



Radiation Pressure Fluid Friction Forces

Rapport d'expérience

Contact : Mateo LETARTRE

Email : letartremateo@gmail.com

Tél : +33 (0)6 52 21 28 56

Table des matières

REMERCIEMENT	3
INTRODUCTION	4
PARTIE 1 : PRESENTATION ET PREPARATION DU PROJET	5
1.1. CONTEXTE DU PROJET.....	5
1.2. PREPARATION DU PROJET	6
1.3. SEMAINE DE CAMPAGNE DE VOLS	7
PARTIE 2 : EXPERIENCE FORCE LUMINIQUE (RADIATION PRESSURE)	9
2.1. CONTEXTE.....	9
2.2. OBJECTIF	9
2.3. DISPOSITIF EXPERIMENTAL	9
2.4. RESULTAT ATTENDU.....	12
2.5. RESULTAT OBTENU.....	15
2.6. DISCUSSION	16
PARTIE 3 : EXPERIENCE FLUIDE FRICTION FORCES	18
3.1. CONTEXTE.....	18
3.2. OBJECTIFS.....	19
3.3. DISPOSITIF EXPERIMENTAL	19
3.4. RESULTAT ATTENDU.....	20
3.5. RESULTAT OBTENU.....	21
3.6. DISCUSSION	28
CONCLUSION	29

Remerciement

Nous tenons, dans un premier temps, à remercier chaleureusement le Centre National d'Études Spatiales (CNES) pour cette opportunité exceptionnelle de nous engager dans un projet scientifique ambitieux. Cette expérience nous a permis d'évoluer dans un cadre d'apprentissage unique, tant sur le plan scientifique qu'humain.

Nous adressons également nos sincères remerciements à notre professeur, Monsieur Jean-François Dovergne, à l'origine du lancement de ce projet sur deux années consécutives, pour sa confiance, son encadrement et son soutien tout au long de cette aventure.

Nous remercions Monsieur Alexis Jolion, ingénieur vols paraboliques à Novespace pour son accompagnement dans la conception et la réalisation de nos expériences, ainsi que pour ses conseils techniques précieux.

Nos remerciements vont aussi à Monsieur Damien De Seze, chargé de projets étudiants au CNES, qui nous a accompagné, ainsi que les autres équipes étudiantes, tout au long de ces deux années et plus particulièrement lors de la semaine passée à Bordeaux, pour son soutien constant et sa disponibilité.

Nous remercions Kubii, entreprise française spécialisée dans la distribution de matériel et composants d'informatique et d'électronique orientés D.I.Y. Le matériel qui nous a été fourni nous a été essentiel.

Enfin, nous remercions notre école d'ingénieur JUNIA, notamment la CPGE associée La Salle-JUNIA HEI pour son soutien et l'accompagnement apporté à ce projet.

Introduction

Radiation Pressure Fluid Friction Forces (RP3F) est un projet étudiant d'étude de la poussée lumineuse ainsi que des frottements dans un fluide, sélectionné pour participer à la 69e campagne de vols paraboliques organisée par le CNES. Les deux expériences ont donc été embarquées à bord de l'Airbus A310 Zéro G de Novespace pour participer à un vol parabolique permettant de recréer l'impesanteur nécessaire à cette étude.

La première expérience se concentre sur l'étude de la poussée lumineuse (ou pression de radiation) en conditions de microgravité (0g). Ce phénomène, bien que théoriquement établi et essentiel au concept de voiles solaires — qui sont d'immenses structures réfléchissantes qui utilisent l'impulsion des photons pour se propulser dans le vide sans moteur — est extrêmement ténu et facilement supplanté par les forces gravitationnelles et aérodynamiques résiduelles sur Terre. En éliminant virtuellement l'influence de la gravité, nous cherchons à quantifier avec précision l'impulsion transférée par les photons à un objet, ouvrant ainsi la voie à une meilleure modélisation des systèmes de propulsion spatiale futurs qui n'utilisent pas de carburant.

Le second volet du projet exploite la phase d'hypergravité (1,8g) du vol parabolique pour analyser les forces de frottement et la dissipation d'énergie lors du mouvement d'objets au sein de tubes. L'augmentation de la force normale due à l'accélération verticale intensifiée (1,8g) permet de mieux caractériser l'impact des frottements sur la décélération et le comportement cinématique des objets. Ces données sont cruciales pour les applications d'ingénierie impliquant le transport de fluides ou de solides dans des environnements soumis à des forces d'accélération élevées.

Partie 1 : Présentation et préparation du projet

1.1. Contexte du projet

Le projet présenté dans ce rapport s'inscrit dans le cadre du programme Parabole Étudiant, proposé chaque année par le Centre National d'Études Spatiales (CNES). Ce programme a pour objectif de permettre à des étudiants de concevoir, développer et mettre en œuvre des expériences scientifiques réalisées dans des conditions de pesanteur variable, à bord de l'Airbus A310-0g, exploité par la société Novespace, filiale du CNES.

À l'origine de ce projet se trouve une proposition de M. Dovergne, ancien enseignant aux classes préparatoires associées La Salle JUNIA HEI, visant à offrir aux étudiants la possibilité de s'engager dans une démarche scientifique ambitieuse, allant au-delà du cadre académique habituel. Le projet a ainsi été mené sur la base du volontariat, en parallèle de la formation suivie au sein des classes préparatoires.

L'équipe, composée de six étudiants des classes préparatoires La Salle JUNIA HEI, a été constituée spécifiquement pour répondre à l'appel à projets du CNES. Elle est organisée de la manière suivante :

- Mateo Letartre : Chef de projet et responsable technique
- Gaspard Mund : Responsable administratif
- Gaspard Fabre : Responsable software
- Martin Augier de Cremiers : Responsable communication
- Anne-Gaëlle Fauchaux : Communication adjointe et support transversal
- Titouan Le Gall : Support structure et intégration mécanique

Après une phase de préparation et la constitution d'un dossier scientifique et technique, le projet a été sélectionné sur dossier par le CNES. Dans un premier temps, l'équipe a été retenue en tant qu'équipe de secours (backup) pour la campagne de vols paraboliques de 2024, avec une confirmation de participation prévue pour l'année suivante sous réserve du bon déroulement des projets initialement sélectionnés.

À l'issue de la campagne 2024, aucun désistement n'ayant été constaté parmi les équipes participantes, le projet a été officiellement confirmé pour la campagne de vols paraboliques de 2025. Ce projet a mobilisé l'équipe sur une durée de deux années, de 2023 à 2025, et a conduit au développement de deux expériences scientifiques distinctes : l'expérience Force Luminique et l'expérience Fluid Friction Forces, qui sont présentées et analysées dans les parties suivantes de ce rapport.

Les vols paraboliques constituent un environnement expérimental unique, permettant de reproduire successivement des phases d'hyperpesanteur (1,8 g), de

pesanteur terrestre (1 g) et d'impesanteur quasi totale (≈ 0 g), sur des durées de l'ordre de vingt secondes par parabole. Ces conditions offrent une opportunité exceptionnelle d'étudier des phénomènes physiques dont le comportement dépend directement du champ de gravité, et de confronter les résultats expérimentaux aux modèles théoriques.

Ce projet s'inscrit ainsi à la croisée de plusieurs disciplines scientifiques et techniques, et illustre une démarche complète de recherche expérimentale : de la définition d'objectifs scientifiques précis à l'exploitation de données acquises dans un environnement proche de celui des missions spatiales.

1.2. Préparation du projet

La phase de préparation du projet a constitué une étape déterminante pour la réussite des expériences. Elle a principalement porté sur la conception, l'adaptation et la validation des dispositifs expérimentaux afin de répondre aux contraintes spécifiques du programme Parabole Étudiant du CNES et de l'environnement particulier des vols paraboliques.

1.2.1. Développement des expériences

Deux expériences distinctes ont été développées au cours du projet : l'expérience Force Luminique et l'expérience Fluid Friction Forces. Chacune a été conçue pour exploiter les variations de gravité rencontrées lors des vols paraboliques, en comparant les comportements observés en 1 g, 1,8 g et en impesanteur quasi totale (≈ 0 g).

Dès la phase de conception, une attention particulière a été portée à la robustesse des systèmes, à leur reproductibilité et à leur capacité à fonctionner de manière fiable pendant des phases d'impesanteur de courte durée. Les dispositifs ont été progressivement améliorés afin de garantir la cohérence des mesures et la stabilité des expériences durant l'ensemble des manœuvres paraboliques.

1.2.2. Contraintes techniques liées aux vols paraboliques

Les vols paraboliques imposent un environnement expérimental particulièrement contraignant et souvent contre-intuitif. En effet, des systèmes fonctionnant correctement sous gravité terrestre peuvent présenter des dysfonctionnements en impesanteur, notamment en raison de l'absence de poids, de la modification des écoulements de fluides ou de comportements mécaniques inattendus.

