

PROJET TUTEURÉ: SLICE

SLIDING CONTACT INVESTIGATION FOR CARBON PANTOGRAPH WEAR
EVALUATION



26 MAI 2025

UFR STGI

ESTEBAN CONSTANTIN

BOBA MBARECK

SAMI BOUAYADI

YANIS DJERROUD

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à nos encadrants de projet, messieurs Philippe Baucour ainsi que Cyrille Verna, pour leur accompagnement constant, leur disponibilité et leurs conseils éclairés tout au long de l'année. Leur soutien a été déterminant dans la compréhension et la mise en oeuvre de notre projet.

Nous remercions également Monsieur Roger Bédu, enseignant en électronique et automatique, pour son aide précieuse concernant les aspects électroniques du projet.

Nos remerciements s'adressent également à Monsieur Oreen OUMER, doctorant au laboratoire FEMTO-ST, pour nous avoir permis de manipuler le banc expérimental et pour avoir pris le temps de répondre à nos nombreuses interrogations avec clarté et bienveillance.

Enfin, bien que n'ayons pas eu l'occasion de le rencontrer, nous souhaitons remercier Monsieur Théo KZYAZIK pour la richesse et la pertinence de sa thèse, qui a constitué une ressource essentielle à l'élaboration de notre travail.

TABLE DES MATIERES

Introduction générale	p. 4
I. Contexte et fonctionnement de la liaison caténaire-pantographe	p. 7
1.1. Introduction au fonctionnement de la liaison électrique	p. 7
1.2. Modélisation de la liaison électrique au FEMTO-ST	p. 9
1.3. Intérêt de ce banc expérimental pour le projet SLICE	p. 10
II. Objectifs et encadrement du projet SLICE	p. 11
2.1. Objectifs du projet SLICE	p.11
2.2. Adaptation du banc expérimental au projet et défis rencontrés.....	p. 11
2.3. Début des travaux du semestre de printemps	p. 13
2.4. Travaux à réaliser pendant les congés	p. 14
2.5. Conception mécanique de la maquette et résultats obtenus....	p.15
III. Analyse, évaluation de la maquette	p. 18
3.1. Comparaison des résultats théoriques et expérimentaux.....	p. 18
3.2. Bilan concernant ces résultats	p. 19
IV. Conclusion.....	p.20
V. Références bibliographiques	p. 22
VI. Annexes	p. 24
6.1. Programmes Arduino.....	p. 24
6.2. Liste du matériel à commander	p. 25
6.3. Dessins de la pièce supportant le pion.....	p.26

TABLE DE FIGURES

Figure 1.1 – Camions à pantographe sur une voie d'autoroute équipée d'une caténaire	p. 7
Figure 1.2 – Schéma de la liaison caténaire-pantographe	p. 8
Figure 1.3 – Banc expérimental au FEMTO-ST ainsi que ses différentes composantes	p. 9
Figure 1.4 – Maquette finalisée avec moteurs pour disque et pion	p. 18
Figure 1.5 – Zones parcourues par le pion (ici un crayon) sur le disque	p. 20

INTRODUCTION

Depuis quelques années, le laboratoire FEMTO-ST dispose d'un banc expérimental simulant le contact électrique glissant que l'on retrouve pour l'alimentation des trains. Un train utilise un pantographe formé d'une bande en carbone qui va frotter sur le fil d'alimentation du train appelé caténaire. Le projet SLICE (Sliding Contact Investigation for Carbone pantograph wear Evaluation) a pour but d'étudier les phénomènes d'usure de ce contact dynamique réalisé via une bande en carbone au contact du fil de caténaire lors du passage du courant. Ainsi, ce projet vise à modéliser et reproduire ce contact à travers un banc expérimental afin de mieux comprendre les mécanismes d'usure et d'échauffement.

De ce fait, le premier objectif de notre groupe était de bien comprendre le banc expérimental présent au laboratoire FEMTO-ST. Ce dernier est composé d'un disque en cuivre en rotation sur lequel vient frotter un pion en carbone qui effectue des allers-retours selon un rayon. Il y a donc une modélisation de la cinématique à mettre en place afin que la vitesse relative du pion par rapport au disque reste constante. L'ensemble disque/pion est parcouru par un courant analogue à celui que l'on peut retrouver pour l'alimentation des trains.

Ainsi, l'objectif du projet est double :

- La réalisation d'une maquette pédagogique qui reproduit le fonctionnement du banc expérimental. Les mouvements du disque et du pion doivent être reproduits. Une solution asservissant la position du pion à la vitesse de rotation peut même être envisagée. Il n'est pas forcément nécessaire de reproduire le contact électrique.
- L'écriture d'un code Python qui permet de visualiser les zones visitées par le pion du disque et de réaliser une animation du mouvement. En effet, le pion frottant sur le disque, la connaissance de la position de la surface de contact est importante pour interprétation des résultats. D'un point de vue logiciel, on utilisera la bibliothèque Pymunk qui est, une bibliothèque Python pour la

simulation de la physique 2D, particulièrement utile pour les aspects mécaniques et cinématiques.

Au cours du semestre 3, notre principal objectif a été de bien comprendre les attentes liées au sujet du projet. Pour cela, nous avons consacré plusieurs séances à des recherches bibliographiques approfondies, essentielles pour appréhender le fonctionnement de la liaison caténaire-pantographe dans les systèmes ferroviaires. Ces lectures, appuyées par des schémas explicatifs, nous ont permis d'acquérir les premières notions nécessaires à l'analyse du problème, notamment en matière de calcul de vitesse relative et de système d'asservissement.

Sur cette base, nous avons commencé à esquisser une première idée de maquette pédagogique. Celle-ci reposait sur un système de bielle-manivelle, couplé à un disque en rotation, où une craie – tenue par la bielle - se déplacerait selon un rayon de disque pour simuler le mouvement du pion. Toutefois, nous avons rapidement identifié une difficulté : la vitesse de rotation du disque n'étant pas constante, il devenait nécessaire de synchroniser les deux moteurs par un système d'asservissement afin de maintenir une vitesse relative constante entre les deux éléments. N'ayant pas les compétences techniques suffisantes dans ce domaine, nous avons sollicité l'aide de Monsieur Bedu, notre enseignant en électronique et automatique, pour mieux comprendre les possibilités d'asservissement adaptées à notre projet.

Durant le semestre 4, les échanges réguliers avec nos encadrants et une seconde visite au laboratoire FEMTO-ST, durant laquelle nous avons pu observer le banc expérimental en fonctionnement, nous ont permis de clarifier notre approche. Nous avons ainsi réévalué certaines des pistes envisagées au semestre précédent, et abandonné certaines solutions trop complexes ou irréalisables dans le temps imprévu.

Nous avons alors opté pour une nouvelle orientation : reproduire le banc expérimental du laboratoire à une échelle réduite, en l'adaptant aux contraintes matérielles et temporelles de notre projet. Ce choix nous a permis de recentrer notre travail sur l'aspect électronique de la maquette, en concevant un système fonctionnel tout en restant fidèle au principe du dispositif réel.

En revanche, par manque de temps et à cause d'une organisation rendue difficile au semestre 3, nous n'avons pas pu développer le code Python prévu pour visualiser les

zones parcourues par le pion sur le disque. Néanmoins, nous avons trouvé une alternative simple mais efficace : utiliser un feutre en translation pour matérialiser le passage du pion, permettant ainsi de visualiser concrètement les zones de contact entre le disque et le pion.

