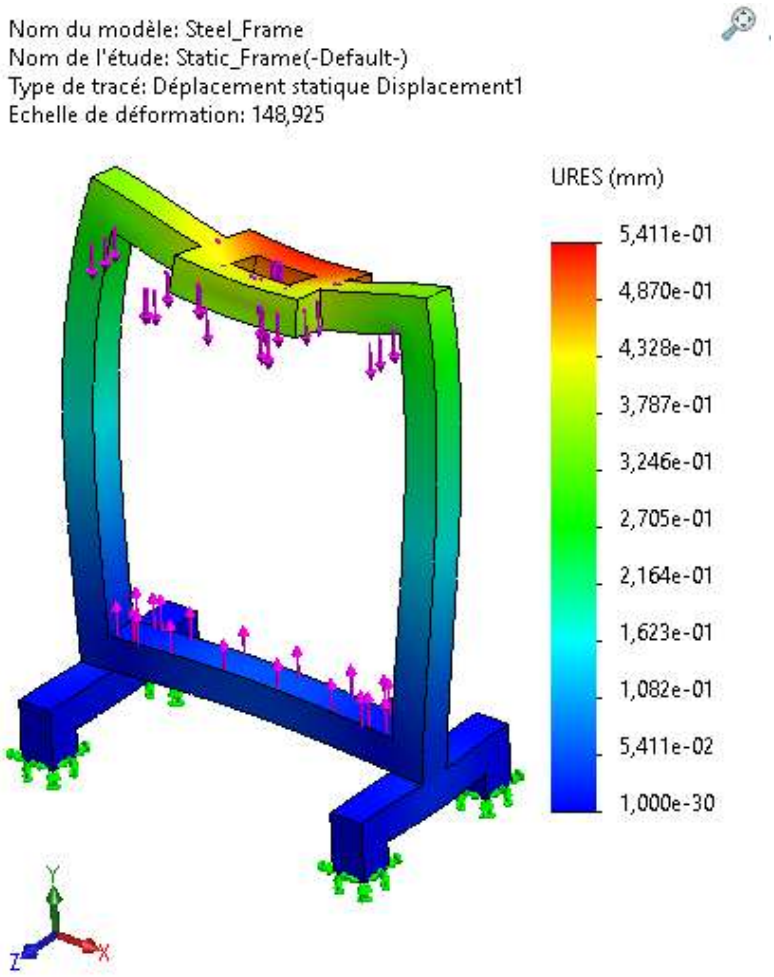
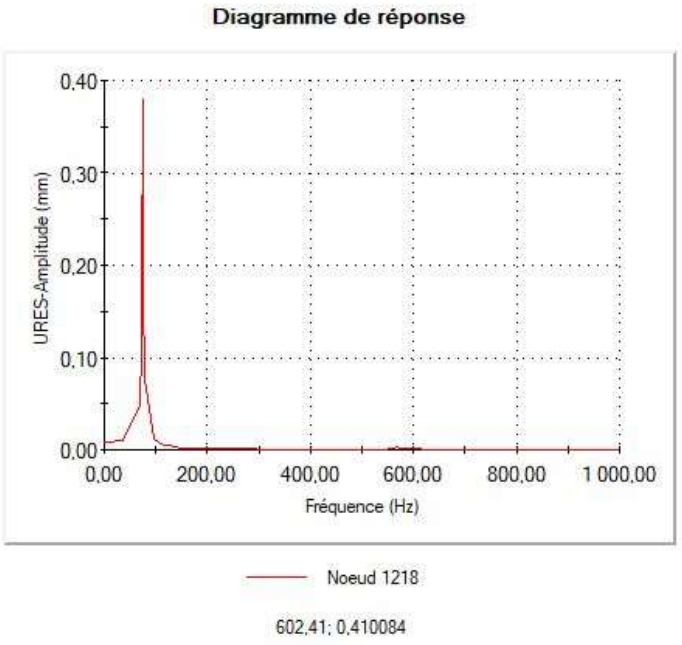


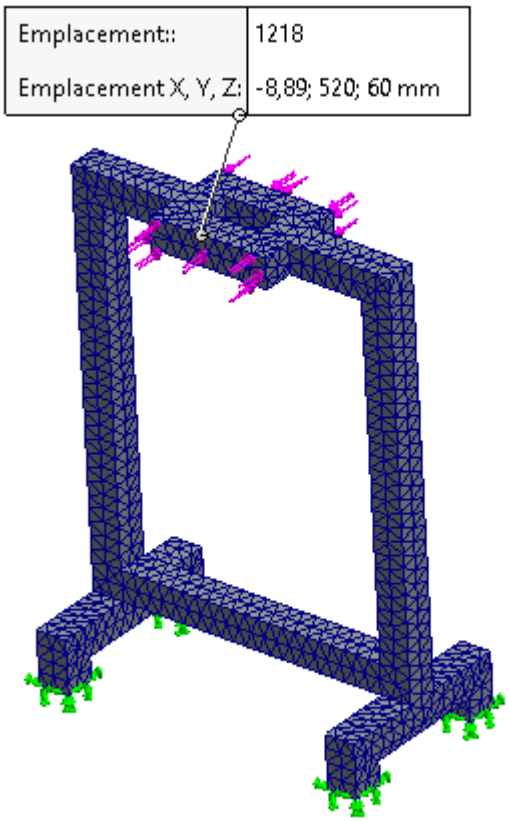
Figure 3-13 Etude statique sur le châssis

Comportement statique du cadre sous une charge statique de 2000 N

Déplacement résultant: 0.5411mm

3.7.1.1.2 Etude harmonique





3.8 Conclusion

En somme, SolidWorks ne se contente pas de répondre aux exigences de la conception moderne ; il redéfinit les standards de l'industrie en offrant une plateforme intuitive et complète pour transformer des idées en réalités tangibles. Son adoption continue dans diverses industries témoigne de son impact et de sa valeur ajoutée dans le processus de conception et de fabrication.

Chapitre IV

Composants électriques essentiels et contrôle de mouvement

4.1 Introduction

Le développement et la mise en œuvre de tout projet électrotechnique ou électronique impliquent l'utilisation d'une gamme variée de composants électriques. Parmi ces composants, les moteurs pas à pas occupent une place particulièrement importante dans de nombreuses applications où un contrôle précis du mouvement est nécessaire. Dans ce chapitre, nous explorerons en détail les différents composants électriques utilisés dans notre projet, en mettant l'accent sur le moteur pas à pas, un élément clé de notre système. Enfin, nous aborderons les aspects de programmation associés à l'utilisation de ces composants, fournissant ainsi une compréhension complète de leur fonctionnement et de leur intégration dans notre projet.

4.2 Partie électronique : Les composants électriques utilisés dans notre projet

4.2.1 Moteur pas à pas : Définition et principes de fonctionnement

Un moteur pas à pas est un dispositif électromécanique qui convertit des impulsions électriques en mouvement mécanique par incréments distincts, appelés "pas". Contrairement aux moteurs électriques conventionnels, qui tournent en continu, les moteurs pas à pas se déplacent en étapes précises, ce qui les rend particulièrement adaptés aux applications nécessitant un positionnement précis, comme les imprimantes 3D [2].