Les expériences ont donc été spécifiquement conçues pour :

- résister aux phases d'hyperpesanteur à 1,8 g
- fonctionner de manière fiable en impesanteur
- supporter les contraintes mécaniques et vibratoires liées au vol
- respecter les normes de sécurité strictes imposées par Novespace

Ces contraintes ont fortement influencé les choix de conception, tant sur le plan mécanique qu'électronique et logiciel.

1.2.3. Suivi technique avec Novespace

Tout au long de la préparation du projet, un contact régulier a été maintenu avec un ingénieur de Novespace. Ces échanges ont permis de garantir que l'ensemble des dispositifs expérimentaux respecte les normes strictes imposées par Novespace, tant en matière de sécurité que de fiabilité et de compatibilité avec l'environnement des vols paraboliques.

Le responsable technique du projet a ainsi travaillé en étroite collaboration avec cet ingénieur afin de concevoir des systèmes conformes aux exigences du CNES, capables de résister aux phases d'hyperpesanteur, de fonctionner en impesanteur et de supporter les contraintes mécaniques et vibratoires du vol. Si ces normes limitaient fortement les choix de conception, elles ont également constitué un cadre particulièrement stimulant, incitant l'équipe à faire preuve de créativité et d'ingéniosité pour développer des solutions techniques originales, tout en restant pleinement conformes aux contraintes imposées.

Ce travail dans un environnement normé et exigeant a représenté une expérience formatrice, mettant en évidence l'importance de l'innovation sous contrainte, caractéristique des projets scientifiques et spatiaux.

1.2.4. Tests et validation avant la campagne de vols

Avant la campagne de vols, les expériences ont fait l'objet de tests au sol visant à vérifier leur bon fonctionnement, leur robustesse et la fiabilité des systèmes de mesure et d'acquisition de données. Ces tests ont permis d'identifier d'éventuels points faibles et d'apporter les dernières corrections nécessaires avant l'intégration finale dans l'Airbus A310-0g.

L'ensemble de cette phase de préparation a permis d'aboutir à des expériences conformes aux exigences du CNES et de Novespace, prêtes à être mises en œuvre lors de la campagne de vols paraboliques.

1.3. Semaine de campagne de vols

La campagne de vols paraboliques constitue l'aboutissement du projet, après près de deux années de conception, de préparation et de validation des expériences. Elle s'est déroulée dans le cadre de la 69^e campagne de vols paraboliques du CNES, organisée par Novespace, à bord de l'Airbus A310-0g.

1.3.1. Semaine de préparation (22 au 26 septembre 2025)

La campagne a débuté par une semaine de préparation, du 22 au 26 septembre 2025, consacrée à l'intégration et à la validation finale des expériences. Durant cette phase, deux membres de l'équipe, Gaspard Fabre et Mateo Letartre se sont rendus sur le site de Novespace avec les deux dispositifs expérimentaux.

Cette semaine a été dédiée à :

- l'installation des expériences dans les racks fournis par le CNES,
- l'intégration du matériel à bord de l'Airbus A310-0g,
- la réalisation des tests finaux en conditions proches de celles du vol,
- la vérification de la conformité aux normes de sécurité et de fonctionnement imposées par Novespace.

Ces étapes ont permis de valider définitivement les expériences en vue de leur mise en œuvre lors des vols paraboliques.

1.3.2. Semaine de vols (29 septembre au 3 octobre 2025)

La semaine de vols s'est déroulée du 29 septembre au 3 octobre 2025. Le reste de l'équipe a rejoint Novespace au début de cette période afin de participer à la phase expérimentale.

Le vol expérimental a eu lieu le mardi 30 septembre 2025. Au cours de ce vol, l'Airbus A310-0g a réalisé une série de manœuvres paraboliques, permettant de recréer successivement des phases d'hyperpesanteur à 1,8 g, de pesanteur terrestre et d'impesanteur quasi totale d'une durée d'environ 22 secondes par parabole. Les deux expériences ont été menées durant ces phases, conformément aux protocoles définis.

1.3.3. Fin de campagne et récupération des données

La fin de la semaine a été consacrée à la désinstallation des expériences, au démontage du matériel et à la récupération des enregistrements vidéo et des données expérimentales collectées durant le vol. Ces données constituent la base de l'analyse présentée dans les parties suivantes du rapport.

La campagne de vols a ainsi marqué l'aboutissement du projet, en permettant la réalisation effective des expériences dans un environnement de pesanteur variable, conforme aux objectifs scientifiques initialement définis.

Partie 2 : Expérience Force Luminique (Radiation Pressure)

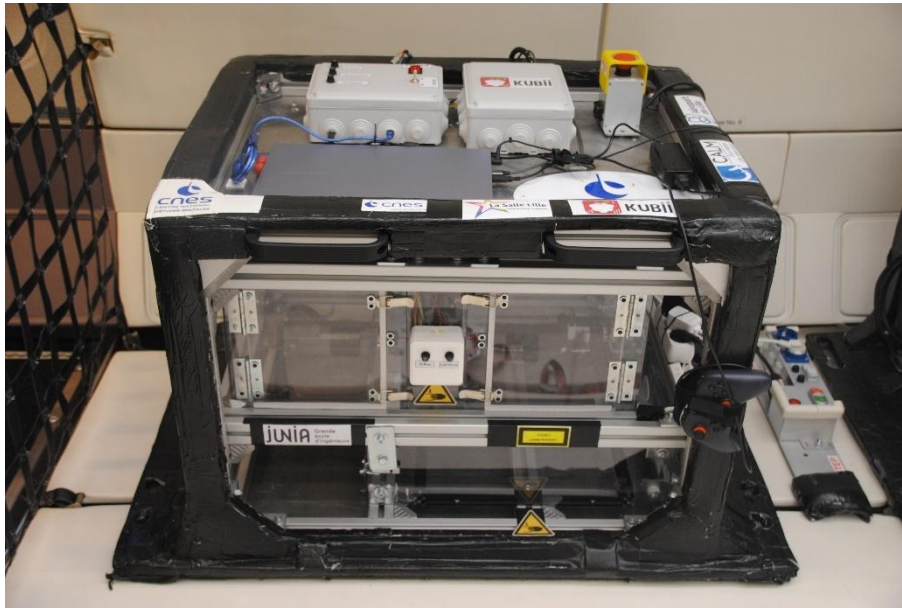


Figure 1 : Rack de l'expérience RP

2.1. Contexte

Le photon, découvert par Albert Einstein en 1905 possède des propriétés particulières dues à sa vitesse, en particulier, son énergie, en effet, bien que le photon n'ait pas de masse, il possède de l'énergie cinétique inversement proportionnelle à sa longueur d'onde.

Lors d'une collision, le photon peut être réfléchi, dans ce cas une force est appliquée par la surface sur lequel le photon rebondit et donc une force de valeur égale est appliquée sur la surface. Cette force est appelée la force luminique.

2.2. Objectif

Le but de notre expérience est de mesurer la poussée luminique, c'est-à-dire la capacité de la lumière à pousser des objets. La lumière est en effet à la fois une onde et une particule. Nous nous intéressons à l'aspect corpusculaire de la lumière c'est-à-dire quand elle se comporte en particule : le photon.

2.3. Dispositif expérimental

L'objectif de cette expérience est de concevoir un dispositif permettant d'étudier la poussée lumineuse exercée par un faisceau laser sur un objet macroscopique. Pour s'affranchir de l'influence de la gravité et maximiser la durée d'observation du

phénomène, l'expérience est réalisée en conditions de microgravité à bord de l'Airbus Zero-G.

Le principe expérimental repose sur l'illumination d'une bille, placée à l'intérieur d'un caisson fermé, par un faisceau laser dirigé horizontalement. Une seconde bille, utilisée comme bille témoin, est placée dans un caisson distinct mais strictement identique, afin de permettre une comparaison directe des comportements dynamiques. Les deux billes doivent être soumises à des conditions de lancement aussi similaires que possible.

En raison des imperfections du régime de microgravité lors des paraboles, les billes ne peuvent pas être laissées libres dans les caissons avant le début de la phase de 0 g. Elles sont donc initialement maintenues en position à l'aide d'un système de pinces. Chaque pince est constituée de deux éléments en forme de cuillères et est intégrée dans son caisson respectif. Sur commande de l'expérimentateur, les pinces s'ouvrent afin de libérer les billes en « free float », en minimisant toute force mécanique transmise lors du lâcher.

Le laser est monté sur une structure de guidage issue d'une graveuse laser modifiée pour les besoins de l'expérience. Cette structure permet le déplacement du laser dans le plan horizontal, sous le caisson contenant la bille. Une caméra est fixée à proximité du laser afin d'observer la bille et de fournir les informations nécessaires à son suivi.

Le système de guidage est piloté par une carte Arduino Mega 2560, qui assure le contrôle des différents composants électroniques de l'expérience. Les moteurs pas à pas de la structure de guidage sont commandés par des contrôleurs dédiés. Un dispositif de sécurité est intégré afin de garantir l'arrêt automatique du système en cas de situation non nominale. De plus, une manette de jeu vidéo est programmée pour permettre à l'expérimentateur de reprendre manuellement le contrôle du guidage du laser et de le recentrer sous la bille si nécessaire.