Ce rapport est structuré en trois grandes parties :

I. Contexte et fonctionnement de la liaison caténaire-pantographe

Nous présenterons les principes de fonctionnement de cette liaison électrique glissante, essentielle dans l'alimentation des trains, en nous appuyant sur les connaissances tirées de nos recherches bibliographiques et de nos échanges avec nos encadrants.

II. Objectifs et encadrement du projet SLICE

Cette partie rappellera les objectifs pédagogiques et techniques du projet SLICE, ainsi que les attendus liés à la modélisation et à la réalisation d'une maquette inspirée du banc d'essai du laboratoire FEMTO-ST. Nous reviendrons par la suite sur les travaux menés lors des semestres 3 et 4.

III. Analyse, évaluation de la maquette

Nous comparerons les résultats obtenus à la théorie initiale afin d'évaluer la pertinence de la maquette développée.

IV. Conclusion générale

Enfin, nous conclurons sur les apports techniques et méthodologiques de ce projet, ainsi que sur les perspectives d'amélioration.

Contexte et fonctionnement de la liaison caténaire-pantographe

1.1) Introduction au fonctionnement de la liaison électrique

La liaison caténaire-pantographe est un système de contact électrique glissant utilisé pour alimenter les trains électriques en courant. Définissons d'abord les termes principaux de cette liaison électrique :

- Caténaire : Structure suspendue composée d'un fil porteur et d'un fil de contact. Ce dernier est généralement en cuivre pour ses bonnes propriétés conductrices.
- Pantographe : Bras articulé sur le toit du train, maintenant une pression constante sur la caténaire. Il est surmonté de bandes de captages qui assurent le contact glissant.
- Bande de captage : Element en carbone qui frotte sur le fil de contact. Elle est soumise à l'usure et à des échauffements dus au frottement et au passage du courant.



FIGURE 1.1 — Camions à pantographe sur une voie d'autoroute équipée d'une caténaire.

Ce contact glissant doit être stable malgré les variations de vitesse ou les courants d'airs induits par le déplacement du train. Ainsi, le mouvement relatif entre le pantographe et la caténaire engendrent des phénomènes d'usure des

matériaux : frottement mécanique, dégradation de la surface ou encore la formation d'arcs électriques. L'usure dépend fortement de la vitesse de glissement, la force de contact, le courant et les arcs électriques générés par celui-ci ou encore le type de graphite utilisé. Typiquement, la bande de captage est réalisée en carbone due à sa résistance thermique et ses propriétés auto-lubrifiantes. Néanmoins, elle nécessite une maintenance régulière due à son usure et se retrouve à être coûteuse.

Le pantographe, situé sur le toit du train, exerce une pression pour rester en contact avec la caténaire malgré les irrégularités de la voie. Pendant le roulement, le pantographe glisse sur la caténaire et, si rien n'est fait pour l'uniformiser, ce glissement provoque une usure localisée de la bande de captage en carbone présente sur le pantographe. De ce fait, pour répartir cette usure de manière homogène sur la largeur de la bande de captage, la caténaire est légèrement désaxée en zigzag, oscillant latéralement. Ce mouvement latéral assure ainsi un frottement entre la bande de carbone et le fil de cuivre délocalisé, limitant donc l'usure d'une seule zone, prolongeant la durée de vie de la bande de captage et permettant à cette liaison électrique de s'avérer moins coûteuse car moins de maintenance à effectuer.

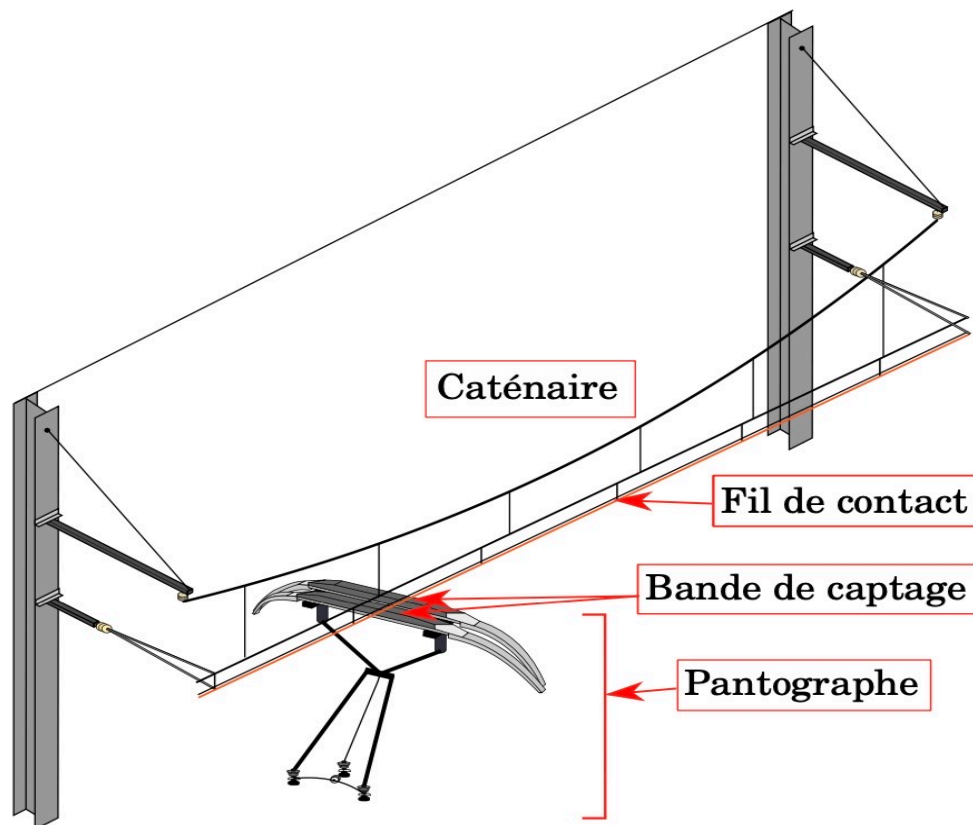


FIGURE 1.2 – Schéma de la liaison caténaire-pantographe.

Au delà du problème de l'usure, le passage du courant électrique à travers le contact crée une résistance électrique, source d'échauffement. Ainsi, en cas de mauvais contact, la température peut très rapidement monter, causant une déformation et une détérioration des matériaux et donc une augmentation de l'usure. Le désaxage de la caténaire en zigzag permet une meilleure répartition de la chaleur générée par la liaison sur une surface plus large.