Le fonctionnement d'un moteur pas à pas repose sur des bobines électromagnétiques placées autour d'un rotoragnétique. Lorsqu'un courant électrique est envoyé à une bobine (Figure 4-2),

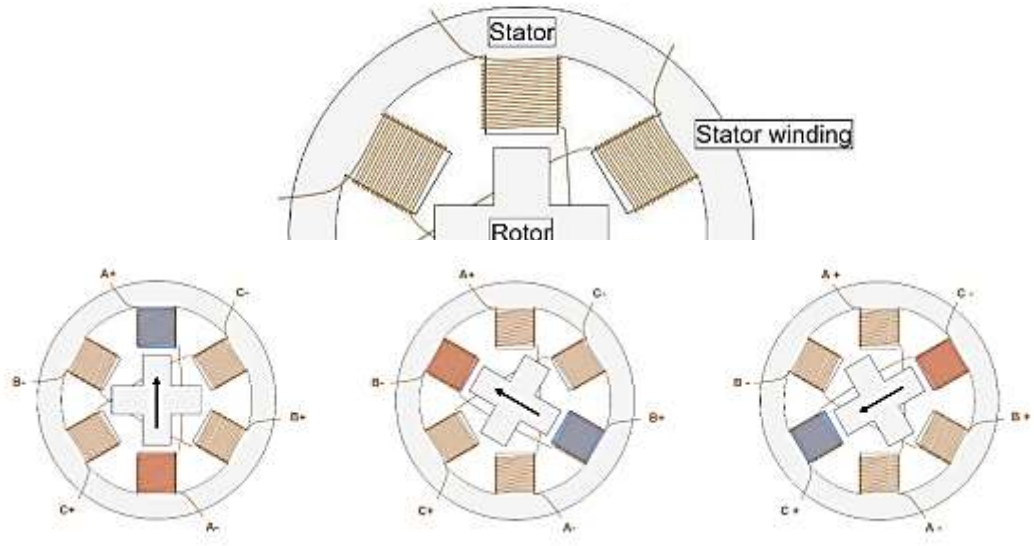


Figure 4-1 Les phases d’un moteur pas à pas

elle crée un champ magnétique qui attire le rotor et le fait avancer d'un pas. En activant séquentiellement différentes bobines dans un motif spécifique, le rotor se déplace de manière précise selon les impulsions électriques reçues [2].

4.2.1.1 Les avantages et les inconvénients du moteur pas à pas

Les moteurs pas à pas présentent plusieurs avantages et inconvénients [26] :

4.2.1.1.1 Avantages

- **Précision** : Les moteurs pas à pas offrent une précision de positionnement élevée, ce qui les rend adaptés à des applications où une précision fine est nécessaire, comme les imprimantes 3D et les machines-outils CNC.
- **Contrôle** : Ils offrent un contrôle précis sur la vitesse et la position. En raison de leur conception, ils peuvent être commandés pour avancer ou reculer d'un pas à la fois, ce qui permet un contrôle précis du mouvement.
- **Couple élevé à basse vitesse** : Contrairement à de nombreux autres types de moteurs, les moteurs pas à pas offrent un couple élevé même à des vitesses de rotation basses, ce qui les rend adaptés à des applications nécessitant un couple élevé à des vitesses de rotation faibles.

4.2.1.1.2 Inconvénients

- **Chaleur** : Les moteurs pas à pas peuvent générer beaucoup de chaleur, en particulier lorsqu'ils sont utilisés à des vitesses élevées ou avec des charges importantes.
- **Vibrations** : À des vitesses élevées, les moteurs pas à pas peuvent produire des vibrations qui peuvent affecter la précision du mouvement ou causer des bruits indésirables.

4.2.1.2 Domaines d’application d’un moteur pas à pas

Les moteurs pas à pas sont largement utilisés dans divers domaines en raison de leur précision et de leur contrôle du mouvement. Leurs applications principales incluent l'impression 3D, les machines-outils CNC, la robotique, l'automatisation industrielle, les équipements médicaux, l'électronique grand public, les instruments de mesure et d'analyse, ainsi que les systèmes de dosage et de distribution. Ils offrent un positionnement précis et reproductible, ce qui les rend essentiels pour des tâches telles que la fabrication de pièces, la production d'images médicales

précises, la réalisation d'opérations d'usinage automatisées, et bien plus encore. En résumé, les moteurs pas à pas jouent un rôle crucial dans de nombreux secteurs où le mouvement contrôlé avec précision est nécessaire [27].

4.3 Module HX711

Amplificateur de signal pour capteur de force.

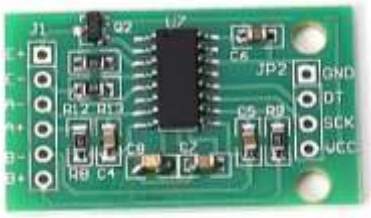


Figure 4-3 Module HX711

4.4 Fils de connexion

Pour relier les différents composants.



Figure 4-4 Fils de connexion

4.5 Plaque d’essais

Utilisée pour créer des circuits électroniques sans soudure.

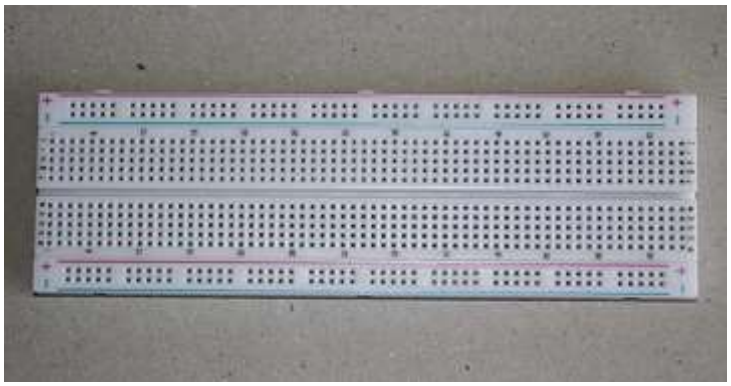


Figure 4-5 Plaque d'essais

4.6 Partie de programmation

4.6.1 Programme de calibrage (ARDUINO)

```
1
2   #include "HX711.h"
3   const int DOUT=A1;
4   const int CLK=A0;
5
6
7   HX711 balanza;
8   void setup() {
9     Serial.begin(9600);
```

Figure 4-6 Programme de calibrage (ARDUINO)

Ce programme Arduino utilise à nouveau la bibliothèque HX711 pour interfacer une cellule de charge et lire les valeurs de poids, mais il diffère légèrement du précédent.

1. **Inclusion de la bibliothèque module HX711 :** Comme dans le précédent programme, la ligne '#include "HX711.h"' importe la bibliothèque module HX711.
2. **Définition des broches pour DOUT et CLK :** Les constantes 'DOUT' et 'CLK' sont définies pour représenter les broches du module HX711 connectées à la broche de données (DOUT) et à l'horloge (CLK) de l'Arduino, respectivement.
3. **Initialisation de l'objet HX711 :** Dans la fonction 'setup (),' la communication série est initialisée à une vitesse de 9600 bauds avec 'Serial.begin(9600);'. Ensuite, l'objet 'balance' est initialisé avec 'balance. Begin (DOUT, CLK);', indiquant les broches utilisées pour la communication avec le module HX711.

4. **Calibrage de la balance :** Contrairement au précédent programme, cette fois-ci, la balance est initialement calibrée avec la ligne ‘balance.set_scale ();’, ce qui utilise l'échelle par défaut (1). Ensuite, la fonction ‘balance. Tare (20);’ est appelée pour définir le poids actuel sur la balance comme tare (zéro).

4.6.2 Programme de capteur de force (ARDUINO)

```
// the setup routine runs once when you press reset:
#include "HX711.h"

const int DOUT=A1;
const int CLK=A0;

HX711 balanza;
```

Figure 4-7 Programme de capteur de force.

Ce programme Arduino utilise la bibliothèque HX711 pour interfacer une cellule de charge et lire les valeurs de poids.

1. **Inclusion de la bibliothèque module HX711** : La ligne ‘#include "HX711.h"’ importe la bibliothèque HX711, qui permet de communiquer avec le convertisseur analogique-numérique HX711.
2. **Définition des broches pour DOUT et CLK** : Les constantes ‘DOUT’ et ‘CLK’ sont définies pour représenter les broches du module HX711 connectées à la broche de données (DOUT) et à l'horloge (CLK) de l'Arduino, respectivement.
3. **Initialisation de l'objet module HX711** : Dans la fonction ‘setup ()’, la communication série est initialisée à une vitesse de 9600 bauds avec ‘Serial.begin(9600);’. Ensuite, l'objet ‘balanza’ est initialisé avec ‘balanza. Begin (DOUT, CLK);’, indiquant les broches utilisées pour la communication avec le module HX711.
4. **Calibrage de la balance** : Le programme effectue un calibrage de la balance en utilisant les fonctions ‘balanza.set_scale (44057.2859);’ pour définir l'échelle de la balance en fonction des caractéristiques spécifiques de la cellule de charge, et ‘balanza. Tare (20);’ pour définir le poids actuel sur la balance comme tare (zéro).
5. **Boucle principale (‘loop’)** : La boucle principale commence par afficher le poids en kilogrammes avec la ligne ‘Serial.print("Peso: "); Serial.print(balanza.get_units (20),3); Serial.println(" kg");’. La fonction ‘balanza.get_units (20)’ retourne le poids mesuré,

avec une compensation de tare pour les 20 lectures précédentes, et ‘Serial.print’ affiche cette valeur sur le moniteur série. Le ‘3’ dans ‘Serial.print(balanza.get_units (20),3);’.