L'installation électrique comporte un interrupteur général ainsi que des capteurs de sécurité associés aux portes des caissons. À chaque ouverture de porte, un signal est envoyé à la commande centrale, entraînant la coupure immédiate de l'alimentation des actionneurs afin d'éviter tout mouvement accidentel.

Enfin, deux logiciels distincts sont utilisés pour le fonctionnement de l'expérience. Le logiciel principal, programmé en C++ et exécuté sur un ordinateur portable, permet à l'opérateur de paramétrer l'expérience et de suivre son déroulement en temps réel. Il constitue l'interface de commande et de supervision du dispositif expérimental.

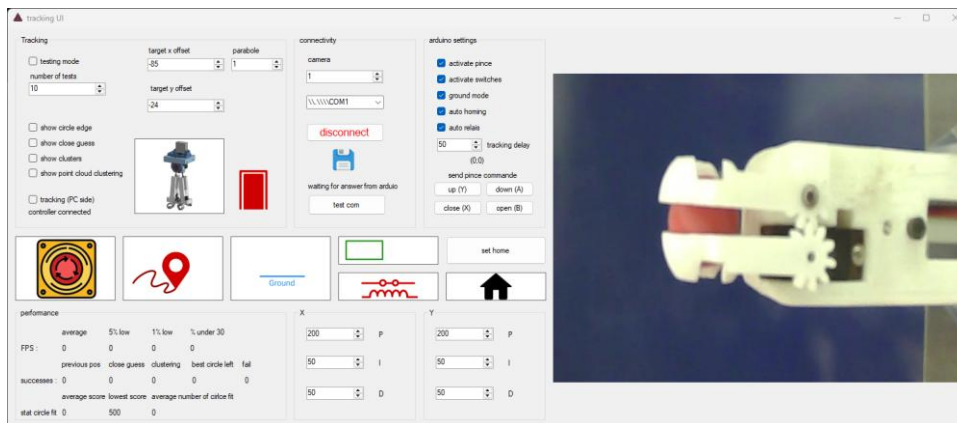


Figure 2 : Capture d'écran du tableau de bord de l'expérimentateur

De plus, ce logiciel analyse les images de la caméra placé à côté du laser afin de déterminer la position relative de la bille et du laser. Avec ces informations, le logiciel peut donc calculer la vitesse des moteurs nécessaire pour suivre la bille. Ces informations sont ensuite transmises à l'Arduino où se situe le deuxième logiciel.

L'Arduino a pour but de suivre les instructions de l'ordinateur. Elle va donc actionner différents moteurs selon la vitesse demandée ou allumer et éteindre le laser par exemple. Certaines logiques sont directement programmées dans l'Arduino en plus comme la gestion des capteurs de fin de course de la graveuse si l'opérateur n'a pas besoin de le contrôler directement. Enfin, l'Arduino envoie les informations nécessaires pour informer l'opérateur et pour s'assurer que tout fonctionne comme prévu. La logique de l'Arduino et de la communication est faite en assurant que les modifications de l'opérateur sont bien prises en compte par l'Arduino.

Fonctionnement de notre dispositif

Séquence de préparation en steady flight	Description
1. Lancement de la séquence	L'opérateur lance la séquence depuis l'ordinateur.
2. Montée des bras	Les bras montent et poussent les portes dans les caissons.
3. Sécurité des servomoteurs	Alimentation coupée pour éviter tout mouvement accidentel.
4. Manipulation des pinces	L'opérateur place une bille dans chaque caisson.
5. Réactivation des servomoteurs	Les servomoteurs sont réactivés pour la phase de vol.

Séquence en impesanteur 0g	Description
1. Activation en microgravité	L'opérateur active la séquence d'apesanteur
2. Libération des billes	Les pinces s'ouvrent pour libérer les billes.
3. Descente des bras	Les bras descendent et referment les portes.
4. Activation du laser et système de guidage	Le laser s'allume et suit la bille.

L'analyse des résultats repose sur le suivi de la position des billes au cours des phases de microgravité afin d'identifier une accélération éventuelle induite par l'illumination laser. La bille principale, soumise au faisceau laser, ainsi que la bille témoin, ont été suivies par un ensemble de caméras embarquées.

La bille témoin a été enregistrée à l'aide de deux caméras GoPro, tandis que la bille principale a été suivie par une caméra GoPro et par la caméra intégrée au système de guidage du laser. La position du système de guidage a été enregistrée tout au long de chaque parabole par le comptage des impulsions envoyées aux moteurs pas à pas, permettant ainsi de reconstituer la position relative du laser dans le référentiel du caisson.

Les images issues des GoPro ont été corrigées de la distorsion optique due aux objectifs grand angle à l'aide d'un logiciel basé sur la bibliothèque OpenCV. L'extraction des positions des billes à partir des vidéos a été réalisée manuellement image par image. Les méthodes de détection automatique testées n'ont pas donné de résultats suffisamment fiables dans les conditions expérimentales rencontrées.

À partir des positions successives obtenues, les trajectoires des billes ont été reconstruites et les accélérations moyennes ont été estimées sur la durée des phases exploitables de microgravité.

2.4. Résultat attendu

Étude de la faisabilité de l'expérience

Nous avons étudié la faisabilité de l'expérience en faisant les hypothèses suivantes :

- Les photons suivent une réflexion totale selon le vecteur unitaire $\hat{e}_x$.
- Il n'y a pas d'absorption de photons

- Aucun frottement, qu'il soit fluide ou solide, n'est pris en compte
- La gravité est négligée

Dans cette configuration, un laser de puissance P et de longueur d'onde λ émet de la lumière suivant l'axe OX dans le sens des x -croissants ($\hat{e}_x$) sur une bille de masse m , placée initialement en O au repos. L'objectif est de déterminer la longueur L parcourue par la bille durant la durée T de l'expérience, en supposant une trajectoire parabolique.

D'après la relation de Planck-Einstein, l'énergie d'un photon est donnée par :

$$E_{\text{photon}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Avec :

- $h = 6.62 \times 10^{-34}$ J.s (constante de Planck)
- $c = 3 \times 10^8$ m/s (vitesse de la lumière dans le vide)

Pendant un intervalle infinitésimal dt , le nombre de photons émis est :

$$dN = \frac{P dt}{E_{\text{photon}}} = \frac{P dt}{hc/\lambda} = \frac{\lambda P dt}{hc}$$

D'après la relation de de Broglie, l'impulsion d'un photon est :

$$\vec{p}_{\text{photon}} = \frac{h}{\lambda} \hat{e}_x$$

Après réflexion sur la bille, cette impulsion devient $-\frac{h}{\lambda} \hat{e}_x$, soit une variation

$$\Delta \vec{p}_{\text{photon}} = -2 \frac{h}{\lambda} \hat{e}_x.$$

Pendant la durée dt , la variation de l'impulsion est donnée par :

$$d\vec{p} = dN \cdot \Delta \vec{p}_{\text{photon}} = \frac{\lambda P dt}{hc} \cdot \left(-2 \frac{h}{\lambda} \hat{e}_x\right) = -2 \frac{P dt}{c} \hat{e}_x$$

D'après la deuxième loi de Newton appliquée aux photons, la force exercée par les photons sur la bille est :

$$\vec{F}_{\text{bille} \rightarrow \text{photons}} = \frac{d\vec{p}}{dt} = -2 \frac{P}{c} \hat{e}_x$$

En vertu de la troisième loi de Newton, la force exercée par les photons sur la bille est opposée et est donnée par :

$$\vec{F}_{\text{photons} \rightarrow \text{bille}} = -\vec{F}_{\text{bille} \rightarrow \text{photons}} = 2 \frac{P}{c} \hat{e}_x$$

La deuxième loi de Newton appliquée à la bille nous donne alors :

$$2 \frac{P}{c} \hat{e}_x = m \vec{a}$$

Où $\vec{a} = a \hat{e}_x$ est l'accélération de la bille. Ainsi, nous avons :

$$a = \frac{2P}{mc}$$

L'intégration de cette équation donne la position de la bille en fonction du temps t :

$$x(t) = \frac{P}{mc} t^2$$

La distance parcourue par la bille, soit la longueur L , pendant la durée T de l'expérience est donc :

$$L = \frac{P}{mc} T^2$$

Exemple d'application numérique :

Pour une puissance de $P = 1 \text{ W}$, une masse de $m = 0.1 \text{ g} = 0.0001 \text{ kg}$, et une durée de $T = 20 \text{ s}$, la distance parcourue par la bille est :

$$L = \frac{1}{0.0001 \times 3 \times 10^8} \times 20^2 = 1.3 \times 10^{-2} \text{ m} = 13 \text{ mm}$$

Bien que le déplacement soit faible, il reste néanmoins détectable.

Toutefois, nous ne pouvons pas garantir des normes de sécurité suffisantes pour obtenir le droit d'utiliser un laser de classe 3B dans l'Airbus Zéro G. Nous nous sommes aussi confrontés au fait que nous n'en avons pas trouvé sur le marché respectant nos contraintes souhaitées (dimensions, poids...).

