

LE PENDULE QUI NOUS FAIT TOURNER LA TÊTE

Romane PERONNET, Louis BONNEFOND-FOREST

Lycée Antoine de Saint-Exupéry, Lyon 4^{ème}

encadrés par:

Alicja Arette-Hourquet

Linda Gostiaux



Septembre 2018 - Février 2019

TABLE DES MATIÈRES

Résumé:	3
Introduction	3
I) Premier modèle théorique	4
1. Principe d'étude d'un mouvement dans un référentiel galiléen	4
2. Choix du référentiel	4
3. Etude du mouvement dans le référentiel géocentrique	4
a) Position du problème	5
b) La force de Coriolis	5
c) Démonstration expérimentale de la force de Coriolis dans le cas du manège	5
d) Influence de la force de Coriolis dans le cas du pendule	6
e) Vitesse angulaire de rotation du plan d'oscillations du pendule	7
f) L'expérience de Léon Foucault	7
g) D'autres manifestations de la force de Coriolis dans le référentiel terrestre	7
II) Mise en oeuvre expérimentale	8
1. Construction du modèle illustrant le pendule de Foucault	8
2. L'installation de notre pendule: de la théorie aux contraintes techniques	8
a) Les conditions optimales pour l'étude du pendule de Foucault	8
b) Les contraintes techniques	9
3. Protocole expérimental pour le lâcher du pendule	10
4. Système de coordonnées	11
5. Premier enregistrement et premiers résultats (Lâcher N°1)	11
a) Première méthode d'enregistrement du mouvement (film du spot de face)	11
b) Premiers résultats	11
III) Prise en compte de l'influence de l'ellipse	13
1. Le problème de l'ellipse	13
2. Mise au point de deux méthodes d'enregistrement et de traitement de données	14
a) Méthode avec films du spot de face et de côté	14
b) Méthode avec appareil photo au plafond et logiciel de reconnaissance de formes	14
3. Résultats expérimentaux	15
a) Récapitulatif des différents lâchers présentés	15
b) Résultats du lâcher N°2 (pointages)	15
c) Résultats du lâcher N°3 et lâcher N°4 (reconnaissance des formes)	17
4. Conclusion sur nos résultats expérimentaux	18
V) La danse du pendule	18
Conclusion	19
Bibliographie	20
Remerciements	20
Annexes	21

Annexe 1: Installation du pendule	21
Annexe 2: Résultats obtenus avec une longueur du pendule de 12 m	22
Annexe 3: Exploitation du film du plafond et explication de la méthode	24
Annexe 4: Les références artistiques	27

Résumé:

Dans ce travail, nous nous intéressons au pendule de Foucault et à son fonctionnement. Nous en avons donc installé un dans le gymnase de notre lycée, grâce à la collaboration de M. Eyraud, PRofesseur AGRégé (PRAG) à l'Ecole Normale Supérieure de Lyon, et M. Gostiaux, chercheur à l'Ecole Centrale de Lyon. Après avoir étudié des œuvres plastiques en lien avec le Pendule, nous avons réalisé notre propre film avec un danseur, illustrant les forces qui agissent sur le Pendule. Nous avons ensuite réalisé une étude théorique, puis expérimentale de la déviation du pendule. La méthode expérimentale consistait à effectuer une série de pointages de positions sur une vidéo, puis à réaliser un traitement de données. Un écart entre le modèle théorique et les résultats expérimentaux nous a amenés à approfondir nos connaissances et prendre en compte le mouvement elliptique du Pendule. Nous avons alors mis au point deux nouveaux protocoles expérimentaux et réalisé de nouvelles expériences avec des résultats plus conformes à nos attentes.

Introduction

Si la rotation de la Terre autour de son axe est connue depuis les travaux de Copernic, elle n'avait presque jamais été démontrée expérimentalement [1]. En effet, il est très difficile de s'en rendre compte sans sortir du référentiel terrestre.

C'est Léon Foucault en 1851, qui a permis de rendre perceptible pour tous cette rotation de la Terre grâce à son pendule. Son idée consistait à construire un pendule simple de grande dimension. Lancé sans vitesse initiale, ce pendule se décale progressivement de son plan d'oscillation initial, du fait de la rotation de la Terre.

Nous avons été attirés par ce sujet, car il s'agit d'un sujet complexe, qui permettrait d'aboutir à de nombreuses expériences toutes enrichissantes. De plus, nous étions motivés à l'idée de pouvoir participer à la construction d'un pendule de Foucault au sein de notre lycée.

Nous avons donc commencé notre travail dans le cadre de nos Travaux Pratiques Encadrés couplant la Physique et les Arts (en particulier la danse). Nous l'avons approfondi et poursuivi dans le cadre de l'Atelier "Arts et Sciences" de notre lycée. Grâce à l'Atelier, nous avons en particulier pu bénéficier de la collaboration de M. Gostiaux, chercheur à l'Ecole Centrale de Lyon, et M. Eyraud, PRAG à l'Ecole Normale Supérieure de Lyon.

Notre objectif a été d'installer un Pendule de Foucault dans notre lycée afin de faire des expériences quantitatives et de comparer les résultats avec la théorie. Nous avons aussi fait un travail artistique autour de la danse, grâce à un danseur contemporain, inscrit dans la filière Technique de la Musique et de la Danse dans notre lycée, ainsi que sa professeure, Mme Auger.

Dans ce mémoire, nous commençons par exposer le modèle théorique permettant d'expliquer la déviation du pendule. Nous décrivons ensuite notre démarche expérimentale, et donnons nos premiers résultats, qui présentent des écarts par rapport au modèle théorique.

Nous exposons ensuite un deuxième modèle théorique, plus élaboré, prenant en compte le mouvement elliptique du Pendule. Nous décrivons alors la mise au point d'une nouvelle série d'expériences, basée sur ce modèle. Ces expériences nous permettent de réduire en grande partie l'écart entre les résultats expérimentaux et la théorie.

Nous finissons par une dimension artistique, en décrivant les oeuvres artistiques en lien avec le Pendule et le film du danseur que nous avons réalisé.

1) Premier modèle théorique

1. Principe d'étude d'un mouvement dans un référentiel galiléen

Le pendule de Foucault correspond au modèle d'un pendule simple : il s'agit d'une masse ponctuelle fixée à l'extrémité d'un fil sans masse, inextensible et sans raideur, qui oscille sous l'effet de la pesanteur.

L'étude théorique du pendule de Foucault, comme celle de tout corps en mouvement en mécanique, se fait grâce à la deuxième loi de Newton. D'après cette loi, dans un référentiel galiléen, la somme vectorielle des forces extérieures appliquées à un objet est égale au produit de la masse de l'objet par le vecteur accélération de son centre d'inertie, soit : $\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$ (éq. 1) avec $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$.

Nous devons donc nous poser la question de savoir dans quel référentiel nous allons étudier le pendule et si ce référentiel est galiléen.

2. Choix du référentiel

Un référentiel est un solide choisi comme objet de référence pour l'étude du mouvement. On peut le modéliser par une origine fixe et un système de trois axes. Un référentiel galiléen (ou inertiel) est un référentiel dans lequel le principe d'inertie est respecté. Ainsi, tout référentiel qui tourne, ralentit ou accélère, par rapport à un référentiel galiléen n'est pas un référentiel galiléen.

Nous allons étudier successivement le mouvement du pendule dans le référentiel géocentrique puis terrestre. Comme durant notre expérience on peut négliger la rotation du centre de la Terre par rapport au centre du Soleil, le référentiel géocentrique pourra être considéré comme étant galiléen.

Quant au référentiel terrestre, on ne pourra pas le considérer comme galiléen pour l'étude du Pendule de Foucault, car notre but est justement de montrer la rotation de la Terre sur elle-même.