6. Ensuite, le programme affiche le poids en Newtons avec la ligne ‘Serial.print("Newton "); Serial.print(balanza.get_units (20) *9.8067,3); Serial.println("N");’. Il utilise la même méthode pour obtenir le poids en Newtons, en multipliant la valeur en kilogrammes par l'accélération gravitationnelle standard (9.8067 m/s²).

4.6.3 Programme de capteur de déplacement (ARDUINO)

```
// the setup routine runs once when you press reset:
void setup() {
  // initialize serial communication at 9600 bits per second:
  Serial.begin(9600);
}
```

Figure 4-8 Programme de capteur de déplacement.

1. **Initialisation de la communication série** : La fonction Serial.begin(9600); initialise la communication série à une vitesse de transmission de 9600 bits par seconde. Cela permet à l'Arduino de communiquer avec le moniteur série.
2. **Boucle principale (‘loop’)** : Cette boucle s'exécute en continu une fois que la configuration initiale est terminée.
3. **Lecture de la valeur analogique :** La ligne ‘int sensorValue = analogRead(A2);’ lit la valeur analogique provenant de la broche A2. Cette valeur est comprise entre 0 et 1023, car Arduino utilise une résolution analogique de 10 bits (2^10 = 1024 valeurs possibles).
4. **Conversion de la valeur analogique en tension :** La ligne ‘float voltage = sensorValue * (25 / 1023.0);’ convertit la valeur analogique lue en une tension en volts. La tension de référence par défaut de l'Arduino est de 5 volts, donc la formule ‘ (25 / 1023.0)’ convertit les valeurs analogiques en tension en multipliant la valeur lue par (5 / 1023).
5. **Affichage de la valeur de déplacement :** Les lignes suivantes affichent la valeur convertie de la tension sur le moniteur série :

```
1   Serial.print("Deplacement: ");
2   Serial.println(voltage);
3
```

Cela affiche "Déplacement : " suivi de la valeur de la tension (en volts) sur une nouvelle ligne.

6. **Délai :** La fonction ‘delay (250);’ introduit un délai de 250 millisecondes entre chaque lecture et affichage de la valeur. Cela permet de ralentir le taux de rafraîchissement et de rendre les données plus lisibles sur le moniteur série.

4.6.4 Programme de capteur de force et de déplacement (ARDUINO)

```
#include "HX711.h"

const int DOUT = A1;
const int CLK = A0;

HX711 balance;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  balance.begin(DOUT, CLK);
  Serial.print("ADC value reading");
  Serial.println(balance.read());
  Serial.println("Do not put any objects on the scale");
```

Figure 4-9 Programme de capteur de force et de déplacement.

- **Initialisation**

1. Le module HX711 est incluse pour permettre la communication avec le capteur de force.
2. Les broches DOUT et CLK sont définies comme les broches de données et d'horloge respectivement.

- **Configuration initiale**

1. La communication série est initialisée à une vitesse de 9600 bits par seconde.
2. La balance (module HX711) est initialisée avec ses broches de données et d'horloge.
3. Une lecture initiale du convertisseur analogique-numérique et affichée sur le moniteur série.
4. La balance est calibrée avec une échelle et un tarage pour mesurer le poids correctement.

- **Boucle principale (loop ())**

1. La tension analogique est lue à partir de la broche A2 et convertie en millimètres (mm) en utilisant une équation de proportionnalité.
2. La valeur du déplacement est affichée sur le moniteur série.
3. La mesure de poids (en kilogrammes) est obtenue à partir de la balance et affichée sur le moniteur série.
4. La valeur de poids est également convertie en Newtons (N) et affichée sur le moniteur série.

5. Un délai de 500 millisecondes est ajouté entre chaque itération de la boucle principale pour éviter une lecture trop rapide et pour permettre un affichage clair des données.

4.7 Installation finale de la machine de flexion

La machine de flexion, utilisée pour tester la résistance et la déformation des matériaux sous charge, la machine comporte une structure métallique.

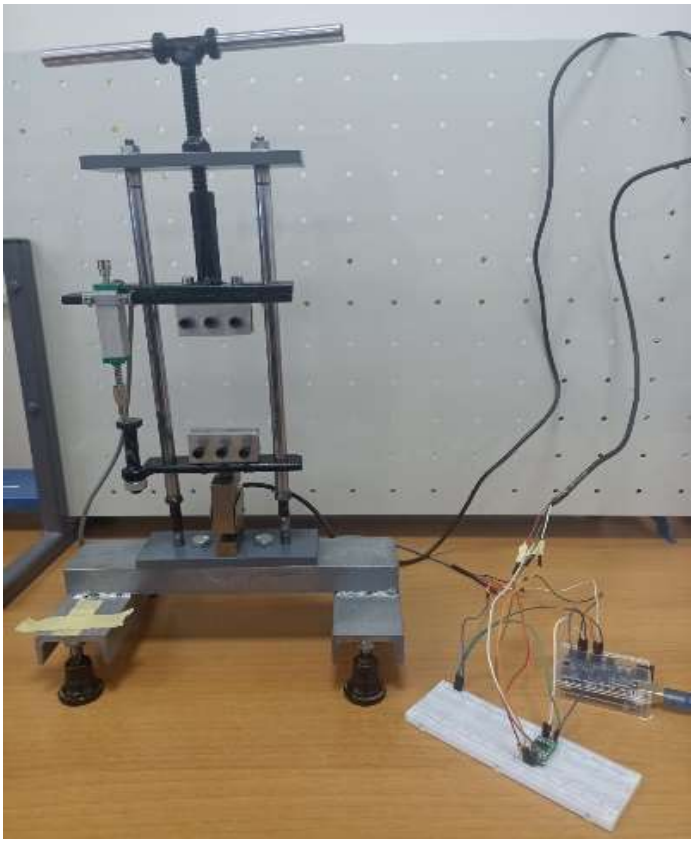


Figure 4-10 La machine de flexion

4.8 Prototypage d'un circuit de mesure de force et de déplacement avec Arduino Uno

Ce projet a pour but de démontrer l'utilisation de capteurs de force et de déplacement avec une carte Arduino Uno pour collecter et traiter des données précises.

Le capteur de force, connectés via le module HX711, permettent de mesurer la pression ou le poids, tandis que le capteur de déplacement détecte les mouvements.

L'Arduino Uno sert de cerveau central, lisant et traitant les signaux de ces capteurs. Le fonctionnement du circuit repose sur l'amplification et la conversion des signaux par le HX711 et la capacité de l'Arduino à lire et traiter ces informations. Ce projet illustre comment utiliser

ces technologies pour des applications pratiques dans les domaines de l'ingénierie et de la robotique.

4.8.1 Composants du circuit

- **Carte Arduino Uno :** Plateforme de microcontrôleur pour prototypage.
- **Plaque d'essai (breadboard)** : Utilisée pour créer des circuits électroniques sans soudure.
- **Fils de connexion** : Pour relier les différents composants.
- **Module HX711** : Amplificateur de signal pour capteur de force.
- **Capteur de force (cellule de charge)** : Mesure la force.
- **Capteur de déplacement** : Mesure le déplacement.