De ce fait nous ne nous attendons pas à avoir des données exploitables mais nous souhaitons plus que ce rapport pose les bases de futures recherches. Nous avons donc vu cette « expérience laser » comme une proof of concept. L'idée est d'avoir un système de tracking qui fonctionne à l'aide d'une caméra et d'un pointage laser. Cette technique est indispensable à maîtriser pour envisager une évolution vers l'étude de la pousée lumineuse.

Nous nous attendons à avoir une bille qui reste en l'air pendant les 20 secondes de 0g et qui rebondit possiblement d'une paroi à l'autre toujours suivie du laser.

Ce dernier, bien qu'assez rapide pour suivre les mouvements de la bille, peut perdre cette dernière. Un contrôle manuel par l'opérateur à l'aide de la manette est prévu afin de recentrer le faisceau laser en cas de perte de suivi.

En termes de données, il est peu probable d'en obtenir sur la distance verticale parcourue par la bille donc nous étudierons le temps du laser passé sous la bille. Nous nous attendons à ce que ce dernier soit de 10s sur les 20s de 0g.

2.5. Résultat obtenu

Les trajectoires mesurées de la bille éclairée par le laser ne montrent pas d'accélération systématique ou significative corrélée à l'allumage du laser. L'accélération moyenne mesurée au cours des phases de microgravité reste proche de zéro dans les limites de précision du dispositif expérimental.

L'accélération résiduelle mesurée dans le référentiel de l'avion est de l'ordre de $0,25 \text{ m/s}^2$. Cette valeur est observée aussi bien pour la bille éclairée que pour la bille témoin. Aucune différence mesurable entre les deux billes n'a pu être mise en évidence à partir des données exploitables.

Un nombre important de paraboles n'a pas pu être utilisé pour l'analyse. Dans de nombreux cas, la bille restait en contact avec les parois du caisson ou se retrouvait confinée dans une zone limitée, ce qui empêche toute observation d'un mouvement libre exploitable. La figure 3 présente un exemple de trajectoire mesurée lors d'une parabole, où la trajectoire est représentée en bleu lorsque le laser pointe la bille et en rouge lorsque

le laser ne pointe pas la bille, mettant ainsi en évidence les contacts fréquents avec les limites du caisson et les périodes d'illumination effective.

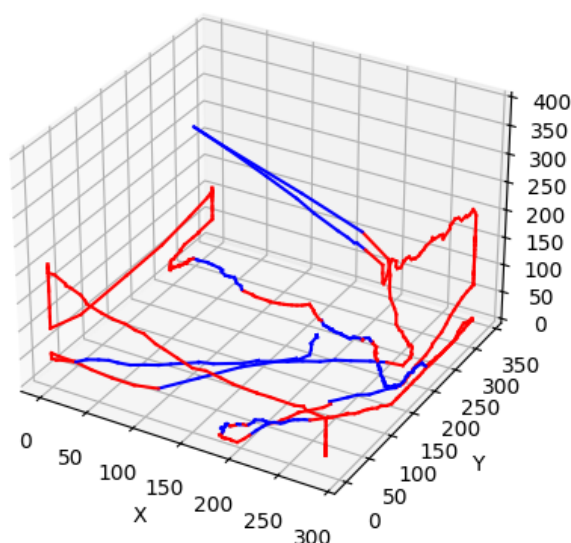


Figure 3 : Trajectoire de la bille pendant une parabole

Par ailleurs, le suivi de la bille par le système de guidage du laser s'est révélé limité. Sur l'ensemble des phases de microgravité analysées, le laser n'a pu être maintenu sous la bille que sur une fraction réduite du temps total, estimée à environ 5 % de la durée des phases de 0 g.

2.6. Discussion

Les résultats obtenus montrent qu'aucun effet mesurable de la poussée lumineuse n'a pu être mis en évidence dans les conditions expérimentales de cette expérience. Cette absence de résultat exploitable est cohérente avec les ordres de grandeur établis lors de l'étude de faisabilité théorique, qui indiquaient que l'accélération induite, par la poussée lumineuse pour la puissance de laser utilisée, est extrêmement faible.

En effet, l'accélération théorique attendue, de l'ordre de $1,3 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$, est plusieurs ordres de grandeur inférieure aux accélérations résiduelles mesurées dans le référentiel de l'avion, qui atteignent environ $0,25 \text{ m/s}^2$. Ces accélérations parasites, inhérentes aux vols paraboliques et aux imperfections du régime de microgravité, masquent totalement l'effet recherché et rendent sa détection impossible avec le dispositif actuel.

Par ailleurs, les conditions réelles de vol ont fortement limité le temps pendant lequel la bille pouvait être considérée en mouvement libre. La bille a fréquemment été en contact avec les parois du caisson, ce qui introduit des forces mécaniques

largement dominantes par rapport à la poussée lumineuse. Ces contacts réduisent considérablement la durée des phases exploitables et constituent une contrainte majeure pour ce type d'expérience.

Le système de guidage du laser représente également une limitation importante. Malgré sa capacité à suivre les mouvements de la bille, le laser n'a pu être maintenu sous celle-ci qu'une fraction réduite du temps total de microgravité, estimée à environ 5 %. La durée effective d'interaction entre le faisceau laser et la bille est donc insuffisante pour produire un déplacement mesurable, même en supposant un mouvement libre idéal.

L'amélioration de l'expérience nécessiterait avant tout une augmentation significative de la puissance du laser. Les estimations montrent qu'un laser de plusieurs watts, associé à une bille de masse très faible (de l'ordre de 0,1 g), permettrait d'obtenir un déplacement plus important, potentiellement observable sur la durée d'une parabole. Toutefois, une telle augmentation de puissance pose des contraintes importantes en termes de sécurité, de réglementation et de gestion thermique, en particulier dans un environnement habité comme l'Airbus Zero-G.

La conception de la bille constitue également un enjeu majeur. Une bille à la fois très légère, mécaniquement résistante et fortement réfléchissante serait nécessaire afin de maximiser l'effet de la poussée lumineuse tout en limitant les effets thermiques. Des solutions envisageables incluent l'utilisation de structures creuses, de matériaux à haute performance issus de l'impression 3D, ou encore de revêtements réfléchissants adaptés.

Enfin, le système de mesure pourrait être amélioré par l'utilisation de caméras dédiées à la localisation spatiale, offrant une meilleure précision de suivi et permettant à la fois l'analyse des trajectoires et le guidage du laser. Une alternative consisterait à utiliser un système optique à miroirs, similaire à ceux employés dans les graveuses laser de forte puissance, afin de maintenir le laser stationnaire et de réduire la complexité mécanique du dispositif de guidage.

Ainsi, bien que cette expérience n'ait pas permis de mesurer directement la poussée lumineuse, elle constitue une preuve de concept pertinente. Elle met en évidence les contraintes physiques et expérimentales associées à ce type de mesure en microgravité et fournit une base solide pour la conception de futures expériences visant à observer cet effet dans des conditions plus favorables.

Partie 3 : Expérience Fluide Friction Forces



Figure 4: Rack de l'expérience 3F

3.1. Contexte

Lorsqu'un objet se déplace dans un fluide, il est soumis à une force de traînée, assimilable à une friction fluide, qui s'oppose à son mouvement. Cette force dépend principalement de la vitesse de l'objet, des propriétés du fluide telles que sa viscosité et sa densité, ainsi que de la forme et de la surface de l'objet et du régime d'écoulement. Dans le cas d'une chute verticale dans un fluide visqueux, la vitesse de l'objet augmente jusqu'à atteindre une vitesse limite, correspondant à l'équilibre entre le poids de l'objet, corrigé de la poussée d'Archimède, et la force de traînée exercée par le fluide.

Une augmentation de la gravité entraîne une augmentation du poids effectif de l'objet, ce qui conduit à une vitesse limite plus élevée. Toutefois, selon la théorie classique de la mécanique des fluides, la force de traînée ne dépend pas directement de la gravité, mais uniquement de la vitesse relative entre l'objet et le fluide, ainsi que des caractéristiques de ce dernier. La gravité intervient donc de manière indirecte, en modifiant la dynamique du mouvement et les vitesses atteintes.

L'étude de la friction en gravité variable présente un intérêt particulier dans le domaine de l'aéronautique, notamment pour la compréhension des entrées atmosphériques de capsules spatiales. Lors de ces phases critiques, les engins sont soumis à des forces de traînée très importantes, qui conditionnent la décélération, les charges mécaniques et la stabilité de la capsule. Sur des planètes ou des corps célestes à gravité supérieure à celle de la Terre, comme Jupiter où la gravité est environ 2,5 fois

celle de la Terre, la dynamique d'entrée est fortement modifiée, avec des vitesses et des efforts aérodynamiques plus élevés.

