

# Concevoir un lanceur de fusée par énergie cinétique : SpinLaunch à l'échelle lycéenne



Projet réalisé par des élèves :



## Présentation de l'équipe

# ÉLÈVES DU LFI SAMUEL BECKETT (DUBLIN)

Participant dans le projet



Loïc  
Moche



Adriana  
Álvarez



Arthur  
Healy



Polina  
Kolesnikova



Albane  
Spinnewyn



Yaroslav  
Valigny

---

## ENCADRANTS DU PROJET



Mme. Van  
Wormhoudt



M. Marcelin

# Sommaire

1. Introduction
2. Problématique
3. Aperçu du projet

## **Partie 1 — Démarche scientifique**

1. Méthode d'ingénieur
2. Justification des deux versions
3. Dimensionnement des composants partagés

## **Partie 2 — Lanceur rotatif L1**

1. Dimensionnement L1
2. Réalisation
3. Tests et résultats
4. Conclusion et limites du L1

## **Partie 3 — Du L1 au L2 : le problème central**

1. Une observation qui change tout
2. Pourquoi ce problème existe
3. La solution : le largage différentiel
4. Simulation et itérations
5. Premier mécanisme conçu : une impasse
6. Le mécanisme retenu

## **Partie 3 — Lanceur rotatif L2**

1. Objectif du L2
2. Réalisation (bras, structure, axe, capteurs, électronique...)
3. Tests et résultats

Conclusion et perspectives

Remerciement

## **Lien vers notre vidéo:**

<https://www.youtube.com/watch?v=qpl4foSJNIY>

# 1. Introduction

## 1.1 Contexte et inspiration

Depuis les débuts de la conquête spatiale, la mise en orbite de charges utiles repose quasi exclusivement sur la propulsion chimique. Si cette technologie a fait ses preuves, elle présente des limitations importantes : coût élevé, complexité logistique, et impact environnemental lié à la combustion de dizaines de tonnes de propergol à chaque lancement. Face à ces contraintes, certaines entreprises cherchent aujourd'hui des alternatives radicalement différentes.

C'est dans ce contexte qu'a émergé le concept de lanceur cinétique rotatif, popularisé par la start-up américaine SpinLaunch. Le principe est mécaniquement élégant : plutôt que de brûler du carburant, on accumule progressivement de l'énergie cinétique dans un bras rotatif motorisé, puis on libère la fusée au moment précis où elle atteint la vitesse souhaitée. L'énergie de rotation est convertie en énergie de translation — sans carburant au lancement.

Notre projet s'inscrit directement dans cette démarche : concevoir, simuler et réaliser un prototype miniature de lanceur cinétique rotatif, en nous confrontant aux mêmes défis physiques et d'ingénierie que les équipes professionnelles, à notre échelle.

## 1.2 Évolution de la problématique

Lors de l'inscription au concours, la question directrice du projet était la suivante : Comment le principe d'inertie centrifuge peut-il être utilisé pour propulser des fusées, et un tel système est-il viable à grande échelle ?

Dès les premières simulations, il est apparu que cette question cachait un problème bien plus fondamental. Calculer l'apogée théorique d'une fusée lancée par un bras rotatif est une application directe de la mécanique classique. En revanche, la phase de largage — le moment précis où la fusée quitte le bras — s'est révélée être le vrai problème, à la fois physique et mécanique.

Deux constats ont orienté ce changement de direction. D'abord, la direction de vol au moment du largage dépend de façon critique de l'angle et de l'instant de relâche : quelques degrés d'écart suffisent à dévier significativement la trajectoire. Ensuite, une fusée solidaire du bras hérite de sa rotation au moment du largage, ce qui compromet sa stabilité en vol. Ces deux problèmes sont liés et ne peuvent pas être résolus indépendamment.

La problématique a donc naturellement évolué vers : comment concevoir un système de largage fiable permettant de convertir l'énergie cinétique d'un bras rotatif en une trajectoire de vol verticale et stable ?

Ce n'est pas un abandon de l'ambition initiale — c'est précisément le problème que SpinLaunch a dû résoudre pour rendre son concept opérationnel.

## 1.3 Objectifs du projet

Le projet poursuit trois objectifs concrets et vérifiables.

Le premier est la **maîtrise de la rotation** : motoriser un bras rotatif, mesurer sa vitesse avec précision, et la contrôler électroniquement.

Le second est la **conception du système de largage** : développer un mécanisme capable de libérer la fusée à l'instant et à l'angle requis, malgré les contraintes imposées par la force centrifuge et les temps de réponse mécanique.

Le troisième est la **validation expérimentale** : tester les prototypes, mesurer les performances réelles, et les confronter aux prédictions des simulations.

Aucune contrainte de hauteur n'a été imposée. Le critère de succès est expérimental : une fusée propulsée verticalement de manière reproductible constitue une validation du concept.

## 2. Problématique

### 2.1 La question centrale

Lancer un projectile avec un bras rotatif est mécaniquement simple. Le vrai défi n'est pas d'accumuler l'énergie — un moteur suffit — mais de la restituer correctement. La question centrale du projet est donc :

**Comment concevoir et valider un système de largage permettant de convertir l'énergie cinétique d'un bras rotatif en une trajectoire de vol verticale et stable, malgré les contraintes physiques imposées par la rotation ?**

### 2.2 Pourquoi cette question est difficile

Trois phénomènes physiques rendent le largage particulièrement complexe.

Le premier est la **contrainte de direction**. La vitesse d'une masse en rotation est tangentielle à sa trajectoire circulaire à chaque instant. Pour un lancement vertical, la fusée doit être relâchée à l'unique position angulaire où cette tangente est orientée vers le haut. À 300 RPM, le bras parcourt  $1,8^\circ$  par milliseconde — la moindre imprécision de déclenchement dévie directement la trajectoire. Un Arduino, avec sa latence de 5 à 20 ms, ne peut pas garantir cette précision. Le déclenchement doit être mécanique.

Le second est la **rotation résiduelle**. Une fusée solidaire du bras tourne avec lui. Au moment du largage, elle conserve cette rotation par inertie. Libérée dans cet état, elle part en vrille — ses ailerons ne peuvent pas stabiliser un vol chaotique. Le système de largage doit neutraliser cette rotation avant ou pendant le largage.

Le troisième est la **force centrifuge**. Au bout du bras, la fusée subit des accélérations pouvant atteindre plusieurs dizaines de g. Chaque pièce du mécanisme de largage doit fonctionner de manière fiable sous cette contrainte, ce qui conditionne directement le choix des matériaux et de la géométrie.

## 2.3 Caractère innovant du projet

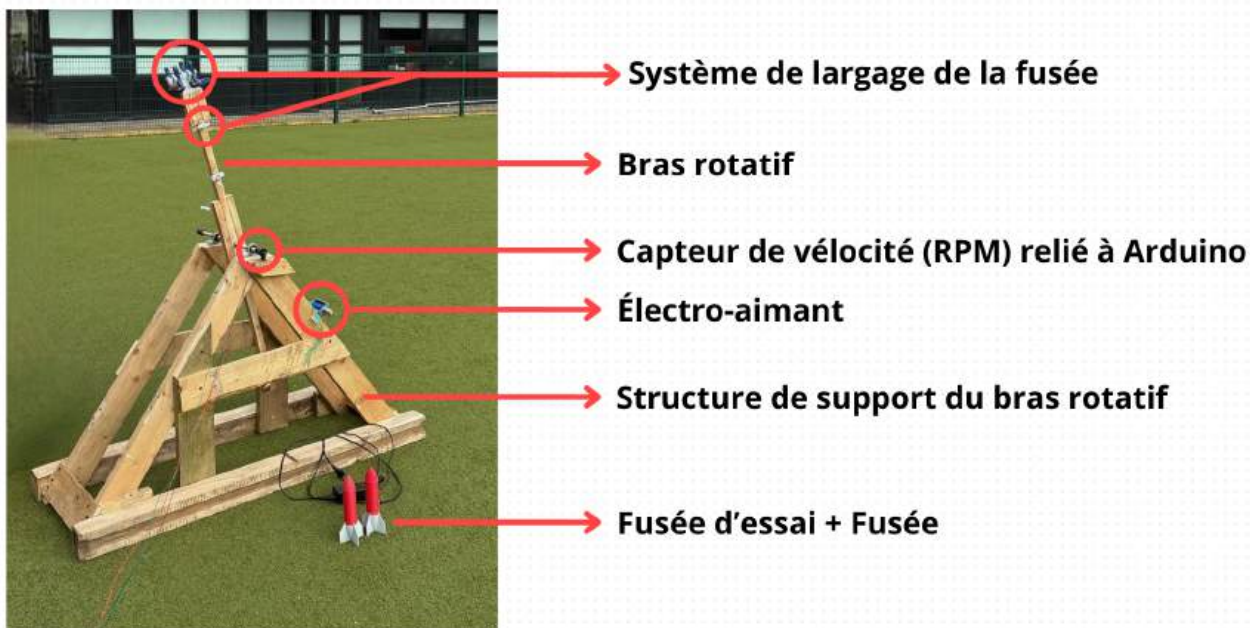
Ces trois contraintes ne sont pas indépendantes : leur résolution simultanée constitue précisément le problème d'ingénierie que SpinLaunch a dû surmonter à l'échelle industrielle. Notre projet s'attaque à ce même verrou à l'échelle d'un prototype lycéen, avec une solution entièrement originale : un mécanisme de largage purement mécanique, déclenché par contact physique, qui détermine l'angle de tir et annule la rotation résiduelle de la fusée.