4.8.2 Connexions et fonctionnement du circuit

4.8.2.1 Alimentation

- La carte Arduino est alimentée via le câble USB connecté à un ordinateur.
- Le module HX711 et les capteurs sont alimentés par l'Arduino via les broches 5V et GND.

4.8.2.2 Connexion du module HX711

- Le module HX711 est un convertisseur analogique-numérique (ADC) spécialisé dans la mesure de signaux de faible amplitude comme ceux produits par une cellule de charge.
- Les broches VCC et GND du module HX711 sont connectées aux broches 5V et GND de l'Arduino.
- Les broches DT (Data) et SCK (Clock) du HX711 sont connectées à deux broches numériques de l'Arduino

4.8.2.3 Connexion du capteur de force

- La cellule de charge est connectée aux entrées du module HX711 (E+ et E- pour l'alimentation de la cellule de charge et A+ et A- pour les signaux de sortie).
- La cellule de charge mesure la force appliquée et envoie un signal analogique au module HX711, qui amplifie et convertit ce signal en une valeur numérique lisible par l'Arduino.

4.8.2.4 Connexion du capteur de déplacement

- Le capteur de déplacement (potentiomètre) est connecté directement aux broches analogiques de l'Arduino pour lire les variations de déplacement.

4.8.3 Fonctionnement du circuit

4.8.3.1 Alimentation et initialisation

- L'Arduino fournit l'alimentation aux composants et initialise la communication avec le module HX711 et le capteur de déplacement.

4.8.3.2 Lecture des données du capteur de force

- Le module HX711 amplifie le signal analogique de la cellule de charge et le convertit en un signal numérique.
- L'Arduino lit les données numériques du HX711 via les broches DT et SCK.

4.8.3.3 Lecture des données du capteur de déplacement

- L'Arduino lit les valeurs analogiques du capteur de déplacement via les broches analogiques.

4.8.3.4 Traitement des données

- Le programme sur l'Arduino traite les données des deux capteurs.

4.9 Conclusion

Ce chapitre a exploré les composants électriques essentiels utilisés dans notre projet, en mettant particulièrement l'accent sur le moteur pas à pas et le pilote de moteur Drive 8825. Nous avons examiné en détail le fonctionnement précis et reproductible du moteur pas à pas, soulignant sa pertinence pour diverses applications. De plus, nous avons évalué les avantages comme la précision du contrôle du mouvement, tout en reconnaissant les défis liés à la chaleur et aux vibrations.

Dans la section 4.7, nous avons également exploré le prototypage d'un circuit de mesure de force et de déplacement avec une carte Arduino Uno. Ce projet illustre l'utilisation des capteurs de force et de déplacement, ainsi que leur intégration avec l'Arduino Uno pour la collecte et le

traitement précis des données. Le fonctionnement du circuit repose sur l'amplification et la conversion des signaux par le module HX711, permettant à l'Arduino de lire et de traiter efficacement ces informations.

Ce chapitre fournit une base essentielle pour comprendre et intégrer de manière efficace les composants électriques dans notre projet, démontrant leur importance et leur fonctionnement dans le cadre de notre application spécifique. L'utilisation combinée des moteurs pas à pas, des capteurs de force et de déplacement avec une carte Arduino illustre pleinement le potentiel de ces technologies pour des projets de prototypage avancés en ingénierie et en robotique.

Conclusion générale

Ce mémoire a exploré en profondeur la problématique de la caractérisation des matériaux composites, en mettant l'accent sur la conception et le développement d'une machine d'essais miniature dédiée à ces matériaux. À travers une analyse approfondie des défis techniques et des enjeux associés à la caractérisation des composites, ainsi que des méthodes d'essai mécanique telles que la traction et la flexion, nous avons cherché à proposer des solutions innovantes pour améliorer la précision, la fiabilité et l'efficacité de ce processus crucial.

La conception de la machine d'essais miniature s'est avérée être un défi complexe, nécessitant une compréhension approfondie des propriétés mécaniques des composites ainsi que des exigences spécifiques des normes d'essai. En intégrant des capteurs de force et de position avec précision, nous avons pu obtenir des mesures fiables et reproductibles des propriétés mécaniques des composites, ouvrant ainsi la voie à une caractérisation plus précise et approfondie de ces matériaux.

En explorant les différentes méthodes d'essai mécanique et en identifiant les avantages et les limitations de chacune, nous avons pu établir des recommandations pour l'utilisation optimale de la machine d'essais miniature dans des applications industrielles variées. Cette machine offre non seulement une solution pratique et efficace pour la caractérisation des composites, mais elle contribue également à l'optimisation de leur conception et de leur application, en garantissant des performances mécaniques optimales dans des conditions d'utilisation réelles.

En conclusion, ce mémoire ouvre de nouvelles perspectives pour la caractérisation des matériaux composites, en proposant une approche innovante et pratique pour surmonter les défis associés à ce processus crucial. En combinant une conception ingénieuse avec une analyse approfondie des méthodes d'essai mécanique, cette recherche contribue à renforcer la position des composites en tant que matériaux de choix dans l'industrie moderne, tout en stimulant l'innovation et le développement de solutions technologiques avancées.

Références bibliographiques

[1] R. F. Gibson, Principles of Composite Material Mechanics, Boca Raton: CRC Press, 2016, pp. 4th ed., pp. 1-10.

[2] A. H. e. B. Drury, "Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications", Oxford: Newnes, 2019, p. 120 et 150.

[3] M. F. Ashby, Materials Selection in Mechanical Design, Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2011, pp. pp. 300-320.

[4] R. M. Jones, Mechanics of Composite Materials, Boca Raton, FL: CRC Press, 1999, pp. pp. 150-170.

[5] R. M. Jones, Mechanics of Composite Materials, Boca Raton, FL: CRC Press, 1999, pp. pp. 180-200.

[6] D. &. C. T. W. Hull, An Introduction to Composite Materials, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1996, pp. pp. 50-70.

[7] A. International, ASTM D3039 / D3039M-17: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, est Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

[8] N. P. &. G. E. Avdelidis, Testing and characterization of sustainable innovative materials, systems and structures, Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2019, pp. pp. 15-30.

[9] W. D. &. R. D. G. Callister Jr., Materials Science and Engineering: An Introduction, Hoboken, NJ: Wiley, 2017, pp. pp. 220-250.

[10] K. K. Chawla, Composite Materials: Science and Engineering, New York, NY: Springer Science & Business Media, 2012, pp. p. 150-170.

[11] R. F. Gibson, Principles of Composite Material Mechanics, Boca Raton, FL: CRC Press, 2016, pp. pp. 200-220.

[12] J. N. G. Stephen P. Timoshenko, Theory of Elasticity, New York: McGraw-Hill, 1970.

[13] J. Fraden, Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications, New York, NY: Springer Science & Business Media, 2004, pp. pp. 1-20.

[14] J. E. Colgate, Capteurs et actionneurs industriels, Paris, France: Dunod, 2007, pp. pp. 100-120.

[15] P. Seshu, Experimental Stress Analysis, Boca Raton, FL: CRC Press, 2009, pp. pp. 150-170.

[16] J. G. Webster, "Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook", Boca Raton: CRC Press, 2014, p. 300 et 400.

[17] M. Margolis, "Arduino Cookbook", Sebastopol: O'Reilly Media, 2020, p. 10 et 30.

[18] S. Monk, "Programming Arduino: Getting Started with Sketches", New York: McGraw-Hill Education, 2016, p. 15 et 40.

[19] M. B. e. M. Shiloh, "Getting Started with Arduino", Sebastopol: O'Reilly Media, 2022, p. 20 et 40.

[20] S. Franco, "Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits", New York: McGraw-Hill Education, 2014, p. 50 et 80.

[21] A. S. S. e. K. C. Smith, "Microelectronic Circuits", New York: Oxford University Press, 2020, p. 100 et 130.

[22] D. P. e. M. Planchard, "Engineering Design with SOLIDWORKS 2020", Mission: SDC Publications, 2020, p. 1 et 30.

[23] R. C. Hibbeler, Mécanique des matériaux : Deuxième édition, Paris: Pearson, 2015, pp. 65-68.