1.2) Modélisation de la liaison électrique au FEMTO-ST

Afin d'étudier cette liaison dans un cadre contrôlé, un banc d'essai expérimental a été développé au laboratoire FEMTO-ST, composé de :

- Un disque de cuivre représentant la caténaire
- Un pion en carbone qui simule la bande de captage sur le pantographe

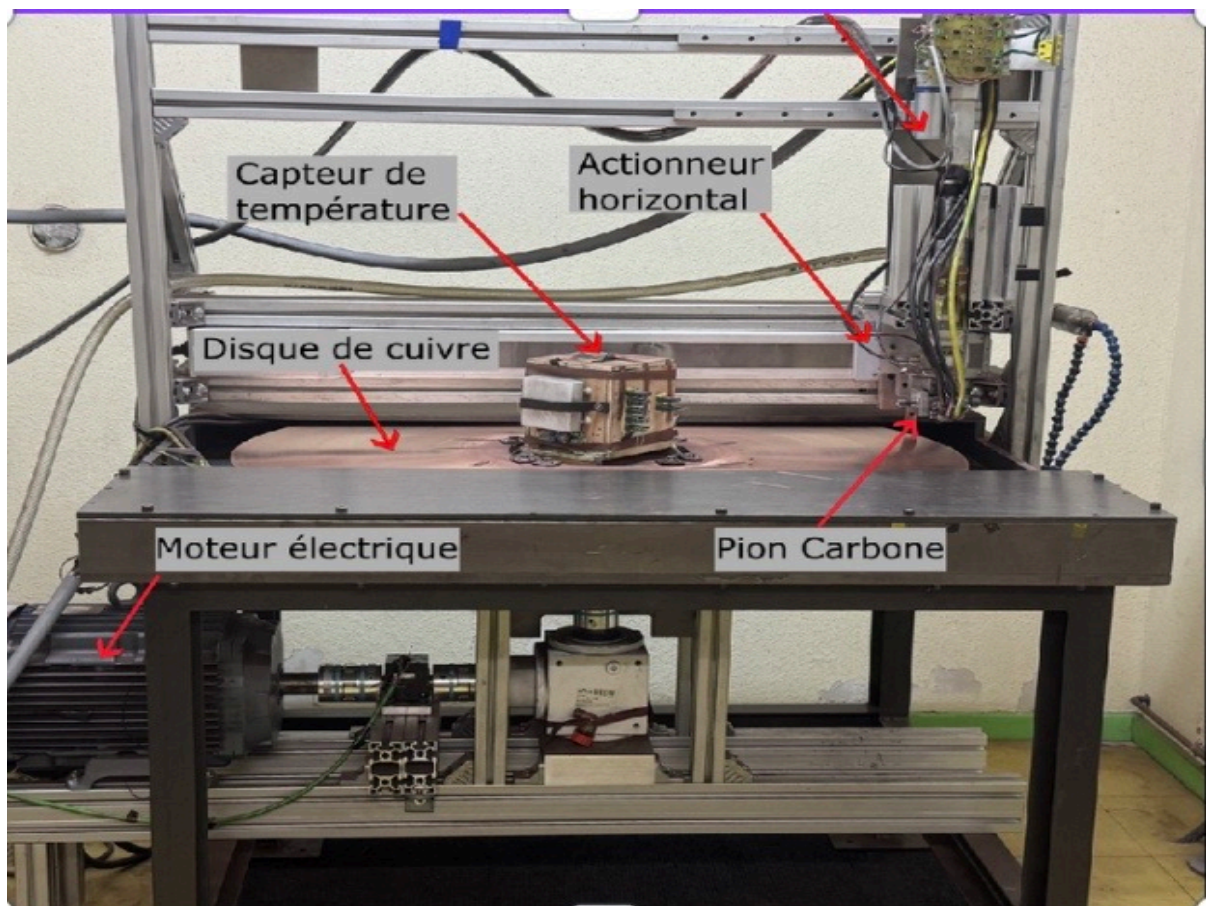


FIGURE 1.3 – Banc expérimental au FEMTO-ST ainsi que ses différentes composantes. Image extraite de la vidéo explicative de la liaison caténaire-pantographe.

L'ensemble est alimenté par un courant électrique.

Le pion effectue des mouvements de va-et-vient sur le rayon du disque, pendant que celui-ci tourne, en laissant un battement au centre et à l'extrémité. De ce fait, nous remarquons que plus le pion se rapproche du centre du disque, plus la vitesse de rotation de ce dernier augmente. Cela est rendu possible avec un asservissement entre le moteur du disque ainsi que le moteur du pion. En effet, le fait de récupérer la position du pion sur le disque, notamment grâce à des capteurs de positions, permet d'asservir les deux moteurs. Cela permet donc de conserver une vitesse relative constante afin de reproduire le plus fidèlement la physique du contact réel présent dans les systèmes ferroviaires. En plus de cela, cela nous permet d'obtenir un frottement mécanique constant et donc de d'étudier plus simplement l'usure des matériaux. Nous pouvons également remarquer l'usure du pion en carbone, qui vient marquer le disque de cuivre au fur et à mesure qu'il avance. La manipulation s'avère assez impressionnante étant donné que la vitesse de rotation du disque de cuivre peut aller jusqu'à 80km/h .

1.3) Intérêt de ce banc expérimental pour le projet SLICE

Le fait de voir la manipulation au FEMTO-ST nous a permis de nous rendre compte des éléments essentiels à conserver dans notre projet d'année, soient l'explication de cette liaison électrique à travers une maquette pédagogique, davantage accès grand public, ainsi qu'une conservation d'une vitesse relative constante afin de pouvoir être le plus fidèle possible au banc d'essai, et donc à fortiori à la réalité.

Objectifs et encadrement du projet SLICE

2.1) Objectifs du projet SLICE

Après avoir étudié en détail le fonctionnement de la liaison caténaire-pantographe, nous disposons désormais d'une compréhension plus précise des attendus de notre projet pour l'année. L'objectif étant de concevoir une maquette pédagogique illustrant cette liaison électrique propre aux systèmes ferroviaires, il est apparu essentiel de nous inspirer du banc d'essai développé au laboratoire FEMTO-ST.

Notre maquette devra donc reproduire de manière simplifiée les mouvements relatifs entre le pion en carbon eet le disque en cuivre. Un point fondamental à respecter est la conservation d'une vitesse relative constante entre ces deux éléments.. Afin de garantir cette constance, une solution technique consiste à asservir les moteurs : l'un entraînant la rotation du disque, l'autre assurant la translation du pion.

En complément de cet aspect mécanique, nous envisageons également de modéliser les zones parcouries par le pion sur le disque grâce à un code Python. Ce programme s'appuiera sur la bibliothèque Pymink, dédiée à la simulation de la physique 2D, notamment en mécanique et en cinématique.

2.2) Adaptation du banc expérimental au projet et défis rencontrés

Dès la découverte du sujet, nous avons entamé une phase de réflexion sur le design de la maquette. Conformément aux recommandations, notre idée a été de reproduire les principes du banc expérimental, tout en l'adaptant aux contraintes imposées, notamment le budget que 500 euros que nous nous étions fixés ainsi que les dimensions réduites d'un modèle pédagogique. Nous avons imaginé une maquette composée ;

- D'un disque de 12cm de rayon,
- Et d'un pion en translation sur 8cm du rayon, laissant un battement de 2cm au centre et à l'extrémité du disque.

Le mouvement du pion serait assuré par un premier moteur avec une vitesse de translation de 2km/h, tandis que la rotation du disque serait confiée à un second moteur.