3. Etude du mouvement dans le référentiel géocentrique

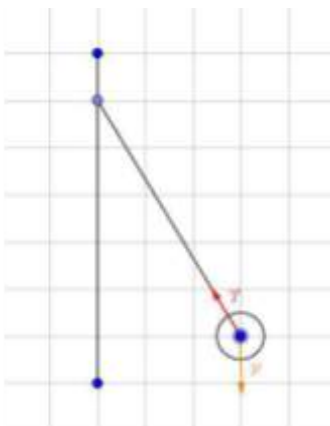


Fig 3: Les forces

Pour simplifier, nous commençons l'étude du pendule dans le référentiel géocentrique, en nous plaçant au Pôle Nord (Fig 2)

Si on néglige les frottements de l'air, le pendule est soumis à deux forces : le poids $\vec{P} = m\vec{g}$ et la tension du fil \vec{T} (Fig 3)

D'après la deuxième loi Newton (éq. 1), on a donc ici

$$\vec{T} + \vec{P} = m \times \vec{a} \quad (\text{éq. 2})$$

Les deux forces se trouvant dans le plan contenant le fil et la verticale, le vecteur accélération se trouve aussi dans ce plan. Si le pendule est lancé sans vitesse initiale, il va donc rester dans ce même plan durant toute l'expérience. Ainsi le pendule gardera un plan d'oscillation fixe dans le référentiel géocentrique considéré comme galiléen.

Par contre la Terre tournera "sous le pendule", et donc vu depuis la Terre, nous aurons l'impression que le plan d'oscillation du pendule tourne.

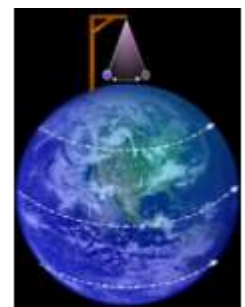


Fig 2: Pendule au Pôle Nord [3]

Par ailleurs la résolution de l'équation du mouvement issue de l'équation (2) montre que l'écart angulaire $\alpha(t)$, c'est-à-dire l'angle entre la verticale et le fil du pendule varie de façon sinusoïdale avec le temps avec une période $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$. Dans notre cas, la longueur entre l'attache et le centre de la boule, mesurée au télémètre, est de 5,6 m, ce qui donne avec $g = 9,81\text{m.s}^{-2}$ une période de 4,7 s.

4. Etude du mouvement dans le référentiel terrestre

a) Position du problème

Cependant, expérimentalement, nous pouvons observer le pendule seulement dans le référentiel terrestre, et ce dernier est un référentiel non galiléen, qu'on notera \mathcal{R}' . Ce référentiel est en mouvement de rotation à vitesse constante par rapport à un référentiel galiléen, ici le référentiel géocentrique, noté \mathcal{R} . La deuxième loi de Newton peut alors être adaptée à ce référentiel non galiléen à condition d'ajouter deux forces fictives (ou forces d'inertie) à la somme des forces extérieures, dues au calcul du vecteur accélération dans un référentiel non galiléen, soit :

$$\Sigma \vec{F}_{ext} + \vec{F}_c + \vec{F}_e = m\vec{a} \quad (\text{éq. 3})$$

\vec{F}_c correspond à la force d'inertie de Coriolis, et \vec{F}_e à la force d'inertie d'entraînement.

La force d'inertie d'entraînement correspond à cette "force centrifuge" qui nous expulse à l'extérieur dans un manège en mouvement. Dans notre cas, l'influence de \vec{F}_e est déjà prise en compte dans l'expression de \vec{g} . Dans notre étude, nous prendrons donc en compte seulement la force de Coriolis.

b) La force de Coriolis

La force de CORIOLIS se définit par l'expression: $\vec{F}_c = 2m\vec{v} \wedge \vec{\Omega}$ (éq. 4)

- \vec{v} correspond à la vitesse de déplacement du centre d'inertie du pendule dans le référentiel terrestre
- $\vec{\Omega}$ est le vecteur de rotation du référentiel d'étude \mathcal{R}' (non galiléen) par rapport à un référentiel galiléen considéré comme fixe. Il est dirigé suivant l'axe de rotation de \mathcal{R}' en respectant la règle du tire-bouchon.

La force de Coriolis n'apparaît donc que si l'objet est en mouvement dans le référentiel tournant (\vec{v} non nul) et elle est en même temps perpendiculaire à \vec{v} et à $\vec{\Omega}$.

c) Démonstration expérimentale de la force de Coriolis dans le cas du manège

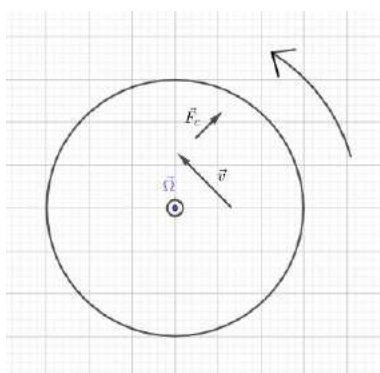


Fig 4: Schéma expliquant l'orientation de la force de Coriolis dans le cas du manège

Afin d'illustrer expérimentalement l'influence de la force de Coriolis, nous nous sommes rendus au carrousel du Parc de la Tête d'Or à Lyon, et nous avons filmé le lancement d'une balle entre deux personnes se trouvant sur le carrousel, depuis deux caméras : une première caméra, petite, fixée sur le ventre de la personne se trouvant sur le carrousel et une autre tenue par une personne immobile placée à l'extérieur du carrousel. Lors des échanges de balle, nous avons pu remarquer que la personne qui filmait sur le carrousel avait besoin d'écartier les bras pour réceptionner la balle, car cette dernière dérivait vers l'extérieur du manège. Cependant, la personne qui filmait depuis l'extérieur du manège, et qui n'était donc pas en mouvement, n'avait pas conscience de ce déplacement, car pour elle, la balle suivait une trajectoire rectiligne. Vous pouvez voir ces vidéos à l'adresse suivante :

<https://youtu.be/PbpbkHoLCdtg>

Essayons de comprendre ce qu'il se passe en faisant l'analyse du mouvement dans le référentiel tournant \mathcal{R}' , non galiléen lié au manège. On appelle \mathcal{R} le référentiel terrestre qui pour cette expérience peut être considéré comme galiléen (expérience de courte durée).

Ici, le vecteur $\vec{\Omega}$ de rotation du référentiel \mathcal{R}' par rapport à \mathcal{R} , est orienté comme sur la Fig. 4. Donc dans le référentiel du manège, le ballon est soumis à la force de Coriolis donnée par la relation $\vec{F}_c = 2m\vec{v} \wedge \vec{\Omega}$ et donc orientée vers l'extérieur. Le ballon est ainsi dévié vers l'extérieur du manège, comme nous l'avons vu expérimentalement.

d) Influence de la force de Coriolis dans le cas du pendule

Revenons maintenant à l'étude du pendule dans le référentiel terrestre, les deux référentiels à considérer ici sont le référentiel terrestre \mathcal{R}' non galiléen et le référentiel géocentrique \mathcal{R} , galiléen. Le vecteur rotation $\vec{\Omega}$ est dirigé suivant l'axe de rotation de la Terre, et orienté vers le Nord (voir Fig.5), et a comme valeur : $\|\vec{\Omega}\| = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{24 \times 3600} = 7,3 \times 10^{-5} \text{ rad.s}^{-1}$

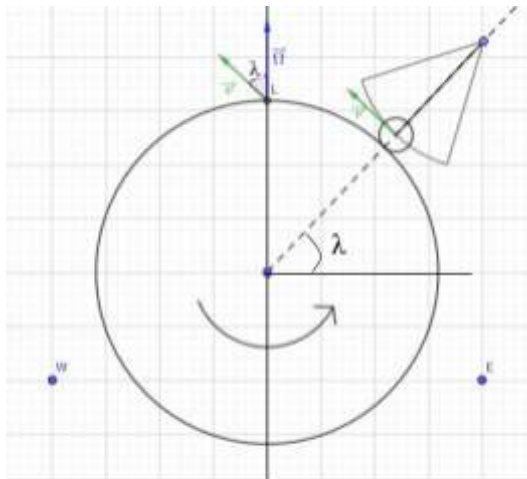


Fig 5: Explication du sens de la force de Coriolis

Imaginons pour simplifier que nous faisons initialement osciller le pendule dans le plan nord-sud. Les vecteurs \vec{v} et $\vec{\Omega}$ sont alors orientés comme sur la Figure 5 et λ correspond à l'angle entre \vec{v} et $\vec{\Omega}$, soit à la latitude du lieu.