[24] S. P. e. W.-K. S. Timoshenko, Theory of Plates and Shells, New York: McGraw-Hill, 1959, pp. 313-316.

[25] T. H. Courtney, Mechanical Behavior of Materials, Long Grove: 2nd Edition, 2000.

[26] J. Hindmarsh, "Stepper Motor Control Using Arduino", Berkeley: Apress, 2018, p. 30 et 50.

[27] M. Böhnel, "Stepper Motors: Fundamentals, Applications and Design", Berlin: Springer, 2017, p. 100 et 130.

[28] T. Instruments, "DRV8825 Stepper Motor Controller IC", Dallas: Texas Instruments, Selon la date de publication du document.

[29] M. (. Kutz, Handbook of Materials Selection, New York, NY: John Wiley & Sons, Inc., 2002.

[30] P. K. Mallick, Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design, Boca Raton, FL: CRC Press, 2007, pp. pp. 1-20.

[31] T. L. Floyd, "Electronic Devices", Upper Saddle River: Pearson Education, 2017, p. 300 et 350.

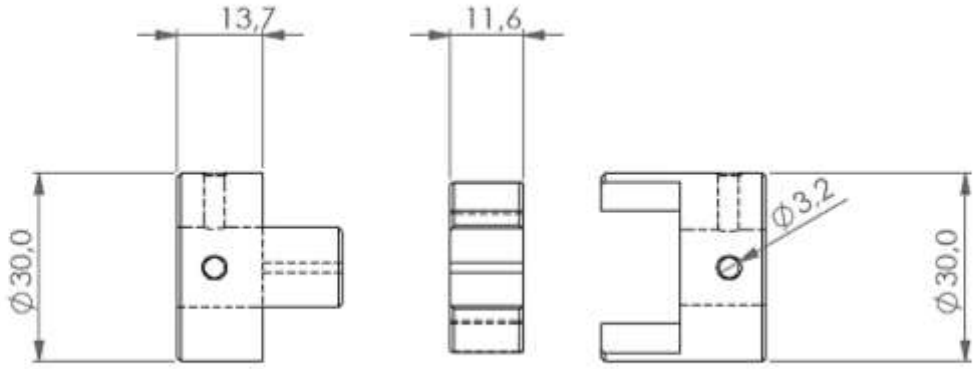
Sites WEB

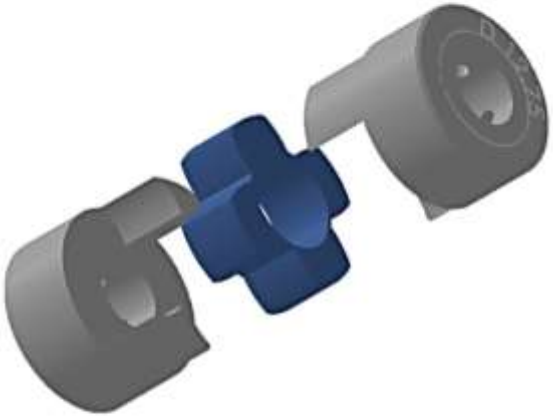
Arduino - Site officiel: https://www.arduino.cc/en/software.

Mathworks - Site officiel: https://www.mathworks.com/

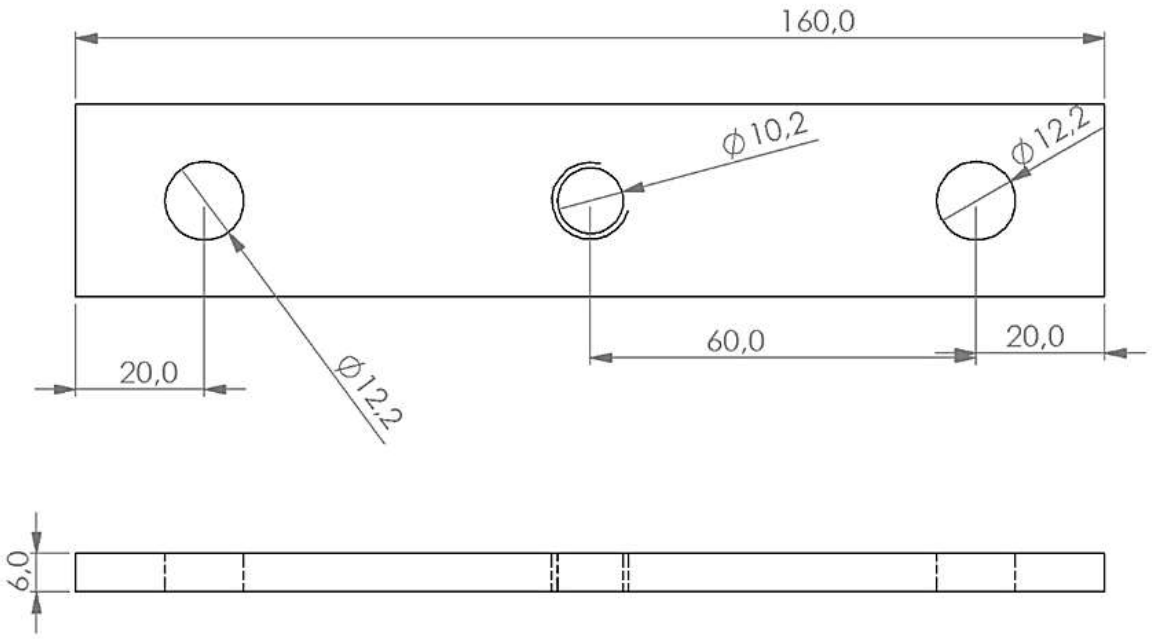
mathworks.com/products/simulink - Site officiel: https://www.mathworks.com/products/simulink.html