Il est donc essentiel de déterminer si une gravité accrue modifie uniquement la vitesse atteinte par un objet dans un fluide, ou si elle influence indirectement la friction elle-même, par exemple en induisant un changement du régime d'écoulement ou des instabilités dynamiques. L'expérience présentée dans cette étude vise à clarifier cette distinction, en séparant les effets purement dynamiques liés à la gravité des propriétés intrinsèques de la traînée fluide, dans un contexte directement pertinent pour les applications spatiales.

3.2. Objectifs

L'objectif principal de cette étude est d'analyser l'influence d'une augmentation de la gravité sur la friction exercée par un fluide visqueux sur des objets en chute verticale. Plus précisément, il s'agit de déterminer si une gravité accrue modifie la force de traînée de manière intrinsèque, ou si elle n'agit qu'indirectement en modifiant la dynamique du mouvement et les vitesses atteintes.

Cette expérience vise également à comparer le comportement dynamique d'objets de formes différentes soumis aux mêmes conditions expérimentales, afin d'identifier d'éventuels effets géométriques dans un contexte de gravité variable. L'analyse porte notamment sur l'évolution de la vitesse de chute, la valeur de la vitesse limite et le temps nécessaire pour l'atteindre, pour des niveaux de gravité de 1 g et 1,8 g.

Enfin, cette étude cherche à vérifier la validité des modèles classiques de traînée fluide lorsque la gravité est modifiée, en évaluant la constance du coefficient de traînée effectif entre les différentes conditions. Les résultats obtenus permettent ainsi de mieux distinguer les effets purement dynamiques liés à la gravité des propriétés intrinsèques de la friction fluide, avec des perspectives d'application aux problématiques d'entrées atmosphériques de capsules spatiales sur des corps célestes à gravité élevée.

3.3. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est intégré dans un rack étanche fourni par le CNES, spécifiquement conçu pour fonctionner dans des conditions de gravité variable. À l'intérieur de ce rack est installée une structure rotative supportant quatre tubes verticaux identiques, scellés hermétiquement et remplis de glycérine. Ce fluide a été choisi en raison de sa forte viscosité et de sa densité élevée, permettant d'augmenter la force de traînée exercée sur les objets et de réduire le temps nécessaire pour atteindre la vitesse limite, ce qui est particulièrement adapté aux contraintes temporelles imposées par les phases de gravité variable.

Chaque tube contient un objet de géométrie différente, une plaque plane, un dôme, un cône et un bouclier, afin d'étudier l'influence de la forme sur la force de traînée. Les objets sont initialement maintenus en position haute dans les tubes à l'aide d'aimants. Lors du passage à une phase de gravité augmentée de 1,8 g, l'opérateur retire simultanément les aimants, libérant ainsi les objets qui chutent verticalement dans la glycérine sous l'effet de leur poids.

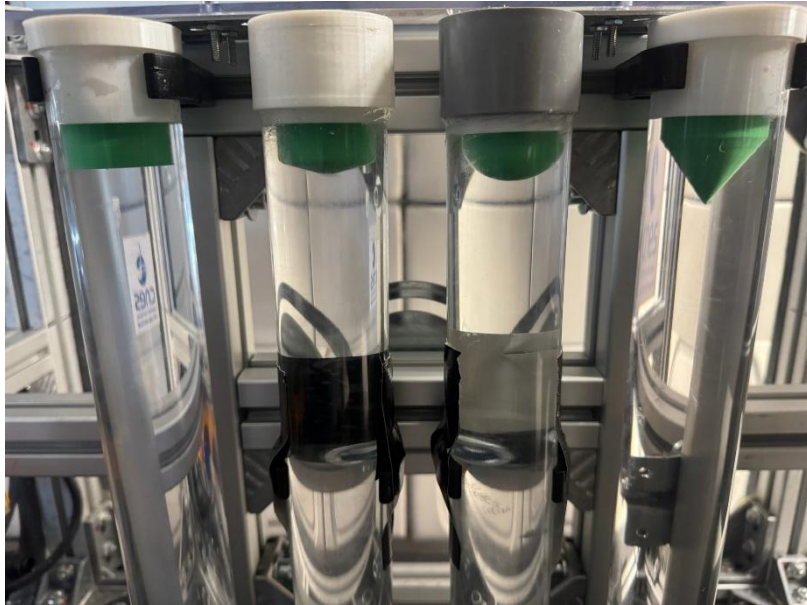


Figure 5 : Image des objets dans leurs tubes

Les quatre tubes sont filmés de face par une caméra, ce qui permet de suivre la trajectoire des objets en fonction du temps et d'extraire les données de position nécessaires à l'analyse cinématique. À l'issue de chaque parabole, la structure est retournée afin de permettre aux objets de revenir à leur position initiale. Les aimants sont alors remis en place, et la structure est repositionnée dans sa configuration de départ, assurant une réinitialisation complète et reproductible du dispositif pour les essais suivants. Ce protocole permet de réaliser plusieurs chutes successives dans des conditions de gravité identiques et comparables, aussi bien en gravité normale qu'en gravité augmentée.

3.4. Résultat attendu

Sur la base des modèles classiques de mécanique des fluides, une augmentation de la gravité entraîne une augmentation du poids des objets, ce qui conduit à des vitesses de chute plus élevées dans un fluide visqueux. Le passage d'une gravité normale (1 g) à une gravité augmentée (1,8 g) devrait ainsi se traduire par une augmentation de la vitesse atteinte par les objets, en particulier de leur vitesse limite.

Les courbes position–temps sont donc attendues plus pentues pour la condition de gravité augmentée, ce qui traduit une vitesse de chute plus élevée. La forme générale des courbes devrait cependant rester similaire entre les deux conditions de gravité. Cet effet est attendu pour l’ensemble des objets étudiés, avec des différences liées à leur géométrie.

En revanche, le coefficient de traînée calculé à partir des vitesses limites mesurées ne devrait pas varier de manière significative entre 1 g et 1,8 g. En effet, selon la théorie, la force de traînée dépend principalement de la vitesse et des propriétés du fluide, et non directement de la gravité. À la vitesse limite, l’équilibre des forces s’écrit :

$$P - \Pi = \frac{1}{2} \rho C_D S v_{\text{lim}}^2$$

où P est le poids de l’objet, Π la poussée d’Archimède, ρ la masse volumique du fluide, S la surface de référence, v_{lim} la vitesse limite et C_D le coefficient de traînée. Une augmentation de la gravité modifie le poids P et donc la valeur de la vitesse limite v_{lim} , mais n’implique pas nécessairement une modification du coefficient de traînée C_D , qui reste une propriété liée à la géométrie de l’objet et au régime d’écoulement.

Ces résultats attendus permettraient de montrer que l’augmentation de la gravité modifie principalement la vitesse de chute des objets, sans changer la nature de la friction fluide, et confirmeraient la validité des modèles classiques de traînée dans un contexte de gravité variable.

3.5. Résultat obtenu

Plusieurs chutes ont été réalisées pour chaque forme étudiée et pour chacune des deux conditions de gravité, en gravité normale (1 g) et en gravité augmentée (1,8 g). Pour chaque objet, quatre chutes ont été effectuées en condition de gravité normale et sept chutes en condition de gravité augmentée. Cette répétition des essais permet d’améliorer la fiabilité des mesures et de limiter l’influence des fluctuations expérimentales.

Pour chaque chute, la position verticale des objets a été mesurée en fonction du temps à partir des enregistrements vidéo. Les données obtenues, exprimées en millimètres et en secondes, ont été représentées sous forme de graphes position–temps. Afin de déterminer quantitativement la vitesse limite de chaque objet, une droite de tendance a été ajustée aux données position–temps pour chaque chute. Le coefficient directeur de cette droite est interprété comme la vitesse limite associée à la chute considérée.

Les graphes position–temps obtenus pour l’ensemble des formes et des conditions de gravité sont présentés ci-après. Pour chaque forme, deux graphes sont fournis : l’un correspondant aux chutes en gravité normale (1 g) et l’autre aux chutes en gravité augmentée (1,8 g).

