

Etudiant : Loïc ROGNON

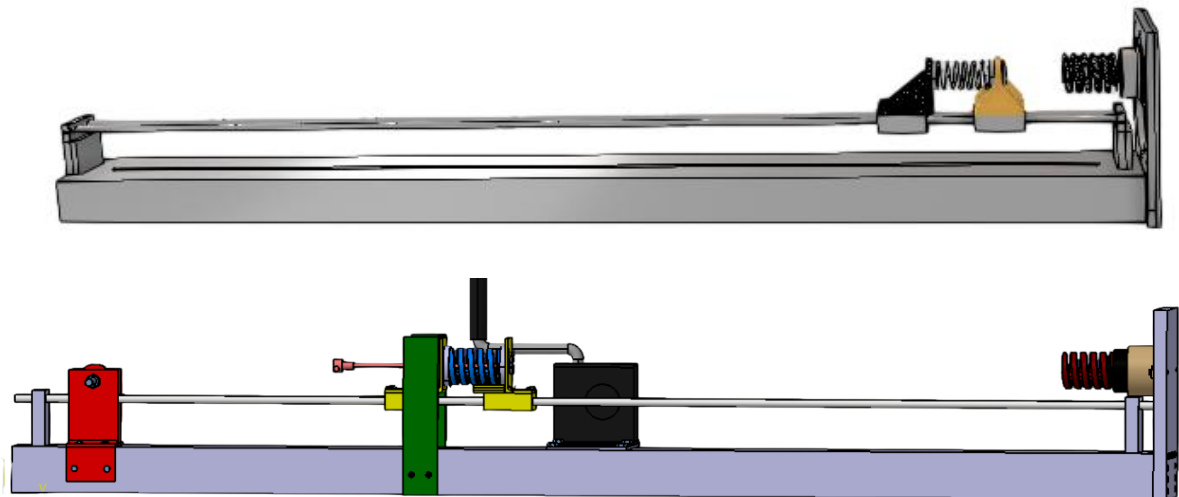
Tuteur entreprise : Loïc TADRIST (enseignant chercheur)

Tuteur université : Jean-Christophe VALLEE (Enseignant)

Soutenance orale : 27 juin 2025

Rapport de stage de 3^e année de BUT GMP

2025



Retournement temporel par choc avec échanges d'énergie non linéaires

Entreprise : Institut des Sciences du Mouvement (ISM)

Service : Systèmes Bio Inspirés (SBI)


Adresse : BATIMENT GENIE
MECANIQUE, 413 Avenue Gaston Berger,
Aix-en-Provence

Université : IUT Aix-En-Provence

Département : Génie mécanique et
productique

Adresse : 413 Avenue Gaston Berger
13090 Aix-en-Provence

Fiche d'identité et de confidentialité de l'entreprise :

FICHE D'IDENTITE ET DE CONFIDENTIALITE	
Année 2025	
STAGIAIRE :	ROBNON Loïc
TITRE :	Retournement temporel par choc avec échanges d'énergies non-linéaire
RESUME :	Conception, fabrication et montage d'un Parc de test pour l'étude expérimentale du retournement temporel en mécanique
Nombre de pages :	43
Nombre de références bibliographiques :	0
ENTREPRISE :	ISM Etienne-Jules MAREY
Président directeur général :	Mathieu PITHOUX
Nombre d'employés :	150
Domaine d'activité :	Recycle
Adresse :	163 avenue de Luning, Nanterre CEDEX 09
Téléphone :	01 73 94 5927
Télécopie :	
Tuteur industriel :	Loïc TADRIS
Fonction :	Enseignant-chercheur
Mail :	loic.tadris@ism-marey.fr
Téléphone :	01 73 94 63 93
PARTIE A REMPLIR PAR LE TUTEUR INDUSTRIEL	
Accessibilité de ce rapport (entourer la mention correcte) :	
<input checked="" type="radio"/> LIBRE	<input type="radio"/> CONFIDENTIEL pendant an(s)
Date :	20/06/2025
Nom du stagiaire :	ROBNON
Signature :	



Remerciements

Je tiens à remercier mon tuteur d'entreprise Monsieur Loïc TADRIST, enseignant chercheur pour Aix-Marseille Université et pour l'ISM, de m'avoir encadré tout au long de mon stage.

Je remercie également Madame Martine PITHIOUX, directrice de l'ISM, pour m'avoir offert l'opportunité d'effectuer mon stage au sein de l'Institut des Sciences du Mouvement.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude à Monsieur Jean-Marc LINARES, responsable de l'équipe SBI, ainsi qu'à Monsieur Julien CHAVES-JACOB, responsable de l'axe Mécanismes Bio-Inspirés, pour m'avoir intégré au sein de leur équipe Systèmes Bio-Inspirés.

Je souhaite remercier aussi Messieurs Guillaume WOLFF et Julien DIPERI, assistants ingénieurs, ainsi que Monsieur Florent BOUDERLIQUE et sa bonne humeur, pour leur aide et conseils dans la conception, la fabrication et le montage du banc de test tout au long de mon stage.

Enfin, je remercie l'équipe pédagogique GMP pour la transmission de leur savoir, de leur intérêt pour la mécanique et l'innovation, et ce depuis bientôt trois ans.



SOMMAIRE

1.	CADRE DU STAGE.....	- 3 -
1.1	L'Institut des Sciences du Mouvement (ISM)	- 3 -
1.1.1	L'histoire de l'ISM Etienne Jules MAREY	- 3 -
1.1.2	Présentation structurelle et localisation.....	- 4 -
1.1.3	Les activités et les équipes de l'ISM	- 6 -
1.1.4	Les partenaires de l'ISM	- 10 -
1.1.5	Organigramme de l'ISM Etienne-Jules MAREY	- 11 -
2.	RAPPORT TECHNIQUE	- 12 -
2.1	Le sujet de la mission :.....	- 12 -
2.1.1	Mise en contexte	- 12 -
2.1.2	Livrables et responsabilités confiées	- 13 -
2.2	Calendrier des démarches réalisées : diagramme GANTT effectué.	- 13 -
2.3	Développement des phases de la mission :	- 14 -
2.3.1	Analyse de l'étude théorique faite l'an dernier	- 14 -
2.3.2	Conception, fabrication et montage du banc d'essai	- 21 -
2.3.3	Essai et améliorations possibles	- 36 -
2.4	Conclusion et objectifs pour la fin de ce stage	- 40 -
3.	RAPPORT PPP	- 40 -
4.	CONCLUSION PERSONNELLE	- 42 -
5.	ANNEXES :	- 43 -



INTRODUCTION

Afin de valider la troisième année de mon Bachelor Universitaire et Technologique en Génie Mécanique et Productique à l'IUT d'Aix-en-Provence, j'ai réalisé mon immersion professionnelle du 24/03/2025 au 16/05/2025 et du 05/06/2025 au 04/07/2025 au sein de l'Institut des Sciences du Mouvement.

Cette coupure de deux semaines s'explique par le fait qu'en tant qu'arbitre catégorie « avenir » de la Fédération Française de Tennis, je suis désigné pour arbitrer à Roland Garros sur cette période-là.

Le sujet qui m'a été confié est : « Retournement temporel par choc avec échanges d'énergie non linéaire ». Ce projet s'inscrit dans les travaux de recherche menés au sein de l'équipe Systèmes Bio-Inspirés (SBI) de l'Institut des Sciences du Mouvement. Ce sujet avait été initialement exploré par Loïc Tadriss il y a quelques années, sans aboutir à une expérimentation complète. L'année dernière, un stagiaire a repris le projet en réalisant une étude théorique approfondie, aujourd'hui quasiment finalisée.

Mon objectif a donc été de poursuivre ce travail en mettant en œuvre physiquement les résultats théoriques à l'aide d'un banc d'essai expérimental. Pour cela, j'ai été chargé de concevoir, fabriquer et assembler l'ensemble des pièces nécessaires à la réalisation du banc de test, afin de valider expérimentalement les résultats obtenus de manière analytique.

Dans ce rapport, je commencerai par présenter le cadre de mon stage, puis je décrirai en détail le projet que j'ai réalisé, et enfin, je conclurai en exposant ce que cette expérience de stage m'a apportée.



1. CADRE DU STAGE

1.1 L'Institut des Sciences du Mouvement (ISM)

1.1.1 L'histoire de l'ISM Etienne Jules MAREY

L'Institut des Sciences du Mouvement (ISM) est un laboratoire de recherche situé à Marseille, sur le campus universitaire de Luminy. Il est rattaché à l'Université d'Aix-Marseille (AMU), au CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) et à l'École Centrale de Marseille, sous le statut d'unité mixte de recherche (UMR 7287).

L'institut porte le nom d'Étienne-Jules MAREY (1830–1904), un scientifique, médecin, physiologiste et inventeur français reconnu pour ses travaux pionniers sur l'analyse du mouvement. Etienne Jules MAREY a développé des dispositifs permettant d'enregistrer et de décomposer les mouvements des êtres vivants, notamment à travers la chronophotographie. Ses recherches ont jeté les bases de la biomécanique moderne et influencé de nombreux domaines, dont la physiologie, la cinématographie et les sciences du sport.

Créé dans la continuité de ces travaux, l'ISM a pour objectif de mieux comprendre le fonctionnement du mouvement humain et animal. Au fil des années, il s'est structuré autour d'équipes pluridisciplinaires réunissant des chercheurs en biomécanique, physique, neurosciences, robotique et sciences de l'ingénieur.

Aujourd'hui, l'ISM est un centre de recherche reconnu, à la fois pour la qualité de ses publications scientifiques et pour ses applications concrètes dans les domaines du sport, de la santé, de la robotique et de la performance humaine.

1.1.2 Présentation structurelle et localisation

L'ISM est une Unité Mixte de Recherche (UMR 7287), rattachée à Aix-Marseille Université et au CNRS. Il s'agit donc d'un établissement public de recherche. Le laboratoire regroupe environ 150 personnes (chercheurs, enseignants-chercheurs, personnels techniques et doctorants), réparties sur plusieurs sites : le campus de Luminy, l'hôpital Sainte-Marguerite, la faculté de médecine de la Timone, et l'IUT d'Aix-en-Provence.

Depuis plus de dix ans, l'ISM développe une approche multidisciplinaire du mouvement, combinant biomécanique, neurosciences, robotique, psychologie et modélisation. Le laboratoire s'appuie sur un concept central : le système de mouvement, qui considère le mouvement comme le résultat d'interactions dynamiques entre structures, fonctions sensori-motrices et environnement.

Les recherches sont structurées autour de trois grands axes :

- Les éléments structurels du mouvement (biomécanique, matériaux, anatomie fonctionnelle)
- Les processus sensoriels, moteurs et cognitifs
- La modélisation bio-inspirée, appliquée à la conception de systèmes en mouvement (robotique, dispositifs médicaux, etc.)

L'ISM est reconnu pour son expertise dans plusieurs domaines : biomécanique et matériaux, neurosciences cognitives, psychologie du mouvement et robotique bio-inspirée. Il adopte une approche systémique, allant de la recherche fondamentale à l'application concrète, notamment dans les secteurs de la santé, du sport, de l'éducation, de la robotique et du transport.

Pour mener ses travaux, l'institut dispose de cinq plateformes technologiques de pointe :

- Le Centre de Réalité Virtuelle de la Méditerranée (CRVM), qui étudie les mouvements humains par des techniques immersives et interactives.



- La plateforme d'Aix-en-Provence, dédiée à l'innovation et le transfert de technologie dans le domaine de la biomécanique.
- L'Arène de Vol, a été construite pour la recherche en biorobotique.

- La plateforme MECABIO, est spécialisée dans la réalisation d'essai de caractérisation mécanique sur tous types de matériaux.
- Le TechnoSport, a été créé pour associer le sport de haut niveau à la recherche scientifique afin d'améliorer les performances des athlètes, mais aussi pour mieux connaître les populations les plus vulnérables (obèses, personnes âgées) en vue d'améliorer la santé et la qualité de vie.

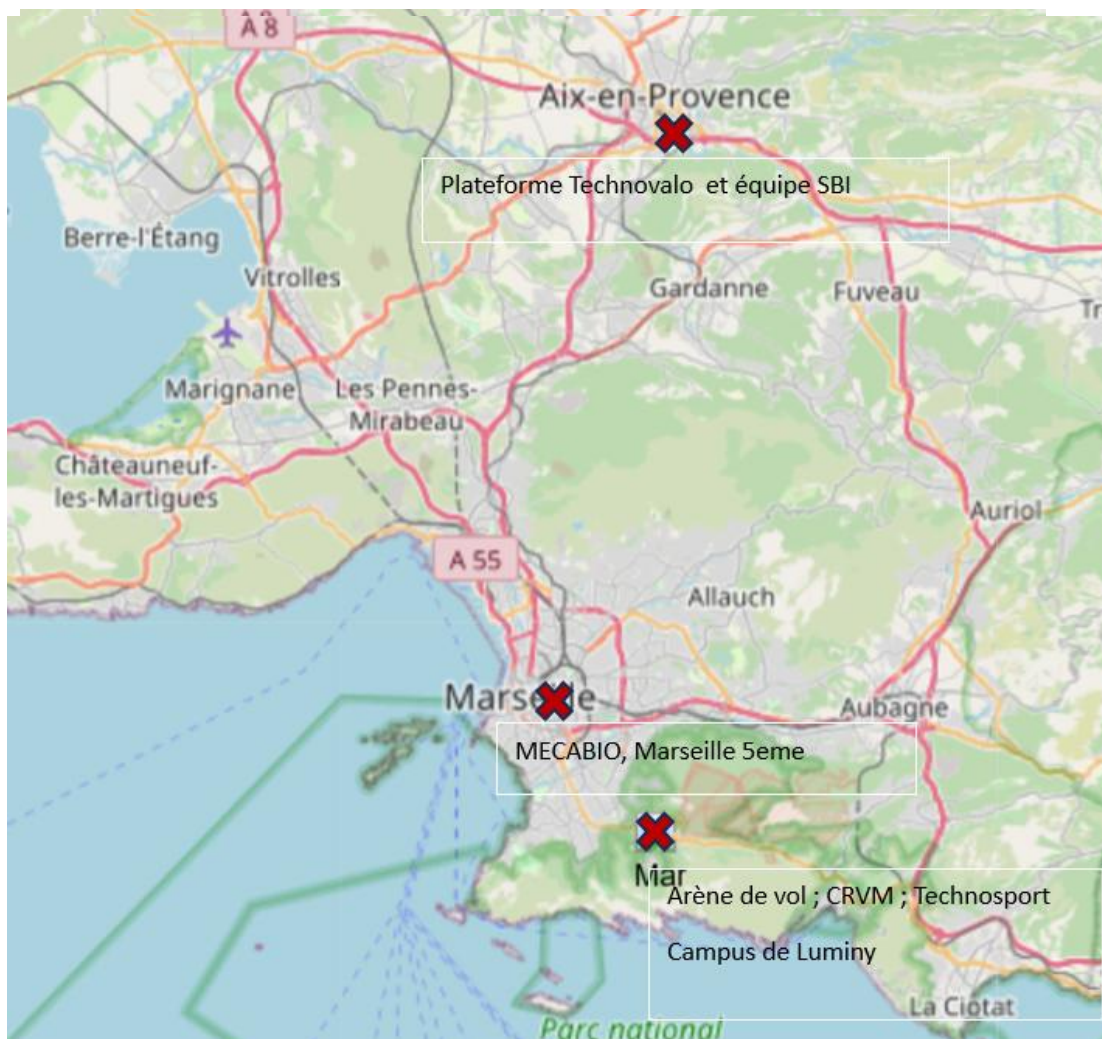
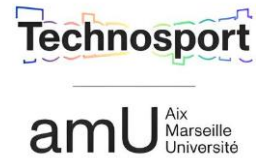


Figure 1: Localisation des plateformes technologiques

L'ISM travaille en collaboration avec des entreprises via des chaires industrielles (Decathlon, Stellantis, AG2R), illustrant la volonté du laboratoire de rapprocher recherche scientifique et innovation technologique.