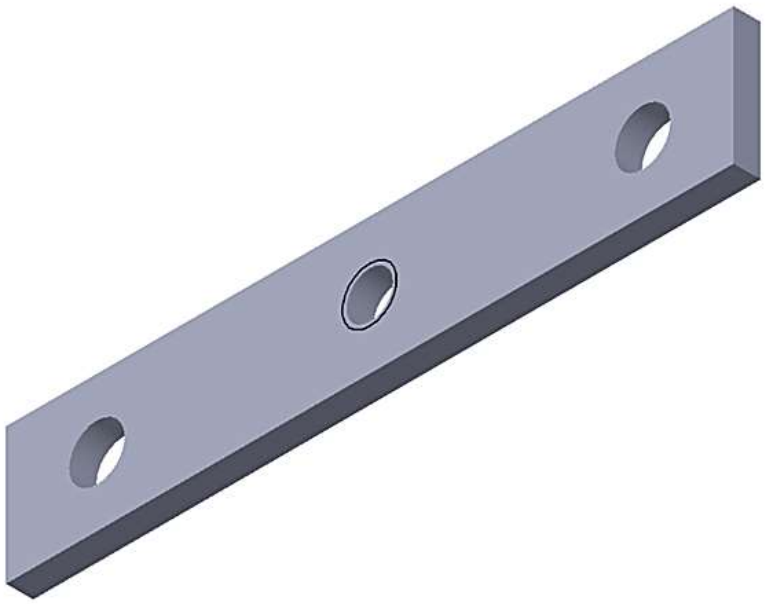
Annexes



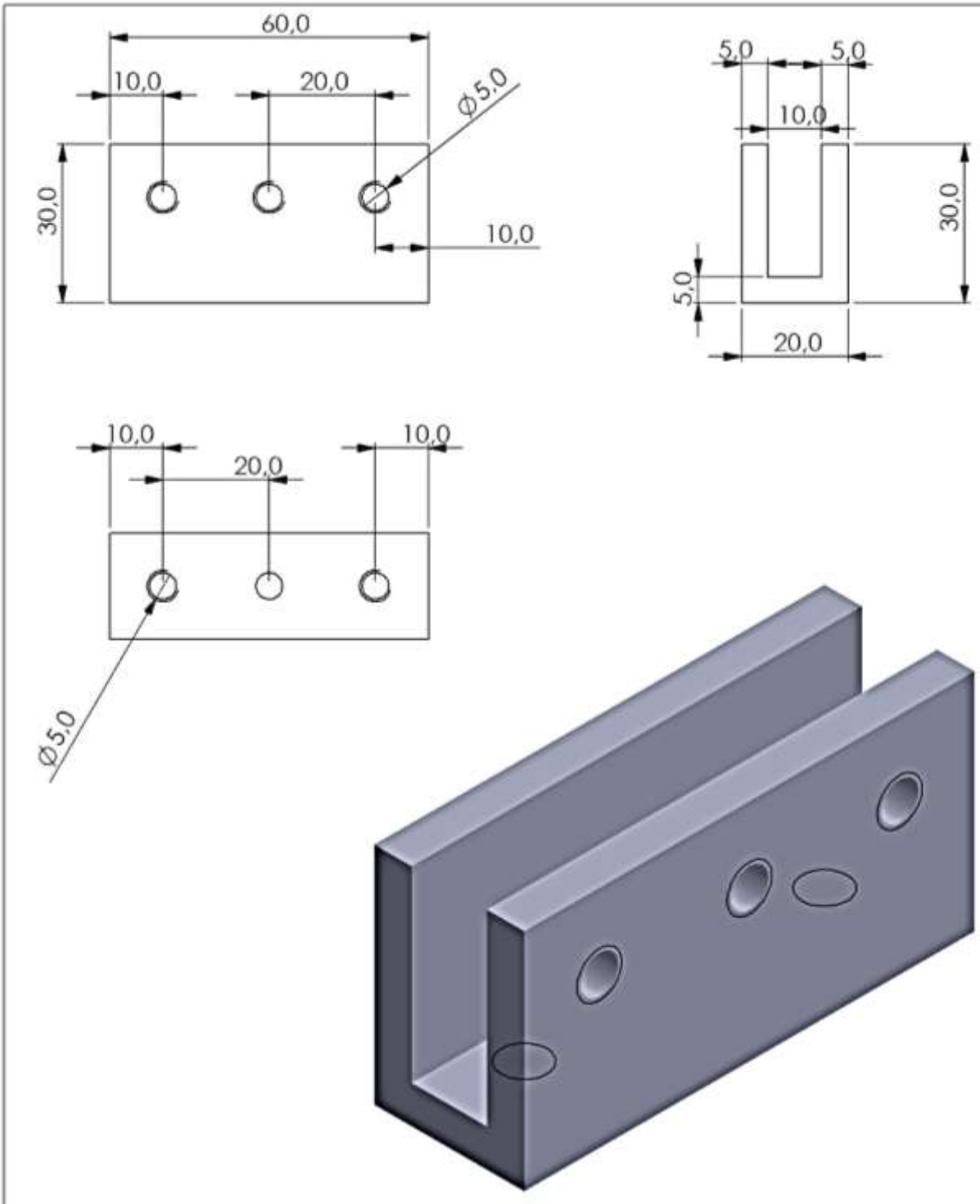


Université Dr Yahia Farès de Médéa		
Mécatronique	Conception d'une machine d'essais miniature pour matériaux composites	Cherair/Mazoun
	Accouplement	JUIN - 2024
format:A4		Ehelle 1:1

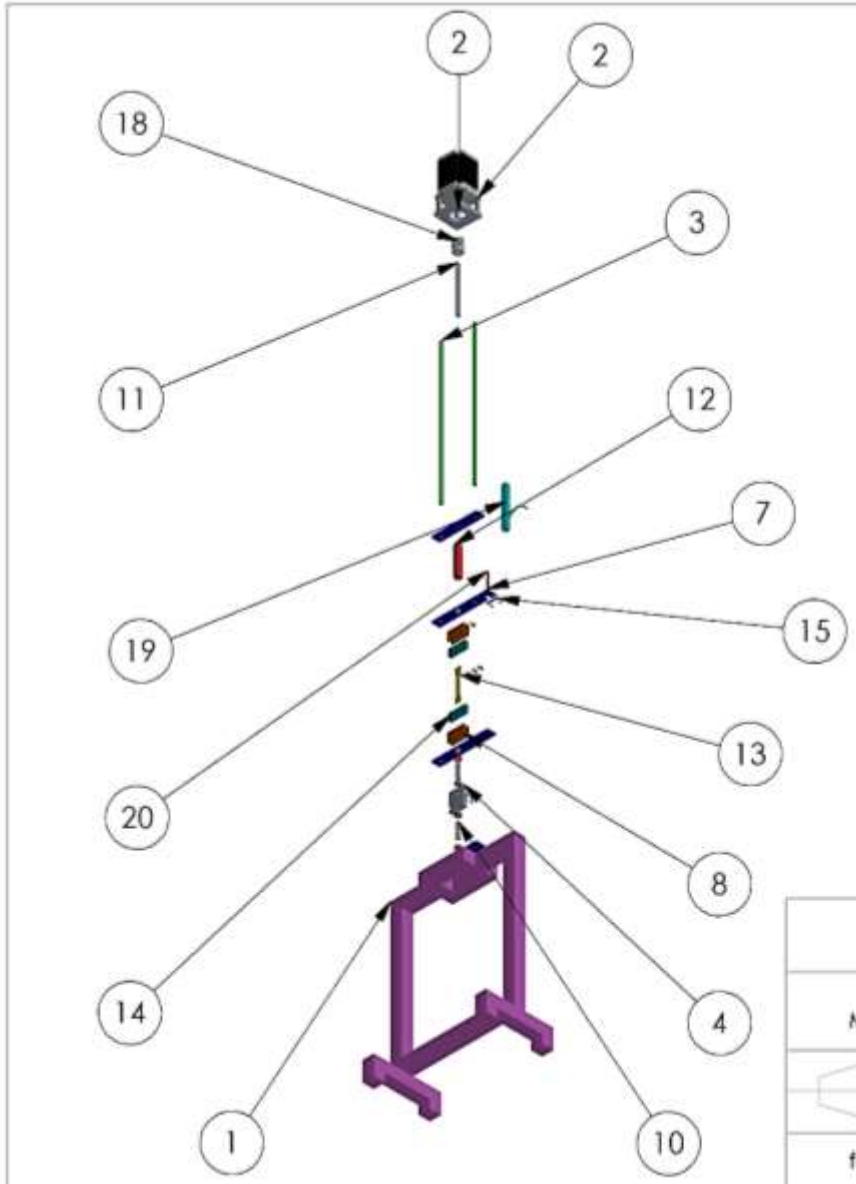




Université Dr Yahia Farés de Médéa		
Quantite:2	Conception d'une machine d'essais miniature pour matériaux composites	Cherair/Mazouni
	Plaque de fixation	JUIN - 2024
format:A4		Ehelle 1:1