D'après la règle de la main droite, lorsque le pendule se déplace vers le Nord, la force de Coriolis donnée par $\vec{F}_c = 2m\vec{v} \wedge \vec{\Omega}$ sera dirigée vers l'Est, et aura pour valeur $F_c = 2mv \times \Omega \times \sin(\lambda)$. Inversement, lorsque le pendule se déplacera vers le Sud, la force de Coriolis sera dirigée vers l'Ouest.

Sur la Figure 6, nous avons représenté le vecteur vitesse du centre du pendule et la force de Coriolis lors de l'aller et du retour du pendule. La vitesse de rotation de la Terre a été largement exagérée pour rendre le schéma lisible.

Notons que la force de Coriolis est toujours perpendiculaire à \vec{v} et plus élevée au centre, car la vitesse de déplacement du pendule est alors plus élevée. Comme le montre la Figure 6, la force de Coriolis aura pour effet le déplacement du plan d'oscillation dans le sens horaire.

Ci-après nous avons représenté, grâce aux simulations en ligne [4],[5] (références bibliographiques) l'allure de la trajectoire du pendule dans le référentiel terrestre dans l'hémisphère Nord. De nouveau sur la simulation, la vitesse de rotation de la Terre est très exagérée pour que le mouvement soit visible.

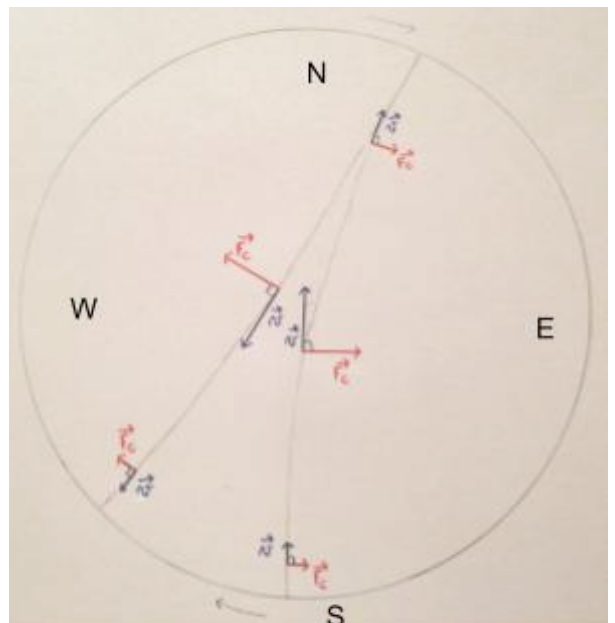


Fig 6: Explication de la déviation du plan d'oscillation du pendule dans l'hémisphère Nord

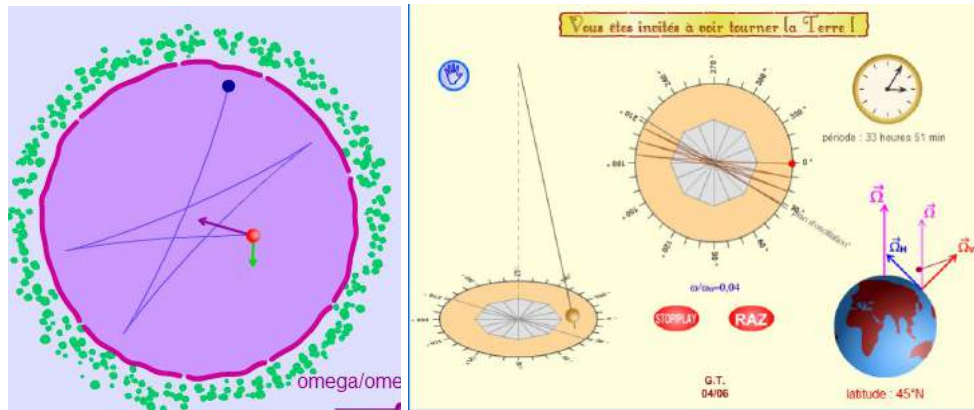


Fig 7: Trajectoire du centre d'inertie du pendule dans le référentiel terrestre

e) Vitesse angulaire de rotation du plan d'oscillations du pendule

Reste à se demander quelle est la vitesse angulaire de rotation du plan d'oscillation du pendule notée ω_{th} , c'est à dire le nombre de radians dont tourne le plan d'oscillation à chaque seconde.

Si le pendule est placé au pôle nord (voir Fig. 2), on imagine aisément qu'il lui faudra 24 heures pour tourner de 2π rad, donc la vitesse angulaire de rotation du plan d'oscillation du pendule est alors égale à $\omega_{th} = \frac{2\pi}{T} = 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ rad.s}^{-1}$.

On conçoit qu'à la latitude λ , où la force de Coriolis est plus faible car sa norme ne vaut plus $2mv \times \Omega$ mais $2mv \times \Omega \times \sin(\lambda)$, cette vitesse angulaire soit plus faible. On montre en effet que la période de rotation est alors $T' = \frac{24 \times 3600}{\sin(\lambda)}$, soit pour Lyon avec $\lambda = 45,76^\circ$, $T' = 1,22 \cdot 10^5 \text{ s} = 33,94 \text{ h}$.

Nous obtenons donc pour Lyon $\omega_{th} = \frac{2\pi}{T'} = 5,2 \cdot 10^{-5} \text{ rad.s}^{-1}$. En 10 minutes, l'angle devrait donc changer de $(5,2 \cdot 10^{-5} \times 60) \times 10 = 0,0312 \text{ rad}$, soit $0,0312 \times \frac{180}{\pi} = 1,79^\circ$.

f) L'expérience de Léon Foucault

Léon Foucault a effectué plusieurs expériences afin de comprendre ce qu'il se passait. Il a tout d'abord construit un pendule de Foucault dans sa cave, avec une hauteur de 2 m. Puis il a réalisé une seconde expérience en présence des grands scientifiques de l'époque, à l'Observatoire de Paris, avec une longueur de fil de 11 m. Et enfin, il a décidé d'installer un pendule au Panthéon avec un fil de 67m de long, ainsi qu'une sphère de 28 kg, afin que tout le monde puisse venir voir "la Terre tourner". Le pendule de Foucault est d'ailleurs toujours installé au Panthéon à Paris aujourd'hui, et est ouvert au public. [2]

g) D'autres manifestations de la force de Coriolis dans le référentiel terrestre

La force de Coriolis est très faible à la surface de la Terre. Cela est dû au fait que la vitesse de rotation de la Terre est très faible ($\Omega = 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ rad.s}^{-1}$).