1.1.3 Les activités et les équipes de l'ISM

Ce laboratoire interdisciplinaire étudie le mouvement sous toutes ses formes : humain, animal ou artificiel. L'ISM mène des recherches fondamentales dans des domaines variés tels que :

- La santé
- Le sport
- La robotique bio-inspirée
- L'industrie
- L'ergonomie
- Le laboratoire se compose de trois équipes, chacune étant spécialisée dans certaines activités.



Equipe BMI : Biomécanique, Matériaux et Caractérisation :

- L'équipe BMI travaille sur la compréhension du comportement mécanique des tissus biologiques, notamment ceux du système musculosquelettique et ostéoarticulaire. La particularité de cette équipe repose sur une approche multidisciplinaire et multi-échelle, combinant mécanique, biologie, biomatériaux, simulations numériques et applications cliniques.
- Les travaux de cette équipe visent à mieux comprendre le fonctionnement des tissus en conditions normales, pathologiques ou après réparation, dans le but d'améliorer les soins médicaux, les diagnostics et les outils d'aide à la décision (prothèses, implants, etc.).

L'équipe s'organise autour de deux axes principaux :

Axe n°1 : Mécanobiologie :

Cet axe cherche à comprendre comment les tissus vivants réagissent aux contraintes mécaniques et aux différents environnements biologiques.

Projets principaux :

- Favoriser la régénération osseuse en identifiant les conditions mécaniques optimales.
- Étudier les interfaces tissulaires (ex : jonctions os-cartilage) pour comprendre leur dégradation et améliorer leur réparation.
- Développer des outils d'imagerie médicale pour suivre l'évolution des tissus et adapter les traitements.

L'objectif est de trouver des solutions efficaces pour réparer les tissus et améliorer les traitements en tenant compte des contraintes mécaniques.

Axe n°2 : Biomécanique intégrative :

Cet axe s'intéresse aux réponses biomécaniques individuelles du corps humain, que ce soit dans un cadre clinique, sportif ou ergonomique. Il s'agit de mieux comprendre comment les structures osseuses et musculaires s'adaptent aux contraintes externes.

Projets principaux :

- Analyser les adaptations mécaniques du système musculosquelettique face à différents efforts.
- Étudier le mouvement de manière individualisée pour anticiper les risques (prévention des blessures, optimisation des performances).
- Aider à la planification chirurgicale grâce à des modèles numériques qui simulent les contraintes internes dans différentes zones du corps (main, pied, genou...).



Ce travail permet de concevoir des solutions personnalisées pour chaque patient ou utilisateur, avec un fort impact en santé, en ergonomie et en ingénierie médicale.



ynamiques Comportementales
Cognition

Equipe DYNAMICC : Dynamiques

Comportementales et Cognition

L'équipe DYNAMICC travaille sur l'étude du mouvement sous ses aspects comportementaux, sensorimoteurs, perceptifs et cognitifs. L'objectif est de mieux comprendre comment le corps humain s'adapte et réagit dans différentes situations, en prenant en compte les interactions entre le corps et le cerveau.

Pour cela, l'équipe utilise des approches issues de plusieurs disciplines comme la psychologie, les neurosciences ou encore la neurophysiologie. Les recherches sont menées aussi bien sur l'humain que sur l'animal, en considérant les effets de différents facteurs comme l'âge, l'environnement, l'expertise ou certaines déficiences.

Voici les deux axes autour desquels s'organisent l'équipe :

Axe n°1 : Processus sensorimoteurs, perceptifs et psychologiques :

Cet axe étudie comment les différents mécanismes moteurs et mentaux fonctionnent ensemble pour permettre l'exécution d'un mouvement. L'objectif est de modéliser ces interactions pour mieux comprendre la performance.

Axe n°2 : Contexte, adaptation et intervention :

Ce deuxième axe s'intéresse à la manière dont le corps adapte son comportement en fonction de l'environnement ou lorsqu'on applique une intervention spécifique (comme un entraînement



ou une rééducation). Ces travaux ont des applications concrètes dans les domaines du sport, de la santé, de l'éducation ou encore des transports.

Pour finir, je vous présente l'équipe dans laquelle j'ai fait mon stage et à laquelle appartient mon tuteur Loïc TADRIST :



Equipe SBI : Système Bio-Inspirés

L'équipe Systèmes Bio-Inspirés étudie le vivant afin d'en tirer des idées innovantes pour l'ingénierie, grâce à une approche biomimétique. L'objectif est de comprendre certains mécanismes biologiques pour les reproduire ou s'en inspirer dans des systèmes mécaniques, robotiques ou industriels.

Les recherches couvrent plusieurs domaines, comme le vol des insectes, la formation des os, les mouvements souples, ou encore les capteurs naturels et les comportements perceptifs des animaux. Ces études permettent de concevoir des solutions durables, légères et efficaces, par exemple pour fabriquer des structures mécaniques plus légères, des actionneurs innovants, ou des prothèses robotisées adaptées à certains troubles moteurs. Jean-Marc LINARES en est le responsable.

Les deux axes principaux sont :

Axe n°1 : Biorobotique :

Cet axe développe des robots et des capteurs inspirés du vivant, en reproduisant les capacités perceptives ou locomotrices d'animaux. Le but est de créer des robots capables de se déplacer de manière autonome et efficace dans différents environnements, sans avoir besoin de GPS. Ces travaux ont aussi des applications en robotique médicale, notamment pour la conception de prothèses plus précises.

Les recherches portent notamment sur :

- La navigation autonome sans GPS
- La perception bio-inspirée pour la robotique et la prothétique
- L'agilité et la robustesse des systèmes robotiques

Axe n°2 : Mécanismes bio-inspirés :

Cet axe vise à développer de nouvelles méthodes de conception mécanique, basées sur des structures ou des comportements observés dans la nature, comme la forme des os ou la croissance des articulations. Ces approches permettent d'optimiser les performances mécaniques tout en réduisant la matière et l'énergie utilisées. Julien CHAVES-JACOB est le responsable de cet axe.

Les sujets étudiés sont :

- La conception de pièces mécaniques inspirées des os
- Les liaisons mécaniques imitant la croissance des articulations
- Les actionneurs et systèmes d'absorption d'énergie bio-inspirés

1.1.4 Les partenaires de l'ISM

L'ISM n'a pas de clientèle directe, ne vend pas de produits ni de services, mais dispose en revanche de partenariats et de projets avec de nombreuses entreprises, services publics (pompiers, hôpitaux), centres sportifs.

Par exemple, Technosport en partenariat avec la FFF et l'OM renforce la préparation physique et nutritionnelle des joueurs, quant à Stellantis, ils essaient de détecter la somnolence au volant. Airbus s'est associé à l'ISM pour développer des systèmes bio-inspirés, les pompiers pour un exosquelette. Le partenariat Décathlon-AMU via l'ISM fait de la recherche fondamentale sur l'interaction homme-équipement sportif, et AG2R La Mondiale travaille sur la prévention des chutes.



Figure 2: Principaux partenaires de l'ISM

1.1.5 Organigramme de l'ISM Etienne-Jules MAREY

L'organigramme de l'ISM se compose de la direction, chargée de superviser l'ensemble des activités scientifiques, administratives et stratégiques. Il regroupe de même plusieurs équipes travaillant sur différentes thématiques. Chaque équipe est dirigée par un responsable scientifique. L'institut dispose de services administratifs, techniques et logistiques qui soutiennent les chercheurs dans leur activités. Un conseil de laboratoire conseille la direction sur les orientations de la recherche et les collaborations à suivre.

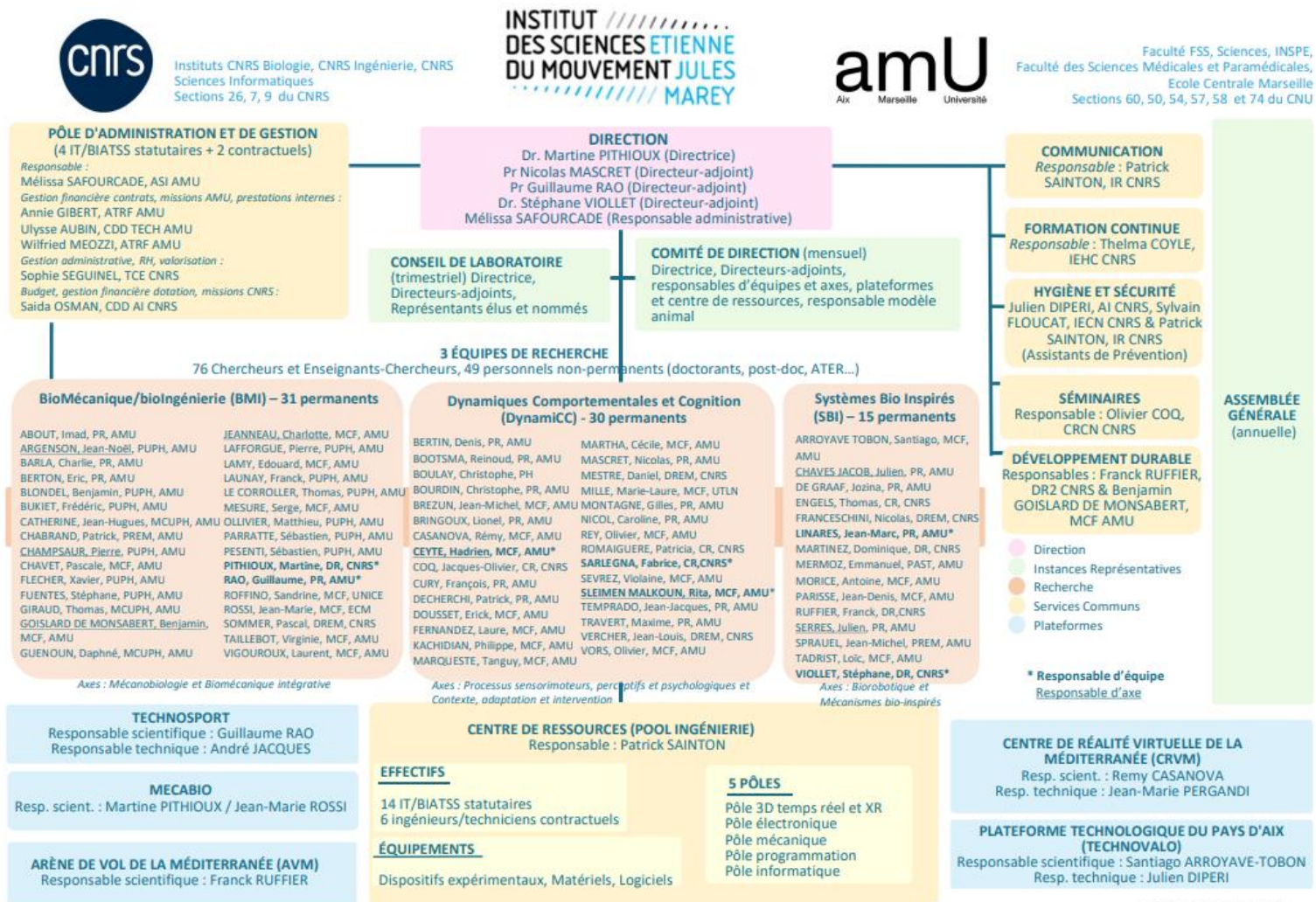


Figure 3: Organigramme de l'ISM

2. RAPPORT TECHNIQUE

Le sujet de la mission :

2.1.1 Mise en contexte

L'Institut des Sciences du Mouvement développe plusieurs axes de recherche, notamment en mécanique bio-inspirée. Dans le cadre de mon stage, j'ai travaillé sur le thème des vibrations induites par un rebond. Lors d'un rebond, l'énergie cinétique incidente est convertie en déformations dynamiques : les vibrations. Une partie de l'énergie des modes de vibration à basse fréquence peut être reconvertie en énergie cinétique à la fin du rebond alors que les modes de vibration à haute fréquence sont très dissipatifs. Cela se traduit par une perte d'énergie potentielle de pesanteur (une moindre hauteur) et un gain d'énergie vibratoire à une fréquence plus élevée.

Cependant, il est théoriquement possible que l'inverse se produise, c'est-à-dire qu'un rebond puisse entraîner un gain d'énergie potentielle : les équations de la mécanique non dissipative sont réversibles, si on change t en $-t$, les équations sont identiques. L'objectif des recherches menées par M. TADRIST est de démontrer que la probabilité qu'un rebond produise un transfert d'énergie d'un mode vibratoire à haute fréquence vers un mode de translation est non nulle.

Mon stage porte sur la possibilité d'obtenir un tel transfert d'énergie dans un modèle de rebond simplifié. Pour cela, nous avons limité l'étude d'un rebond à une seule direction. Pour réaliser ce rebond, nous cherchons à inverser la flèche du temps. La flèche du temps est une expression introduite en 1928 par l'astrophysicien Arthur Eddington, qui décrit le phénomène selon lequel le temps semble s'écouler toujours dans la même direction. Cette direction peut être définie à l'aide de l'entropie. Dans un système fermé, plus un événement est improbable, plus il peut être relié à un passé ordonné. Inversement, plus il est probable, plus il peut être relié à un futur désordonné. Dans notre cas, l'état ordonné correspond au mode de translation et l'état désordonné au mode de vibration à haute fréquence.

Ainsi, pour réaliser ce transfert d'énergie, nous allons essayer de reproduire le chemin inverse d'un rebond.

2.1.2 Livrables et responsabilités confiées

Le livrable attendu pour ce projet de recherche est un banc de test fonctionnel, permettant de faire du retournement temporel. Si nous arrivons à faire ce dernier, un livrable supplémentaire peut-être une vidéo ultra ralentie, avec un framerate (nombre d'images successivement affichées à l'écran en une seconde) très bas afin de filmer le rebond de manière qu'il soit impossible de distinguer dans quel sens la vidéo est jouée.

Pour cela, je suis responsable de la conception du banc d'essai et des différentes pièces le composant. J'ai la liberté de définir le principe de fonctionnement, de dimensionner et concevoir les pièces, de choisir le procédé de fabrication, ainsi que le montage. J'ai donc carte blanche pour l'ensemble du processus de mise en œuvre du banc de test, l'atelier de GMP Aix-en-Provence me permettant d'avoir un large choix de procédés de fabrication. Les seules limites rencontrées sont le fait que le bâti et certains composants standards sont déjà existants. Il faut alors adapter la taille des futures pièces aux dimensions du bâti.