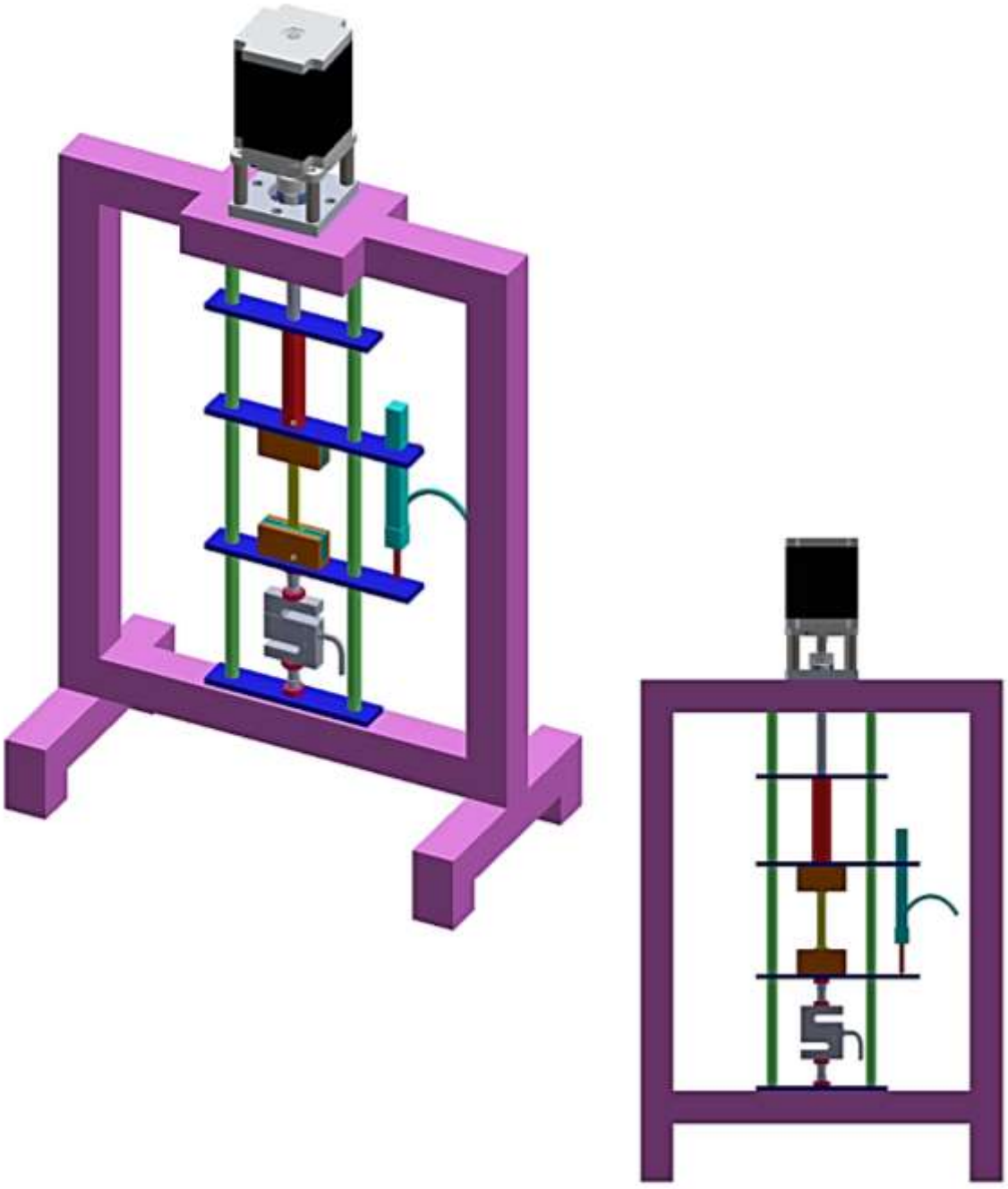
Université Dr Yahia Farés de Médéa		
Quantite:1	Conception d'une machine d'essais miniature pour matériaux composites	Cherair / Mazouni
	Support supérieure	JUIN - 2024
format:A4		Ehelle 1:1



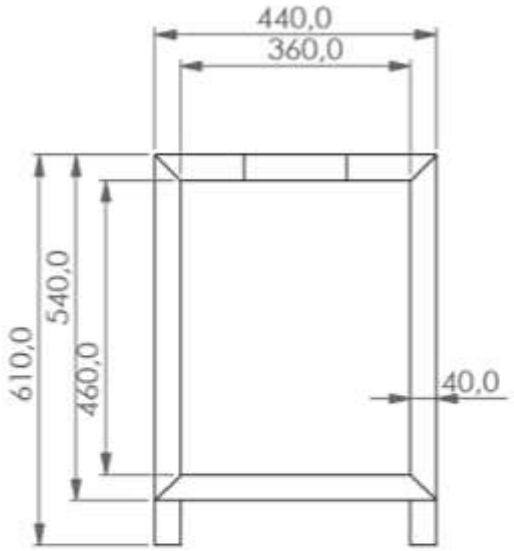
No. ARTICLE	NUMERO DE PIECE	QTE
1	châssis	1
2	Moteur pas a pas_Accouplement	1
3	Tige de guidage	2
4	écrou	1
5	Jaw_Plate	1
6	Jaw_Plate	2
7	Plaque de fixation	1
8	Machoire	2
9	ISO - 4035 - M12 - N	4
10	M12_Stud	2
11	Vis	1
12	écrou de guidage	1
13	Eprouvette	1
14	Plaque de fixation	4
15	Sensor_Fix	1
16	EN ISO 4762 M6 x 10 - 10N	6
17	EN ISO 4762 M4 x 6 - 6N	2
18	coupling_fycf30-12-12	1
19	LDS_Body	1
20	LDS_axes	1

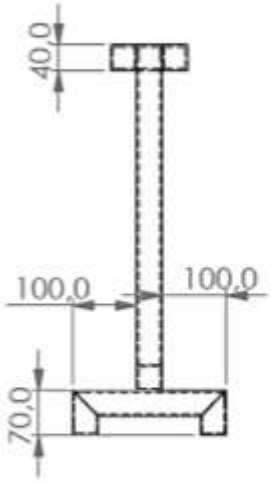
Université Dr Tahia Farès de Médéa

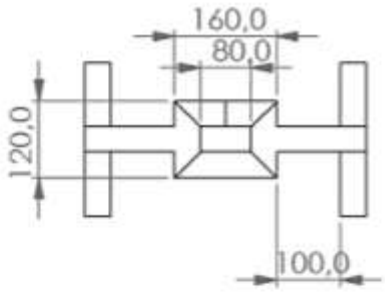
Mécatronique	Conception d'une machine d'essais miniature pour matériaux composites	Cherair/Mazouni
format:A3	**Vue éclatée de la machine**	JUIN - 2024
		Ehelle 1:16

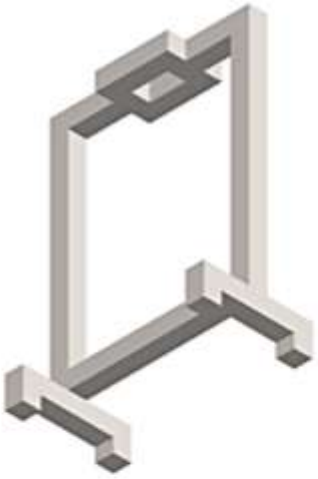


Université Dr Yahia Farés de Médéa		
Quantite:1	Conception d'une machine d'essais miniature pour matériaux composites	Cherair / Mazouni
	Assemblage A4	JUIN - 2024
format:A4		Ehelle 1:5