Nous pouvons évaluer son ordre de grandeur pour notre expérience avec un pendule d'une masse $m = 22 \text{ kg}$, évoluant à Lyon ($45,76^\circ$). La vitesse moyenne du pendule étant d'environ 1 m.s^{-1} (il parcourt environ 4 m en une période de 4,7s), nous avons:

$$F_c = 2mv \times \Omega \times \sin(\lambda) = 2 \times 22 \times 1 \times 5,2 \cdot 10^{-5} \times \sin(45,76) = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

Soit une force de Coriolis de l'ordre de 10^{-3} N , donc 10 fois moins que le poids d'une masse de 1,0 g. Pour que l'effet de la force de Coriolis soit visible, il faut donc des mouvements se déroulant sur une grande distance, ou pendant un temps long.

Historiquement, son influence a été mise en évidence pour la première fois par Reich en 1831, qui a étudié la déviation de 28 mm des objets lors de la chute dans un puits de mine de 158 m [6].

Elle se manifeste aussi dans les alizées (vents), les courants marins, elle influence les marées [7],[8], et les méandres des rivières [9].

Le génie de Foucault, c'est donc d'avoir trouvé une expérience qui cumule des déviations très petites pour les rendre visibles sur un temps grand et dans un espace réduit.

II) Mise en oeuvre expérimentale

1. Construction du modèle illustrant le pendule de Foucault



En premier lieu, nous avons décidé de fabriquer une maquette du pendule de Foucault afin de mieux illustrer comment le pendule peut rester dans un même plan alors que la Terre tourne. Nous avons donc construit, à l'aide d'une roue de vélo, d'un socle en métal, de trois morceaux de bois, et d'une vitre ronde en plexiglas, une maquette d'une assez grande hauteur pour que le phénomène du pendule soit observable facilement, mais pas trop non plus pour qu'elle soit facilement transportable.

Nous avons ensuite utilisé du fil de pêche et une boule relativement lourde, attachée en haut de la maquette, à travers un trou percé dans le plexiglas. Nous avons pensé à cette attache afin de diminuer les frottements, et pour que le pendule puisse osciller dans la direction qu'il souhaitait. Ainsi l'attache n'influencerait pas ses oscillations.

Fig 8: Première maquette du pendule

Pour faire marcher la maquette, nous lâchons le pendule sans vitesse initiale, puis nous faisons tourner la roue de vélo, qui représente la Terre "en-dessous" du pendule. Le pendule doit alors osciller dans un même plan malgré la rotation de la roue. Cependant, cette maquette avait un problème de jeu au niveau de la fixation au socle, et n'était donc pas très stable.



Fig 9: Nouvelle maquette

Ainsi, lorsque nous tournions la roue pour faire marcher la maquette, cette dernière ne tournait pas correctement et perturbait les oscillations du pendule, qui ne restaient pas dans le même plan.

Nous avons donc décidé de construire une nouvelle maquette plus stable. Pour cela, nous avons acheté un plateau à fromages rond en bois, ainsi qu'un roulement à billes. Sur ce montage, nous avons placé de nouveau nos morceaux de bois ainsi que la vitre en plexiglas, mais cette fois placés perpendiculairement au plateau pour éviter tout mouvement qui générerait l'expérience.

Ainsi, aucun paramètre ne peut alors perturber la rotation du plateau à fromage, qui est donc plus stable, et permet aux oscillations du pendule de bien rester dans un seul plan lorsqu'on le tourne. Notre maquette illustre donc correctement les mouvements du pendule de Foucault.

2. L'installation de notre pendule: de la théorie aux contraintes techniques

a) Les conditions optimales pour l'étude du pendule de Foucault

Voici les conditions optimales, que nous devons mettre en place pour étudier notre pendule le plus précisément possible.

Afin que les frottements fluides (de l'air) et solides soient négligeables devant le poids, il faut choisir un objet dense de forme sphérique ou cylindrique. La boule de 22 kilogrammes et de forme sphérique a été choisie pour cela. Il faut également veiller à l'attache du pendule afin de pouvoir réduire considérablement les frottements solides.

En outre, dès que le mouvement devient elliptique (ce qui peut arriver suite à un lancement avec vitesse initiale, des frottements, d'un manque de symétrie...), le pendule précède avec une vitesse angulaire donnée par l'éq 5. Il faut donc utiliser un pendule long expliquant ainsi la recherche du lieu avec la plus grande hauteur dans le lycée et le lancer sans vitesse initiale avec un fil qui est brûlé. Cette hauteur restait néanmoins faible. (se référer au paragraphe III.1)

b) Les contraintes techniques

Nous avons décidé, après plusieurs changements, d'installer notre pendule de Foucault dans le gymnase Roland Garros, au lycée Saint-Exupéry.

En effet, c'est dans ce gymnase que nous pouvions avoir la plus grande hauteur et donc la plus grande longueur pour notre pendule.

Nous pensions tout d'abord placer le pendule au milieu du gymnase, où il n'y a pas de terrain, afin que les ballons de volley ne le percutent pas. Mais nous avons eu quelques problèmes, car les poutres du gymnase sont des poutres porteuses, et nous ne pouvions donc pas les percer.

Nous avons donc modélisé le gymnase avec le logiciel Google Sketchup, pour une meilleure perception du lieu.

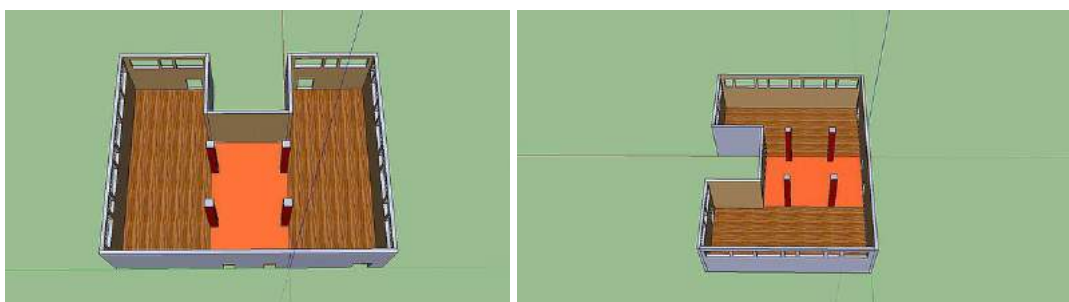


Figure 10: Représentations 3D du gymnase Roland-Garros

Nous avons soumis notre projet à Monsieur EYRAUD de l'Ecole Normale Supérieure de Lyon, rencontré lors de la fête de la science à l'ENS en octobre 2017, et celui-ci avec grand enthousiasme, nous a proposé son aide. Fort de son expérience dans un projet similaire, Monsieur EYRAUD nous a prêté la boule de plomb de 22 kg, et nous a aussi transmis les plans de l'accroche du pendule de Foucault, qui avait été réalisé à l'ENS. En effet, Monsieur LE TOURNEAU, ingénieur en réalisation mécanique de l'ENS avait réalisé une fixation pour le bâtiment de l'ENS de la rue Fontenay à Lyon. Ces plans de la fixation nous ont permis de découvrir un système très ingénieux, lequel permet de

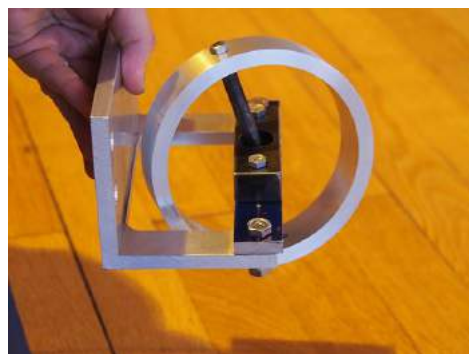


Fig 11: fixation finale réalisée par l'école centrale

réduire au maximum les frottements solides afin que le pendule puisse osciller dans n'importe quel plan, et qu'il n'ait pas un plan de préférence. Le point d'accroche dans notre gymnase étant différent, des modifications ont dû toutefois être apportées à la fixation par Messieurs GOSTIAUX et LE TOURNEAU.