2.2 Calendrier des démarches réalisées : diagramme GANTT effectué.

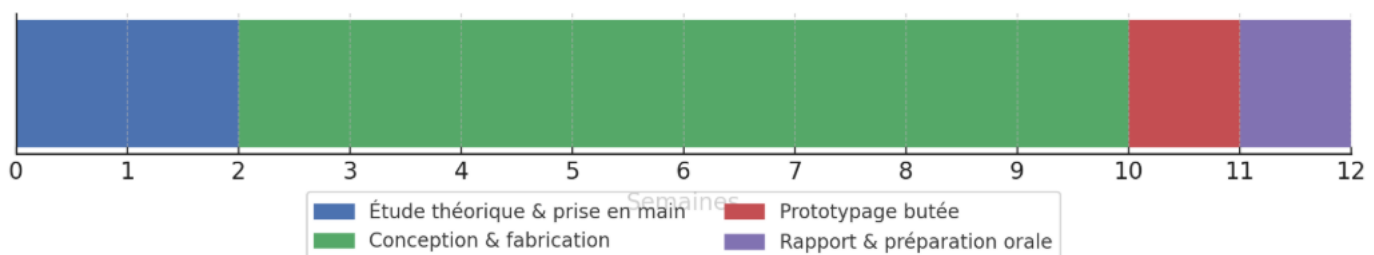


Figure 4: Diagramme GANTT effectué

2.3 Développement des phases de la mission :

2.3.1 Analyse de l'étude théorique faite l'an dernier

Le système étudié est un ressort 1 de longueur à vide l_1 fixé à deux masse M_0 et M_1 . Ce système repose sur deux chariots pour glissières linéaires. Le tout est monté sur deux tiges de deux mètres de longueur, formant une liaison glissière.

Fixé au bâti ainsi qu'à l'extrémité des tiges, un deuxième ressort 0 est positionné de manière à ce que son axe soit coaxial à celui du premier ressort, assurant ainsi un alignement centré des deux éléments.

Dans un premier temps le ressort de longueur à vide l_1 est comprimé puis va être relâché. Il va alors translater le long des tiges, tout en oscillant, jusqu'à atteindre et rebondir sur le ressort fixé au bâti.

A) Chute libre :

Nous posons : δx la compression du ressort à l'état initial :

$$\delta x = x_1(t=0) - x_0(t=0) - l_1$$

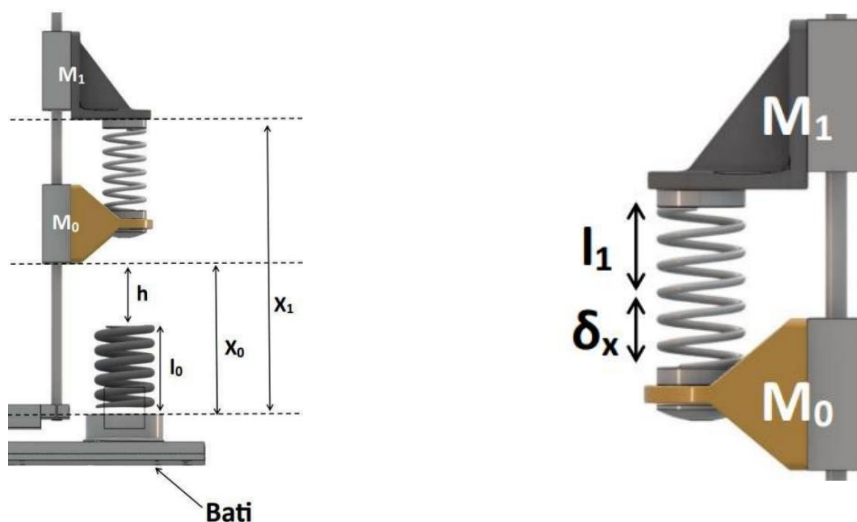


Figure 5: Schématisation du système avec les paramètres

En notant x_0 et x_1 la position des centres de masses des solides 0 et 1, nous pouvons appliquer le PFD :

$$m_0 \ddot{x}_0 = -m_0 g + k_1 (x_1 - x_0 - l_1)$$

$$m_1 \ddot{x}_1 = -m_1 g - k_1 (x_1 - x_0 - l_1)$$

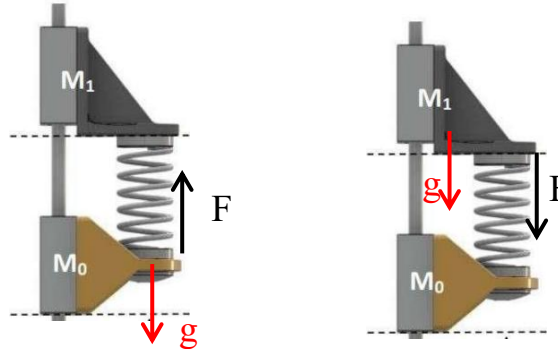


Figure 6: Analyse du problème

Nous obtenons des grandeurs adimensionnées en divisant par des grandeurs caractéristiques de la masse 1 du ressort 1.

Nous obtenons donc :

$$\tilde{X}_0 = \frac{x_0}{l_1} \quad \tau = \sqrt{\frac{m_1}{k_1}} \quad \tilde{g} = \frac{g\tau^2}{l_1} \quad \tilde{\ddot{X}}_0 = \frac{\ddot{x}_0\tau^2}{l_1} \quad \alpha = \frac{m_0}{m_1}$$

Nous obtenons ainsi :

$$\cancel{\frac{m_0}{m_1}} \frac{d^2 x_0 / l_1}{dt^2 / \tau^2} = - \underbrace{\frac{\tau^2}{l_1} \cancel{\frac{m_0}{m_1}} g}_{= \tilde{g}} + \frac{\tau^2 k_1}{m_0} \left(\frac{x_1}{l_1} - \frac{x_0}{l_1} - \cancel{\frac{l_1}{l_1}} \right)$$

$$\tilde{\ddot{X}}_0 = -\tilde{g} + \frac{\cancel{m_1} k_1}{\cancel{m_0} \cancel{k_1}} (\tilde{X}_1 - \tilde{X}_0 - 1)$$

$$\tilde{\ddot{X}}_0 = -\tilde{g} + \frac{1}{\alpha} (\tilde{X}_1 - \tilde{X}_0 - 1)$$

$$m_1 \ddot{x}_1 = -m_1 g - k_1 (x_1 - x_0 - l_1)$$

$$\cancel{\frac{m_1}{m_1}} \frac{d^2 x_1 / l_1}{dt^2 / \tau^2} = - \underbrace{\frac{\tau^2}{l_1} \cancel{\frac{m_1}{m_1}} g}_{= \tilde{g}} - \frac{\tau^2 k_1}{m_1} \left(\frac{x_1}{l_1} - \frac{x_0}{l_1} - \cancel{\frac{l_1}{l_1}} \right)$$

$$\tilde{\ddot{X}}_1 = -\tilde{g} - \frac{\cancel{m_1} k_1}{\cancel{m_1} \cancel{k_1}} (\tilde{X}_1 - \tilde{X}_0 - 1)$$

$$\ddot{\tilde{x}}_1 = -\tilde{g} - (\tilde{x}_1 - \tilde{x}_0 - 1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{\tilde{x}}_0 = -\tilde{g} + \frac{1}{\alpha} (\tilde{x}_1 - \tilde{x}_0 - 1) \\ \ddot{\tilde{x}}_1 = -\tilde{g} - (\tilde{x}_1 - \tilde{x}_0 - 1) \end{array} \right.$$

Nous pouvons écrire le système d'équations différentielles homogènes sous forme matricielle : $\dot{X} = AX$

$$\text{Avec : } X = \begin{pmatrix} \dot{x}_0 \\ x_0 \\ \dot{x}_1 \\ x_1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_0 \\ x_0 \\ \dot{x}_1 \\ x_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{\alpha} & 0 & \frac{1}{\alpha} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x}_0 \\ x_0 \\ \dot{x}_1 \\ x_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\tilde{g} - \frac{1}{\alpha} \\ 0 \\ -\tilde{g} - 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Les valeurs propres de A sont :

$$\lambda_1 = 0$$

$$\lambda_2 = -i \frac{\sqrt{\alpha+1}}{\alpha}$$

$$\lambda_3 = i \frac{\sqrt{\alpha+1}}{\alpha}$$

La matrice A n'est pas diagonalisable, avec 2 valeurs propres complexes conjuguées. Les solutions sont donc sous la forme $x(t) = Bt + C + D\cos(\sqrt{\frac{\alpha+1}{\alpha}}t) + E\sin(\sqrt{\frac{\alpha+1}{\alpha}}t)$

Un système de solutions particulière est :

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{x}_0(t) = -\frac{1}{2} \tilde{g} t^2 \\ \tilde{x}_1(t) = -\frac{1}{2} \tilde{g} t^2 + 1 \end{array} \right.$$

Nous déterminons les constantes d'intégration à partir des conditions initiales :

$$\left\{ \begin{array}{l} x_0(t=0) = h+l_0 \\ x_1(t=0) = h+l_0+l_1+\delta_x \\ \dot{x}_0(t=0) = 0 \\ \dot{x}_1(t=0) = 0 \end{array} \right.$$

Nous adimensionnons ces grandeurs par la longueur à vide du ressort 1, nous obtenons :

$$\tilde{h} = \frac{h}{l_1} \quad \gamma = \frac{l_0}{l_1} \quad \Delta = \frac{\delta_x}{l_1}$$

Les conditions initiales deviennent alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} x_0(t=0) = \frac{h}{l_1} + \frac{l_0}{l_1} = \tilde{h} + \gamma \\ x_1(t=0) = \frac{h}{l_1} + \frac{l_0}{l_1} + \frac{l_1}{l_1} + \frac{\delta_x}{l_1} = \tilde{h} + \gamma + 1 + \Delta \\ \dot{x}_0(t=0) = 0 \\ \dot{x}_1(t=0) = 0 \end{array} \right.$$

Finalement, nous obtenons les équations régissant le mouvement de notre ensemble de solide durant sa chute libre :

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{x}_0(t) = \tilde{h} + \gamma - \frac{1}{2} \tilde{g} t^2 + \frac{\Delta}{1+\alpha} (1 - \cos(\sqrt{\frac{\alpha+1}{\alpha}} t)) \\ \tilde{x}_1(t) = \tilde{h} + \gamma - \frac{1}{2} \tilde{g} t^2 + 1 + \frac{\Delta}{1+\alpha} (1 + \alpha^* \cos(\sqrt{\frac{\alpha+1}{\alpha}} t)) \end{array} \right.$$

Nous définissons la fin de la chute comme étant t_0 tel que $x_0=l_0$ soit $\tilde{x}_0=\gamma$

Nous pouvons alors déterminer les vitesses de contact en fin de chute libre :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_0 = \dot{\tilde{x}}_0(t_0) = -gt_0 + \frac{\Delta}{\sqrt{\alpha(\alpha+1)}} \sin(\sqrt{\frac{\alpha+1}{\alpha}} t_0) \\ v_1 = \dot{\tilde{x}}_1(t_0) = -gt_0 - \Delta \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha+1}} \sin(\sqrt{\frac{\alpha+1}{\alpha}} t_0) \end{array} \right.$$

t_0 obtenu avec $x_0(t_0) = \gamma$

Nous obtenons alors une expression de t_0 en fonction des vitesses de contact :

$$t_0 = -\frac{v_1 + \alpha v_0}{(1 + \alpha)g}$$

Nous pouvons également déterminer la compression du ressort au moment du contact :

$$\delta = \tilde{x}_1(t_0) - \tilde{x}_0(t_0) - l_1$$

$$\tilde{\delta}(t_0) = \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha+1}} \frac{(v_0 - v_1)}{\tan\left(\sqrt{\frac{\alpha}{\alpha+1}} t_0\right)}$$

B) Description du contact

Nous étudions le mouvement du système au contact du ressort 0.

On applique le PFD : en utilisant le rapport $\beta = \frac{k_0}{k_1}$

Le système d'équation adimensionné devient :

$$\ddot{x}_0 = \frac{k_1}{m_0} (x_1 - x_0 - l_1) - \frac{k_0}{m_0} (x_0 - l_0) - g$$

$$\tilde{\ddot{x}}_0 = -\tilde{g} + \frac{k_1 \tau^2}{m_0} \left(\frac{x_1}{l_1} - \frac{x_0}{l_1} - \frac{l_1}{l_1} \right) - \frac{k_0 \tau^2}{m_0} \left(\frac{x_0}{l_1} - \frac{l_0}{l_1} \right)$$

$$\tilde{\ddot{x}}_0 = -\tilde{g} + \frac{k_1 m_1}{m_0 k_1} (\tilde{x}_1 - \tilde{x}_0 - 1) - \frac{k_0 m_1}{m_0 k_1} (\tilde{x}_0 - \gamma)$$

$$\tilde{\ddot{x}}_0 = -\tilde{g} + \frac{1}{\alpha} (\tilde{x}_1 - \tilde{x}_0 - 1) - \frac{\beta}{\alpha} (\tilde{x}_0 - \gamma)$$

$$\ddot{x}_1 = -\frac{k_1}{m_1} (x_1 - x_0 - l_1) - g$$

$$\tilde{\ddot{x}}_1 = -\tilde{g} - \frac{k_1 \tau^2}{m_1} \left(\frac{x_1}{l_1} - \frac{x_0}{l_1} - \frac{l_1}{l_1} \right)$$

$$\tilde{\ddot{x}}_1 = -\tilde{g} - \frac{k_1 m_1}{m_1 k_1} (\tilde{x}_1 - \tilde{x}_0 - 1)$$

$$\tilde{\ddot{x}}_1 = -\tilde{g} - (\tilde{x}_1 - \tilde{x}_0 - 1)$$

$$\tilde{\ddot{x}}_0 = -\tilde{g} + \frac{1}{\alpha} (\tilde{x}_1 - \tilde{x}_0 - 1) - \frac{\beta}{\alpha} (\tilde{x}_0 - \gamma)$$

$$\tilde{\ddot{x}}_1 = -\tilde{g} - \tilde{x}_1 + \tilde{x}_0 + 1$$

En rentrant sur ces équations sur un programme Matlab, j'obtiens le logarithme de l'énergie vibratoire en fonction de la hauteur et de la compression initiale :

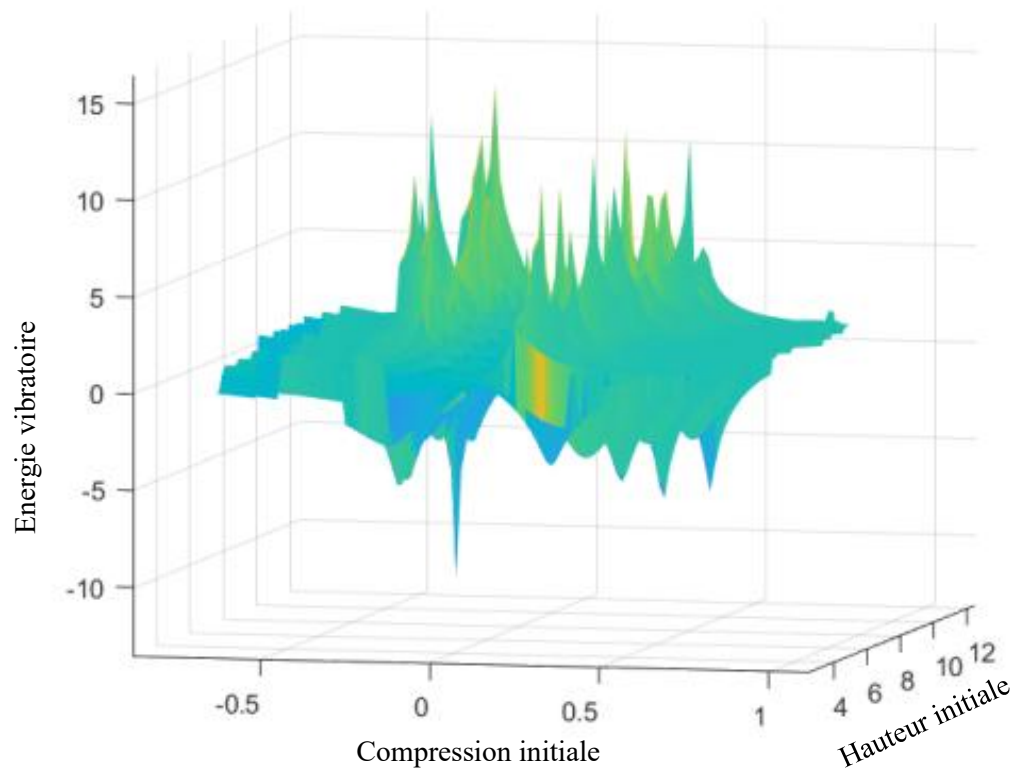


Figure 7: Logarithme de l'énergie vibratoire en fonction de la hauteur, de la compression initiale et $\alpha=2$

Nous cherchons donc la surface tracée, les minimas qui correspondent à une énergie vibratoire la plus petite possible (quasiment l'intégralité de l'énergie vibratoire serait reconvertie en énergie cinétique).