## 3. Aperçu du projet

Le principe est simple : plutôt que d'utiliser un moteur-fusée pour propulser une fusée vers le haut, on accumule de l'énergie en faisant tourner un bras motorisé très rapidement, puis on libère la fusée au bon moment. Elle repart alors sur sa lancée, propulsée uniquement par l'énergie cinétique accumulée pendant la rotation — exactement comme une fronde, mais à grande vitesse et avec une précision mécanique calculée.

Le dispositif repose sur trois éléments principaux. Une structure en bois supporte un axe en acier autour duquel tourne un bras de 60 cm de rayon, entraîné par une visseuse électrique. Une fusée miniature imprimée en 3D est fixée au bout de ce bras grâce à un système de largage mécanique. Un Arduino connecté à des capteurs de vitesse mesure la rotation en temps réel et déclenche le largage au moment précis où la vitesse cible est atteinte.

*Photo légendé du lanceur L2 le jour des tests*



Le défi principal n'est pas d'accumuler l'énergie — un moteur suffit pour ça. C'est de la restituer correctement : libérer la fusée au bon angle, au bon moment, sans qu'elle parte en vrille. C'est ce problème que ce projet cherche à résoudre, à travers deux prototypes successifs et un mécanisme de largage entièrement original.

# Partie 1 – Démarche scientifique

## **1. Méthode d'ingénieur**

La conception d'un système impliquant des contraintes mécaniques et de sécurité nécessite une démarche rigoureuse. Aucun composant ne doit être laissé au hasard: chacun doit répondre à un besoin précis du système tout en respectant les contraintes physiques, techniques et économiques du projet. Afin de garantir la cohérence et la fiabilité de la conception, nous avons adopté une démarche d'ingénierie.

Cette démarche se déroule en plusieurs étapes :

### **1. Identification du besoin fonctionnel**

Chaque composant doit remplir une fonction précise au sein du système (supporter une charge, transmettre un mouvement, assurer la stabilité, stocker de l'énergie, etc.). La première étape consiste donc à définir clairement le rôle du composant dans l'architecture globale du projet.

### **2. Détermination des contraintes physiques et techniques**

À partir du fonctionnement global du système, nous déterminons les contraintes auxquelles le composant sera soumis : forces, moments, pressions, vitesses, températures ou autres sollicitations. Ces contraintes sont estimées à l'aide de calculs analytiques, de modélisations physiques ou de simulations numériques.

### **3. Dimensionnement du composant**

Les résultats obtenus permettent d'établir les caractéristiques minimales que doit posséder le composant pour fonctionner de manière fiable (résistance mécanique, capacité énergétique, dimensions minimales, puissance, etc.).

Une marge de sécurité peut être intégrée afin de tenir compte des incertitudes et des conditions réelles d'utilisation.

### **4. Définition des caractéristiques techniques recherchées**

À partir du dimensionnement, nous établissons un cahier des caractéristiques techniques nécessaires : matériaux, résistance mécanique, masse maximale, tolérances, plage de fonctionnement, compatibilité avec les autres éléments du système.

### **5. Choix de la solution technique**

Plusieurs solutions peuvent alors être envisagées pour répondre à ces exigences. Nous comparons les différentes options possibles (composants du commerce ou fabrication spécifique) en fonction de critères techniques, économiques et de faisabilité.

### **6. Mode d'acquisition du composant**

Enfin, nous déterminons la manière la plus adaptée d'obtenir le composant :

- utilisation d'un composant du commerce,
- adaptation d'un composant existant,
- ou fabrication spécifique (impression 3D, usinage, assemblage).

Cette méthodologie a été appliquée de manière systématique pour chaque élément majeur du projet. Les sections suivantes présentent son application concrète pour les différents composants des

systèmes, accompagnée de calculs, de simulations et de graphiques permettant de justifier les choix techniques réalisés.

## 2. Justification du choix de créer 2 versions:

Nous avons décidé de concevoir et réaliser un lanceur L1, ayant 3 objectifs. Le premier est de valider expérimentalement que le principe de lancement par énergie cinétique fonctionne à notre échelle et que les simulations d'apogée prédisent correctement les distances atteintes. Le second est de tester et valider le système de détection de vitesse — capteurs, code Arduino, précision des mesures — dans des conditions réelles de rotation. Le troisième est de sécuriser un résultat expérimental concret indépendamment de l'avancement du L2. Nous détaillerons rapidement cette L1.

Le cahier des charges du L1 est volontairement simplifié : aucune exigence de stabilité de vol.

Le lanceur L2 dépend des résultats obtenus avec le lanceur L1. Sa différence majeure réside dans son système de largage, qui doit permettre le largage stable d'une fusée miniature. Il doit également être de plus grande dimension pour proposer des lancements plus haut que le lanceur L1.

## 3. Dimensionnement des composants

Une décision importante a été prise dès le début : acheter les composants une seule fois, dimensionnés pour le L2 — la version la plus exigeante. Le L1 utilise exactement les mêmes composants dans des conditions moins sévères. Ils conviennent donc forcément, et on évite d'acheter deux fois.

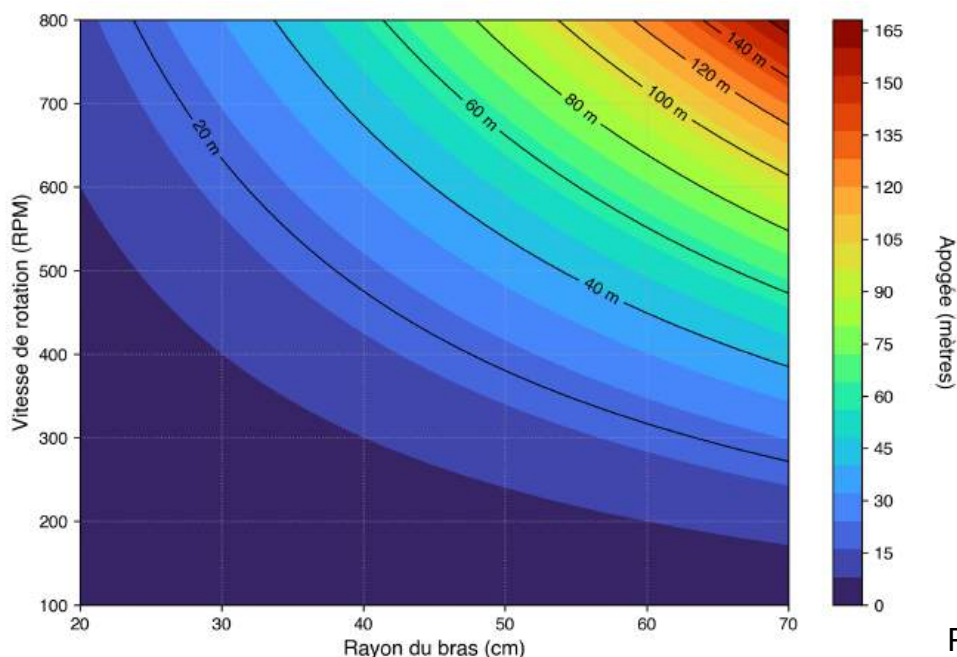
Pour chaque composant, on applique la même démarche : on calcule les contraintes au pire cas (L2, paramètres maximaux), on ajoute une marge de sécurité, et on choisit le composant en conséquence.

### Choix critique du rayon du bras L2

C'est le paramètre central : il conditionne directement les performances du lanceur et les contraintes mécaniques sur tous les composants.

Le graphique suivant montre l'apogée théorique en fonction du rayon et de la vitesse de rotation :

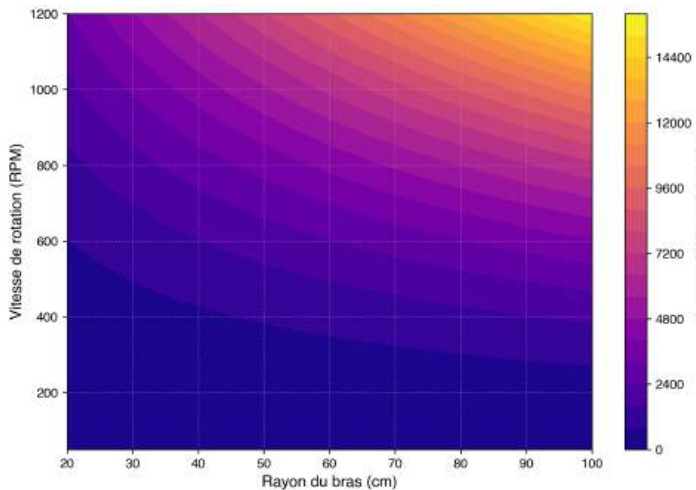
**Graphique 1.3a : Impact combiné du rayon des RPM sur l'apogée théorique (Masse fusée: 100g, Cd= 0.5)**



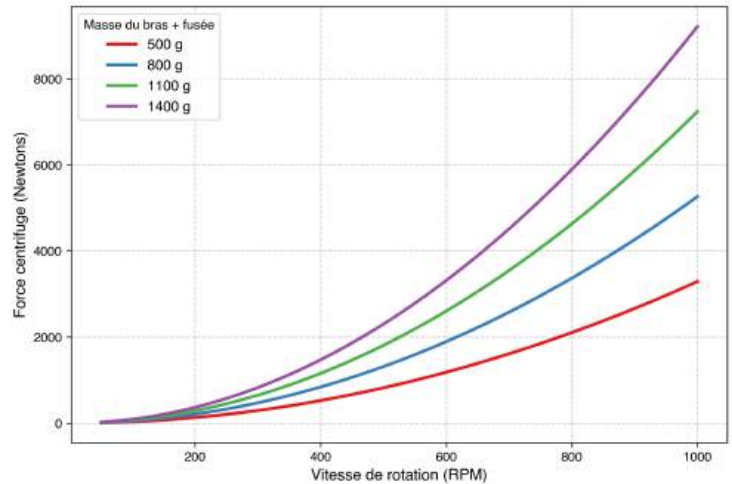
On voit clairement que l'apogée est très sensible au rayon. À 400 RPM, passer de 20 cm à 60 cm multiplie l'apogée par environ 6. Un rayon de 60 cm à 400 - 450 RPM permet théoriquement d'atteindre 20 à 30 mètres — ce qui est correct et réaliste compte tenu de nos contraintes de sécurité et de budget. Rien ne nous empêchera d'augmenter davantage la vitesse si les conditions de sécurité le permettent.