L'école centrale, où travaille Monsieur GOSTIAUX, a accepté de nous fabriquer l'accroche, avec l'aide des plans fournis par Monsieur EYRAUD.

La fixation a alors été réalisée par M.TELALI et M.POIREL du Département de Mécanique de l'École Centrale en acier sur mesure, et dans des délais serrés afin de permettre une installation avant les vacances d'hiver soit le 10 février 2018.

On voit bien sur la figure 11 que le doigt en acier trempé, coincé dans la coupole, correspond à l'unique point de frottements, et limite considérablement ces derniers. Cette suspension permet au pendule d'avoir des oscillations libres, et de pouvoir se déplacer, sans aucune influence dessus.

Monsieur EYRAUD nous a proposé de nous prêter une sphère de plomb de 22 kilogrammes, qu'il a fait fabriquer avec la récupération d'anciens tuyaux. Il nous a également conseillé d'utiliser de la corde de piano de 6 millimètres afin que le fil soit suffisamment solide pour supporter un poids conséquent.

Le mercredi 7 février 2018, l'installation a eu lieu. Messieurs BOUZID et MANDARON opérateurs techniques du lycée SAINT EXUPÉRY ont monté alors un échafaudage afin d'atteindre le plafond pour fixer l'accroche. L'accroche est fixée sur le support en bois déjà existant. Après l'accroche de la fixation, la boule a été suspendue au fil placé sur la fixation, et ce en prenant bien soin de coincer la corde de piano par des vis dans l'embout.



Fig 12: Photo du mécanisme permettant de retenir le fil tenant la boule

Le pendule est alors lancé pour une première fois et cela est concluant. En effet il oscille bien et semble dévier dans le sens prévu. Nous pouvons ainsi commencer à l'étudier. Quelques photos de l'installation du pendule sont données dans l'annexe 1.

3. Protocole expérimental pour le lâcher du pendule



Fig 13 : Rapporteur

Cependant, l'étude du pendule de Foucault demandait des mesures quantitatives. Nous avons donc décidé de fabriquer un grand rapporteur de 1 m de rayon, afin de le placer sous notre pendule, et ainsi pouvoir mesurer sa déviation au cours du temps. Pour ce faire, après avoir découpé un carré de 2x2 mètres dans du PVC, nous avons tracé un cercle d'un rayon de 1 mètre. Puis nous avons gradué notre cercle tous les 10 degrés, ainsi que tous les degrés sur une partie, afin de mieux voir la progression du pendule lors de son lancement (il va donc s'agir de notre point de départ du pendule lors de nos expériences).

Notre rapporteur terminé, nous l'avons placé sous notre pendule, lorsque celui-ci était à l'arrêt, avec le centre du rapporteur sous la pointe de notre sphère.

Cependant, nous nous sommes vite rendus compte que nous avions des difficultés à lire précisément la position du pendule sur le rapporteur lorsqu'il était lancé, à cause des problèmes de parallaxe. Nous avons donc eu

l'idée de créer un pointeur, à l'aide d'une diode reliée à un boîtier où se trouvent les piles qui permettent de l'alimenter. Nous avons placé le tout sur la boule, la masse de la diode et des piles étant négligeable devant celle de la boule (22 kg).

Il nous fallait une diode laser qui puisse se placer sous la pointe de notre pendule, donc qui soit fine, afin de ne pas gêner ses oscillations, mais qui pourtant indique bien le centre de notre sphère. En effet, en oscillant, notre pendule effectue des rotations sur

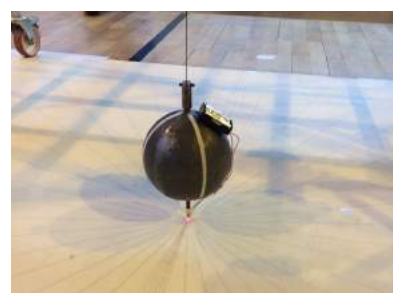


Fig 14 : Diode fixée sur la boule

lui-même. Cela ne gêne en rien ses oscillations et son sens de rotation, mais cela nous a obligé à trouver une solution pour que la lampe soit effectivement bien sous la pointe de la sphère. Une fois notre système de diode construit, nous avons dû le placer précisément sous la pointe de



Fig 15 : Lâcher du Pendule

Pour le lancement du pendule, nous avons réfléchi à la meilleure solution pour qu'il y ait le moins de forces et de perturbations données possibles. Ainsi nous avons décidé d'attacher le pendule à une ficelle. Au début nous tenions la ficelle à la main comme sur la figure 15, mais par la suite pour plus de stabilité nous l'avons attachée au mur de notre gymnase. Nous avons ensuite attendu que le pendule se stabilise, et qu'il n'y ait plus aucune force contenue dans le fil. Puis nous avons brûlé la ficelle à l'aide d'un briquet, afin de lancer le pendule.

4. Système de coordonnées

Théoriquement à Lyon, la vitesse angulaire de rotation du plan d'oscillation du pendule notée ω_{th} est de $5,2 \cdot 10^{-5} \text{ rad.s}^{-1}$ et le plan se déplace dans le sens anti-trigonométrique (horaire). Notre but est de vérifier cela expérimentalement. Nous avons donc eu

intérêt de nous placer en coordonnées polaires (r, θ) pour avoir un accès direct à $\omega = \frac{d\theta}{dt}$.

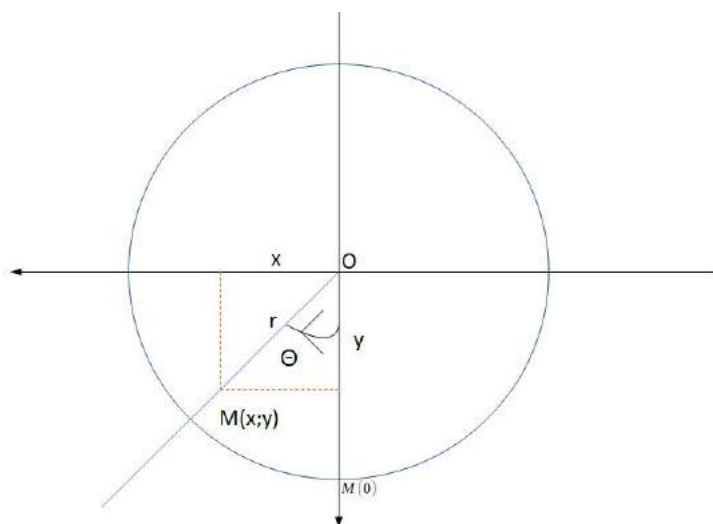


Fig 16: Les coordonnées polaires

Nous avons associé à notre rapporteur le repère de coordonnées (O, x, y) , avec O le centre du rapporteur, avec des axes Ox et Oy orientés comme sur la figure 16. Le pendule est initialement lancé suivant l'axe Oy dans le sens des y négatifs et à partir de la position $M(0)$. On note θ l'angle de rotation du plan d'oscillation du pendule et donc l'angle orienté entre Oy et OM. On note r la distance OM.

Avec notre choix de coordonnées, du fait de la rotation de la Terre, le plan du pendule devrait tourner dans le sens des θ croissants, avec une vitesse angulaire théorique positive $\omega_{th} = 5,2 \cdot 10^{-5} \text{ rad.s}^{-1}$.