Le système de paramètres qui correspond le mieux à notre expérience est :

$$\alpha = 2 = \frac{m_0}{m_1} ; \tilde{h} = 11.03 \text{ (hauteur initiale)} ; \beta = 2 = \frac{k_0}{k_1} \quad \Delta = -0.298 \text{ (taux de compression)}$$

En utilisant ces valeurs, nous pouvons obtenir les tracés des énergies au cours du mouvement :

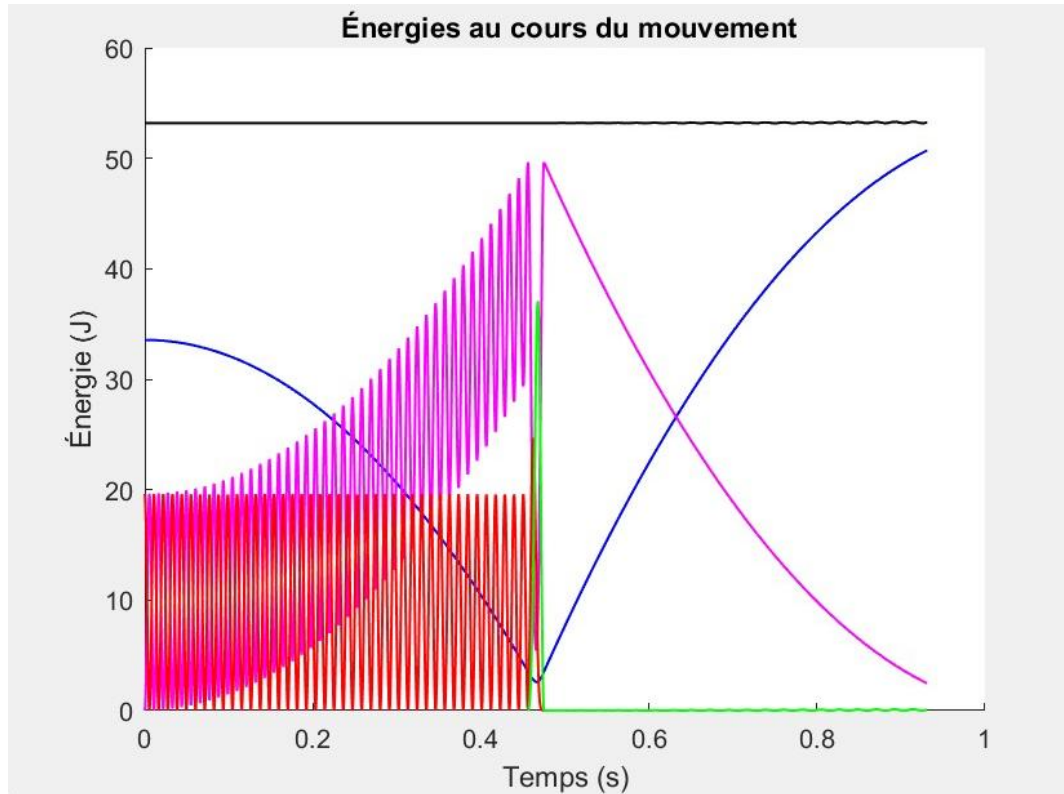


Figure 8: Énergie mécanique (en noir), énergie cinétique (en magenta), énergie élastique du ressort 1 (en rouge), du ressort 0 (en vert) et l'énergie potentielle de pesanteur (en bleu)

Nous observons qu'il est théoriquement possible de faire du retournement temporel, puisque le ressort a, après le rebond, une plus grande énergie potentielle de pesanteur.

2.3.2 Conception, fabrication et montage du banc d'essai

Pour réaliser notre expérience, nous allons concevoir un banc d'essai qui permet le guidage selon un axe de notre ensemble masse - ressort. Le guidage de la liaison glissière est assuré par deux tiges et afin de limiter les frottements, la glissière est réalisée via des éléments roulants. Les deux masses sont des pièces imprimées en 3D. Ces composants existaient déjà lorsque j'ai commencé mon stage. Le banc d'essai doit permettre la précontrainte du ressort 1 et doit prévoir un mécanisme de lâcher. Également, le ressort 0 doit pouvoir être fixé sur le bâti.

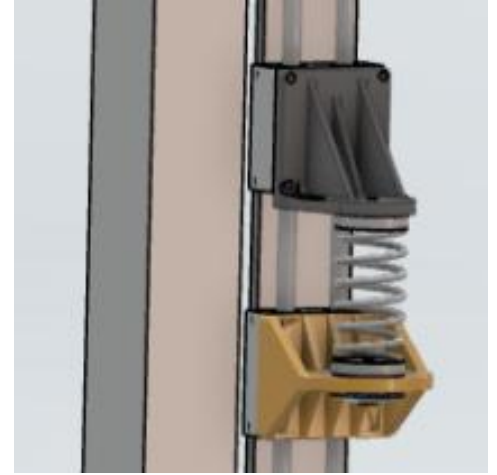


Figure 9: Zoom sur l'ensemble masse-ressort



Figure 10: Banc de test initialement conçu et fabriqué

A mon arrivée, le banc de 2mètres de long comprenait à une l'extrémité aussi le montage du système de poulie, qui permet de mettre le ressort sous compression.

Les tiges $\Phi 12$ pour guider les glissières sont déjà présentes.

Le système de poulie est composé d'une tige fileté M8 sur laquelle vient une poulie et des écrous pour la maintenir en position. Cette poulie est un composant standard acheté dans l'industrie. Elle est livré avec des centreurs pour positionner la poulie.



Figure 11: Montage de la poulie sur le banc de test

Les ressorts de compressions ont été fabriqués par le Comptoir Général du Ressort (CGR) afin de respecter les caractéristiques dont nous avons besoin.

Ainsi : $k_1 = 54.5\text{N/mm}$ et $k_0 = 109\text{N/mm}$ afin de respecter $\beta = 2 = \frac{k_0}{k_1}$

$l_1 = 0.09\text{m} = 10$ afin de respecter $\gamma = \frac{l_0}{l_1} = 1$

Pour fixer le ressort 1 aux masses des chariots, le ressort avait été soudé l'an dernier à des cales. Ces mêmes cales peuvent être fixées par des vis sur les masses des chariots.



Figure 12: Montage cales-ressort soudés

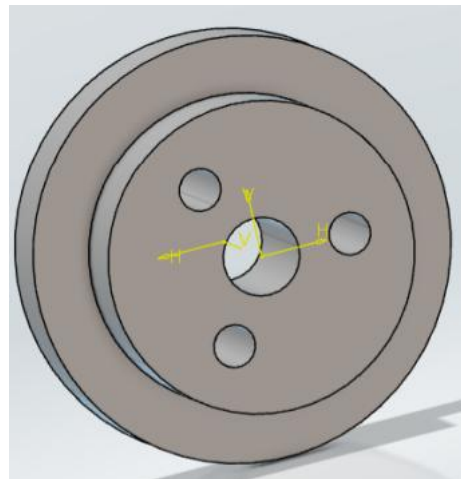


Figure 13: CAO de la cale

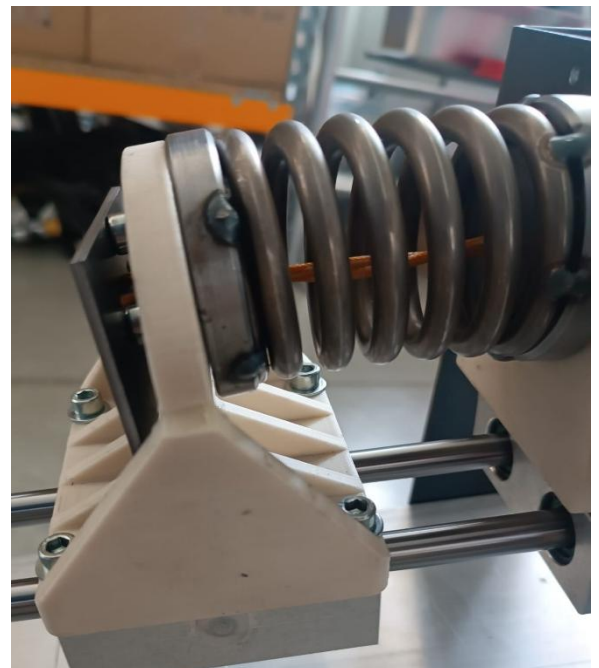


Figure 14: Montage du ressort sur les masses du chariot pour glissière

Pour comprimer le ressort nous disposons d'un tirefort manuel. Une corde d'escalade s'enroule en tournant la manivelle autour du boîtier, qui est composé de mâchoires alternées. Cela permet à la corde de s'enrouler petit à petit et d'avoir une traction contrôlée, l'objectif étant de s'arrêter à 30% de compression. Le système acheté a un levier de retour qui fonctionne comme un frein automatique : lorsque l'on s'arrête de tourner la manivelle, la corde reste en place et il suffit de basculer la position du levier de retour pour relâcher la corde. Un collier de serrage est fourni avec le tirefort pour enrouler la corde.

Le tirefort est fixé sur une tôle d'acier de 3 mm d'épaisseur, elle-même vissée solidement au bâti. Il est positionné à une distance d'environ 1 mètre du socle, de manière à ce que, lorsque le banc d'essai est relevé à la verticale, le tirefort se trouve à hauteur de hanche. Ce positionnement ergonomique permet à l'utilisateur d'exercer un effort optimal sur la manivelle, en profitant d'une bonne posture et d'un meilleur levier.

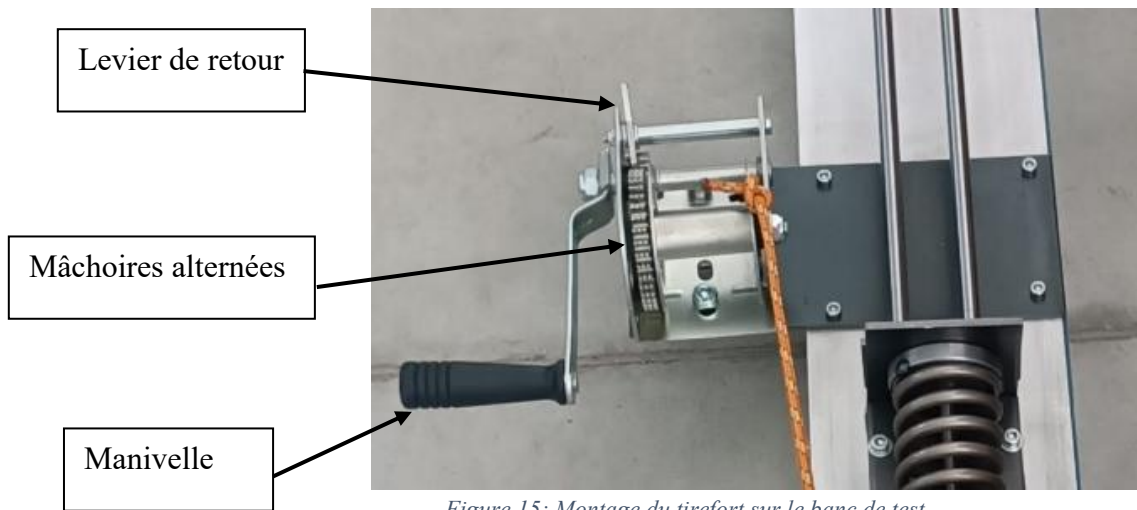


Figure 15: Montage du tirefort sur le banc de test

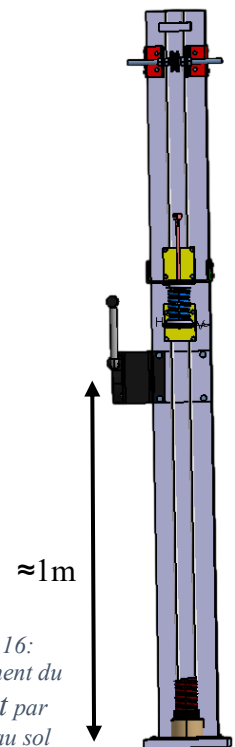


Figure 16:
Emplacement du
tirefort par
rapport au sol

La corde d'escalade utilisée est de 3mm de diamètre pour s'adapter au collier de serrage fourni. Cette corde a une résistance à la traction de 250kg.



Figure 17: Corde
d'escalade utilisée

Pour exercer la traction sur le ressort, je l'ai traversé avec une tige filetée positionnée dans son axe central. À l'extrémité de cette tige, du côté du système de poulie, j'ai fixé un crochet fileté, qui vient se visser directement sur la tige pour assurer une liaison solide. Deux écrous sont positionnés de part et d'autre de la tige filetée, ce qui permet de la maintenir en place et d'éviter tout déplacement axial lors de l'effort de traction.