Cependant, un rayon plus grand signifie aussi des forces bien plus importantes sur le bras et l'axe. Il faut donc vérifier que les matériaux suivent. Les graphiques suivants montrent la force centrifuge exercée sur le système de largage en fonction du rayon et des RPM :

**Graphique 1.3 b : Force centrifuge sur la fusée selon le rayon du bras et les RPM (Masse fusée = 100g)**



**Graphique 1.3 c : Croissance de la force centrifuge par masse en fonction des RPM (Rayon = 60cm)**



À 500 RPM et un bras d'un rayon de 60 cm avec le poids du bras total égal à 1000g (bras+fusée+contrepois), la force centrifuge atteint environ 1500 N. Cependant nous avons décidé d'équilibrer le bras avec un contre poids pour que son centre de masse coïncide avec le centre de rotation. Ainsi la force exercée sur cette axe est très limitée.

Le choix de 60 cm offre de bonnes performances (apogée) et faisabilité mécanique. Bien que ces performances puissent sembler faibles, rappelons que l'objectif n'est pas d'atteindre une hauteur mais bien de réaliser un vol stable.

### Axe de rotation

- Besoin : transmettre la rotation et supporter la force centrifuge du bras
- Contrainte : 1500 N mais ce n'est pas la force exercée sur l'axe grâce au contre poids correctement ajusté la force s'annule pratiquement.
- Solution : tige filetée acier M12 (diamètre 12mm) → résistance > 8000 N. La résistance est largement suffisante pour tous les tests, nous avons préféré prendre une très grande marge car c'est une pièce critique il faut absolument éviter que l'axe s'use ou casse. Et il y a peu de différence de prix entre une tige fine ou une tige plus épaisse.
- Avantage de la tige filetée : le filetage permet de positionner et fixer tous les éléments par écrous, et d'ajouter des composants à n'importe quelle position sur l'axe.

### Roulements à billes

- Besoin : permettre la rotation de l'axe avec un minimum de friction
- Contrainte : force radiale max 400N, rotation continue jusqu'à 800 RPM / rayon 60 cm

- Marge : roulements validés à plus de 600 N par roulement, largement suffisant
- Solution : roulements à billes standard adaptés à l'axe M12 + support en metal pour faciliter la fixation sur le bois avec des vis.

## Motorisation

- Besoin : mettre le bras en rotation et maintenir la vitesse cible
- Contrainte : puissance mécanique requise calculée par simulation (traînée bras + projectile + frottements roulements). Il est important de noter que la puissance nécessaire est très inférieure à nos simulations car un effet de tourbillons d'air se créer avec le bras ce qui réduit la traînée apparente de celui-ci.
- À 500 RPM / 60 cm / 1000g (masse totale du bras) → environ 380W mécaniques requis
- Marge : facteur  $\times 1.3$  appliqué, rendement moteur estimé à 70% → puissance électrique requise d'environ 500W
- Solution : visseuse électrique → puissance nominale largement suffisante, disponible immédiatement, pas besoin d'un système moteur+contrôleur complexe. C'est donc une solution fiable, simple et économique. Nous avons donc acheté une visseuse de 500W, 120N.m sur batterie. Cependant l'inconvénient c'est que l'on ne peut pas contrôler la visseuse à distance avec un Arduino, des solutions peuvent être envisagées.

## Fabrication des pièces aux formes complexes (système de largage)

- Besoin : pièces légères, formes complexes, fabricables rapidement et modifiables
- Contrainte : force centrifuge au bout du bras sur le système de largage →  $\approx 100N$  à 400 RPM / 60 cm
- Tests réalisés : Nous avons testés les pièces à + de 210N pour 1cm d'épaisseur et 90% de remplissage, sans déformation visible. La résistance est validée.
- Solution : impression 3D PLA
- Limite connue : fragilité aux impacts — identifiée lors des tests L2, prise en compte dans la conception des goupilles et des ailerons. Il faut adapter les paramètres d'impression pour chaque pièce.

### Tableau récapitulatif des composants clés

Composant	Retenu	Contrainte max simulée	Capacité réelle	Marge
Rayon bras L2	60 cm	—	—	Compromis performance/sécurité
Axe	Tige fileté M12 acier	$\sim 1000$ N	$> 8000$ N	X8
Roulements	Roulements à billes M12	$\sim 500$ N par roulement	$> 1000$ N par roulement	x2
Motorisation	Visseuse électrique	380W	500W	X1.3
Pièces structurelles	PLA impression 3D	150 N	Pour l'épaisseur utilisée lors de la conception: bien plus de 300N	X2 (attention a renforcer les pièces critiques)

# Partie 2 — Lanceur L1

## 1. Dimensionnement du L1

Le L1 a un objectif simple : valider le concept fondamental. Pas de nécessité d'aller haut, juste assez pour mesurer. Est-ce qu'on arrive à lancer quelque chose avec un bras rotatif, et est-ce que nos simulations prédisent correctement ce qui se passe ?

Le graphique 1a (voir plus haut) montre qu'avec un bras de 20 cm de rayon tournant à environ 600 RPM, on peut lancer un projectile de 100g à environ 7 mètres. C'est mesurable, sécurisé, et suffisant pour valider le concept.

Les composants structurels — axe M12, roulements, visseuse... — sont les mêmes que pour le L2. Ils ont été dimensionnés pour les paramètres L2, donc ils conviennent largement pour le L1 sans aucun achat supplémentaire.

## 2. Réalisation

### Démarche de conception

Avant de construire quoi que ce soit, on a commencé par des schémas papier du système complet. Ça permet de visualiser les interactions entre les composants et d'identifier les points critiques avant de passer sur Fusion 360. Le système de largage a été identifié immédiatement comme l'élément le plus complexe — c'est lui qu'on a conçu et testé en premier avec des tests intermédiaires, avant même d'assembler le reste.

### Structure

La structure est construite en bois. Elle doit maintenir l'axe parfaitement vertical et absorber les vibrations générées par la rotation. On a utilisé des tasseaux et des planches vissés entre eux, avec un socle lesté pour garantir la stabilité à haute vitesse.

Percer un trou droit à la main dans le bois s'est avéré difficile. Les roulements n'étaient donc pas parfaitement alignés avec l'axe. Ce problème a été identifié et corrigé avec le L2 grâce à une pièce de positionnement imprimée en 3D.

### Le bras rotatif

Le bras est constitué de deux tiges filetées de 30 cm, fixées en leur centre sur l'axe M12 à l'aide d'une pièce imprimée en 3D et de deux écrous. Le système de largage est monté au bout de chaque tige, ce qui donne un rayon effectif de 20 cm de chaque côté de l'axe.

Point important : le mécanisme de largage est dupliqué des deux côtés du bras. Pour que la rotation à haute vitesse soit stable, le centre de masse du bras doit rester sur l'axe de rotation. Il y a donc deux projectiles lancés simultanément à chaque essai.

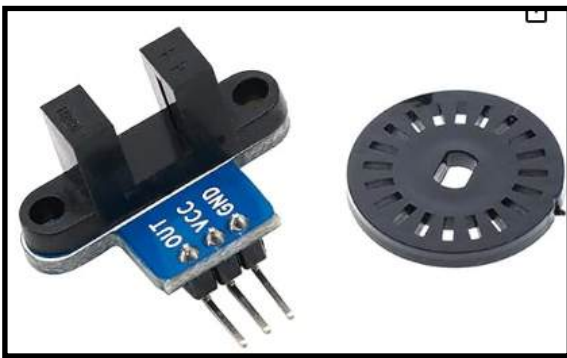
## Motorisation

La mise en rotation du bras est assurée par une visseuse électrique sur batterie, connectée à l'axe M12 via une pièce de liaison imprimée en 3D. Ce choix est justifié par la puissance disponible, largement suffisante pour nos paramètres, et par sa simplicité de mise en œuvre.

La vitesse de rotation est contrôlée manuellement par l'opérateur via le bouton de la visseuse. L'Arduino ne pilote pas la visseuse — il assure uniquement la lecture des capteurs, l'affichage de la vitesse en temps réel, et le déclenchement de la séquence de largage.