Pour garantir une vitesse relative constante, il nous fallait déterminer une vitesse de rotation du disque en fonction de la position du pion. En nous appuyant sur la thèse de Monsieur Théo KZYAZIK, nous avons utilisé la formule suivante pour calculer la vitesse théorique de rotation :

$$V_{rot} = (V_t \times 10^6) / (60 \times 2\pi R)$$

Où:

- V_t est la vitesse de rotation (en mm/min)
- R est le rayon parcouru par le pion (en mm)

Ainsi, nous obtenons les résultats suivants :

- A l'extrémité du disque (80mm) :

$$V_{rot,ext} = (2.1 \times 10^6) / (60 \times 2\pi \times 80) = 66,31 \text{ tr/min}$$

- Près du centre du disque (20mm) :

$$V_{rot,int} = (2.1 \times 10^6) / (60 \times 2\pi \times 20) = 265,258 \text{ tr/min}$$

Ces résultats mettent en évidence un point crucial : plus le pion s'approche du centre de disque, plus la vitesse de rotation de celui-ci doit augmenter pour conserver une vitesse tangentielle constante. Cela signifie que sans asservissement des moteurs, la vitesse relative ne resterait pas constante, ce qui fausserait l'interprétation des phénomènes d'usure .

Suite à nos interrogations sur la conservation d'une vitesse relative constante entre le pion et le disque, nous avons sollicité l'avis de Monsieur Bédu, enseignant en électronique et en automatique. Celui-ci nous a conseillé d'intégrer à notre système une boucle de régulation basée sur un microcontrôleur, associé à un encodeur de position. L'objectif de cette solution serait d'ajuster dynamiquement la vitesse de rotation du disque en fonction de la position du pion, garantissant ainsi la constance de la vitesse tangentielle. L'utilisation d'une carte Arduino, combinée à ces composants, permettrait également de corriger automatiquement les écarts de vitesse observés, en mettant en oeuvre un asservissement en temps réel.

Une fois cette approche clarifiée, notre attention s'est portée sur la problématique du déplacement linéaire du pion. Après plusieurs échanges au sein du groupe, nous avons envisagé un système mécanique de bielle-manivelle, capable de générer un mouvement de translation régulier. Afin d'assurer, un guidage rectiligne précis, nous avons également imaginé la mise en place de rails fixes positionnés sur le disque, qui contraindraient la trajectoire du pion dans une direction rectiligne.

Ce semestre d'automne s'est ainsi conclu par l'élaboration de premières esquisses de conception de la maquette, alliant réflexion mécanique et début de réflexion sur l'aspect électronique. Toutefois, il est vite apparu que notre principal défi résiderait dans la mise en oeuvre de l'asservissement des moteurs. Aucun membre du groupe n'ayant encore expérimenté le pilotage de moteurs avec un microcontrôleur ni travaillé avec des kits Arduino, ce point a soulevé des incertitudes quant à notre capacité à concrétiser cette partie du projet à court terme. Cela a eu pour conséquence un retard dans notre avancement global, a fortiori sur notre avancement du second semestre.

2.3) Début des travaux du semestre de printemps

Le semestre de printemps a débuté par une seconde visite au laboratoire FEMTO-ST, au cours de laquelle nous avons pu observer le banc d'essai en fonctionnement, sous la supervision de notre encadrant Monsieur Philippe BAUCOUR et du doctorant Oreen OUMER. Cette démonstration s'est révélée particulièrement riche d'enseignements : elle nous a permis de mieux prendre conscience de la complexité technique du dispositif réel, et de mesurer le travail considérable nécessaire à sa conception et sa mise en oeuvre.

Cette visite a également été l'occasion d'un échange approfondi avec Monsieur Baucour au sujet de nos dernières avancées et des idées que nous avons en tête pour la conception de notre maquette. Etant donné les contraintes organisationnelles et le fait que nous étions déjà à la mi-février, il nous a été recommandé de simplifier notre conception en repartant directement du principe même du banc d'essai FEMTO-ST, et en abandonnant le système bielle-manivelle initialement envisagé pour la translation du pion, jugé trop imprécis pour notre objectif.

A la place, il a été proposé de recourir à un système à courroie, plus fiable et plus simple à mettre en oeuvre, où le pion serait maintenu par une pièce conçue en impression 3D.

Afin de concrétiser cette nouvelle orientation, nous avons organisé plusieurs réunions avec notre second encadrant, Monsieur Verna, enseignant en mécanique. Ces échanges nous ont permis de mieux cadrer la conception mécanique de la maquette. Après avoir établi une liste des composants nécessaires, nous l'avons transmises à nos encadrants. Il s'est avéré que Monsieur Verna disposait déjà d'une partie du matériel demandé, ce qui nous a permis d'éviter certaines commandes.

Cependant, dans un souci de simplification et afin d'éviter de surcharger la maquette, Monsieur Verna nous a proposés une alternative plus efficace : utiliser des moteurs pas à pas, déjà disponibles dans les salles de TP. Ces moteurs présentent l'avantage de permettre un contrôle précis de la position du pion sans nécessiter de capteurs de positions externes, cette dernière étant connue en fonction du nombre de pas effectués.

2.4) Travaux à réaliser pendant les congés

A l'approche des congés de Pâques, nous avons tenu une dernière réunion avec nos encadrants pour faire le point sur les tâches à réaliser pendant cette période. Plusieurs objectifs nous ont été confiés :

- Etablir une liste détaillée des dernières pièces à commander sur le site du fournisseur RadioSpares pour compléter la maquette.
- Réaliser un prototype de programme Arduino permettant de faire varier la vitesse du moteur pas à pas, notamment celui destiné à entraîner le disque. Le code devrait être conçu en langage Arduino et devrait permettre de contrôler la vitesse via des signaux numériques, c'est-à-dire en fonction du nombre de 0 et 1 renvoyés en sortie.

N'ayant jamais programmé de carte Arduino auparavant, nous avons été orientés vers des ressources en ligne, telles que le site Clockwise, pour apprendre à :

- Faire tourner les moteurs pas à pas (disque et pion) à des vitesses données.
- Faire varier le sens de rotation et simuler des phases de décélération.
- Ajouter à la carte Arduino une extension, un shield, pour augmenter le nombre de ports de sortie disponibles et permettre la connexion simultanée de plusieurs composants, ici plusieurs moteurs.

A notre retour des vacances de Pâques, nous avons découvert la structure de la maquette, réalisée en grande partie par notre encadrant Monsieur Verna. Cette reprise a également été l'occasion de lui présenter notre travail personnel effectué durant les congés, notamment les premiers essais de programmation sur carte Arduino.

Nous avons ainsi pu tester nos codes directement sur la carte, et vérifier le bon fonctionnement du moteur pas à pas que nous avait prêtés Monsieur Verna. Deux programmes ont été élaborés, que vous retrouverez en annexe.

Ces essais nous ont permis de valider la communication entre la carte Arduino et les moteurs. Une comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux sera proposée plus loin dans le rapport.

Une fois les dimensions du disque ajustée à la structure existante (6,15cm de rayon parcourus par le pion, 1,35cm de battement à l'intérieur et 3cm de battement à l'extérieur soit 10,5cm de rayon), nous avons procédé à la commande des éléments restants nécessaires à l'assemblage final de la maquette. Cela comprenait :

- Les composantes électroniques complémentaires,
- Un revêtement en ardoise à poser sur le disque,
- Ainsi que des feutres pour ardoise servant de pions traceurs simulant le contact avec la caténaire.

La liste complète des composants commandés ainsi que les programmes Arduino figurent en annexe du présent rapport.