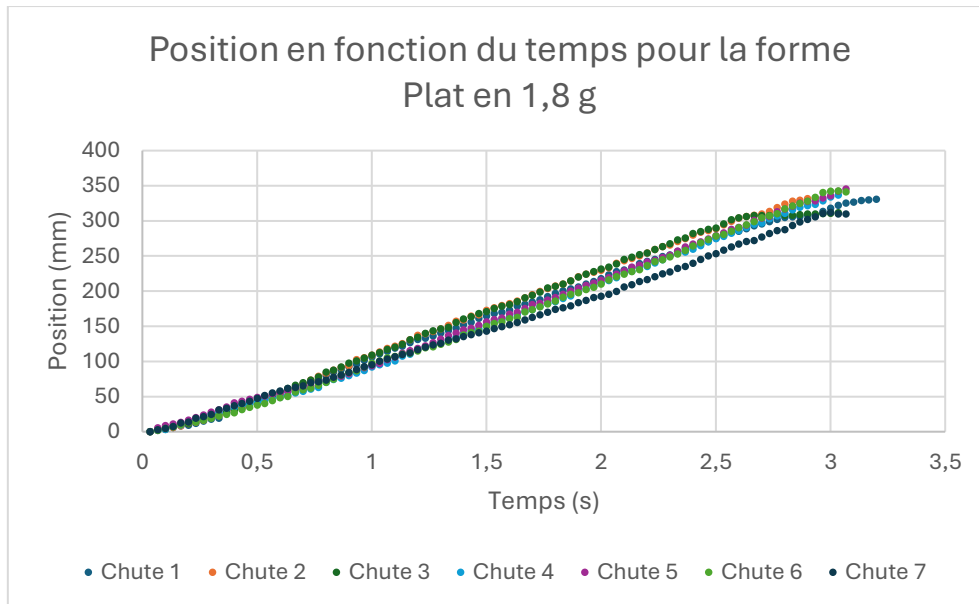


Figure 6

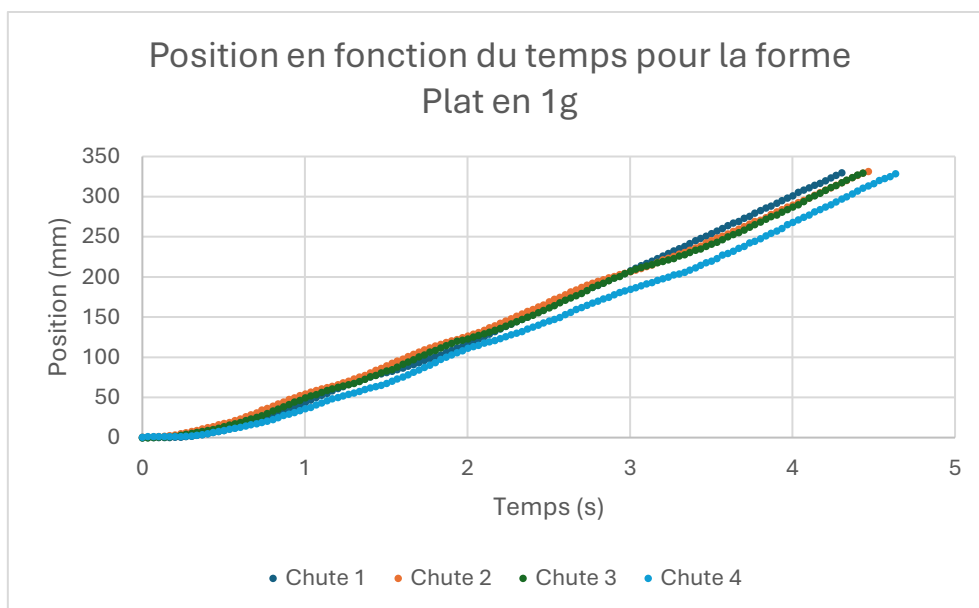


Figure 7

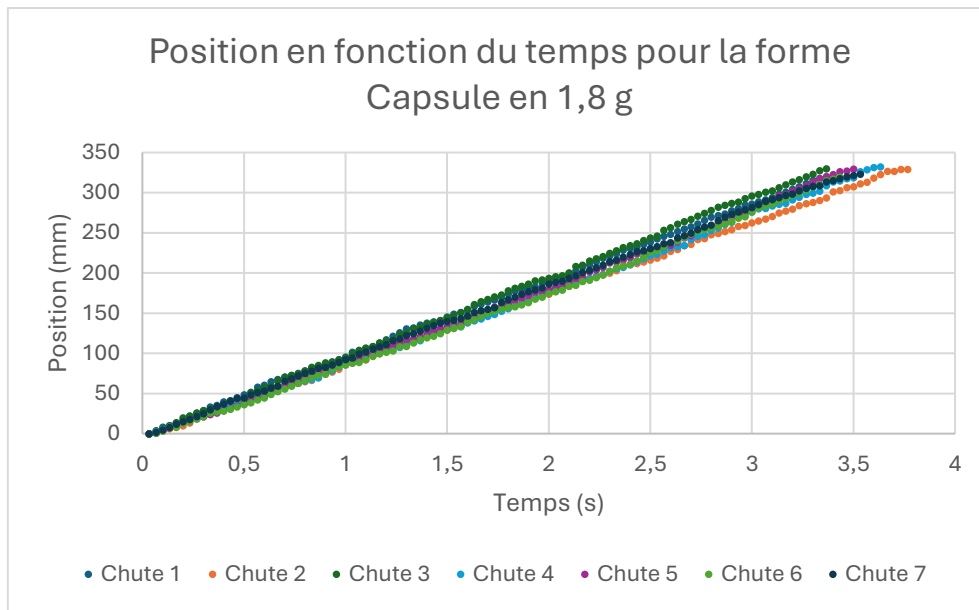


Figure 8

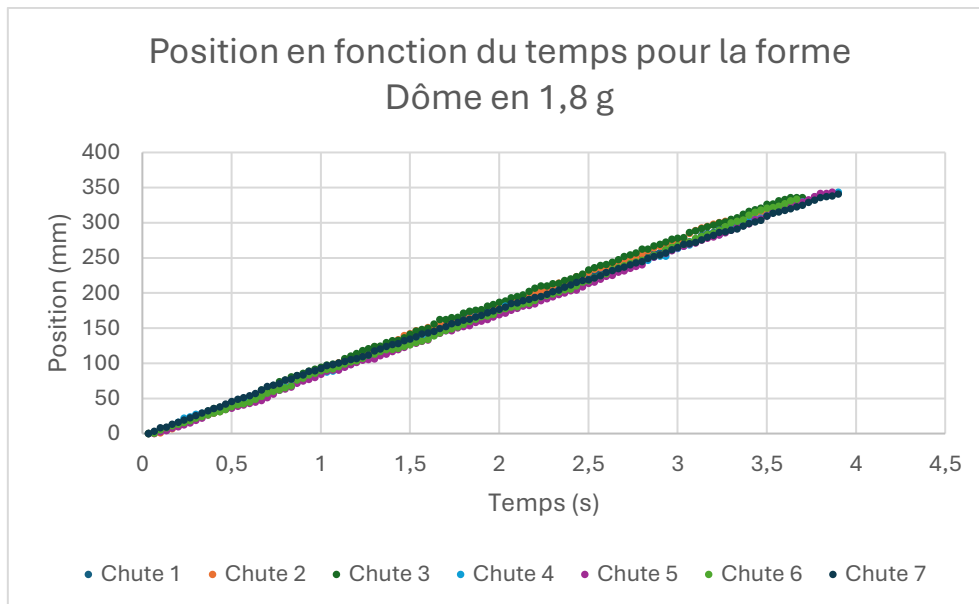


Figure 9

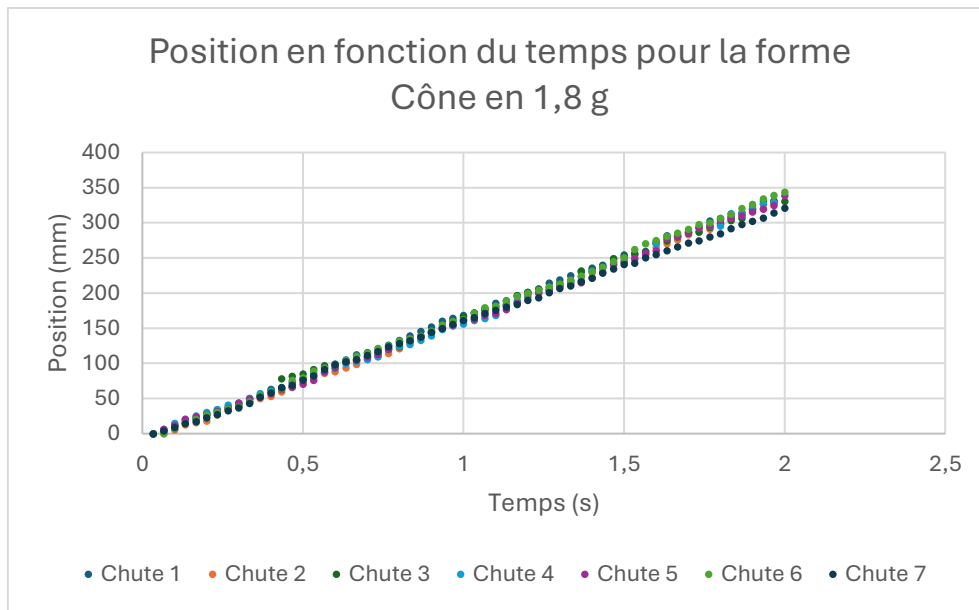


Figure 10

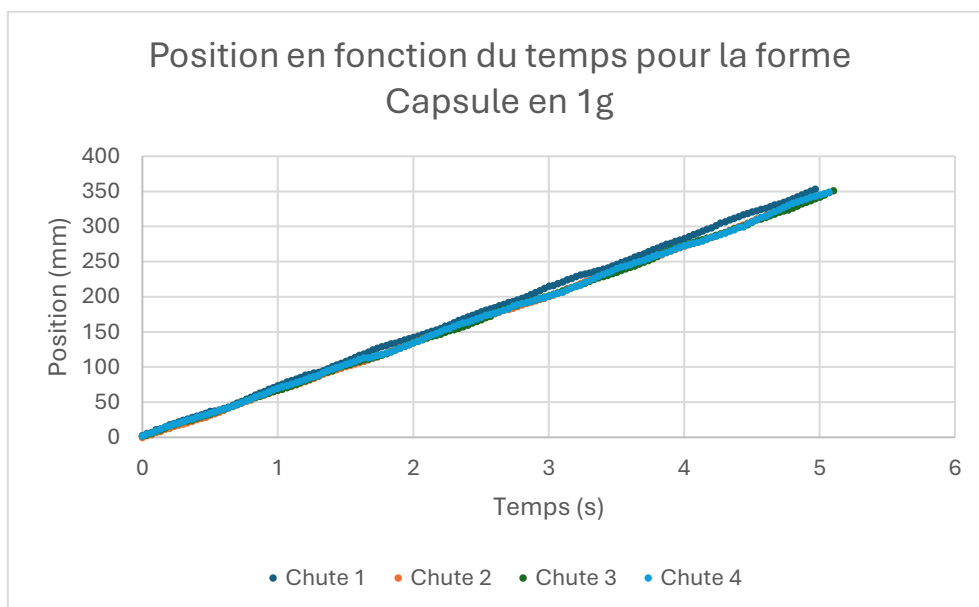


Figure 11

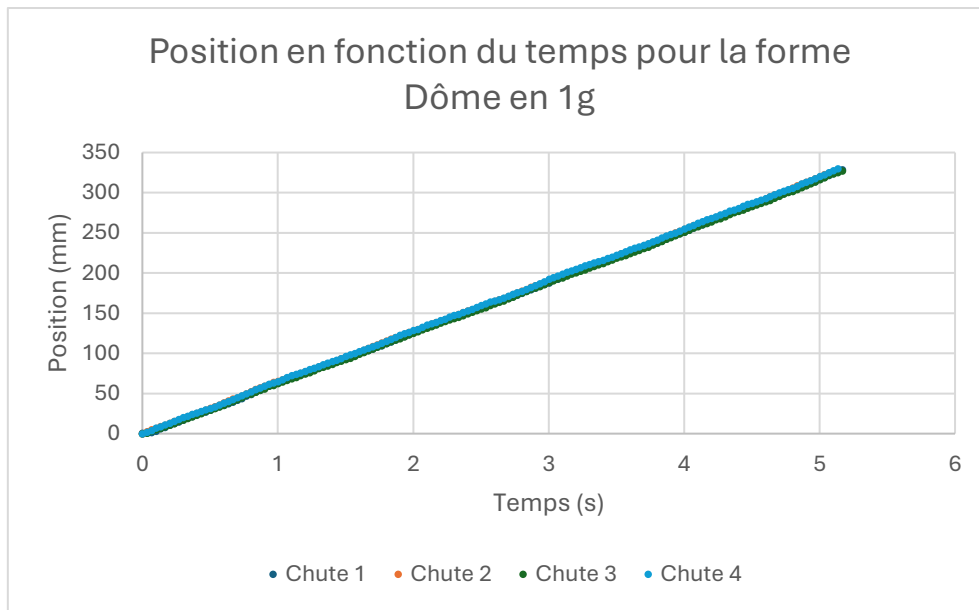


Figure 12

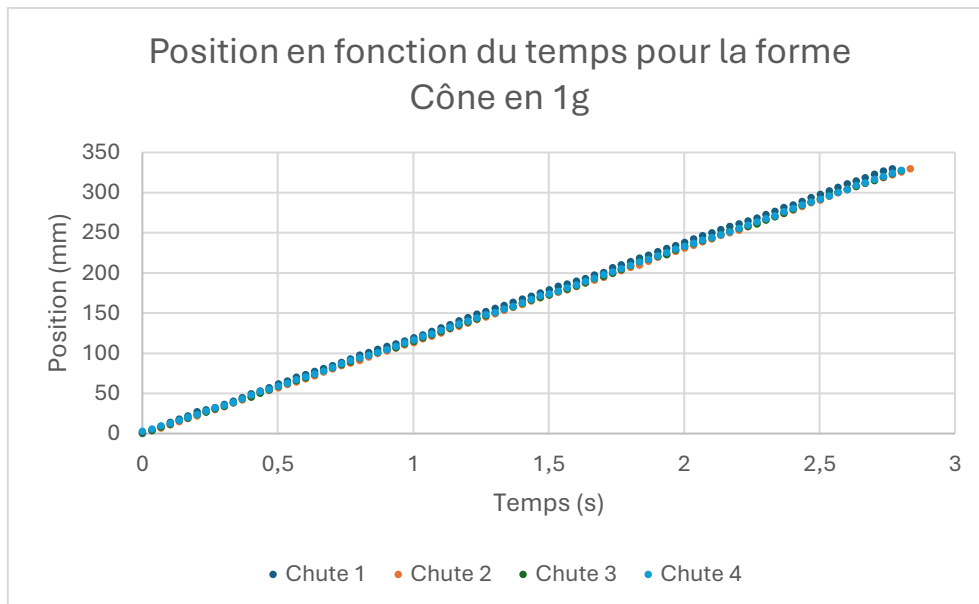


Figure 13

Ces graphes montrent une évolution quasi linéaire de la position en fonction du temps sur la majeure partie de la chute, indiquant que les objets se déplacent à une vitesse approximativement constante dans la glycérine. Pour l'ensemble des formes étudiées, la pente des courbes est plus élevée en gravité augmentée qu'en gravité normale, traduisant une augmentation de la vitesse de chute lorsque la gravité augmente.

Les vitesses limites extraites à partir des droites de tendance ont été moyennées pour chaque forme et chaque condition de gravité. Les valeurs obtenues sont récapitulées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : Vitesses limites moyennes et rapport entre conditions de gravité

Forme de l'objet	Vitesse limite moyenne en 1 g (mm/s)	Vitesse limite moyenne en 1,8 g (mm/s)	Rapport ($v_{1.8g}/v_{1g}$)
Plat	78,18	114,43	1,46
Capsule	68,83	93,70	1,36
Dôme	63,48	90,76	1,43
Cône	116,75	171,00	1,47

Les résultats présentés dans le tableau montrent une augmentation systématique de la vitesse limite lorsque la gravité passe de 1 g à 1,8 g, pour l'ensemble des formes étudiées. Le rapport entre les vitesses limites mesurées dans les deux conditions de gravité est compris entre 1,37 et 1,47, et reste du même ordre de grandeur pour toutes les géométries. L'ordre relatif des vitesses entre les différentes formes est conservé, ce qui indique que la géométrie de l'objet demeure un facteur déterminant du comportement en traînée.