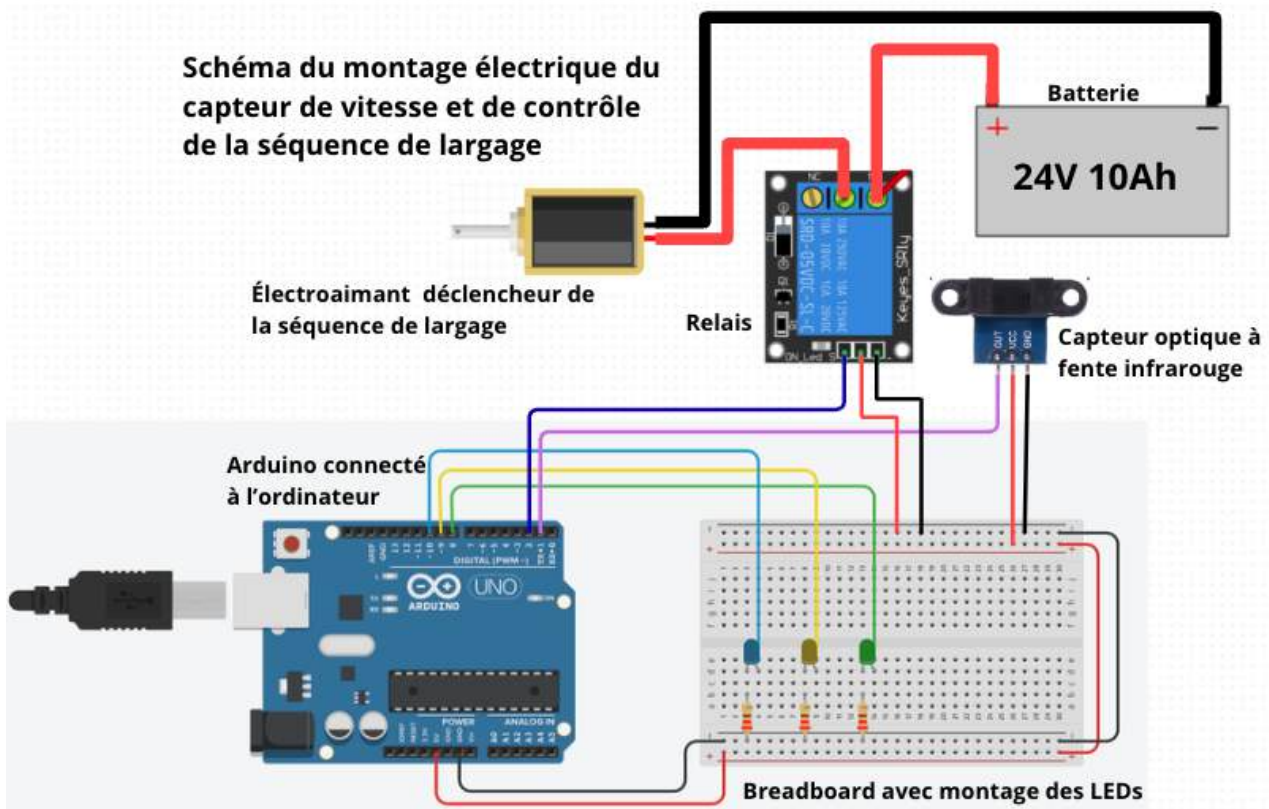
## Capteurs et électronique

Pour mesurer la vitesse de rotation, on utilise un capteur optique à fente infrarouge : un disque perforé est fixé sur l'axe, et le capteur compte le passage de chaque trou. Avec 20 trous, on obtient une précision de  $\pm 3$  RPM — suffisante pour nos besoins.



*Capteur à coupleur optique infrarouge à fente.*

Le capteur est connecté à un Arduino monté sur breadboard, alimenté par une batterie dédiée. Le code remplit trois fonctions : calculer la vitesse en temps réel, allumer des LEDs progressivement selon des paliers de vitesse définis, et déclencher la séquence de largage via un relai contrôlant l'électroaimant une fois la vitesse cible atteinte. Les données sont également transmises en direct à un ordinateur via le port série, et enregistrées par un script Python.



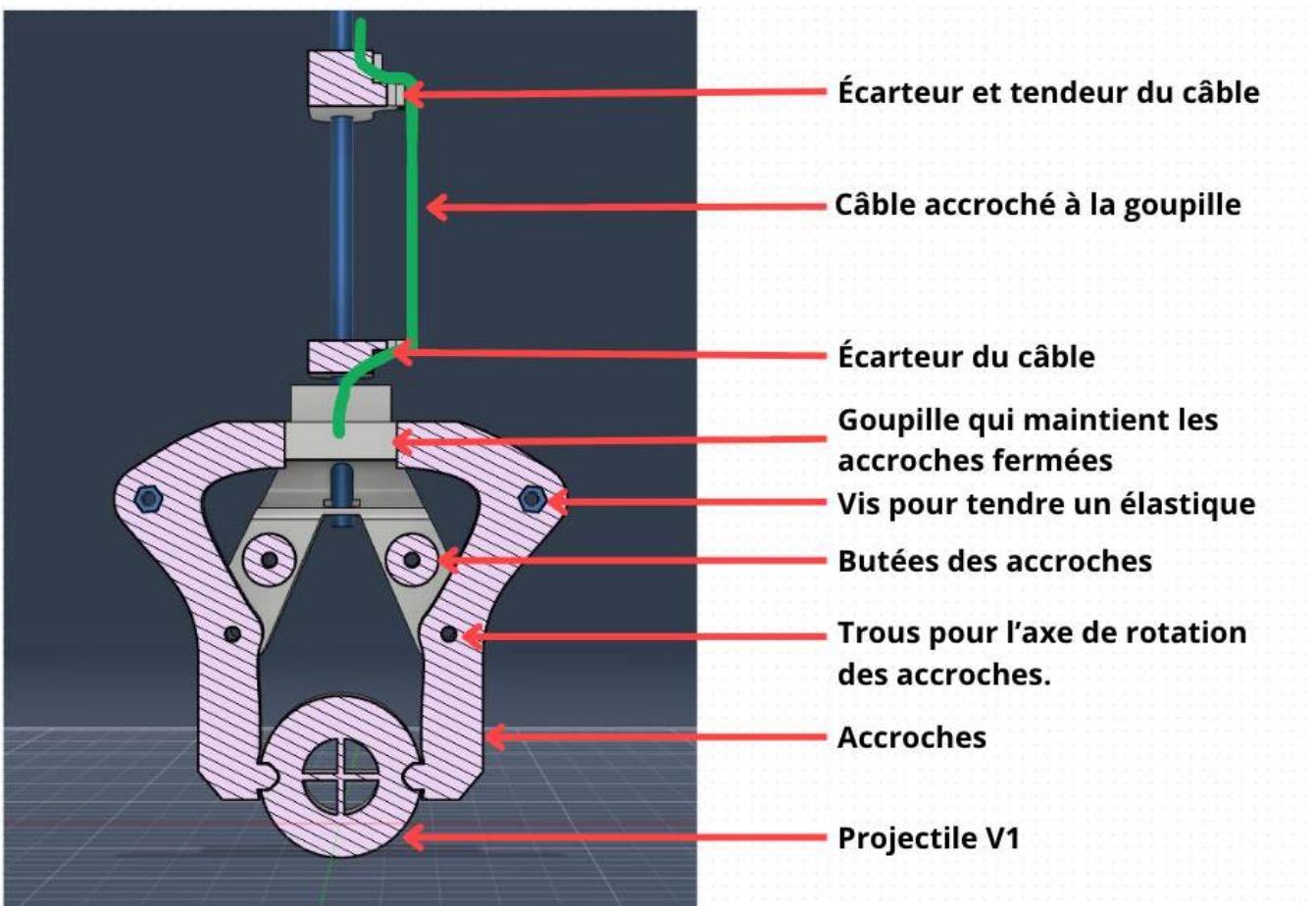
## Système de largage L1

C'est l'élément central de cette version. Avant de décrire la solution retenue, il faut comprendre pourquoi un déclenchement purement électronique ne fonctionne pas.

À 400 RPM, le bras parcourt environ  $2,4^\circ$  par milliseconde. L'Arduino a une latence incompressible de 5 à 20 ms selon les conditions — ce qui représente une erreur angulaire potentielle de  $12$  à  $48^\circ$ . C'est bien trop imprécis pour garantir une direction de vol reproductible.

La solution retenue est un déclenchement mécanique par contact physique. L'électroaimant pousse une tige fixe, légèrement déportée par rapport à la trajectoire du bras. L'astuce est la suivante : peu importe quand l'Arduino déclenche l'électroaimant, le bras doit terminer son tour avant de venir percuter la tige. Le point de contact est donc toujours au même endroit angulaire, indépendamment de la latence électronique. Ce contact tire un câble qui retire une goupille, libérant les deux pinces qui retiennent le projectile.

### *Vue de coupe du fonctionnement du mécanisme de largage L1 modélisé sur Fusion 360*



## Projectile L1

Le projectile est un disque en PLA de 3,5 cm de diamètre et 30 g. Aucune exigence de stabilité de vol pour cette version — l'objectif est uniquement de valider le mécanisme de largage et de mesurer une distance.

### 3. Tests et résultats

Une fois le lanceur assemblé, on a réalisé une série de tests progressifs pour valider le mécanisme de largage et comparer les distances obtenues aux prédictions des simulations.

Le tableau suivant récapitule les résultats :

Essai	Vitesse (RPM)	Distance mesurée	Distance simulée	Écart
1	200	1.3 m	1.6 m	+ 18,75 %
2	450	1.8 m	2.1 m	+ 14,29 %
3	700	4 m	4.5 m	+ 11,11 %

Le meilleur essai a été réalisé à 700 RPM : le projectile a parcouru 4 mètres pour une hauteur d'environ 2 mètres. Il s'agit d'un vol balistique — le L1 n'est pas conçue pour un lancement vertical. L'objectif était uniquement de valider que le mécanisme de largage fonctionne et que les simulations sont cohérentes avec la réalité. Ces simulations prennent en compte l'angle de largage et n'ont donc rien à voir avec celle de l'apogée théorique .

Concernant la qualité des prédictions on remarque que la distance simulée est légèrement supérieure à la distance mesurée. Ce qui est causé par plusieurs raisons:

- Les simulations sont codées pour simuler la distance dans le pire des cas pour garantir la sécurité : c'est mieux de prévoir un espace de tir plus grand que de risquer de percuter quelque chose avec la fusée.
- Le projectile largué n'est pas aérodynamique et il vrille dans tous les sens. Donc il perd de l'énergie en vol. Ce qui explique pourquoi les distances réelles sont inférieures aux distances simulées.

Aucun problème mécanique majeur n'a été observé. La rotation était stable, les capteurs ont fonctionné correctement, et les données ont bien été récupérées en temps réel sur l'ordinateur.