2.5) Conception mécanique de la maquette et résultats obtenus

En parallèle, nous avons entrepris la conception d'une pièce. En impression 3D destinée à supporter le feutre-pion sur le disque. A cette fin, nous avons réalisé des schémas annotés, permettant de définir précisément les dimensions et la géométrie de la pièce. Celle-ci a ensuite été fabriquée par Monsieur Verna à l'aide d'une imprimante 3D. Le schéma de cette pièce légendée sera également disponible en annexe de ce présent rapport.

Une fois les moteurs pas à pas réceptionnés, nous avons pu les fixer sur la maquette avec l'aide de Monsieur Verna. Le moteur dédié à la rotation du disque a été relié à son support via un système de courroie, assurant une transmission mécanique stable et conforme au fonctionnement prévu.

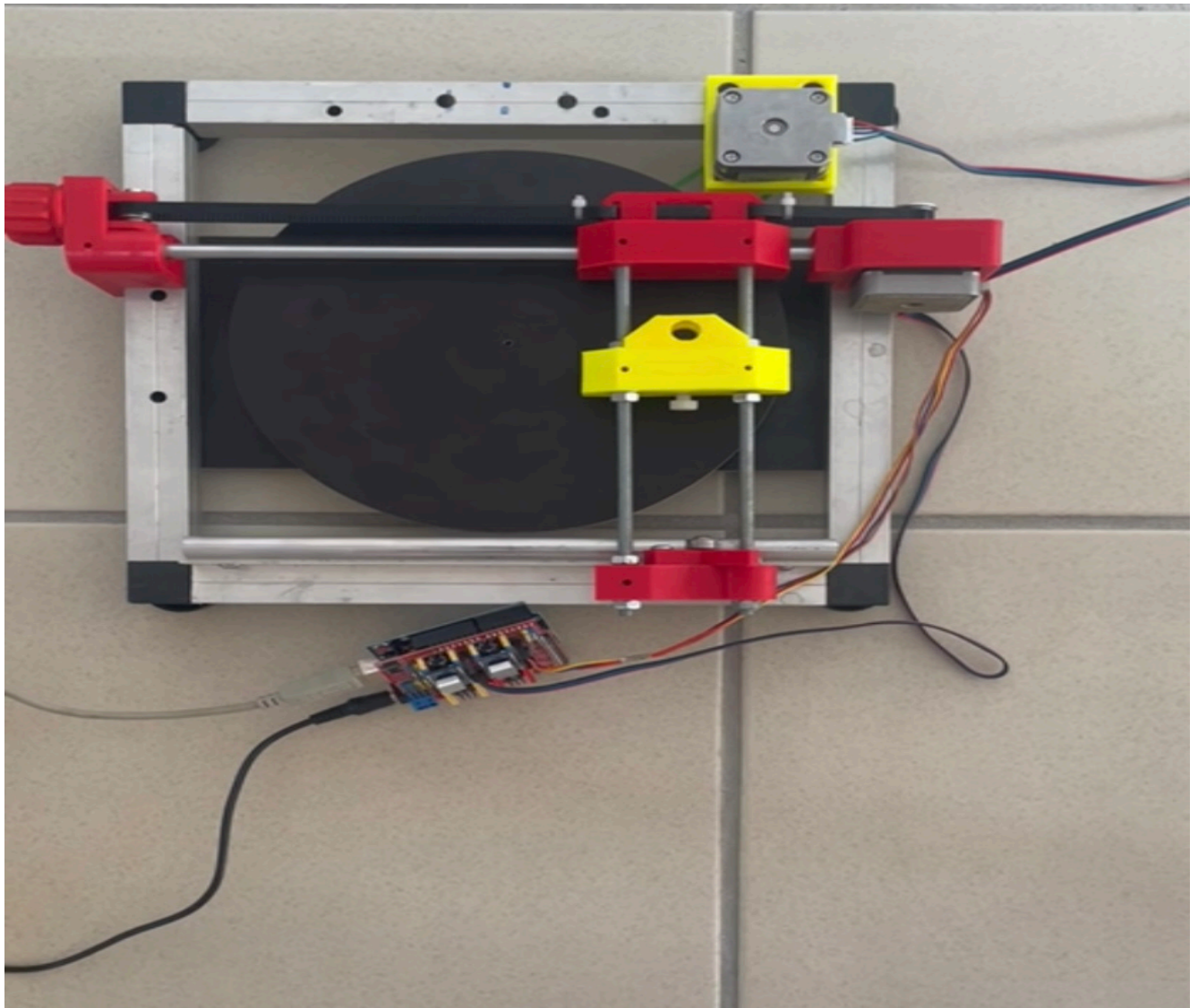


FIGURE 1.4 - Maquette finalisée avec moteurs pour disque et pion.

Afin de disposer d'un nombre suffisant de ports de sortie pour connecter l'ensemble des composants électroniques de notre maquette, nous avons ajouté à la carte Arduino une extension, un shield. Cet accessoire permet d'augmenter la capacité d'interfaçage tout en conservant une architecture simple.

A notre retour des vacances de printemps, il ne nous restait plus que trois semaines environ pour finaliser une version présentable de la maquette en vue du Festival scientifique INOUIH, où nous devons introduire les travaux du laboratoire du FEMTO-ST. Face à cette contrainte de temps, et après discussion avec Monsieur Baucour, nous avons décidé de renoncer à la conception du code Python, destiné à visualiser les zones parcourues par le pion sur le disque.

En remplacement de cette visualisation numérique, nous avons mis en place une solution matérielle simple : un revêtement en ardoise posé sur le disque, permettant au pion (un feutre) de laisser une trace visible de son passage. Cette alternative répondait à l'objectif pédagogique de montrer concrètement le trajet du pion.

Lors du deuxième jour du Festival INOUIH, le samedi 24 mai 2025, le revêtement en ardoise et les feutres n'étaient pas encore arrivés. Nous avons donc improvisé en utilisant une feuille blanche et du crayon, permettant tout de même de démontrer au public le fonctionnement de notre maquette, en particulier les zones réellement visitées par le pion.