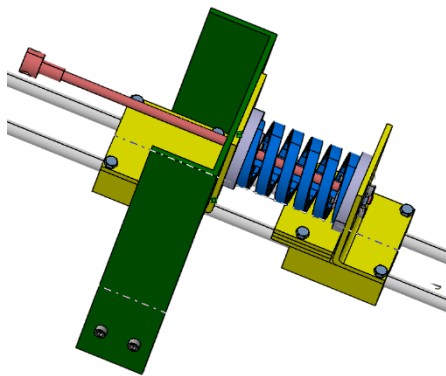


Figure 18: Système tige filetée pour comprimer le ressort

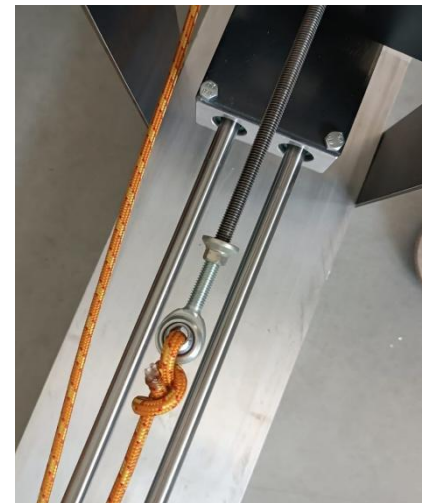
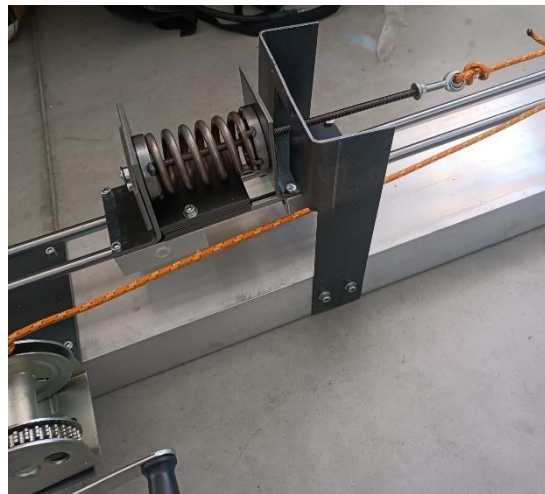


Figure 19: Crochet où l'on attache la corde

La corde est fixée d'un côté au tirefort, passe ensuite par la poulie, puis est reliée au crochet. L'emplacement du crochet a été choisi de manière à aligner la poulie, le crochet et l'axe du ressort sur un même axe, afin de garantir une traction la plus axiale possible.

Pour relâcher le ressort, la corde se sectionne en la brûlant. Cela permet d'avoir une libération rapide et sans choc mécanique, j'évite avec cette méthode un mécanisme de déclenchement complexe. Pour économiser de la longueur de corde, une « corde martyre » est accrochée au crochet, cette corde est reliée par un « nœud de pêcheur » à la corde qui passe par la poulie et le tirefort. Pour chaque essai, je ne brûle que 20cm de corde.

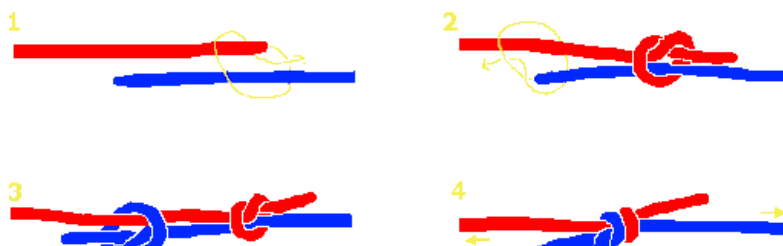


Figure 20: Schéma du nœud de pêcheur

Nœud de pêcheur : chaque corde fait un nœud autour de l'autre. Quand on tend les deux extrémités, les nœuds se resserrent l'un contre l'autre et empêchent les cordes de se séparer.

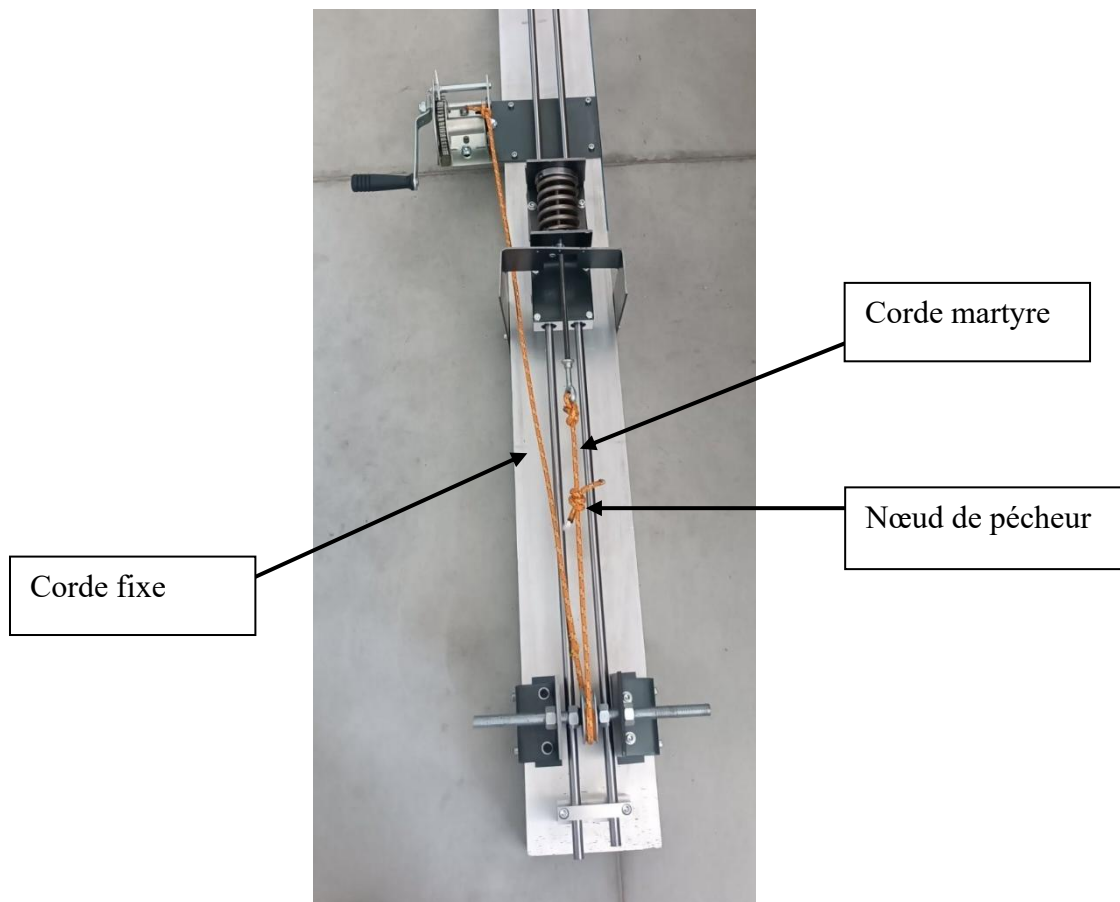


Figure 21: Système assemblé pour mettre le ressort en compression

Pour comprimer le ressort, j'utilise une butée fixe positionnée le long de la glissière. Dans un premier temps, le ressort est tiré par la corde, ce qui le fait se déplacer jusqu'à venir en contact avec la butée. À partir de ce point, la corde continue d'exercer une traction, mais comme le ressort ne peut plus avancer, il commence alors à se comprimer progressivement. Une fois qu'il a atteint une compression de 30 % de sa longueur initiale, la traction est arrêtée.

La butée a été conçue de manière à ce que ce soient les masses du chariot qui viennent en appui contre elle, et non le chariot lui-même. En effet, si la butée avait été réalisée sous la forme d'un simple profilé en U fixé directement au bâti et en contact avec la glissière, cela aurait généré un couple mécanique non pris en compte dans les calculs théoriques initiaux. Pour éviter cette sollicitation parasite, la butée finale sera usinée de façon à s'adapter précisément au profil des masses du chariot, assurant ainsi un contact direct, stable et sans déformation indésirable du système.

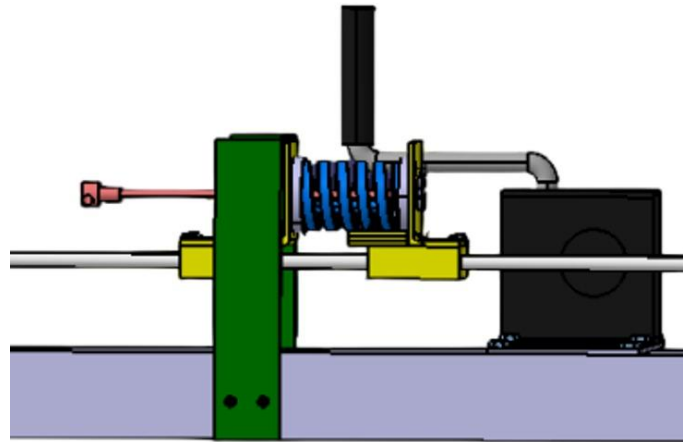
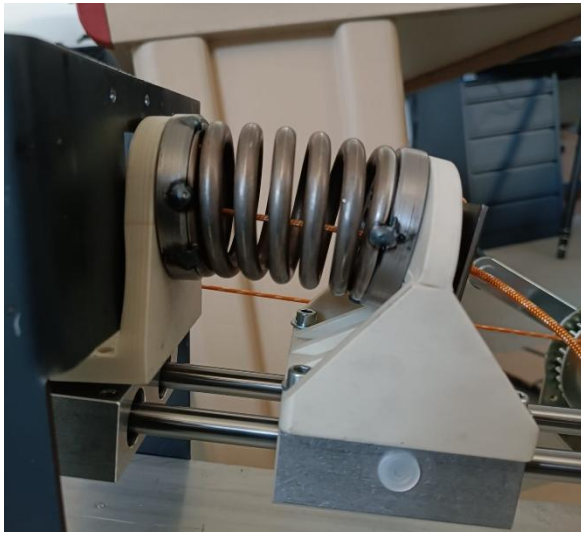


Figure 22: Ressort comprimé contre la butée

Elle a été dimensionnée pour s'adapter parfaitement à la largeur du bâti, et que pour sa hauteur coïncide avec la hauteur des masses du chariot. Au vue de la forme de la butée, le procédé de fabrication que j'ai utilisé est l'électroérosion. J'ai étudié cette année l'électroérosion à fil, ce qui m'a permis de faire le tracé du fil sous forme de programme à renseigner dans la machine FANUC de GMP Aix.

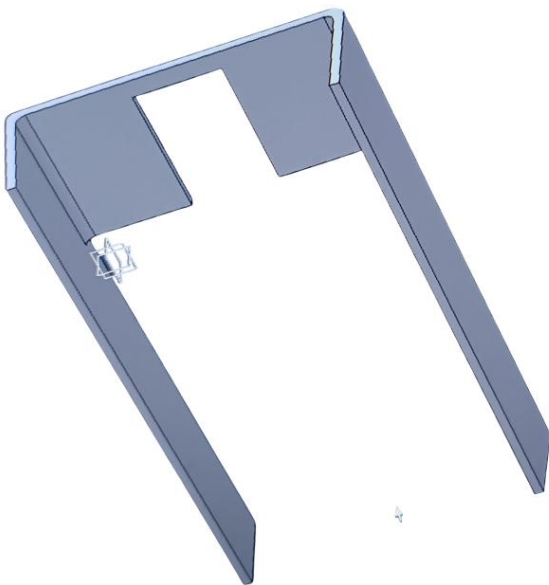


Figure 24: CAO de la butée



Figure 23: Machine d'électroérosion GMP Aix

Voici le tracé de la forme de la butée et le programme d'électroérosion :

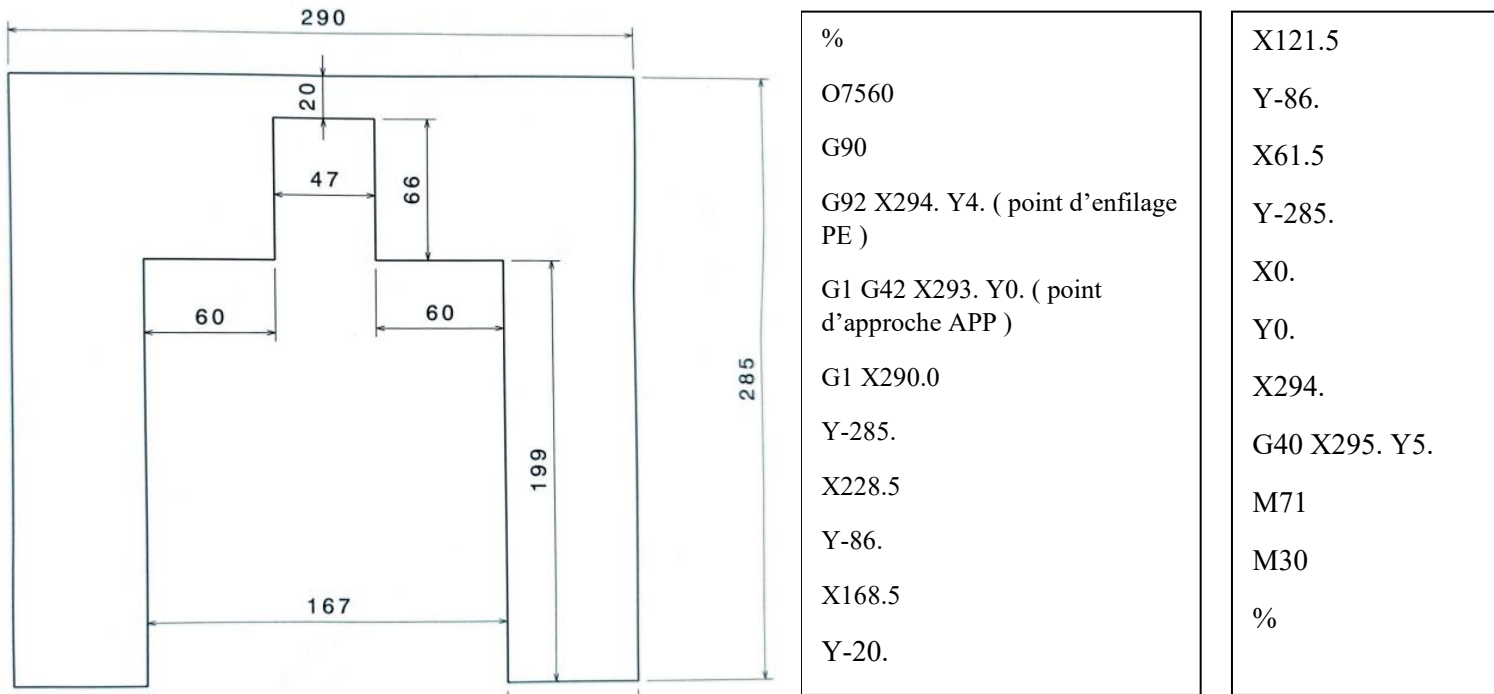


Figure 25: Tracé et programme de la butée pour électroérosion

Une fois la forme obtenue, je suis passé sur la plieuse à commande numérique Jean Perrot pour replier les faces de largeur 61,5mm.

Les perçages nécessaires pour viser la butée au bâti ont été poinçonnés avant la phase de pliage.

La butée est installée à exactement 106,4 cm de la base du ressort 1 fixé au bâti, pour respecter la hauteur initiale $h=1,03m$ théoriquement calculée.