5. Premier enregistrement et premiers résultats (Lâcher N°1)

a) Première méthode d'enregistrement du mouvement (film du spot de face)



Fig 17 : Emplacement de l'appareil

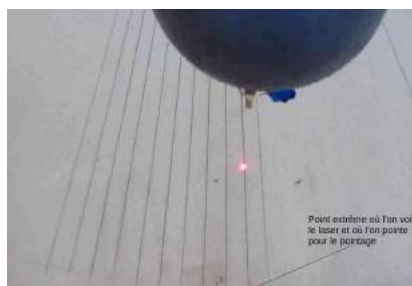
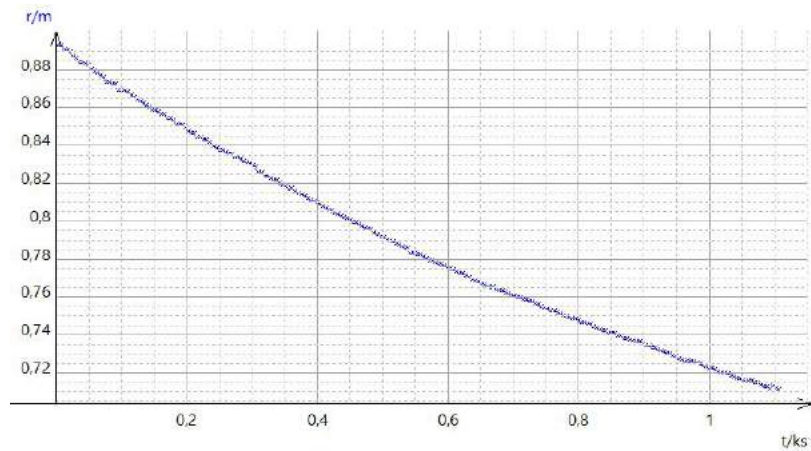


Fig 18 : Image donnée par l'appareil

Après plusieurs problèmes de conversion de vidéo, nous avons réalisé avec Aviméca un pointage afin de déterminer les coordonnées (x, y) de la position extrême du spot M. Nous en avons déduit les coordonnées polaires grâce aux relations: $\theta = \arctan(\frac{x}{y})$ et $r = \sqrt{x^2 + y^2}$

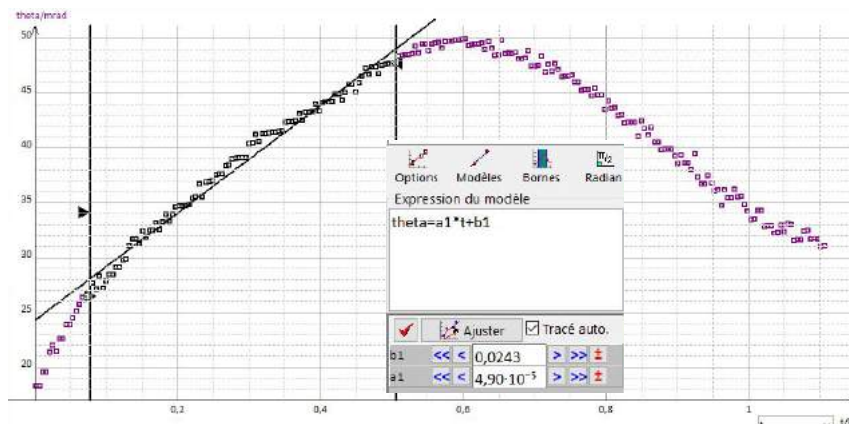
b) Premiers résultats

Nous avons tout d'abord tracé l'évolution de r en fonction du temps, et nous observons une décroissance lente et régulière : l'amortissement de notre pendule est faible, il y a donc peu de frottements.



Graph 1: Evolution de r en fonction du temps pour le Lâcher N°1

Nous avons ensuite tracé le graphe $\theta = f(t)$.



Graph 2: Evolution de θ en fonction du temps pour le lâcher N°1 (L=5,6 m)

On constate qu'entre 100 s et 500 s, la courbe est proche d'une droite avec un coefficient directeur de $4,9 \cdot 10^{-5} \text{ rad.s}^{-1}$, donc proche de la valeur théorique $\omega_{th} = 5,2 \cdot 10^{-5} \text{ rad.s}^{-1}$. Cependant on remarque que la valeur expérimentale de la vitesse de rotation du plan du pendule, (notée ω_{exp}), qui correspond au coefficient directeur de la tangente à la courbe, diminue au cours du temps et devient même négative. Le pendule ralentit donc sa rotation et finit même par rebrousser chemin. Par ailleurs ω_{exp} est aussi trop élevée au début de l'expérience ($1,2 \cdot 10^{-4} \text{ rad.s}^{-1}$).

Ces résultats ne correspondent donc pas vraiment à nos attentes, étant donné qu'on aurait dû obtenir une droite croissante de pente $5,2 \times 10^{-5} \text{ rad.s}^{-1}$. Nous avons réalisé à plusieurs reprises l'expérience en constatant toujours que la vitesse de rotation ne correspondait pas à celle attendue et qu'elle évoluait au cours de l'expérience. Nous avons alors essayé de comprendre quelle pouvait être l'origine de ces écarts.

Nous voulions vérifier si ce phénomène se produisait également avec une longueur de fil plus élevée. Nous avons pu le faire grâce au film réalisé avec notre rapporteur et notre diode, par M.Eyraud et Mme Clément à l'ENS, où la hauteur du plafond était de 12 m. Les détails de l'expérience et de la méthode de traitement de données se trouvent dans l'annexe 2. Nous observons que la courbe $\theta = f(t)$, bien que plus proche du modèle théorique, s'en écarte quand même.

Nous avons constaté durant les deux expériences que le pendule décrivait une ellipse qui était de plus en plus marquée. Plus l'ellipse était large, plus la rotation était perturbée. En consultant le livre que nous a fourni M.Eyraud [10], le site Techno-Sciences [11] ainsi qu'en regardant les résultats de

différentes personnes et scientifiques ayant fait l'expérience avec le pendule de Foucault, nous avons appris que la formation de l'ellipse pouvait modifier la vitesse de rotation du plan du pendule.

III) Prise en compte de l'influence de l'ellipse

1. Le problème de l'ellipse

Théoriquement (voir partie I. 3) le pendule lâché sans vitesse initiale devrait osciller dans un plan, sans former d'ellipse. Cependant il est difficile en pratique de lâcher le pendule sans aucune vitesse initiale. Par ailleurs, des forces horizontales parasites (courant d'air, frottements au niveau de la fixation, torsion de la corde de piano...) peuvent intervenir. D'après la théorie, le pendule a alors un mouvement elliptique. Comme l'a déjà montré Victor Puiseux [7] et comme le montre M.G. Olsson [8], lorsque le mouvement du pendule est elliptique, il apparaît un mouvement de précession de l'ellipse avec une vitesse angulaire:

$$\omega_{ell} = \frac{3}{8} \times \frac{a \times b}{L^2} \times \sqrt{\frac{g}{L}} \quad (\text{éq.5}) \quad \text{avec } a, \text{ le demi-grand axe de l'ellipse}$$

b, le demi-petit axe de l'ellipse
L, la longueur du pendule, ici 5,65 m
g, l'intensité de pesanteur, ici 9,81 m.s⁻¹

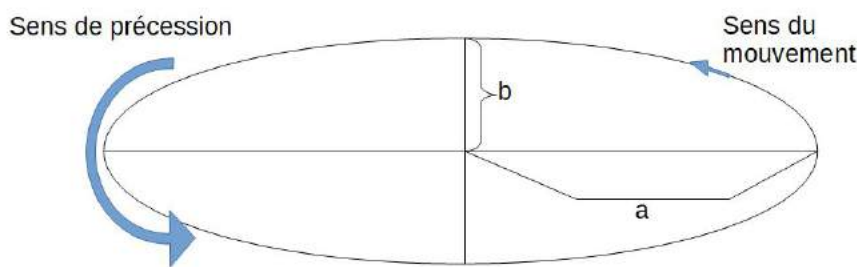


Fig 19: Précession de l'ellipse

Le sens de précession est le même que celui dans lequel l'ellipse est décrite, comme indiqué sur la figure ci-dessous: avec notre orientation des axes (voir Figure 16) $\omega_{ellipse}$ sera compté positivement si l'ellipse est décrite (et donc précesse) dans le sens indirect, et négativement sinon.