### 4. Conclusion et limites du L1

Le L1 remplit ses trois objectifs : le principe de lancement par énergie cinétique est validé, le système de détection de vitesse fonctionne, et on dispose d'un résultat expérimental concret.

Deux problèmes ont cependant été identifiés et orienteront la conception du L2 :

**Alignement des roulements.** Le perçage manuel dans le bois ne permet pas un positionnement suffisamment précis. Une pièce de centrage imprimée en 3D sera utilisée avec le L2.

**Rotation résiduelle du projectile.** Les disques lancés tournent sur eux-mêmes après le largage. Une fusée dans cet état serait instable en vol. Ce problème est directement lié à la méthode de largage — c'est le problème central que le L2 devra résoudre.

Cette dernière observation est le point de départ de la partie suivante.

# **Partie 3 – Du L1 au L2 : le problème central**

## **1. Une observation qui change tout**

Le concept L1 fonctionne, mais les tests ont révélé un problème impossible à ignorer pour le L2 : les projectiles tournent sur eux-mêmes après le largage.

Ce phénomène est négligeable pour un disque, mais critique pour une fusée ; la vrille initiale empêche les ailerons de stabiliser la trajectoire.

## **2. Pourquoi ce problème existe**

Quand la fusée est solidaire du bras, elle tourne avec lui. Au moment du largage, elle conserve cette rotation par inertie — c'est la conservation du moment cinétique. Rien ne vient l'annuler, donc elle continue à tourner après avoir quitté le bras. (Voir schéma 3a)

La direction de vol, elle, se résout en choisissant le bon angle de largage. Mais la rotation propre est un problème indépendant. Peu importe l'instant du largage, la fusée conserve toujours sa vitesse angulaire. Et l'électronique ne peut rien y faire non plus : à 250 RPM, le bras parcourt 1,5° par milliseconde, et la latence d'un Arduino est de 5 à 20 ms. La solution doit être purement mécanique.

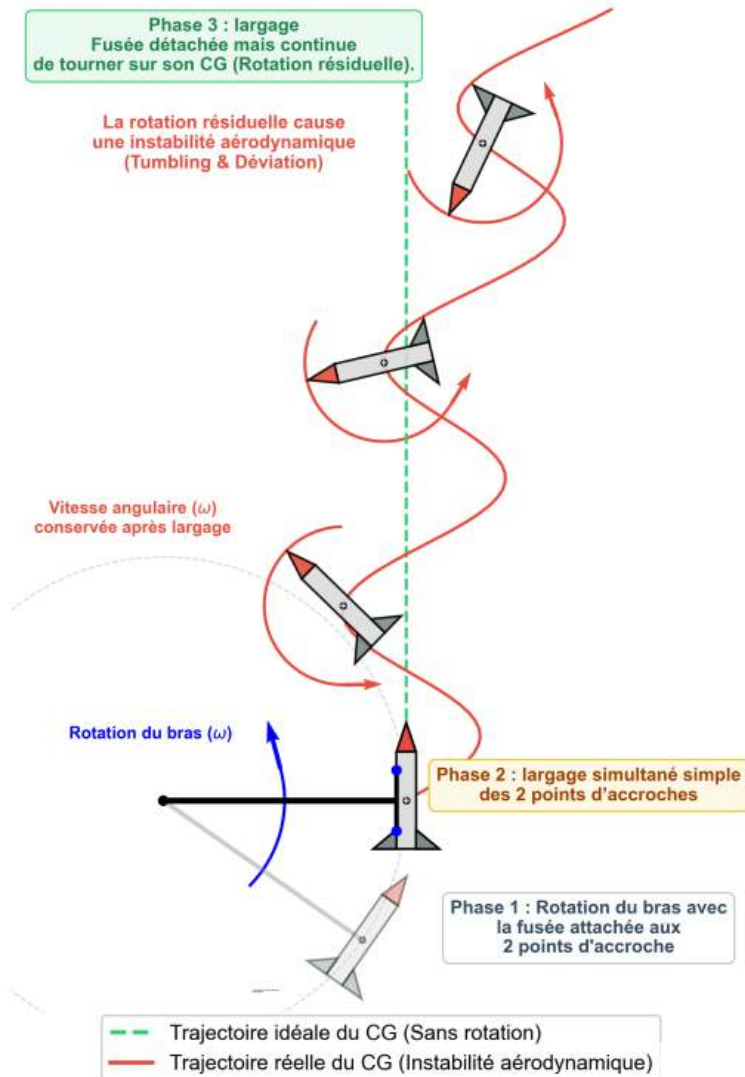
## **3. La solution : le largage différentiel**

En cherchant des ressources sur ce problème, on a trouvé une vidéo d'étudiants ayant travaillé sur un système similaire (jm\_space). On les a contactés, et ils ont eu la gentillesse de partager leur documentation scientifique sur le largage différentiel. C'est cette documentation, combinée à notre propre travail de simulation, qui nous a permis de concevoir notre solution finale.

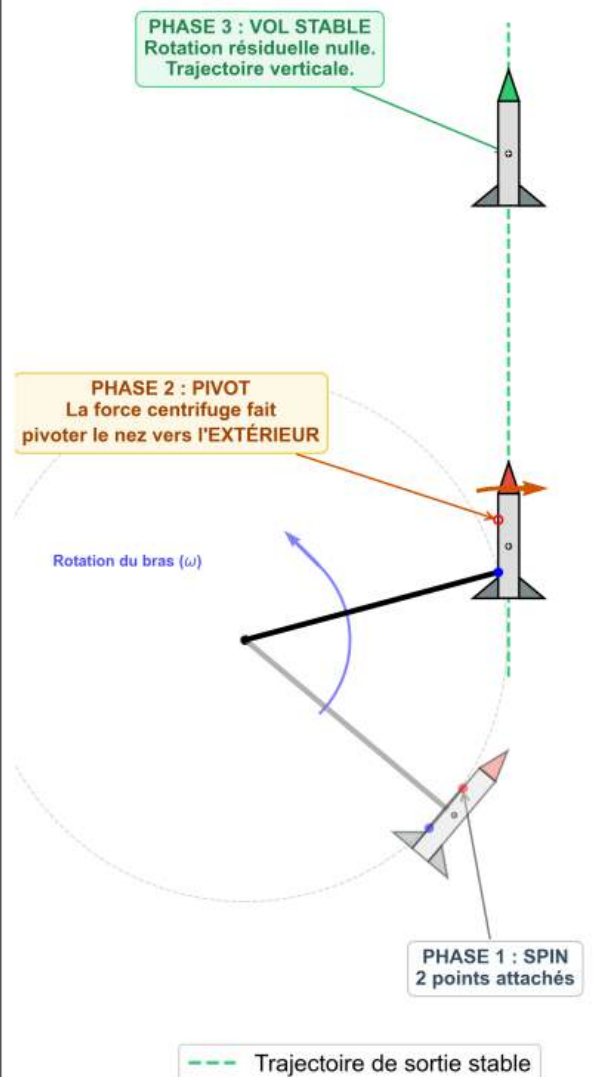
### **L'idée centrale**

Plutôt qu'un point d'attache unique, la fusée est maintenue par deux points. Le premier est libéré en premier. Le second — le point de pivot — est placé à une position précise par rapport au centre de gravité de la fusée, et libéré un peu plus tard.

Entre les deux libérations, la fusée pivote librement autour du point de pivot, entraînée par la force centrifuge elle-même. Si la géométrie est bien calculée, ce pivotement annule exactement la rotation résiduelle au moment où le second point se libère.



## Le problème de la Rotation Résiduelle (largage Rigide)



## Solution : Le largage différentiel

### Pourquoi ça fonctionne

Pendant la phase de pivot, le centre de gravité de la fusée est au-dessus du point de pivot. La force centrifuge tire le centre de gravité vers l'extérieur du bras, ce qui crée un couple qui fait tourner la fusée dans le sens opposé à la rotation du bras. C'est exactement la rotation compensatrice dont on a besoin — sans aucun actionneur.

Le paramètre clé est la distance  $d$  entre le pivot et le centre de gravité. Il existe une valeur unique qui annule parfaitement la rotation résiduelle — elle dépend de la géométrie de la fusée, de sa masse, et de la taille du bras.

## 4. Simulation et itérations

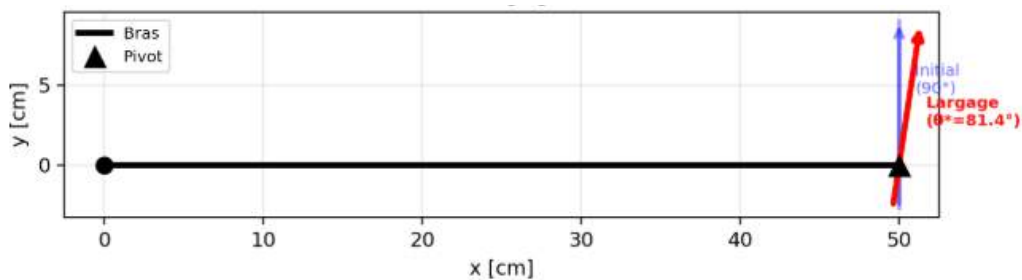
Trouver cette valeur analytiquement est très difficile. On a donc développé une simulation Python basée sur la physique du document reçu, enrichie de nos propres améliorations.

Le processus a été itératif :

1. Simulation avec une géométrie initiale → résultat
2. Le résultat est-il cohérent ? Le point de pivot est-il à une position structurellement viable sur la fusée (pas dans les ailerons, pas au nez) ?
3. Si non → ajustement de la géométrie ou du code, nouvelle simulation
4. Répétition jusqu'à convergence

Ce point est important : la simulation et la conception de la fusée sont interdépendantes. La position du pivot contraint directement la géométrie de la fusée, notamment la position de son centre de gravité. Les deux ne peuvent pas être conçus séparément.