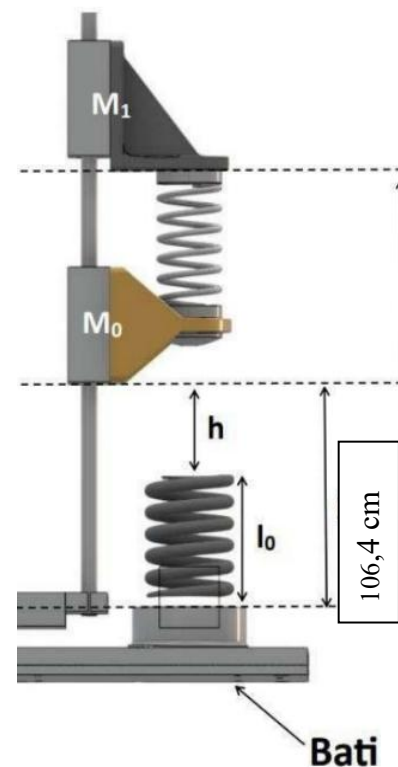


Figure 26: Emplacement de la butée par rapport au bâti

Une fois la butée mis en place, j'ai procédé à plusieurs essais pour vérifier la résistance des pièces à la compression du ressort, et améliorer le montage du banc de test.

Après ces tests, plusieurs pièces vont être changées :

J'ai commencé à concevoir et fabriquer le système de poulie. J'ai utilisé celui qui avait été fait l'an dernier par un autre stagiaire, qui n'avait effectué aucun test. Lors de mes premiers essais, la tige filetée sur laquelle était montée la poulie, ainsi que les supports la maintenant, ont subi une déformation importante et ont flambé sous l'effet des efforts de traction. Cette défaillance a mis en évidence la nécessité de redimensionner et renforcer les éléments du système.

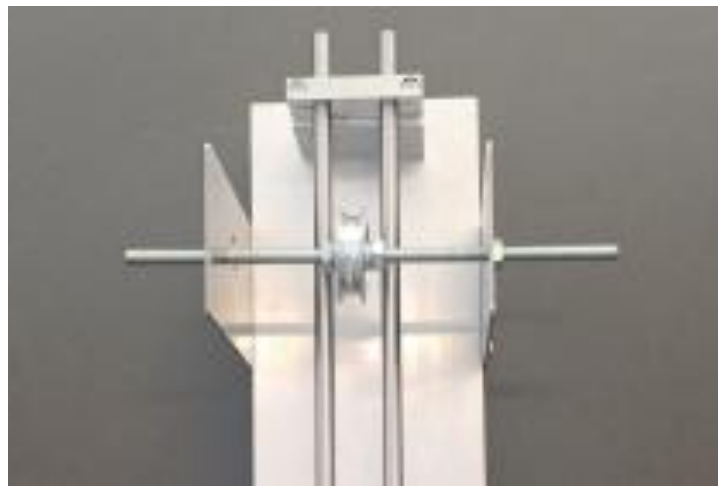
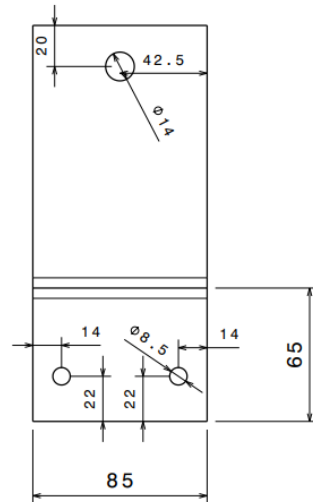
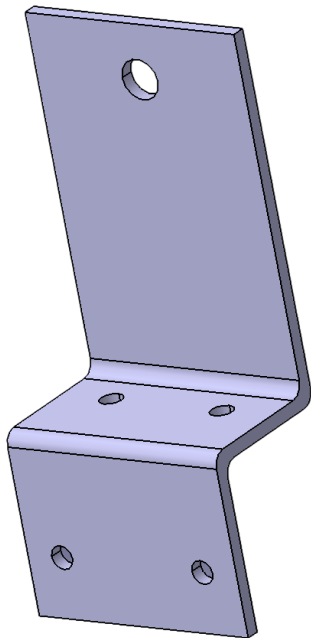


Figure 27: Ancien système de poulie

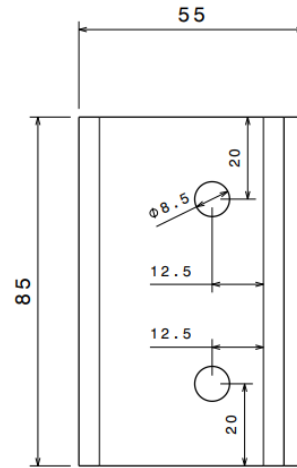
Pour limiter le flambage, j'ai commencé par augmenter le diamètre de la tige filetée, en passant d'un filetage M8 à M14. Cela permet d'augmenter la résistance mécanique. De plus, j'ai limité le porte-à-faux en fabriquant des supports pliés qui reviennent vers le centre du bâti.

Enfin, j'augmente l'épaisseur des pièces en acier à 5mm.

Ces deux pièces seront faites en pliage, et poinçonnées. La plieuse CN nous renseigne sur la longueur développée dont nous avons besoin.



Vue de face



Vue du dessus

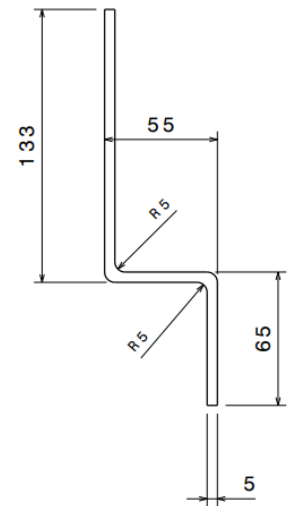


Figure 29: CAO support du système poulie

Figure 28: Dessin de définition du support

Puisque la section de la tige fileté a augmenté, j'ai refait les centreurs de la poulie pour qu'ils puissent se monter sur du M14. Ces centreurs sont en PLA, imprimés sur les machines Ultimaker de la salle InProto. Les écrous ont aussi été changés.

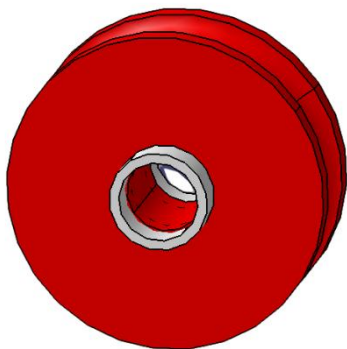


Figure 31: Centreur en PLA monté dans la poulie

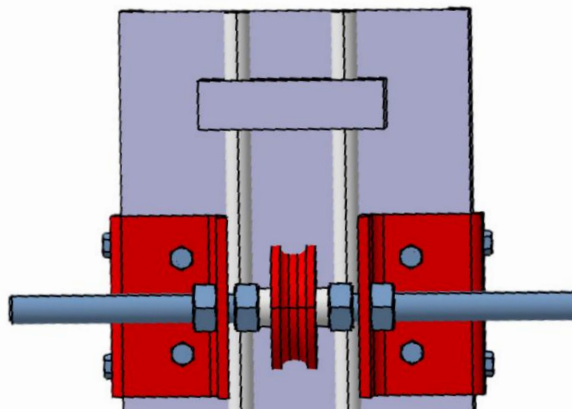


Figure 30: Nouveau système de poulie

Une difficulté rencontrée lors du montage de ces pièces provient de la présence de rayons de pliage sur leurs zones de contact, alors que les arêtes du bâti sont vives. Ce décalage géométrique empêchait un appui correct des pièces contre le bâti. Pour y remédier, j'ai ajouté des cales d'ajustement permettant de compenser les irrégularités et d'obtenir une surface d'appui maximale. Cela garantit un meilleur contact entre les pièces et le bâti, et permet un serrage par vis plus efficace et sécurisé.

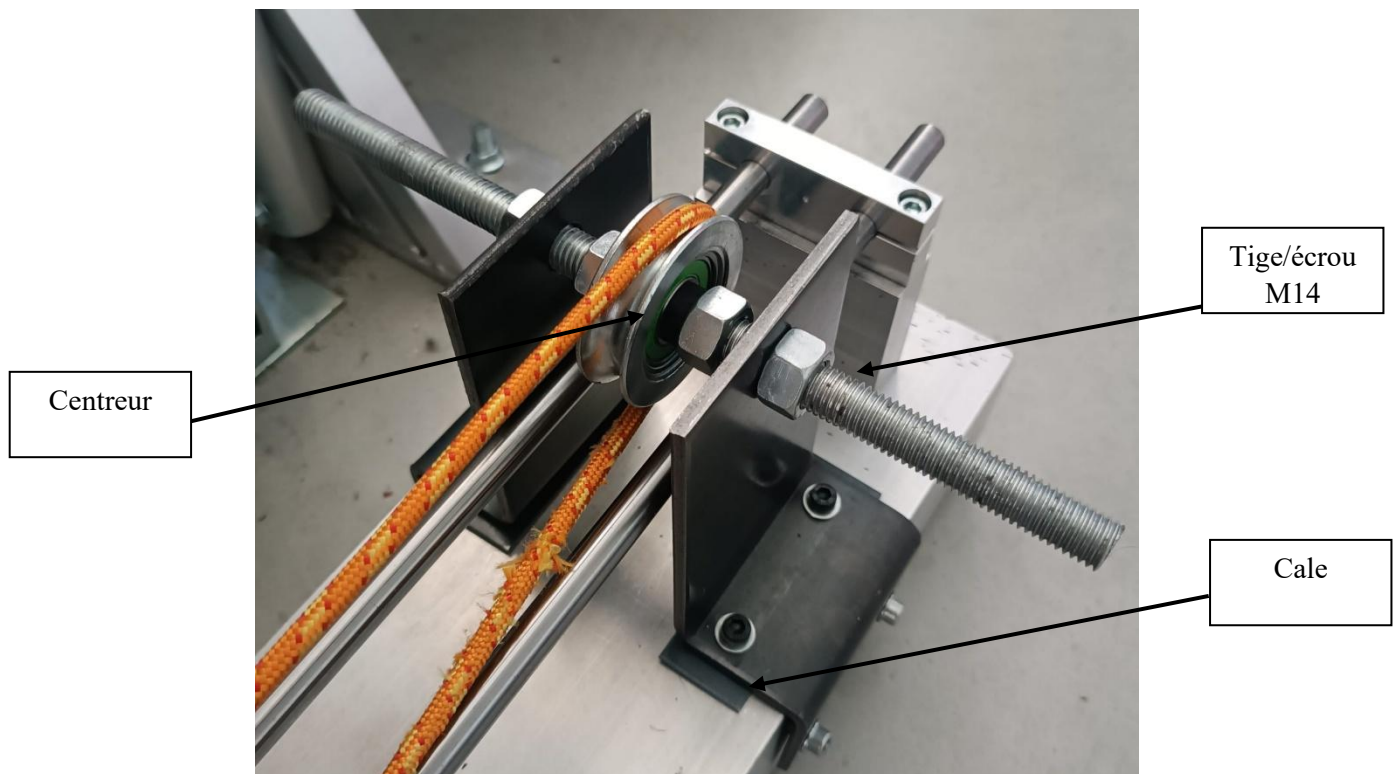


Figure 32: Nouveau de système de poulie monté, plus résistant

La corde de 3mm de diamètre n'a pas résisté à la traction. Je l'ai changé en choisissant une la même corde mais de diamètre 7mm, ayant une résistance à la traction de 1200kg. Cette corde étant trop épaisse pour le collier de serrage, un serre-câble sera utilisé pour enrouler la corde autour du tirefort.

Les masses des chariots, initialement réalisées en ABS, n'ont pas résisté aux contraintes mécaniques exercées lors des essais. Le matériau a fendu, probablement sous l'effet combiné de la traction et du serrage. En conséquence, les masses ne remplissent plus leur rôle correctement : la traction n'est plus axiale, ce qui entraîne un déplacement non guidé du ressort et une compression désaxée.



Figure 33: Masses du chariot fissurées/cassées sous les contraintes



Figure 34: Ressort se comprimant de manière désaxée

J'ai refait les masses de chaque chariot en acier épaisseur 5mm. Leur forme est simplement une tôle pliée en U, avec des perçages pour laisser passer la tige fileté qui comprime le ressort et pour permettre le vissage du ressort contre les masses.

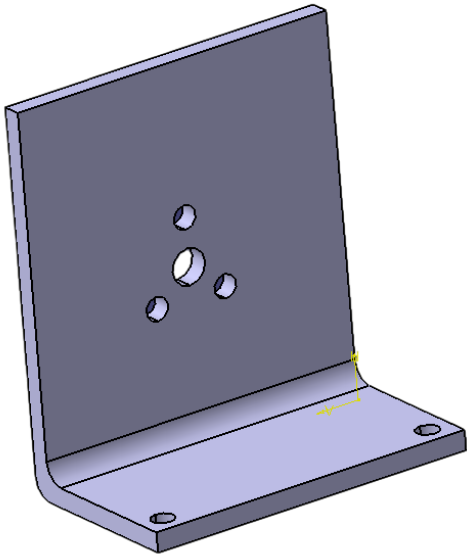


Figure 35: CAO de la masse

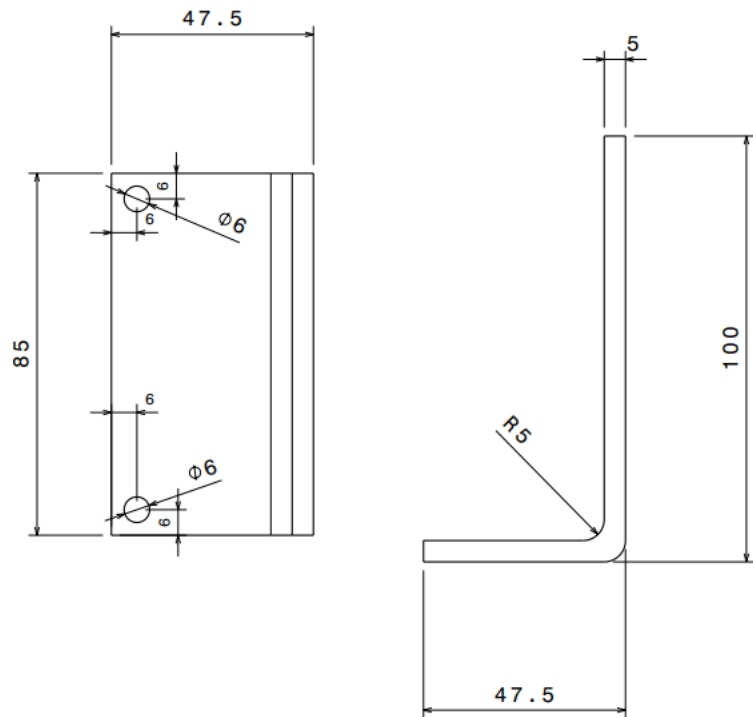
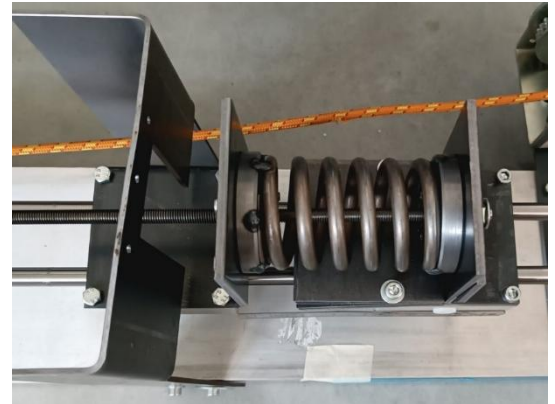
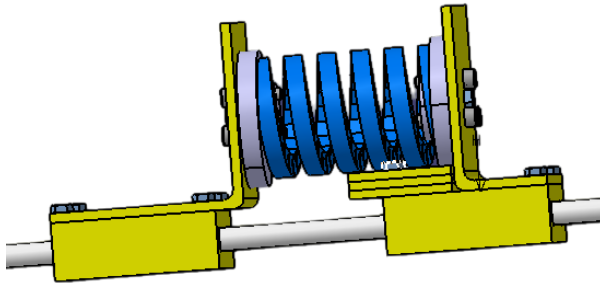


Figure 36: Dessin de définition de la masse

J'en ai profité pour respecter le paramètre $\alpha = 2 = \frac{m_0}{m_1}$

Dans notre cas, la masse m_1 est de 1,165 kg, ce qui implique que m_0 doit être de 2,33 kg pour obtenir un α égal à 2.