Ce mouvement de précession se superposera au mouvement de rotation du plan d'oscillation dû au mouvement de la Terre. Suivant le sens dans lequel l'ellipse est décrite, sa présence pourra artificiellement augmenter ou diminuer la vitesse de rotation du plan d'oscillation. Ceci permettrait d'expliquer le fait que la vitesse de rotation du plan d'oscillation du pendule ne corresponde pas à la valeur attendue et qu'elle varie durant l'expérience.

Afin d'évaluer l'importance relative de la précession du pendule due à l'ellipse par rapport à celle due à la rotation de la Terre, nous avons calculé $\omega_{ellipse}$ lorsque le pendule décrit une ellipse avec un demi petit axe b = 1 cm.

En premier lieu, pour notre pendule de 5,65 m de long, et de demi grand axe a = 1 m, on a :

$$\omega_{ellipse} = \frac{3}{8} \times \frac{1 \times 1 \cdot 10^{-2}}{(5,65)^2} \times \sqrt{\frac{9,81}{5,65}} = 1,55 \cdot 10^{-4} \text{ rad.s}^{-1}$$

Nous faisons alors le rapport $\frac{\omega_{ell}}{\omega_{th}} = \frac{1,55 \cdot 10^{-4}}{5,2 \cdot 10^{-5}} = 2,98$ soit près de 300%.

Pour le pendule de M. Eyraud, qui fait 12,5 m de long, avec toujours a = 1 m, on a :

$$\omega_{ellipse} = \frac{3}{8} \times \frac{1 \times 1 \cdot 10^{-2}}{(12,5)^2} \times \sqrt{\frac{9,81}{12,5}} = 2,13 \cdot 10^{-5} \text{ rad.s}^{-1} \quad \text{et} \quad \frac{\omega_{ell}}{\omega_{th}} = \frac{2,13 \cdot 10^{-5}}{5,2 \cdot 10^{-5}} = 0,4 \text{ soit } 40\%.$$

Pour le pendule du Panthéon, de 67 m de long, et de 6 m de diamètre, on a :

$$\omega_{ellipse} = \frac{3}{8} \times \frac{3 \times 1 \cdot 10^{-2}}{(67)^2} \times \sqrt{\frac{9,81}{67}} = 9,59 \cdot 10^{-7} \text{ rad.s}^{-1} \quad \text{et} \quad \frac{\omega_{ell}}{\omega_{th}} = \frac{9,59 \cdot 10^{-7}}{5,2 \cdot 10^{-5}} = 0,02 \text{ soit } 2\%.$$

Donc on en conclut que la longueur de notre pendule doit être très importante. En effet, si nous avons une ellipse, celle-ci va avoir une grande influence sur le mouvement de notre pendule, contrairement à celui du Panthéon ou de l'ENS. C'est pour cela qu'il est fondamental dans notre cas d'enlever la contribution de l'ellipse.

Ainsi pour enlever cette influence de l'ellipse et retrouver la seule influence de la rotation de la Terre, il faudra donc soustraire à la vitesse de rotation mesurée expérimentalement ω_{exp} , la vitesse de précession $\omega_{ellipse}$.

2. Mise au point de deux méthodes d'enregistrement et de traitement de données

Nous devons donc réaliser une expérience qui nous donne accès en même temps à ω_{exp} et $\omega_{ellipse}$ et cela tout au long du mouvement du pendule. Nous pourrions alors calculer la valeur de la vitesse de déviation corrigée $\omega_{corr} = \omega_{exp} - \omega_{ellipse}$, et la comparer à ω_{th} . Pour évaluer $\omega_{ellipse}$ nous devons connaître à chaque instant les deux demi-axes de l'ellipse, a et b , et pour évaluer $\omega_{exp} = \frac{d\theta}{dt}$ nous devons connaître à chaque instant θ , qui est l'angle de déviation du pendule. Nous devons donc trouver une méthode d'enregistrement permettant d'évaluer l'évolution au cours du temps de a , b et θ .

a) Méthode avec films du spot de face et de côté

Nous avons accès à a et à θ , grâce à l'enregistrement de face, en effet on sait que a correspond à r en coordonnées polaires. Pour connaître b , nous avons filmé avec un deuxième appareil photo le passage du spot au voisinage du centre du rapporteur.

Ensuite grâce à *Pymecavideo* (prenant en compte différents formats de vidéo) nous avons pointé les positions P_1 et P_2 des spots les plus proches du centre du rapporteur (voir *Fig 21*) à l'aller et au retour, en veillant à se mettre au centre de la marque du spot (sur l'axe des y).

Ensuite, nous avons calculé b en utilisant la formule: $b = \frac{y(P_2) - y(P_1)}{2}$.



Figure 20: Emplacement de l'appareil

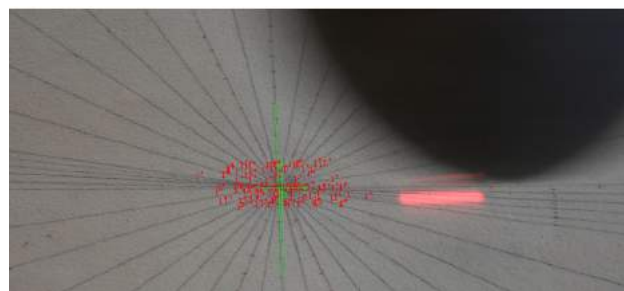


Figure 21: Pointage sur Pymecavideo

b) Méthode avec appareil photo au plafond et logiciel de reconnaissance de formes

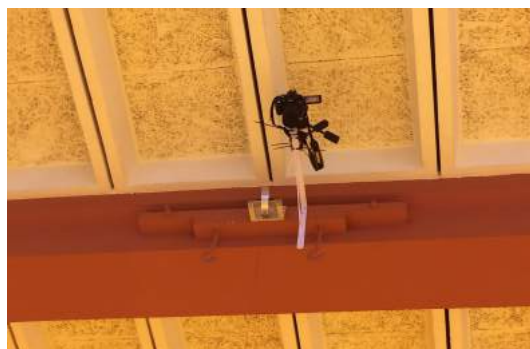


Fig 22: Emplacement de l'appareil fixé au plafond

Afin de diminuer les erreurs de parallaxe possibles, nous avons décidé de réaliser un film avec un appareil photo fixé au plafond, près du point d'attache du pendule, à la verticale de la boule du

pendule. M. Gostiaux nous a ensuite aidé à exploiter les images et à utiliser un algorithme de reconnaissance de forme, dont nous expliquons la méthode en détails dans l'annexe 3.