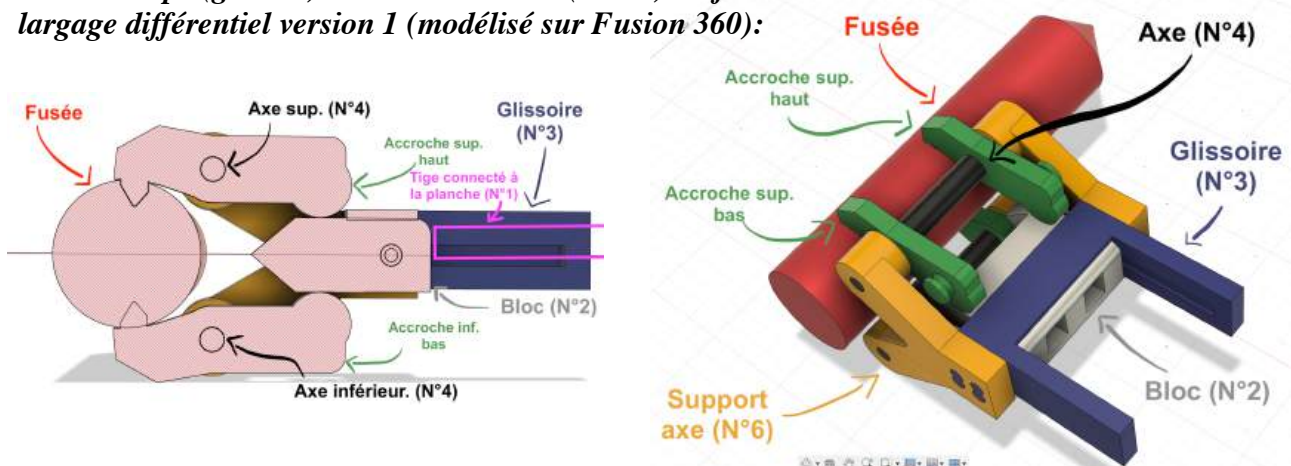
*Position initial de la fusée et position au largage dans le référentiel tournant:*



## 5. Premier mécanisme conçu : une impasse

Avant de trouver la bonne solution, on a essayé de concevoir un 1er mécanisme. L'idée était la suivante : un bloc coulissant sur des glissières, retenu par des tiges (pièce L1) et tiré par des ressorts, venait libérer quatre pinces (accroche) maintenant la fusée par deux points d'accroche. La différence de longueur entre les deux extrémités du bloc (pièce L2) permettait de régler le délai entre la libération du point haut et du point bas.

*Vue de coupe (gauche) et vue d'ensemble (droite) du fonctionnement du mécanisme de largage différentiel version 1 (modélisé sur Fusion 360):*



Bien que théoriquement viable, ce mécanisme a révélé trois défauts majeurs lors de sa mise en œuvre pratique :

- **Poids excessif et risques sécuritaires** : Sa masse trop élevée compromet directement la sécurité de l'ensemble.

- **Complexité et manque de fiabilité** : Les premiers essais ont montré une résistance excessive au déblocage due aux frottements. De plus, la multiplication du nombre de composants accroît statistiquement les risques de défaillance.
- **Dangerosité du mode d'activation** : Le système nécessite l'impact à haute vitesse d'un élément rigide contre le bras pour se déclencher, ce qui pose un problème de sécurité critique.

Nous n'avons donc pas conservé ce système. C'est une étape importante de la démarche scientifique nous avons appris et renforcé notre cahier des charges pour le prochain système.

## 6. Le mécanisme retenu

Le mécanisme final est épuré : deux goupilles, un câble, une vingtaine de pièces imprimées en PLA. Voici la séquence complète.

### Phase 1 — Spin-up

La fusée est maintenue par deux points d'accroche. Chaque accroche fonctionne comme une pince : un élastique cherche à la refermer d'un côté, mais une goupille insérée dans la pince la maintient ouverte du côté fusée. Le système tourne jusqu'à la vitesse cible.

### Phase 2 — Libération du point haut : Pivot

L'Arduino déclenche l'électroaimant. Une tige, légèrement déportée par rapport à la trajectoire du bras, est poussée dans le plan de rotation. Le bras termine son tour et vient percuter le câble tendu le long du bras — c'est le même principe qu'avec le L1, simplement déporté davantage pour éviter tout contact accidentel entre la tige et le bras. Le câble tire la goupille 1. La pince se referme d'un côté et s'ouvre de l'autre par effet de levier. Le point haut est libéré.

La fusée est maintenant libre de pivoter autour du point de pivot. Le centre de gravité étant au-dessus du pivot, la force centrifuge entraîne la fusée vers l'extérieur. Les ailerons — situés en dessous du pivot — se rapprochent de l'axe de rotation.

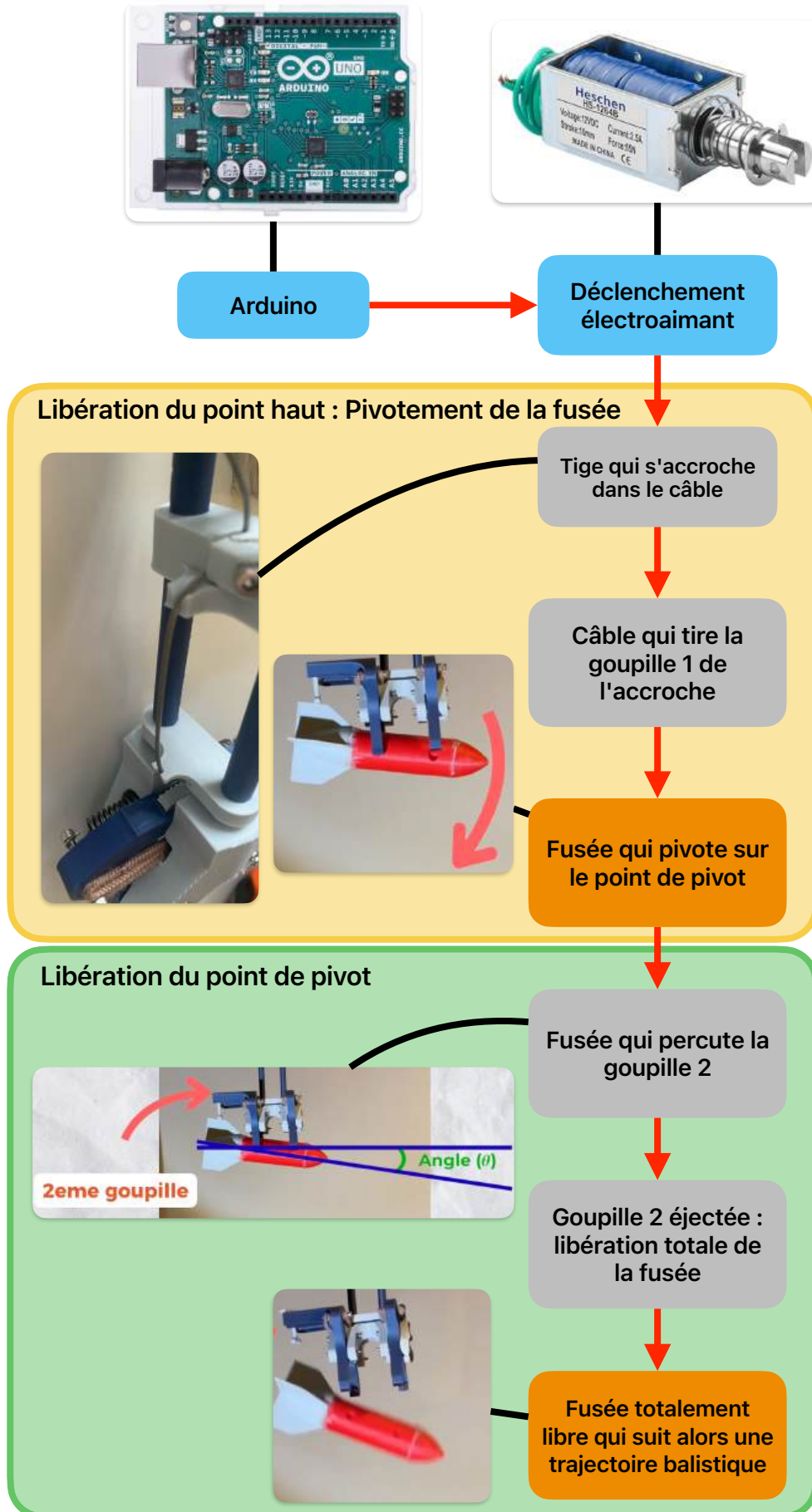
### Phase 3 — Libération du point de pivot

Quand la fusée atteint l'angle calculé par la simulation, les ailerons viennent frapper la goupille 2, fixée sur le bras.

Cette goupille a une géométrie très précise : fine pour s'éjecter rapidement, mais suffisamment large pour offrir une bonne surface de contact. Une tige la prolonge vers une petite plateforme sur laquelle l'aileron vient frapper. C'est la longueur de cette tige qui détermine l'angle de largage : plus la tige est longue, plus l'angle de rotation de la fusée avant libération est faible, et inversement. C'est ce paramètre qu'on ajuste pour correspondre à la valeur calculée par la simulation.

Au moment de l'impact, la goupille est éjectée. La pince du point de pivot se relâche. La fusée est complètement libre, sans rotation résiduelle.

*Schéma de la séquence de largage complète du déclenchement logiciel au largage de la fusée :*



# **Partie 4 – Lanceur L2**

## **1. Objectif du L2**

Le L2 est conçue pour répondre aux deux limites identifiées avec le L1 : proposer un vol stable d'une vraie fusée, et atteindre des hauteurs significativement supérieures. Les paramètres de dimensionnement découlent directement des simulations présentées dans la démarche scientifique — c'est précisément pour ces paramètres que les composants partagés ont été achetés.