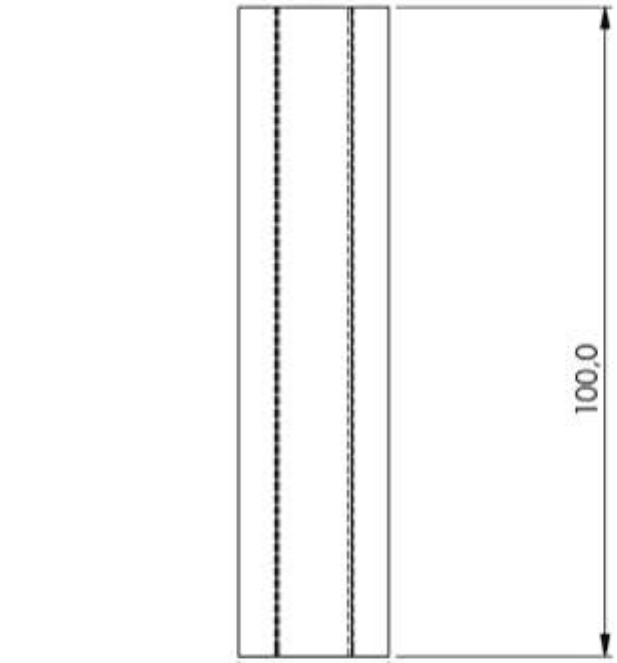




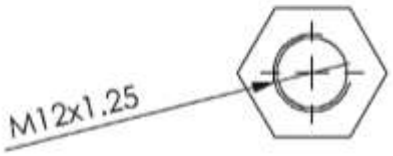




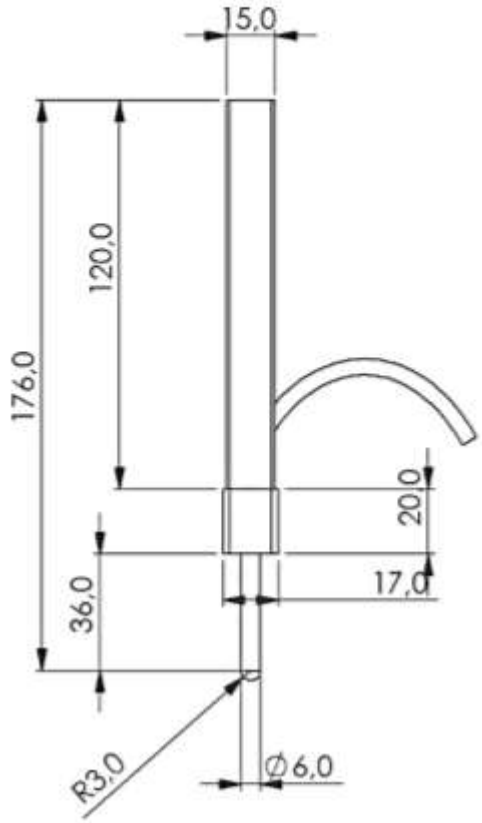
Université Dr Yahia Farès de Médéa		
Mécatronique	Conception d'une machine d'essais miniature pour matériaux composites	Cherair/Mazouni
	Le châssis	JUIN - 2024
format:A4		Ehelle 1:10

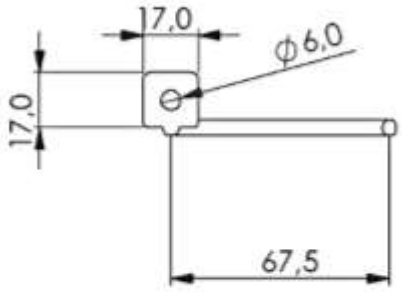


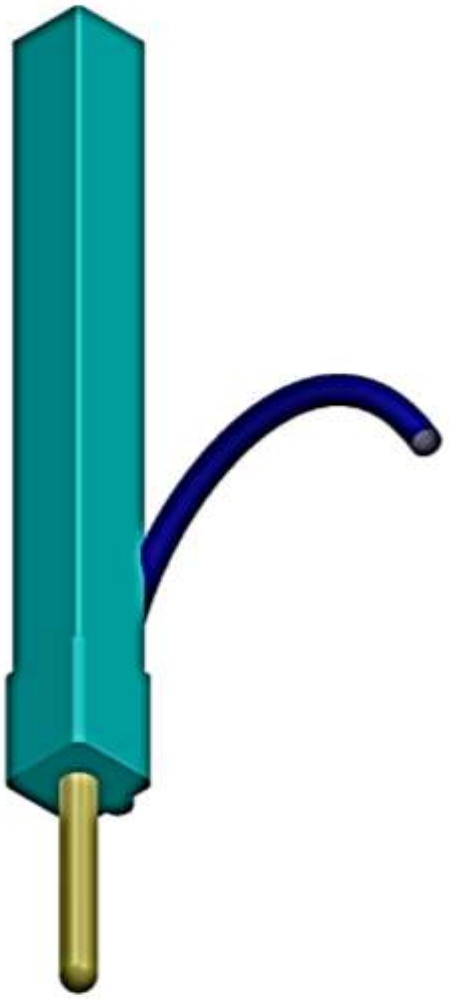




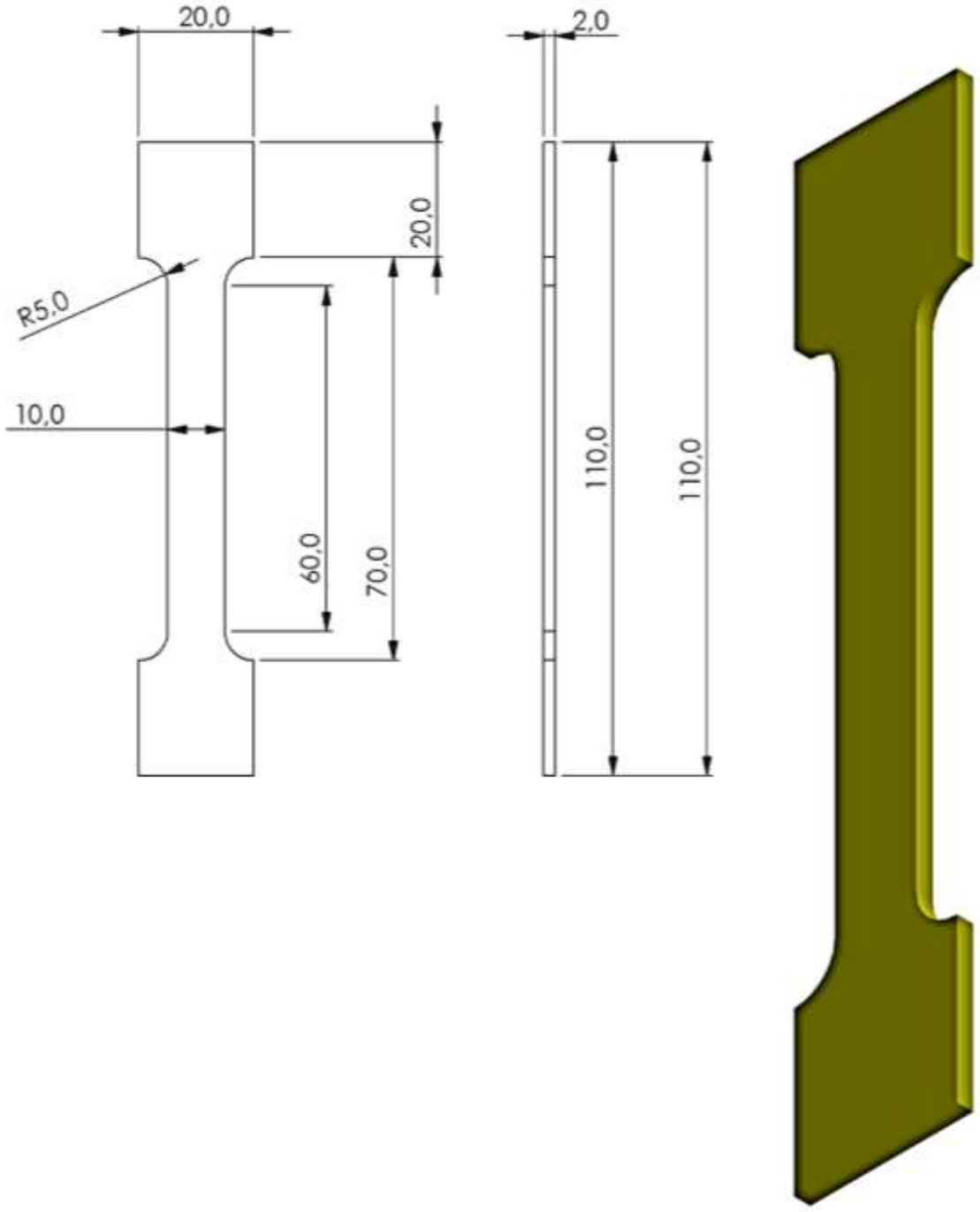
Université Dr Yahia Farès de Médéa		
Quantite:1	Conception d'une machine d'essais miniature pour matériaux composites	Cherair/Mazouni
	Guide écrou	JUIN - 2024
format:A4		Ehelle 1:1







Université Dr Yahia Farés de Médéa		
Quantite:1	Conception d'une machine d'essais miniature pour matériaux composites	Cherair/Mazouni
	Capteur de déplacement	JUIN - 2024
format:A4		Ehelle 1:1



Université Dr Yahia Farés de Médéa		
Quantite:1	Conception d'une machine d'essais miniature pour matériaux composites	Cherair/Mazouni
	Éprouvette	JUIN - 2024
format:A4		Ehelle 1:1