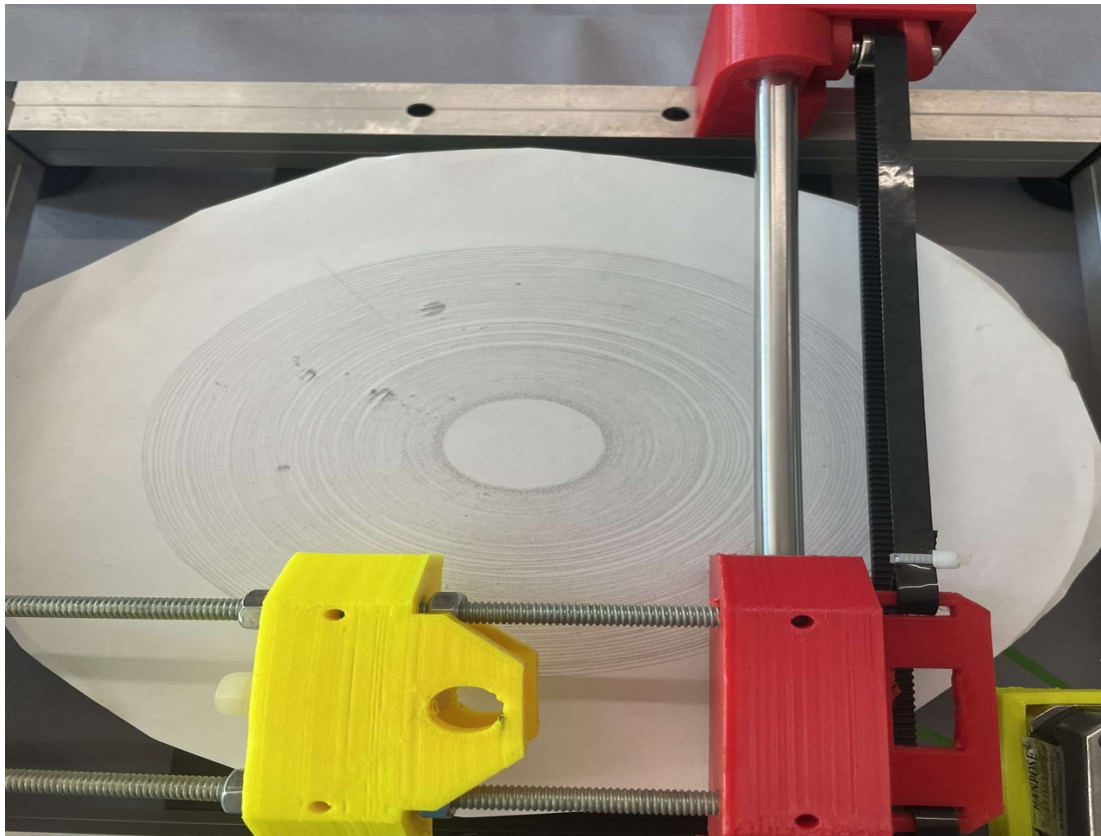


FIGURE 1.5 – Zones parcourues par le pion- ici un crayon – sur le disque.

Analyse. évaluation de la maquette

3.1) Comparaison des résultats théoriques et expérimentaux

Avec les nouvelles dimensions du disque de notre maquette, nous avons pu recalculer les vitesses de rotation théoriques en fonction de la position radiale du pion, en nous appuyant sur la relation extraite des travaux de Monsieur Théo KZYAZIK :

$$V_{rot} = (V_t \times 10E6) / (60 \times 2\pi R)$$

où:

- V_t est la vitesse de rotation (en mm/min)
- R est le rayon parcouru par le pion (en mm)

En supposant une vitesse de translation constante de 0.5tr/min, nous obtenons les vitesses théoriques suivantes :

- A l'extrémité du disque (75mm) :

$$V_{rot,ext} = (0,5E6) / (60.2. \pi.75) = 17,7 \text{ tr/min}$$

- Près du centre du disque (13,5mm) :

$$V_{rot,int} = (0,5E6) / (60.2. \pi.13,5) = 98,24 \text{ tr/min}$$

En comparaison avec les résultats obtenus lors du semestre d'automne, on observe une baisse significative des vitesses de rotation. Cette diminution s'explique principalement par une vitesse de translation du pion plus faible : 0.5 tr/min actuellement contre 2km/h précédemment. Cette adaptation a été rendue nécessaire pour respecter les nouvelles dimensions de la maquette et assurer la stabilité du mouvement.

Lors de la mise en marche de notre maquette, nous avons mesuré les vitesses de rotations réelles :

- Vitesse pratique à l'extrémité du disque : 21.4 tr/min
- Vitesse pratique près du centre du disque : 95.5 tr/min

Nous avons ensuite déterminé l'incertitude relative entre les valeurs théoriques et les mesures pratiques :

- A l'extrémité du disque (75mm) :

$$(21.4-17.7) / 21.4 = 20.9\%$$

Près du centre du disque (13 ,5mm) :

$$(98.24-95.5) / 98.24 = 2.7\%$$

3.2) Bilan concernant ces résultats

Ces résultats montrent que l'écart relatif est plus important à l'extrémité du disque, ce qui s'explique par une légère instabilité mécanique et le tangage du disque observé pendant le fonctionnement. Malgré cela, le comportement global de la maquette reste satisfaisant, et elle s'avère suffisamment fiable et pédagogique pour illustrer le principe de la liaison caténaire-pantographe auprès d'un public non spécialiste, notamment dans le cadre du Festival INOUIH.

Conclusion générale

Le projet SLICE nous a offerts l'opportunité de nous confronter à une problématique concrète : la modélisation de la liaison caténaire-pantographe, essentielle dans le domaine ferroviaire. A travers l'étude du contact électrique glissant entre un pion en carbone et un fil conducteur, nous avons pu explorer les enjeux mécaniques et électroniques liés à ce système complexe.

Notre démarche s'est organisée autour de plusieurs axes :

- Une phase de compréhension théorique et de recherches documentaires.
- La modélisation cinématique du mouvement relatif
- La conception d'une maquette pédagogique, fidèle au banc d'essai du laboratoire FEMTO-ST

Le semestre d'automne a été consacré à l'exploration du sujet, aux premières idées de conception, et à l'identification des principales contraintes, notamment liées à l'asservissement des moteurs. Cette période a été marquée par une certaine déstabilisation : nous ne savions pas vraiment comment nous organiser, ni par où commencer. Néanmoins, ce flou a, au fur et à mesure, laissé place à un travail plus structuré, porté par nos encadrants et nos propres efforts.

Le semestre de printemps a permis une avancée plus concrète, avec une conception plus aboutie, des choix techniques plus simples mais plus efficaces, et surtout une réalisation complète de la maquette, présentée lors du Festival INOUIH. Nous avons alors ressenti une véritable fierté à exposer le fruit de notre travail à un public, avec une maquette fonctionnelle, démonstrative et fidèle à l'objectif pédagogique initial.

Ce projet a été particulièrement intéressant car il nous a permis de mettre en pratique nos connaissances, souvent abordées de manière théorique en cours. A travers cette démarche, nous avons eu pour la première fois le sentiment de "faire de l'ingénierie" : concevoir, tester, corriger, améliorer etc. Toutefois, cette phase de concrétisation a aussi mis en évidence nos difficultés à articuler nos savoirs mécaniques de manière opérationnelle. L'application pratique de la mécanique s'est révélée plus laborieuse que prévu, et constitue un axe d'amélioration évident, en plus de l'organisation, pour la suite

de notre formation.

En définitive, le projet SLICE nous a apportés bien plus que des compétences techniques : il nous a permis de développer notre autonomie, notre esprit de collaboration, notre capacité d'adaptation, mais aussi notre sens de l'analyse critique. Ce fut une expérience exigeante, mais formative, motivante et valorisante, qui restera un moment marquant de notre parcours en deuxième année.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Introduction au sujet, définition des termes clés (pantographe/ caténaire)

Kziazyk T. Etude expérimentale de l'usure et de l'échauffement d'un contact glissant : application caténaire-pantographe [Thèse de doctorat en ligne]. Belfort : Université de Bourgogne Franche-Comté ; 2023 [cité le 11 janvier 2025]. Disponible sur : <https://theses.fr/2023UBFCCD043> .

- Fonctionnement général du système ferroviaire

Janssoone D. Technologie fonctionnelle du transport ferroviaire et urbain : train, métro, tramway, RER. Malakoff. Dunod ; 2021.