À partir des vitesses limites mesurées, un coefficient de traînée effectif a été calculé pour chaque forme et pour chaque condition de gravité. À la vitesse limite, l'équilibre des forces s'écrit, dans le cas d'une traînée quadratique :

$$P - \Pi = \frac{1}{2} \rho C_D S v_{\text{lim}}^2$$

où P est le poids de l'objet, Π la poussée d'Archimède, ρ la masse volumique du fluide, S la surface de référence, v_{lim} la vitesse limite et C_D le coefficient de traînée.

Pour un même objet chutant dans le même fluide, les grandeurs ρ , S et $(m - \rho V)$ restent constantes. Il est alors possible de comparer directement les coefficients de traînée entre les deux conditions de gravité en utilisant le rapport :

$$\frac{C_{D,1.8g}}{C_{D,1g}} = \frac{1.8}{\left(\frac{v_{1.8g}}{v_{1g}}\right)^2}$$

Cette relation permet de déterminer l'évolution relative du coefficient de traînée sans avoir à connaître explicitement la surface de référence ni la masse volumique du fluide, celles-ci étant identiques pour un même objet dans les deux conditions expérimentales.

En appliquant cette expression aux vitesses expérimentales mesurées pour chaque forme, les rapports entre les coefficients de traînée obtenus en gravité augmentée (1,8 g) et en gravité normale (1 g) sont les suivants :

- **Forme plate** : $C_{D,1.8g}/C_{D,1g} \approx 0,84$
- **Capsule** : $C_{D,1.8g}/C_{D,1g} \approx 0,96$
- **Dôme** : $C_{D,1.8g}/C_{D,1g} \approx 0,88$
- **Cône** : $C_{D,1.8g}/C_{D,1g} \approx 0,84$

L'incertitude sur le rapport des coefficients de traînée est principalement liée à l'incertitude sur la détermination des vitesses limites. Ces vitesses sont obtenues à partir des pentes des droites de tendance ajustées aux courbes position–temps pour chaque chute. Pour une forme donnée et une condition de gravité donnée, l'incertitude relative sur la vitesse limite peut être estimée par :

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\sigma_v}{\bar{v}}$$

où $\bar{v}$ est la vitesse limite moyenne et σ_v l'écart-type calculé à partir des différentes chutes.