En ajoutant quelques tôles de compensation, j'ai obtenu une masse m_0 de 2,337 kg, ce qui donne un rapport $\alpha=2,006$ très proche de la valeur cible.



Figures 37: Montage du ressort sur les nouvelles masses en acier

Maintenant que l'ensemble des pièces critiques a été renforcé, un nouvel essai de compression du ressort a pu être réalisé. Cette fois-ci, le système a permis de comprimer le ressort jusqu'à 30 % de sa longueur initiale sans défaillance mécanique : aucune pièce ne s'est déformée ni rompue. Pour mesurer le taux de compression du ressort, j'installe un réglet avec le 0 au niveau de la bague de la masse m_1 . Sachant que mon ressort a une longueur à vide de 9cm, je comprime mon ressort jusqu'à ce que la bague de la masse m_1 soit au niveau des 3cm : compression de 30%.

Afin de permettre au ressort de rebondir correctement contre celui fixé au bâti, il est nécessaire de concevoir et fabriquer une pièce de maintien adaptée. À ce jour, aucun système de fixation mécanique n'est en place pour immobiliser ce ressort sur son emplacement. Seul un support imprimé en ABS assure un positionnement approximatif, sans assurer de maintien en position sous l'effet du choc, lorsque les ressorts rentrent en contact.

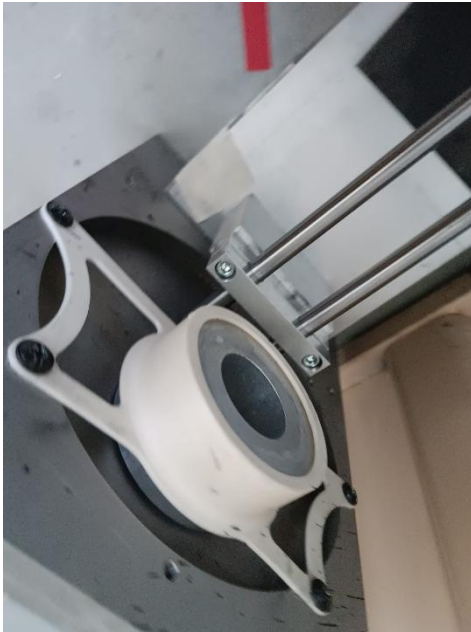


Figure 39: Emplacement du ressort fixe

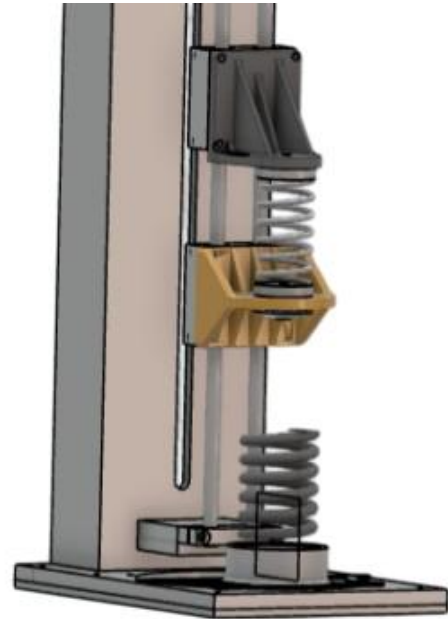


Figure 38: Représentation du ressort fixé au bâti

J'ai conçu un centreur qui s'insère directement dans le socle afin d'assurer un alignement axial précis entre le ressort fixe, monté sur le bâti, et le ressort mobile, guidé par les glissières. Ce centrage est essentiel pour que la compression et la restitution d'énergie se fassent de manière symétrique et sans déviation.

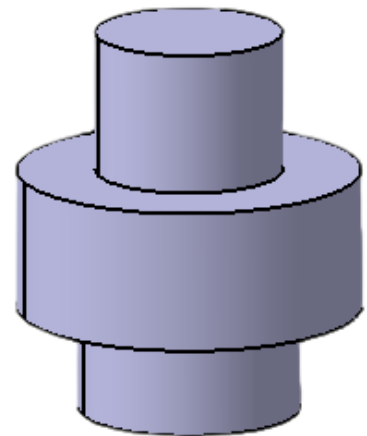


Figure 40: CAO du centreur de ressort

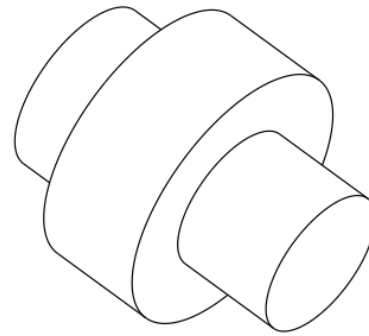
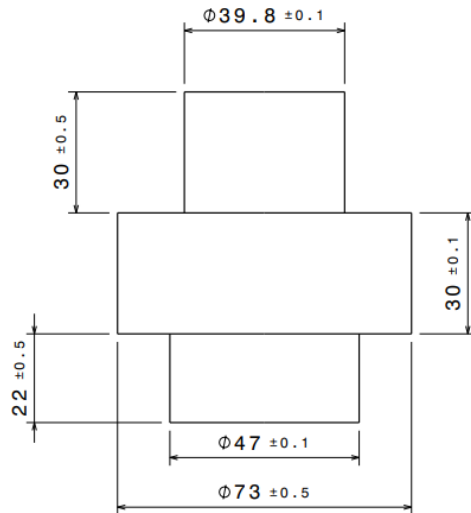


Figure 41: Dessin de définition du centreur de ressort

Le cylindre de diamètre 39,8 mm est conçu pour venir s'encaster dans le socle du bâti, assurant ainsi un positionnement stable de la pièce. Le cylindre de diamètre 47 mm, quant à lui, joue le rôle de centrage du ressort afin de garantir son alignement parfait avec le ressort mobile guidé par la glissière. Cette configuration permet de maintenir une coaxialité optimale.

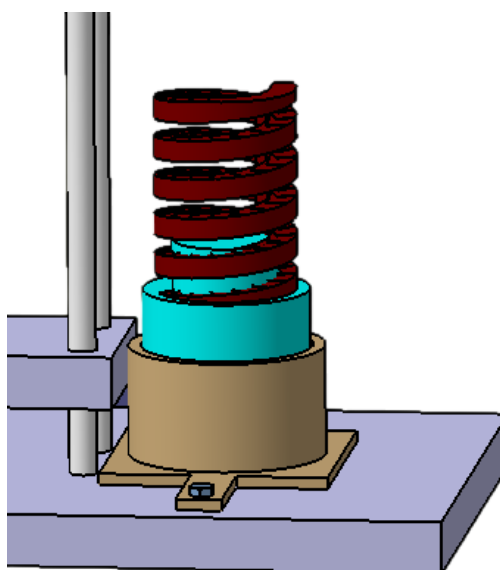


Figure 42: Montage du centreur avec le ressort fixe

Le centreur a été usiné sur un tour conventionnel disponible dans les ateliers de l'IUT. Le matériau choisi est l'aluminium, en raison de sa bonne usinabilité, de sa légèreté et de sa résistance suffisante pour l'effort auquel la pièce sera soumise.

2.3.3 Essai et améliorations possibles

J'ai procédé à un essai pour voir à quel hauteur le ressort comprimé de 30%, à une hauteur initiale de 1,03m rebondit après son contact avec le ressort fixé au bâti.

Le premier essai est plutôt concluant. Une partie de l'énergie vibratoire est bien convertie en énergie potentielle, puisque le ressort remonte à une hauteur que l'on peut estimer entre 80 et 90 cm de haut.



Figure 44: Position ressort mobile, initialement comprimé de 30%



Figure 43: Ressort mobile en contact avec le ressort fixe



Figure 45: Rebond maximum du ressort mobile

Malheureusement, lors des essais, le ressort fixé au bâti est sorti de son logement, malgré la présence du centreur en aluminium. Ce défaut de maintien a empêché le ressort de transmettre correctement toute son énergie au ressort mobile situé dans la liaison glissière. L'énergie de restitution a donc été partiellement perdue.

Une solution pour améliorer le système est de souder directement le ressort à son centreur.

J'ai donc décidé de refaire ce centreur, mais cette fois-ci en acier.

L'usinage a été réalisé sur un tour à commande numérique. Ce choix m'a permis de bénéficier de vitesses de coupe plus élevées, d'un temps d'usinage réduit.

J'ai choisi le SOMAB 250+ qui a des outils adaptés pour usiner de l'acier.

Voir contrat de phase en annexe

Voici le ressort soudé au MAG à son centreur (un préchauffage à 150°C a eu lieu pour limiter les contraintes thermiques et le risque de fissuration).



Figure 47: Ressort fixe soudé à son centreur



Figure 46: Ressort fixe sur son emplacement

Dorénavant, grâce au nouveau centreur en acier, le ressort fixe est correctement maintenu et devrait être capable de transmettre l'intégralité de son énergie au ressort mobile.

Théoriquement, dans ce cas, le ressort de la glissière devrait rebondir au-delà de sa position de départ, du fait de la restitution d'énergie accumulée.

Toutefois, dans la configuration actuelle, cela reste impossible en raison de la butée fixe, qui bloque le mouvement du chariot et empêche le ressort de dépasser ce point.

Il est donc nécessaire de concevoir une butée amovible, qui pourrait se retirer temporairement afin de laisser passer le ressort lors du rebond.

Le prototype de butée mobile que j'ai réalisé reprend le principe de la butée fixe, à la différence près que la partie en contact avec le ressort est désormais mobile : elle peut se relever à l'aide de charnières achetées sur RS Components. Un ressort précontraint situé entre les deux plaques permet à la charnière de s'ouvrir automatiquement.

J'ai utilisé des charnières à ouverture automatique, qui permettent à cette partie de la butée de se dégager rapidement au moment opportun, afin de laisser passer le ressort et lui permettre de poursuivre son mouvement de rebond au-delà de la position initiale.

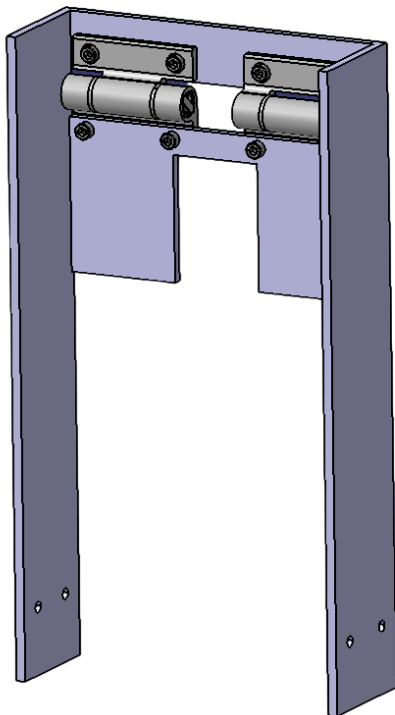


Figure 48: Prototype de butée mobile

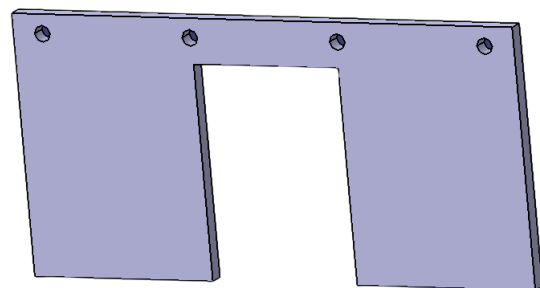


Figure 49: Partie mobile de la butée

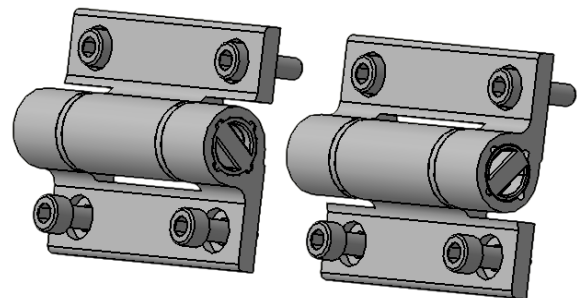


Figure 50: Charnières à ouverture automatique RS

Un système de goupille doit être étudié pour bloquer la charnière, et dégager la goupille de sorte à ouvrir la charnière de manière automatique.