À environ 500 RPM et 60 cm de rayon, l'apogée théorique est d'environ 40 mètres pour une fusée de 100g. C'est l'ordre de grandeur de performance visée pour le L2. Les contraintes mécaniques à ces paramètres ont déjà été calculées — elles sont couvertes par les composants dimensionnés en démarche scientifique.

## **2. Réalisation**

### **Structure**

La structure L2 est entièrement reconstruite, plus grande et plus stable que le L1. La leçon principale tirée du L1 est appliquée immédiatement : les roulements à billes sont cette fois positionnés à l'aide d'une pièce imprimée en 3D, qui garantit un alignement parfait de l'axe perpendiculairement au sol. Un axe légèrement incliné génère des vibrations importantes à haute vitesse — ce problème est définitivement écarté avec le L2.

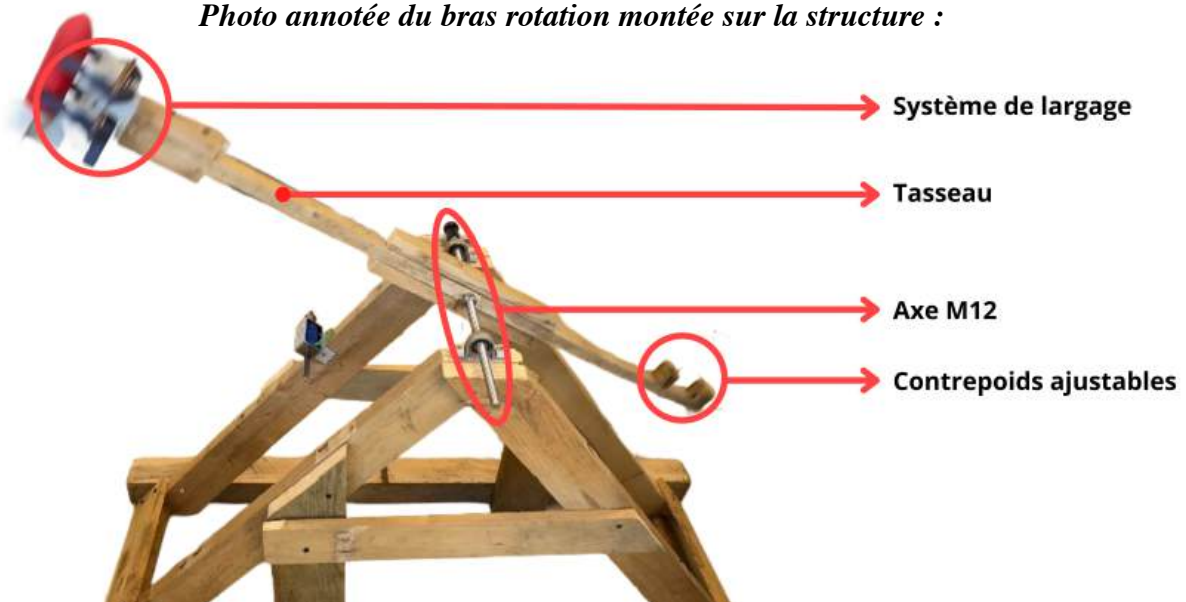
La structure est construite en bois, tasseaux et planches vissés entre eux. Le socle est lesté pour absorber les forces de rotation et garantir la stabilité pendant les essais.

### **Le bras rotatif**

Le bras L2 est un tasseau en bois de 120 cm de longueur totale, donnant un rayon de 60 cm de chaque côté. Il est fixé directement sur l'axe M12 : un trou de 12 mm a été percé au centre du tasseau, puis l'axe y est inséré et serré par deux écrous de part et d'autre. La fixation est simple, robuste, et facilement démontable.

Contrairement au L1 où le mécanisme de largage était dupliqué des deux côtés, le L2 n'a qu'un seul système de largage différentiel d'un côté du bras. L'autre côté est équipé d'un système de contrepoids : quatre masses en laiton de 100 g chacune. Les deux premières sont fixées en bout de bras, à 200 g fixes à l'extrémité. Les deux autres sont mobiles — leur position le long du bras est ajustée pour équilibrer précisément la rotation en tenant compte du poids de la fusée et du mécanisme de largage. C'est un système de réglage simple et efficace : déplacer un contrepoids vers l'extérieur du bras augmente son moment et compense l'ajout de masse côté largage.

*Photo annotée du bras rotation montée sur la structure :*



## Capteurs et électronique

Le système de capteurs est identique au L1 : capteur optique à fente infrarouge avec disque perforé à 40 trous, précision  $\pm 1,2$  RPM. L'Arduino assure la lecture en temps réel, l'affichage de la vitesse par LEDs, et le déclenchement du largage via le relais et l'électroaimant. Les données sont enregistrées en direct sur l'ordinateur via un script Python connecté sur le port série. La batterie dédiée à l'électroaimant est conservée. (Voir schéma: partie 2, section 2)

Le câble de déclenchement reprend exactement le même principe qu'avec le L1 — tige poussée par l'électroaimant, câble tendu le long du bras — mais il est davantage déporté par rapport à la surface du bras pour éliminer tout risque de contact accidentel entre la tige et le bras en rotation.

## Système de largage différentiel

C'est l'élément central du L2, décrit en détail en Partie 3. Voici son implémentation concrète sur le bras. (Voir schéma ci-dessus)

La fusée est maintenue par deux points d'accroche fonctionnant chacun comme une pince. Un élastique cherche à refermer chaque pince d'un côté, mais une goupille insérée dans le mécanisme la maintient ouverte du côté fusée.

La goupille 1, côté point haut, est déclenchée par le câble du bras au passage devant l'électroaimant — identique au système L1. La goupille 2, côté pivot, est frappée par les ailerons de la fusée quand celle-ci atteint l'angle calculé par la simulation. Sa géométrie est précisément conçue pour ça : fine pour s'éjecter rapidement, suffisamment large pour offrir une bonne surface de contact avec l'aileron. Une tige la prolonge vers une petite plateforme sur laquelle l'aileron vient frapper — c'est la longueur de cette tige qui détermine l'angle de largage. Ce paramètre correspond directement à la valeur calculée par la simulation. Dans notre cas la fusée doit pivoter de  $8,3^\circ$  soit une goupille de 3.2 cm.

## La fusée

La fusée est entièrement imprimée en PLA (Acide Polylactique). Sa conception résulte d'un processus itératif entre simulation et conception CAO — les deux contraintes suivantes devaient être satisfaites simultanément.

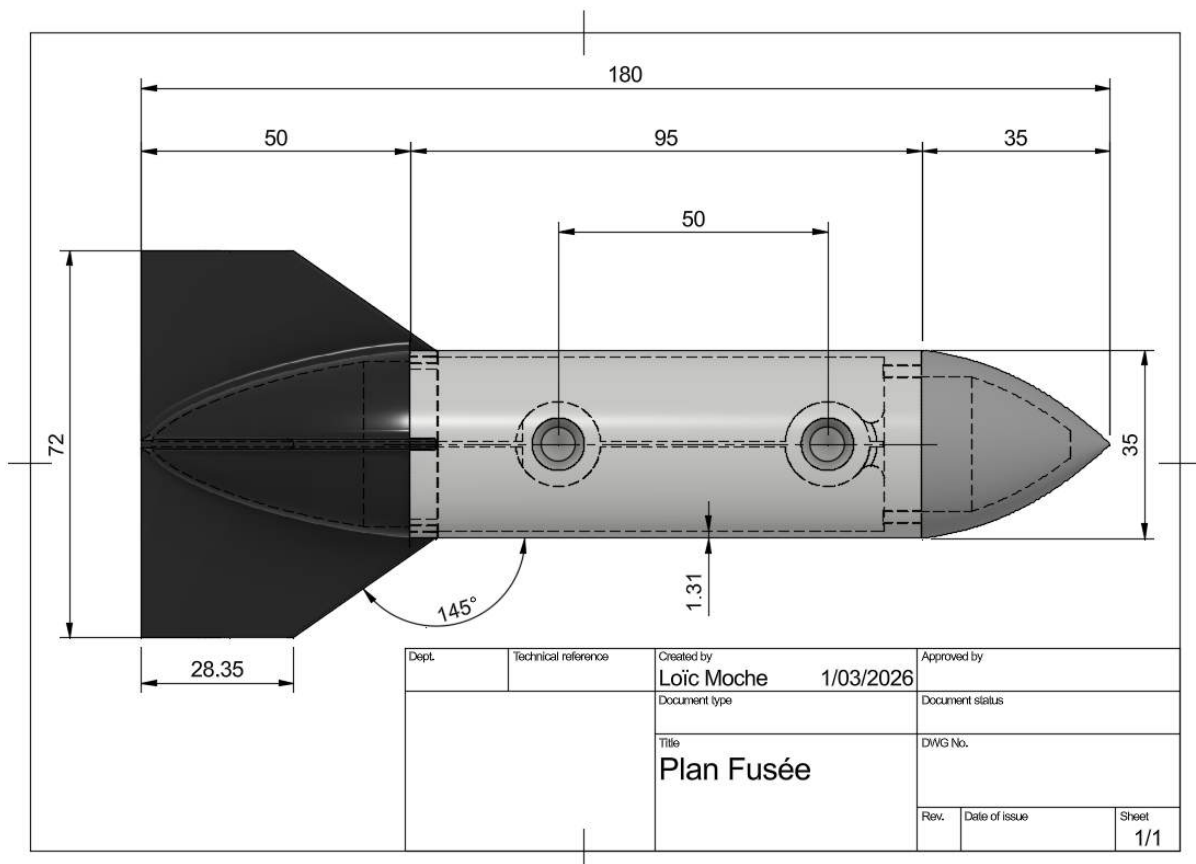
La première contrainte est la stabilité aérodynamique : le centre de gravité doit se trouver au moins 2 calibres devant le centre de pression. Les ailerons, placés le plus en arrière possible, déplacent le centre de pression vers l'arrière. Le lest, placé à l'avant, avance le centre de gravité.