Le coefficient de traînée effectif étant proportionnel à l'inverse du carré de la vitesse limite, l'incertitude relative sur le coefficient de traînée s'écrit, à première approximation :

$$\frac{\Delta C_D}{C_D} \approx 2 \frac{\Delta v}{v}$$

Dans le cas du rapport des coefficients de traînée entre les deux conditions de gravité, l'incertitude relative sur le rapport des vitesses est obtenue par propagation des incertitudes :

$$\frac{\Delta(v_{1.8g}/v_{1g})}{(v_{1.8g}/v_{1g})} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{v,1.8g}}{v_{1.8g}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{v,1g}}{v_{1g}}\right)^2}$$

et l'incertitude relative sur le rapport des coefficients de traînée s'en déduit par :

$$\frac{\Delta(C_{D,1.8g}/C_{D,1g})}{(C_{D,1.8g}/C_{D,1g})} \approx 2 \frac{\Delta(v_{1.8g}/v_{1g})}{(v_{1.8g}/v_{1g})}$$

Les valeurs numériques des écarts-types mesurés pour chaque forme et chaque condition de gravité, ainsi que les incertitudes relatives déduites par propagation des erreurs, sont récapitulées dans le *Tableau 2 : Écarts-types et incertitudes relatives associées aux vitesses limites*. Les incertitudes relatives sur le rapport des vitesses limites $v_{1.8g}/v_{1g}$ sont comprises entre environ 2 % et 6,5 % selon la forme de l'objet,

tandis que les incertitudes relatives sur le rapport des coefficients de traînée $C_{D,1.8g}/C_{D,1g}$ s'échelonnent entre environ 4 % et 13 %. Ces valeurs traduisent une dispersion plus marquée des vitesses en gravité augmentée, en particulier pour les formes présentant une traînée élevée, et constituent la base quantitative de l'analyse de la significativité des variations observées sur les coefficients de traînée.

Tableau 2 : Écarts-types et incertitudes relatives associées aux vitesses limites

Forme de l'objet	Écart-type en 1 g (mm/s)	Écart-type en 1,8 g (mm/s)	Incertitude relative sur $v_{1.8g}/v_{1g}$ (%)	Incertitude relative sur $C_{D,1.8g}/C_{D,1g}$ (%)
Plat	3,20	5,86	≈ 6,5	≈ 13
Capsule	1,07	4,52	≈ 5,0	≈ 10
Dôme	0,13	2,01	≈ 2,0	≈ 4
Cône	0,96	4,04	≈ 2,5	≈ 5

3.6. Discussion

Les résultats obtenus montrent une augmentation systématique de la vitesse limite lorsque la gravité passe de 1 g à 1,8 g pour l'ensemble des formes étudiées. Cette augmentation est observée de manière cohérente sur les graphes position–temps et confirmée par les valeurs moyennes présentées dans le *Tableau 1 : Vitesses limites moyennes et rapport entre conditions de gravité*. L'ordre relatif des vitesses limites entre les différentes formes est conservé dans les deux conditions de gravité, ce qui indique que la géométrie de l'objet reste un facteur déterminant du comportement en traînée.

Les rapports entre les vitesses limites mesurées en 1,8 g et en 1 g sont compris entre environ 1,36 et 1,47 selon la forme de l'objet. Ces valeurs sont proches de la prédiction théorique $\sqrt{1,8} \approx 1,34$, attendue dans le cas d'une traînée principalement proportionnelle au carré de la vitesse. Cette observation suggère que le régime d'écoulement reste comparable entre les deux conditions de gravité et qu'aucun changement majeur de régime n'est induit par l'augmentation de la gravité dans les conditions expérimentales de cette étude.

L'analyse du coefficient de traînée effectif, réalisée à partir des vitesses limites mesurées, montre que le rapport $C_{D,1.8g}/C_{D,1g}$ est compris entre 0,84 et 0,96 selon la forme. Ces écarts indiquent une légère diminution apparente du coefficient de traînée en gravité augmentée. Toutefois, l'analyse des incertitudes associées aux vitesses limites, basée sur les écarts-types mesurés et présentée dans le *Les valeurs numériques des écarts-types mesurés pour chaque forme et chaque condition de gravité*, ainsi que les incertitudes relatives déduites par propagation des erreurs, sont récapitulées dans le *Tableau 2 : Écarts-types et incertitudes relatives associées aux vitesses limites*. Les incertitudes relatives sur le rapport des vitesses limites $v_{1.8g}/v_{1g}$ sont comprises entre environ 2 % et 6,5 % selon la forme de l'objet, tandis que les incertitudes relatives sur le

rapport des coefficients de traînée $C_{D,1.8g}/C_{D,1g}$ s'échelonnent entre environ 4 % et 13 %. Ces valeurs traduisent une dispersion plus marquée des vitesses en gravité augmentée, en particulier pour les formes présentant une traînée élevée, et constituent la base quantitative de l'analyse de la significativité des variations observées sur les coefficients de traînée.

Tableau 2 : Écarts-types et incertitudes relatives associées aux vitesses limites, montre que les incertitudes relatives sur le rapport des coefficients de traînée sont comprises entre environ 4 % et 13 % selon la forme.

Les variations observées sur le coefficient de traînée sont donc du même ordre de grandeur que les incertitudes expérimentales. Dans ces conditions, il n'est pas possible de conclure à une variation significative du coefficient de traînée en fonction de la gravité. Les écarts mesurés peuvent être attribués aux incertitudes liées à l'extraction des vitesses limites, aux fluctuations expérimentales, ainsi qu'à d'éventuelles instabilités de trajectoire ou d'orientation des objets lors de leur chute dans le fluide.

Ces résultats indiquent que l'augmentation de la gravité agit principalement sur la dynamique de chute des objets en modifiant la vitesse atteinte, sans affecter de manière mesurable la friction fluide intrinsèque. Ils sont en accord avec les modèles classiques de mécanique des fluides, selon lesquels la force de traînée dépend des propriétés du fluide, de la vitesse et de la géométrie de l'objet, mais pas directement de la gravité.

Enfin, cette étude met en évidence l'intérêt d'expériences en gravité variable pour dissocier les effets purement dynamiques liés à la gravité des propriétés intrinsèques de la traînée. Les résultats obtenus constituent une base pertinente pour des applications telles que l'étude des entrées atmosphériques de capsules spatiales en environnement de gravité renforcée, tout en soulignant l'importance d'une analyse fine des incertitudes pour interpréter correctement les écarts expérimentaux.

Conclusion

Le projet RP3F (*Radiation Pressure Fluid Friction Forces*), mené dans le cadre de la 69^e campagne de vols paraboliques du CNES, marque l'aboutissement de deux années d'investissement intense, allant de la définition théorique à la mise en œuvre expérimentale en conditions extrêmes. Ce projet nous a permis d'explorer deux domaines distincts de la physique — la propulsion spatiale par voile solaire et la mécanique des fluides en gravité variable — tout en nous confrontant aux exigences rigoureuses du secteur spatial.

La première expérience, consacrée à la force lumineuse, a été confrontée à d'importants défis techniques et réglementaires. Les strictes normes de sécurité à bord de l'Airbus A310 Zéro G ont limité la puissance des lasers utilisables, rendant la mesure directe de l'impulsion photonique difficilement perceptible face aux bruits expérimentaux résiduels. Néanmoins, ce volet a rempli son rôle de « Proof of Concept ». Nous avons pu valider la faisabilité du dispositif de suivi (tracking) et le comportement mécanique du système de largage des billes en impesanteur. Ce travail pose les bases technologiques nécessaires pour de futures tentatives qui pourraient bénéficier de lasers plus puissants ou de capteurs plus sensibles.

Le second volet, l'expérience sur les forces de frottement fluides, a quant à lui fourni des résultats quantitatifs probants. L'analyse comparée des chutes d'objets en gravité terrestre (1 g) et en hypergravité (1,8 g) a mis en évidence une augmentation systématique des vitesses limites, conforme aux prédictions théoriques. L'étude approfondie des coefficients de traînée C_D a montré que les variations observées restaient dans l'ordre de grandeur des incertitudes expérimentales (entre 4 et 13 %). Ces résultats nous permettent de conclure que l'augmentation de la gravité influence la dynamique de chute (via le poids apparent) sans modifier intrinsèquement la nature de la friction fluide ou le régime d'écoulement. Cette confirmation de la validité des modèles classiques en gravité renforcée apporte des éléments pertinents pour la modélisation des entrées atmosphériques sur des corps célestes massifs.

Au-delà des résultats scientifiques, cette campagne a constitué une expérience formatrice inestimable. La nécessité d'adapter nos systèmes aux contraintes de sécurité de Novespace, la gestion des imprévus techniques et le travail en équipe dans un environnement opérationnel dense nous ont permis de développer des compétences d'ingénierie concrètes. Ce projet restera une étape fondatrice de notre parcours, illustrant parfaitement comment la rigueur scientifique et l'ingéniosité technique peuvent s'allier pour explorer les frontières de la physique.