Banc de test avec tous ses composants :

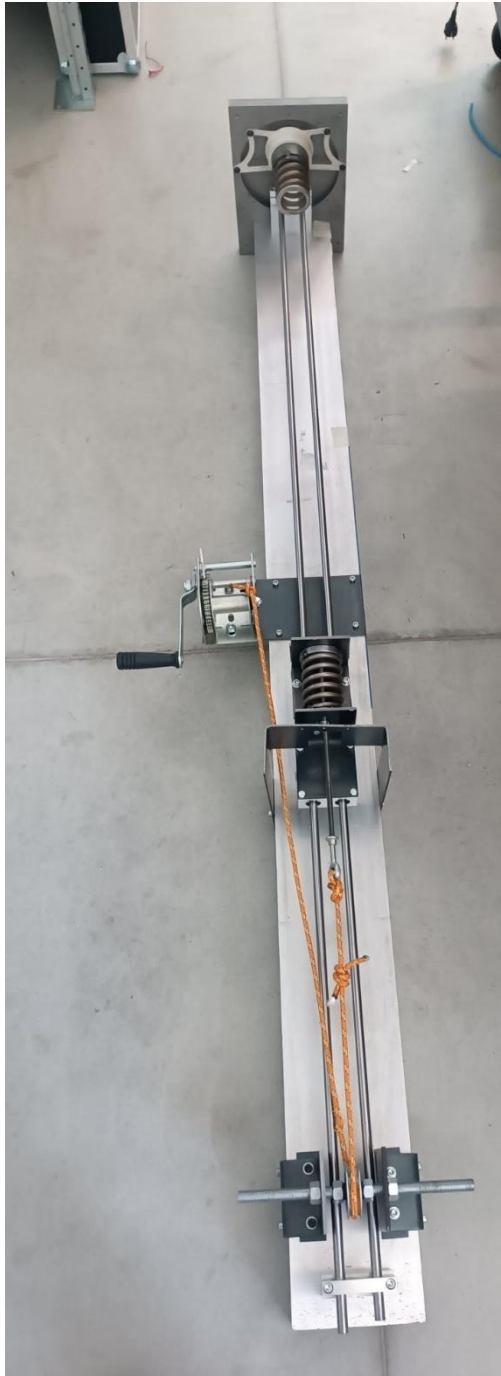


Figure 51: Banc de test final avec tous ses composants

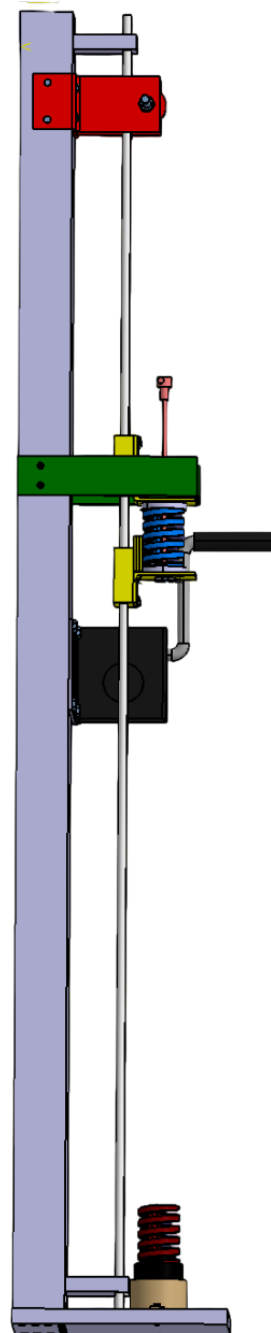


Figure 52: CAO du banc de test avec tous ses composants

2.4 Conclusion et objectifs pour la fin de ce stage

J'ai beaucoup avancé sur ce projet de recherche, le banc d'essai étant fonctionnel, et ayant eu des premiers résultats encourageant. J'ai réussi à m'adapter au banc d'essai déjà existant, à adapter les pièces au système afin de le faire fonctionner comme je le souhaitais. Ce qui était pour moi au début de ce stage une mission très difficile de faire du retournement temporel, me paraît maintenant plus que atteignable.

Pour ces deux dernières semaines de stage, l'objectif est de fabriquer cette nouvelle butée. Les deux parties seront faites en électroérosion, une grande partie du programme ayant déjà été étudiée. Il faut aussi faire et fabriquer le système de goupille qui retient l'ouverture de la charnière au moment opportun.

In fine, le principal objectif reste de faire un essai concluant et de voir le ressort rebondir plus haut que sa position initiale. Si possible, il faudrait réussir à filmer l'essai, et voir s'il est possible de ne pas distinguer dans quel sens est joué la vidéo.

3. RAPPORT PPP

Entretien avec Loïc TADRIST sur son métier d'enseignant chercheur :

Dans le cadre de mon stage de fin d'études, j'ai eu l'occasion d'échanger avec M. TADRIST, enseignant-chercheur au département Génie Mécanique et Productique (GMP) de l'IUT d'Aix-Marseille, site d'Aix-en-Provence. À travers cette discussion, j'ai pu mieux comprendre les différents aspects de son métier, son parcours, et ce qui l'a amené à exercer cette fonction.

- Bonjour M. TADRIST. Vous êtes enseignant-chercheur : concrètement, qu'est-ce que ça veut dire ?
- Bonjour. Être enseignant-chercheur signifie exercer à la fois des missions d'enseignement et de recherche. J'interviens en tant qu'enseignant au sein du département GMP de l'Université d'Aix-Marseille, sur le site d'Aix-en-Provence. A côté, je mène des travaux de recherche au sein de l'Institut des Sciences du Mouvement, un laboratoire de recherche rattaché à AMU. Cette double casquette me permet de transmettre mes connaissances tout en contribuant à l'avancement de la recherche scientifique.
- Quel a été votre parcours pour en arriver là ?



- J'ai suivi un cursus scientifique classique dans les sciences et techniques, puis j'ai intégré l'ENS Cachan, ce qui m'a bien préparé à la fois à la recherche et à l'enseignement. Ensuite, j'ai fait une thèse en mécanique et en mécanique des fluides. Après ça, je suis parti en post-doc à l'université de Liège en Belgique, où j'ai aussi travaillé comme chercheur pendant un moment. Et finalement, je suis revenu m'installer dans la région d'Aix, d'où je suis originaire, pour prendre le poste que j'occupe aujourd'hui.
- Quelles sont vos responsabilités ici, au département GMP ?
- Je m'occupe de coordonner l'enseignement des mathématiques, et je suis aussi responsable du parcours Innovation pour l'Industrie. Ce parcours met l'accent sur les projets concrets, l'innovation technique, et la logique de développement produit. Je gère donc à la fois les contenus pédagogiques et le suivi des étudiants.
- Depuis quand êtes-vous en poste ?
- Je suis arrivé ici en 2020.
- Et en dehors des cours, quelles sont vos autres activités ?
- Une part importante de mon temps est consacrée à la recherche scientifique. J'encadre plusieurs projets de recherche tout au long de l'année, impliquant des chercheurs post-doctorants ainsi que des stagiaires. Mon rôle est de les accompagner dans leurs travaux, de définir les orientations scientifiques, de superviser les expérimentations, et d'assurer la valorisation des résultats à travers des publications lorsque c'est possible.
- Où exercez-vous vos activités au quotidien ?
- Tout se passe en grande partie ici, sur le site d'Aix-en-Provence. Pour la recherche, on a la chance d'avoir une halle d'essais bien équipée, ce qui permet de faire pas mal d'expérimentations sur place. Après, selon les projets, je peux être amené à me déplacer dans d'autres laboratoires ou entreprises pour des collaborations, ou à aller à des conférences scientifiques pour présenter nos résultats.
- Qu'est-ce qui vous a motivé à faire ce métier ?
- Clairement, la liberté. Dans la recherche, on choisit nos sujets, on monte nos projets, on explore ce qui nous intéresse vraiment. Il y a de la rigueur, bien sûr, mais aussi beaucoup de liberté intellectuelle. Et puis, sur un plan plus personnel, je voulais revenir dans la région où je suis originaire.



- Avez-vous des objectifs pour la suite ?
- Mon objectif principal à court terme est de faire avancer les projets de recherche en cours, d'obtenir des résultats exploitables et de qualité. En recherche, tout ne se déroule pas toujours comme prévu, certains projets n'aboutissent pas, mais cela fait partie du processus scientifique. Ce qui compte, c'est d'en tirer des enseignements, même des échecs, et de continuer à progresser.

4. CONCLUSION PERSONNELLE

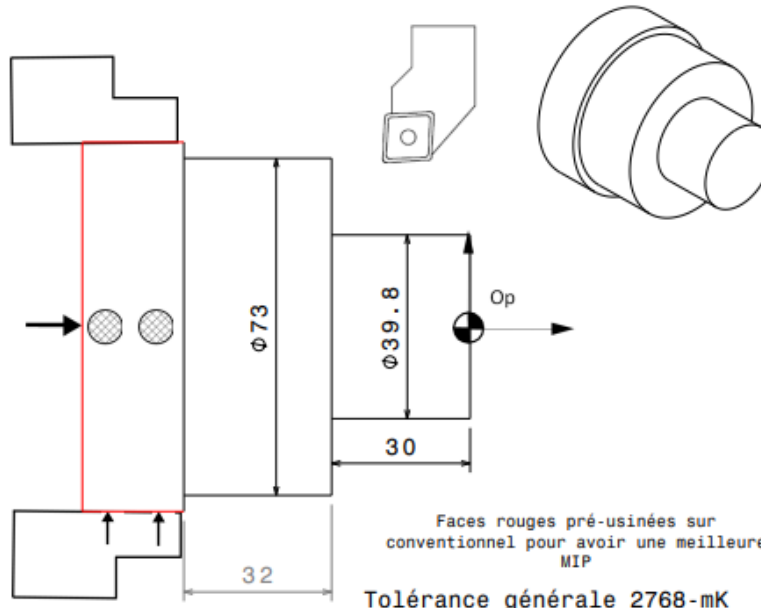
Ce stage a été pour moi une expérience particulièrement formatrice, à la fois sur le plan technique et humain. Il m'a permis de confronter mes connaissances théoriques acquises durant le BUT à la réalité du prototypage, de la conception, et de la mise au point d'un système complexe.

J'ai été amené à analyser des défaillances, à adapter des pièces existantes, à usiner de nouvelles solutions, tout en veillant à respecter des contraintes mécaniques précises. Le travail autour du ressort, des butées, du système de poulies ou encore des matériaux m'a permis de renforcer mes compétences en conception mécanique, mais aussi de prendre conscience de l'importance de l'expérimentation, des tests et de la résolution de problèmes sur le terrain.

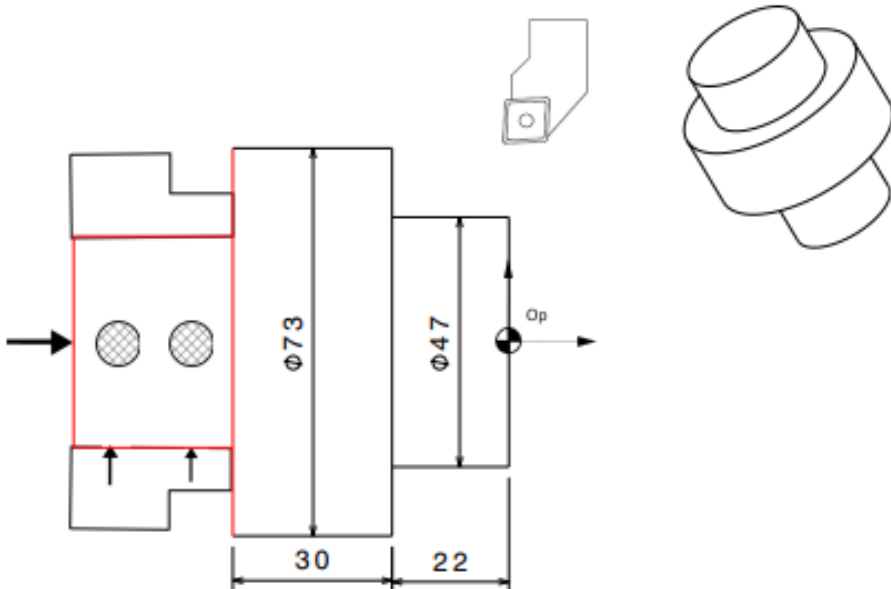
Un des points marquants de ce stage a été la mise en pratique de procédés que je n'avais jusqu'alors étudiés que sur le papier, comme l'électroérosion ou la plieuse à commande numérique. Pouvoir les utiliser m'a donné une meilleure compréhension de leurs possibilités, limites.



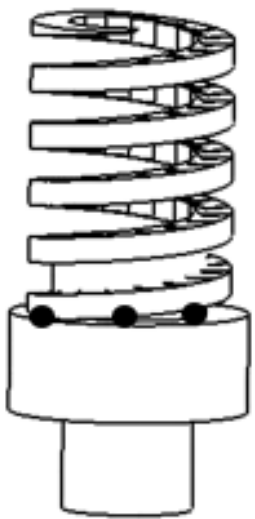
Ce stage m'a aussi appris à gérer les imprévus, à prendre des décisions techniques rapidement, et à assumer la responsabilité de mes choix dans un projet en autonomie. Cela m'a conforté dans l'idée que je souhaite poursuivre dans un domaine mêlant conception, innovation et essais mécaniques, avec une dimension pratique et technique forte.

5. ANNEXES :

PROJET D'ETUDE DE FABRICATION		BUREAU DES METHODES			
PHASE 10					
Etabli par:ROGNON LOIC	ELEMENT: MAINTIENT RESSORT-BATI	N°:			
Le: 16/05/2025	S/Ensemble:	Matière: 60Si7			
Programme:1 PIECE	Ensemble:	Brut:Ø80x90			
Désignation: TOURNAGE CN					
Machine outil:SOMAB 250 +					
<div></div>					
Tolérance générale 2768-mK					
Désignation de opérations	Outils	Paramètres de coupe			
		Vc	Ap	Ae	f(z)
		m/min	mm	mm	mm/tr (1/dt)
Dressage ébauche	PWLN	100	1		0.1
Dressage finition	PWLN	120	XXX		0.05
Chariotage ébauche	PWLN	100	2		0.1
Chariotage finitiion	PWLN	120	XXX		0.05

Annexe I: Phase 10 centreur du ressort fixe

	PROJET D'ETUDE DE FABRICATION	BUREAU DES METHODES			
	PHASE 20				
Etabli par:ROGNON LOIC	ELEMENT: MAINTIENT RESSORT-BATI	N°:			
Le: 16/05/2025	S/Ensemble:	Matière: 60Si17			
Programme:1 PIECE	Ensemble:	Brut:Ø80x90			
Désignation: TOURNAGE CN					
Machine outil:SOMAB 250 +					
<div></div>					
Tolérance générale 2768-mK					
Désignation de opérations		Paramètres de coupe			
		Vc	Ap	Ae	f(z)
		m/min	mm	mm	mm/tr (/dt)
	Dressage ébauche	PWLN	100	1	0.1
	Dressage finition	PWLN	120	XXX	0.05
	Chariotage ébauche Ø47	PWLN	100	2	0.1
	Chariotage finition Ø47	PWLN	120	XXX	0.05

 Institut Universitaire de Technologie Aix-Marseille Université		Descriptif de Mode Opérateur de Soudage		
Procédé :	135	Pièce :	Matière : 60Si7 (ressort) Épaisseur : spire de 5 à 10mm	
Matériel :		Métal d'apport :	Nuance : G4Si1 Diamètre : 0,8mm	
Assemblage :	Disposition : PAIG (à plat)	Protection :	Type : Fil plein	
Préparation des pièces : <input checked="" type="checkbox"/> Brosage <input type="checkbox"/> Toilage <input type="checkbox"/> Meulage <input checked="" type="checkbox"/> Dégraissage : alcool industriel <input checked="" type="checkbox"/> Préchauffage 150 °C <input type="checkbox"/> Autres :		Schéma de préparation des bords :		
Schéma de l'opération : <div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;">  <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-left: 20px;"> 6 points de soudage autour de la base du ressort : 1 point tous les 60 ° </div> </div>				
Paramètres de soudage :				
Vitesse de soudage :	0mm/s (pointage)	Intensité de soudage :	100 A	
Temps d'arc :	0,5 à 1 s (manuel)	Inclinaison torche :	15°	
Polarité :	Fil + ; Masse -			
Contrôle				
Systématique : Visuel, fissures (ZAT)		Échantillonnage : Néant		

Annexe III: DMOS pour souder le ressort sur son centreur



Nom et Prénom du stagiaire : ROGNON Loïc

Stage BUT : GMP 3A

Nom entreprise : Institut des Sciences du Mouvement ISM Etienne-Jules MAREY

Lieu du stage : (Ville) : Aix-en-Provence (13)

Tuteur industriel : Loïc TADRIST

Fonction : Enseignant-chercheur

Tuteur universitaire : Jean-Christophe VALLEE

Résumé du projet de stage :

Conception, fabrication et montage d'un banc de test pour l'étude expérimentale du retournement temporel en mécanique.