La seconde contrainte est imposée par le largage différentiel : le point de pivot doit être 45 mm sous le centre de gravité, à une position structurellement solide sur le corps de la fusée — ni dans les ailerons, ni dans le nez.

Ces deux contraintes sont compatibles, et leur résolution simultanée est l'un des résultats concrets du travail de simulation.

Le lest est constitué de petits plombs fixés à la colle chaude, représentant environ 50 g soit la moitié de la masse totale. Ce poids a d'abord été déterminée par simulation, puis vérifiée par le logiciel de CAO qui calcule la position du centre de gravité en fonction de la masse ajoutée. Le résultat a ensuite été confirmé expérimentalement — la position du CG mesurée correspond bien à la valeur simulée.

### *Plan de la fusée dessinée sur le logiciel (CAD) Fusion 360*



### 3. Tests et résultats

Les tests ont été conduits progressivement, en augmentant la vitesse par paliers pour vérifier la sécurité à chaque étape. Le système de largage différentiel a été validé avant les essais de vols complets — la séquence en deux phases fonctionne de manière fiable et reproductible.

Le meilleur essai a été réalisé à environ 500 RPM : **la fusée a parcouru 16 mètres de distance horizontale et atteint environ 10 mètres de hauteur.** La rotation résiduelle était nulle — le modèle mathématique et les simulations sont validés expérimentalement. On observe que la fusée ne part pas parfaitement verticale à l'instant du largage, mais ses ailerons corrigent rapidement la trajectoire en quelques millisecondes et lui permettent d'atteindre un vol parfaitement stable.

Plusieurs problèmes ont été rencontrés lors des tests.

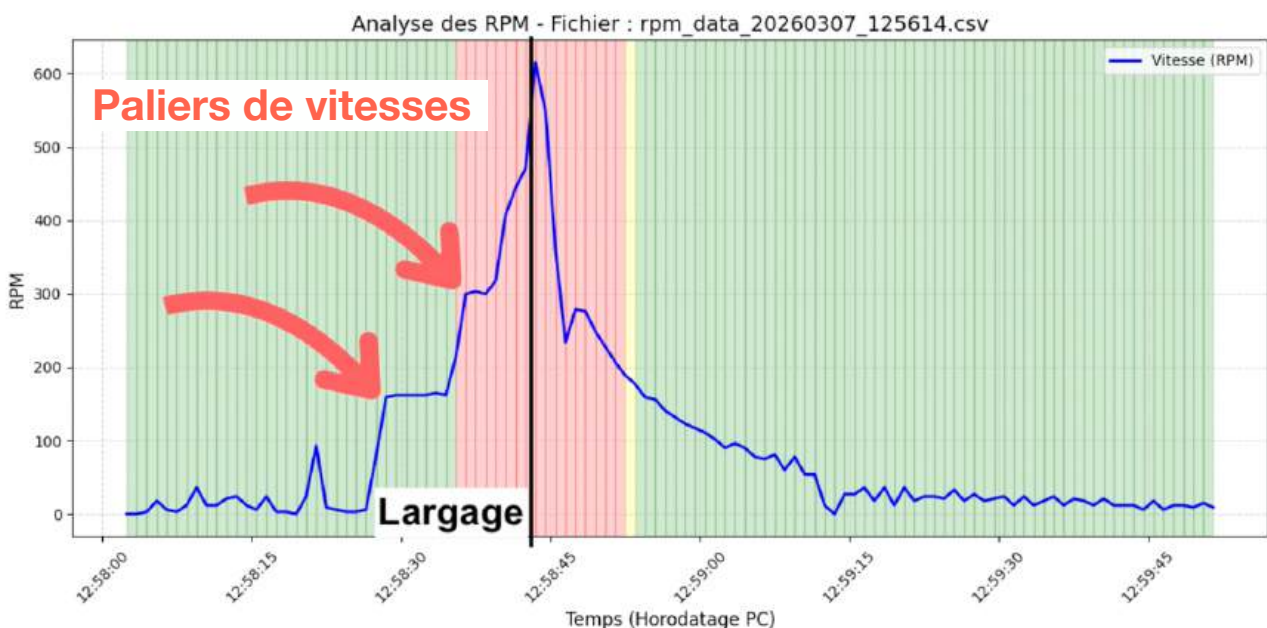
Le capteur optique, exposé au soleil le jour des essais, ne fonctionnait plus — la lumière directe saturait le signal infrarouge. Un carter d'ombre improvisé avec du papier et un bonnet a résolu le problème sur place. Une solution permanente est à prévoir.

Certaines pièces se sont révélées insuffisamment renforcées : la tige fixée à l'électroaimant et l'écarteur de câble se sont cassés lors des tests. Des pièces de rechange avaient été prévues — elles ont été remplacées. Ces pièces ont depuis été redessinées avec une géométrie renforcée.

Les fusées se sont dégradées après une dizaine d'essais, sous l'effet cumulé de l'atterrissage brutal sans système de ralentissement et de l'impact répété de l'aileron sur la goupille 2. L'impression 3D permet de les reproduire rapidement — ce n'est pas un problème bloquant.

La visseuse accélère par paliers non uniformes (voir schéma si-dessous), ce qui génère des à-coups sur la pièce de liaison axe/visseuse et limite la répétabilité des essais. Ce problème est lié à l'absence de contrôle à distance de la visseuse : un opérateur devant rester à proximité pour maintenir le bouton, les vitesses testées sont volontairement bridées par sécurité.

*Évolution de la vitesse de rotation du bras entraîné par une visseuse et mesurée avec capteur optique, mise en évidence des paliers d'accélération :*



# Conclusion et perspectives

## **Ce que ce projet a démontré**

Ce projet avait un objectif clair : concevoir et valider un système de lancement par énergie cinétique rotationnelle, capable de propulser une fusée de manière stable et reproductible.

Le résultat est là. Le L1 a validé le principe fondamental et confirmé que nos simulations prédisent correctement les performances réelles. Le L2 a résolu le problème central du largage — la rotation résiduelle — grâce à un mécanisme différentiel entièrement conçu, simulé et fabriqué dans le cadre de ce projet. Le meilleur essai a atteint 15 mètres de hauteur pour 16 mètres de distance, avec une rotation résiduelle nulle confirmée expérimentalement.

Ce n'est pas simplement un lanceur qui fonctionne. C'est la validation d'un modèle physique complet : les simulations d'apogée, le dimensionnement des composants, et le modèle de largage différentiel ont tous été confrontés à la réalité, et les résultats sont cohérents.

## **Ce qu'on a appris en chemin**

La problématique a évolué au fil du projet. On pensait que le défi principal était d'accumuler suffisamment d'énergie cinétique. En réalité, le vrai problème était de la restituer correctement. Ce changement de perspective, né des observations expérimentales, est peut-être l'apprentissage le plus important du projet — c'est exactement ce que SpinLaunch a dû résoudre à l'échelle industrielle.

On a également appris à travailler de manière itérative : simuler, construire, tester, observer les échecs, comprendre pourquoi, et recommencer. Le premier mécanisme de largage rejeté, le capteur saturé par le soleil, les ailerons qui cassent — ce sont des résultats scientifiques autant que des obstacles.

## **Perspectives**

Plusieurs directions d'amélioration sont clairement identifiées.

La priorité immédiate est le contrôle à distance de la visseuse. C'est la contrainte qui bride actuellement tous les tests — un opérateur à proximité de la structure limite les vitesses accessibles par sécurité. Une fois ce problème résolu, il sera possible de tester des vitesses proches des paramètres simulés, et de vérifier si les prédictions d'apogée à 250 RPM sont confirmées expérimentalement.

Le système de tracking vidéo en cours de développement permettra de reconstruire la trajectoire 3D complète de chaque vol. C'est une donnée précieuse pour quantifier précisément la qualité du largage et affiner les simulations.

Nous souhaitons également réaliser des essais avec un angle de largage parfaitement vertical — ce qui n'a pas encore été possible pour des raisons de sécurité, l'opérateur devant rester à proximité du lanceur pendant les tests. Il serait également intéressant de vérifier expérimentalement ce qui se passe sans système de largage différentiel : est-ce que la fusée conserve bien sa rotation résiduelle

comme le prédit le modèle ? Ce test de contrôle permettrait de quantifier précisément l'apport du mécanisme différentiel et de valider le modèle par l'absurde.

À plus long terme, deux évolutions sont envisagées. La première est l'intégration d'un vrai moteur-fusée pour la phase de vol — le lanceur rotatif assurerait la vitesse initiale, et le moteur prendrait le relai en altitude, comme dans le concept SpinLaunch original. La seconde est l'augmentation du rayon du bras et de la vitesse de rotation, pour explorer des régimes plus proches des limites calculées par les simulations.

Ce projet a posé des bases solides. Le concept est validé, le modèle physique est fiable, et le mécanisme de largage fonctionne. La suite, c'est aller plus haut.

## **Remerciements**

Nous remercions le concours CGénial pour l'organisation et la subvention de 200 € qui nous a permis de réaliser ce projet.

Nous remercions également le Lycée Français International Samuel Beckett pour son soutien financier complémentaire ainsi que pour nous avoir permis d'entreprendre un tel projet.

Nous remercions Mme Van Wormhoudt et M. Marcelin pour leur encadrement tout au long de ce projet.