- Une liaison avec des enjeux industriels importants (thermiques, mécaniques et chimiques)

Jonckheere B. Caractérisation multi-physique d'une interface multi-contacts à l'arrêt et en mouvement : cas du captage de courant via l'interface caténaire-pantographe [Thèse de doctorat en ligne]. Amiens : Université de Picardie Jules Vernes, 2021 [cité le 11 janvier 2025]. Disponible sur : <https://theses.hal-science/tel-03828928v1>

- Limites de la liaison pantographe-caténaire et la possibilité de la remplacer

Pereira G, Bartholomeux P, Le Moigne Ph, Rombaut Ch, Van Berten Ph, Poli G. Transport urbain sans caténaire et nouvelles techniques de stockage [En ligne]. 2000 [cité le 11 janvier 2025]. Disponible sur: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20222891>

- Schéma d'une liaison pantographe/caténaire

Louvel P, Ezerzere P, Jourdes P, Robin F, Khimech G. 4. Systèmes embarqués ferroviaires. In : Louvel P, Ezerzere P, Jourdes P, Robin F, Khimech G. Systèmes électroniques embarqués et transports : Automobile, ferroviaire, aéronautique et espace. Malakoff : Dunod ; 2021. p.83-138.

- Intérêt d'une telle liaison d'un point de vue électrique et énergétique

Mange D. Plan rail 2050 : Plaidoyer pour la vitesse [En ligne]. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes ; 2010 [cité le 11 janvier 2025]. Disponible sur : <https://univ-scholarvox-com.scd1.univ-fcomte.fr/reader/docid/88838300/page/129?searchterm=pantographe%20caténaire>

ANNEXE

6.1) Programmes ARDUINO

```
#define STEP_Y 3
#define DIR_Y 6

#define STEP_X 2
#define DIR_X 5

const int stepsPerRevolution = 20;
const float vitesseY_RPM = 0.5; // constante
const int pasParCycle = 290;

AccelStepper moteurY(AccelStepper::DRIVER, STEP_Y, DIR_Y);
AccelStepper moteurX(AccelStepper::DRIVER, STEP_X, DIR_X);

long positionDepart = 0;
long positionCible = pasParCycle;

long dernierPasY = 0;
float vitesseX_actuelle = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  // Initialiser moteur Y
  moteurY.setMaxSpeed(convertRPMTtoStepsPerSec(vitesseY_RPM));
  moteurY.setSpeed(convertRPMTtoStepsPerSec(vitesseY_RPM));

  // Initialiser moteur X
  moteurX.setMaxSpeed(2000); // max possible
  moteurX.setSpeed(100); // valeur initiale
}

void loop() {
  // --- MOTEUR Y ---
  moteurY.runSpeed();

  if ((moteurY.currentPosition() >= positionCible && moteurY.speed() > 0) ||
      (moteurY.currentPosition() <= positionCible && moteurY.speed() < 0)) {
    moteurY.setSpeed(-moteurY.speed());
    positionDepart = moteurY.currentPosition();
    positionCible = positionDepart + (pasParCycle * (moteurY.speed() > 0 ? 1 : -1));

    Serial.print("Direction Y inversée. Nouvelle cible : ");
    Serial.println(positionCible);
  }

  // --- MOTEUR X ---
  moteurX.runSpeed();

  long positionY = abs(moteurY.currentPosition());

  if (abs(positionY - dernierPasY) >= 5) {
    float rayon = mapPasToRayonSymetrique(positionY); // en cm
    float vitesseX = (vitesseY_RPM * 1e6) / (60.0 * 2 * PI * rayon);

    // Imposer une vitesse minimale
    if (vitesseX < 10) vitesseX = 10;
    if (vitesseX > 2000) vitesseX = 2000;
  }
}
```

```

// N'appliquer la nouvelle vitesse que si elle change vraiment
if (abs(vitesseX - vitesseX_actuelle) > 5) {
    moteurX.setSpeed(vitesseX);
    vitesseX_actuelle = vitesseX;

    Serial.print("Y pos: ");
    Serial.print(positionY);
    Serial.print(" | Rayon: ");
    Serial.print(rayon);
    Serial.print(" cm | VitesseX: ");
    Serial.println(vitesseX);
}

dernierPasY = positionY;

Conversion tr/min → pas/sec
int convertirRPMToStepsPerSec(float rpm) {
    return (rpm * stepsPerRevolution) / 60.0;

Correction : commence à 7.5 cm et va vers 1.35 cm
int mapPasToRayonSymetrique(long pas) {
    float rayonMax = 7.5;
    float rayonMin = 1.35;
    long cycle = pas % (2 * pasParCycle);
    float phase = (cycle < pasParCycle) ? (float)(pasParCycle - cycle) / pasParCycle
    : (float)(cycle - pasParCycle) / pasParCycle;
    return rayonMin + (rayonMax - rayonMin) * phase;
}

```

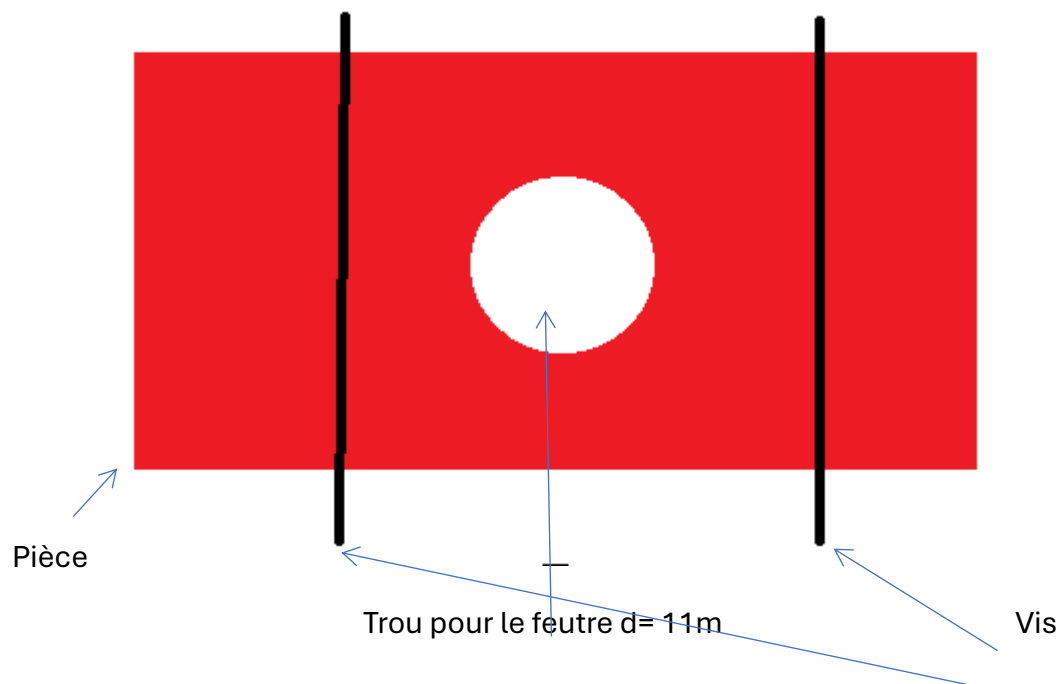
6.2) LISTE DU MATERIEL A COMMANDER :

Désignation	Lien d'achat	Prix (€)
Shield CNC pour Uno ARD-CNC-K1	Lien	18.8
Carte de développement MikroBUS A9488	Lien	24.92
2 moteurs (disque et pion) pas à pas de balayage radial NEMA 17	Lien	93.64
Support moteur pas à pas NEMA 17	Lien	5.5
BIC Velleda Rouleau Adhésif Effaçable à Sec 45x50 cm	Lien	9.96
BIC Velleda Liquid Ink Feutres Premium pour Tableau Blanc Effaçables à Sec Avec Pointe Conique Medium	Lien	14.94
Courroie synchrone RS PRO 5M Caoutchouc, Long 330mm Largeur 9mm, 66 dents	Lien	5.02
Pack de feutres blancs pour ardoise	Lien	10.79
Colle forte (5 unités)	Lien	33.2
Ruban adhésif	Lien	16.46

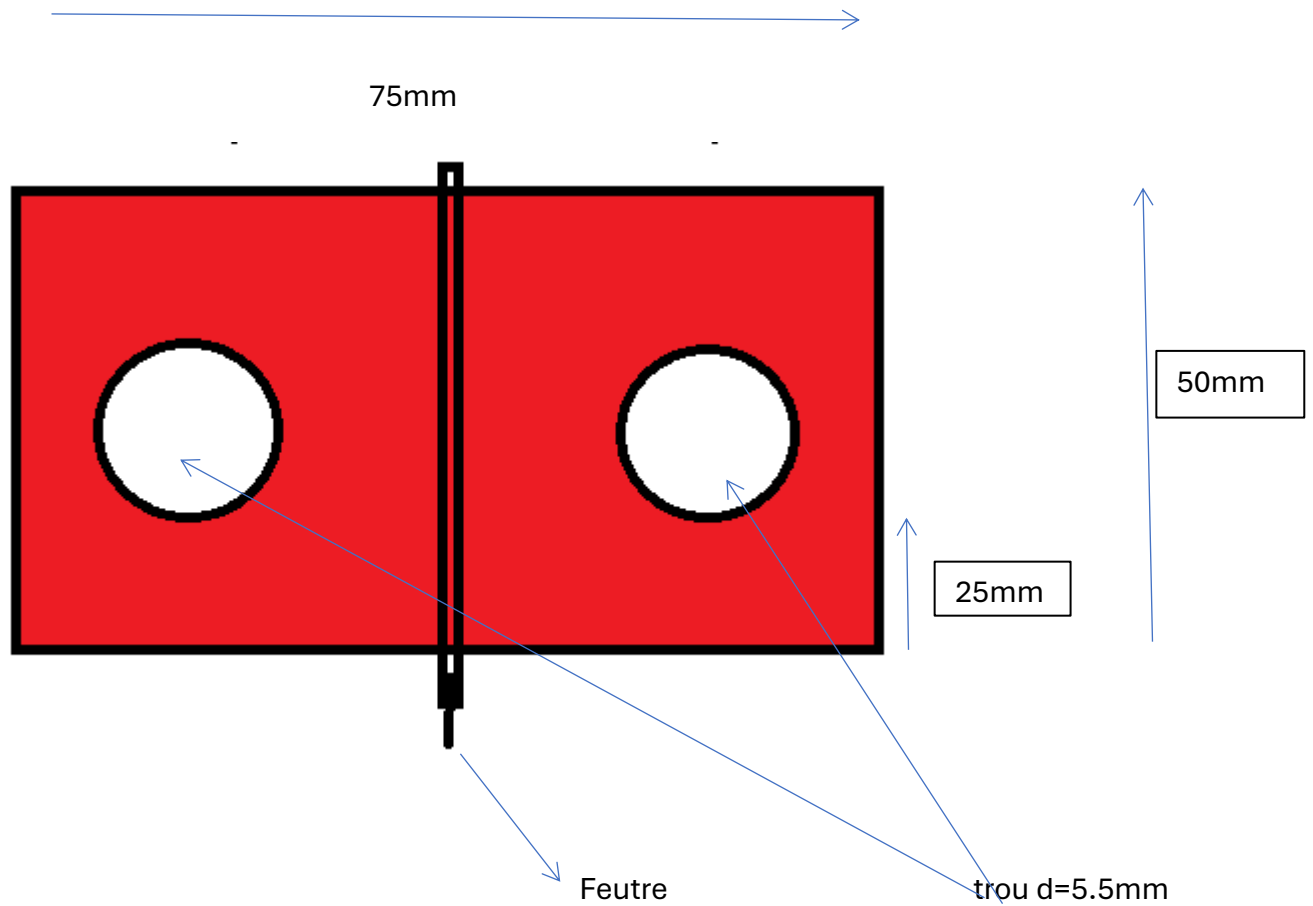
6.3) Dessins de la pièce supportant le pion

Pièce vue du dessus :

Les deux barres noires sur le schéma sont les vis, le trou blanc traverse toute la pièce et servira à y mettre le feutre le diamètre du rond blanc sera de 11mm.

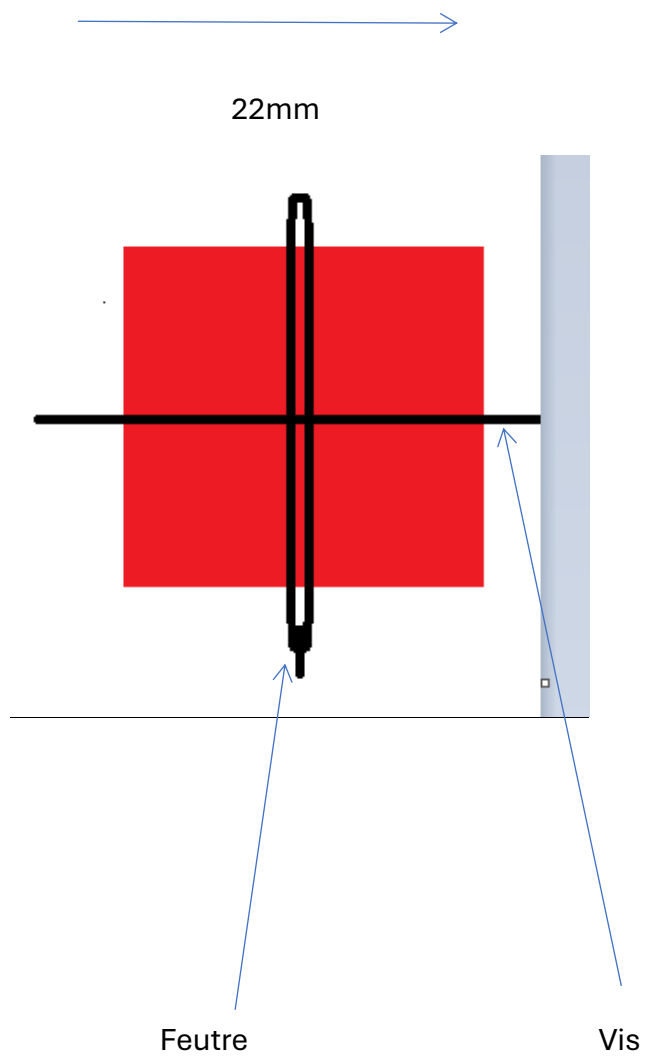


Pièce vue du face :



Les centres des trous des vis de 5.5mm de diamètre sont éloignés du bord de la pièce de 16mm. L'écart entre les deux vis est donc de 38mm.

Pièce vue de côté :



L'autre option possible est de faire une fente dans le trou du feutre pour y mettre une vis pour faire en sorte de bloquer le feutre.