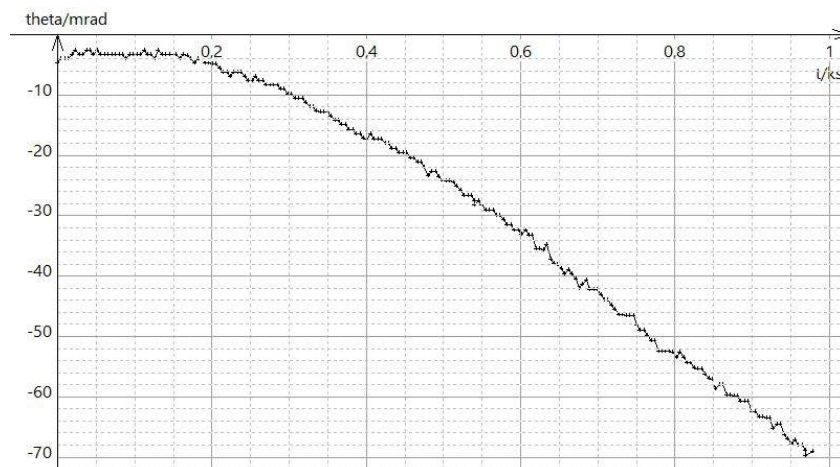
3. Résultats expérimentaux

a) Récapitulatif des différents lâchers présentés

N° du Lâcher	Date	Conditions de la vidéo	Durée du film	Traitements réalisés	Courbes obtenues	Calculs possibles
Lâcher 1	9/06/2018	de face	23 min	pointage face	$\theta(t), r(t)$	ω_{exp}
Lâcher 2	6/07/2018	de face et de côté	17 min	pointage face et côté	$\theta(t), b(t), r(t)$	$\omega_{exp}, \omega_{corr}$
Lâcher 3	6/07/2018	du plafond	14 min	reconnaissance de formes	$\theta(t), b(t), r(t)$	$\omega_{exp}, \omega_{corr}$
Lâcher 4	19/12/2018	du plafond	10 min	reconnaissances de formes	$\theta(t), b(t), r(t)$	$\omega_{exp}, \omega_{corr}$
Lâcher ENS	oct 2018	de face	20 min	pointage face	$\theta(t)$	ω_{exp}

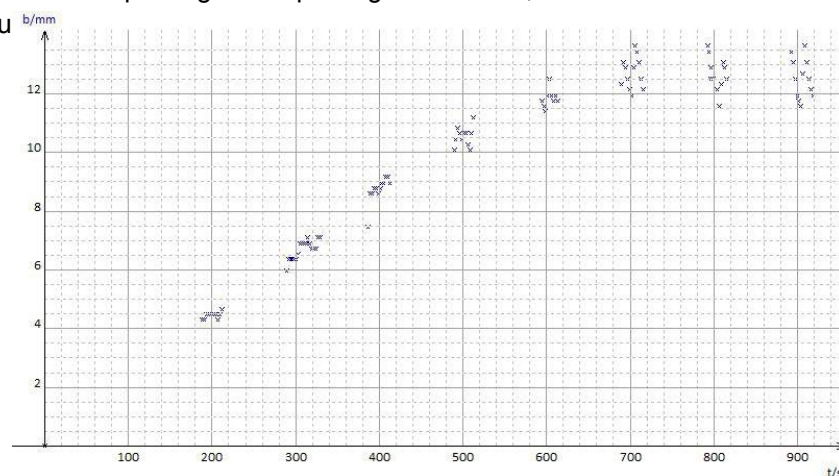
b) Résultats du lâcher N°2 (pointages)

De la manière analogue que celle utilisée pour le lâcher 1, nous avons obtenu l'évolution de $\theta = f(t)$ (voir Graph 3, ci-après). On constate ici que θ est négatif, en effet contrairement à ce qu'on avait d'habitude, le pendule est parti dans le sens direct durant le lâcher N°2.



Graph 3: Evolution de θ en fonction du temps pour le Lâcher N°2

A partir des résultats de pointages au passage du centre, nous avons obtenu l'évolution de b en fonction du temps.

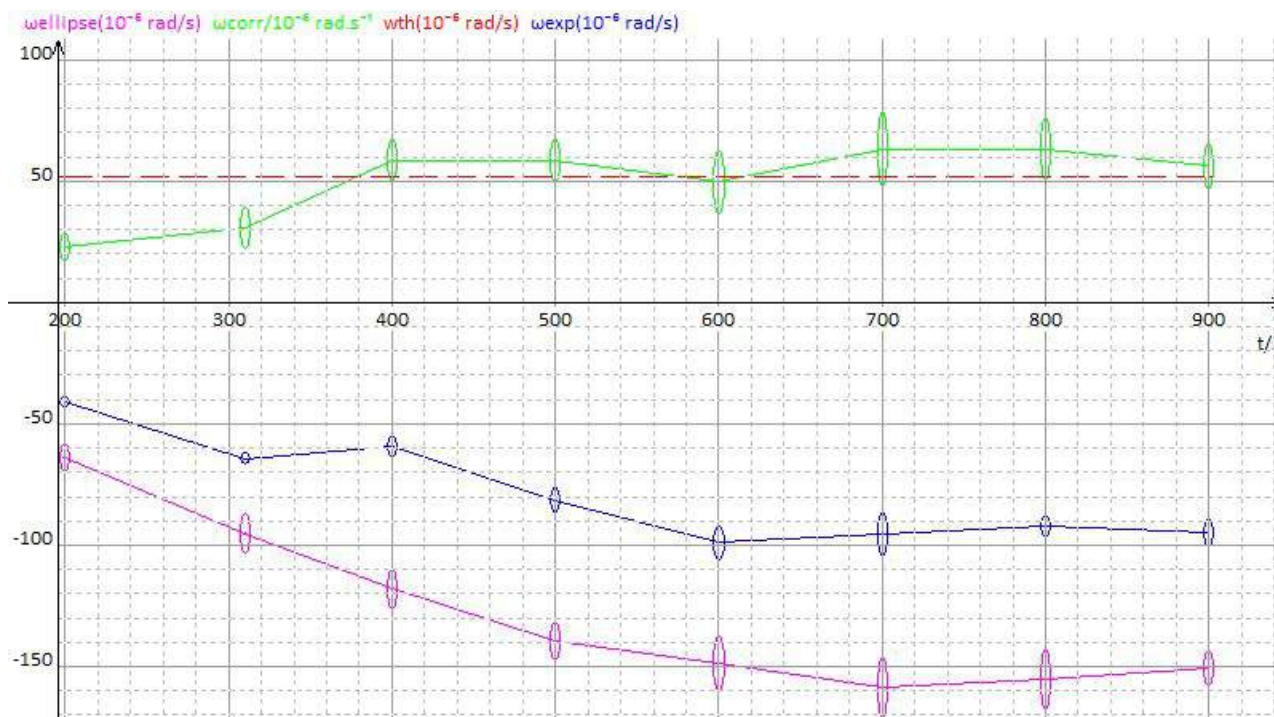


Graph 4: Evolution de b en fonction du temps pour le Lâcher N°2

Le traitement de données étant assez long, nous avons uniquement pris des séries de mesures autour de dates précises espacées dans le temps: 200 s, 310 s, 400 s, 500 s, 600 s, 700 s, 800 s et 900 s. Nous avons alors estimé b et son incertitude à partir du graphe. Parallèlement, nous avons cherché dans les résultats de l'enregistrement de face les valeurs de r, donc de a correspondant à ces dates.

Nous avons ensuite calculé la valeur de $\omega_{ellipse}$ en utilisant l'eq. 5. Durant l'expérience, nous avons constaté que l'ellipse était décrite dans le sens direct, ce qui fait que $\omega_{ellipse}$ doit être compté négativement.

A partir du graphe N°3, nous avons estimé ω_{exp} aux mêmes dates en modélisant la courbe localement par une droite. Nous avons enfin calculé la vitesse de rotation du pendule lorsqu'on enlève la contribution due à l'ellipse: $\omega_{corr} = \omega_{exp} - \omega_{ellipse}$. Voici le graphe correspondant à ces résultats.



Graph 5: Les vitesses de rotation du plan du pendule pour le Lâcher 2 :
en bleu la vitesse angulaire mesurée expérimentalement, en rouge la vitesse théorique, en vert
vitesse obtenue en enlevant la vitesse due à l'ellipse (violet)

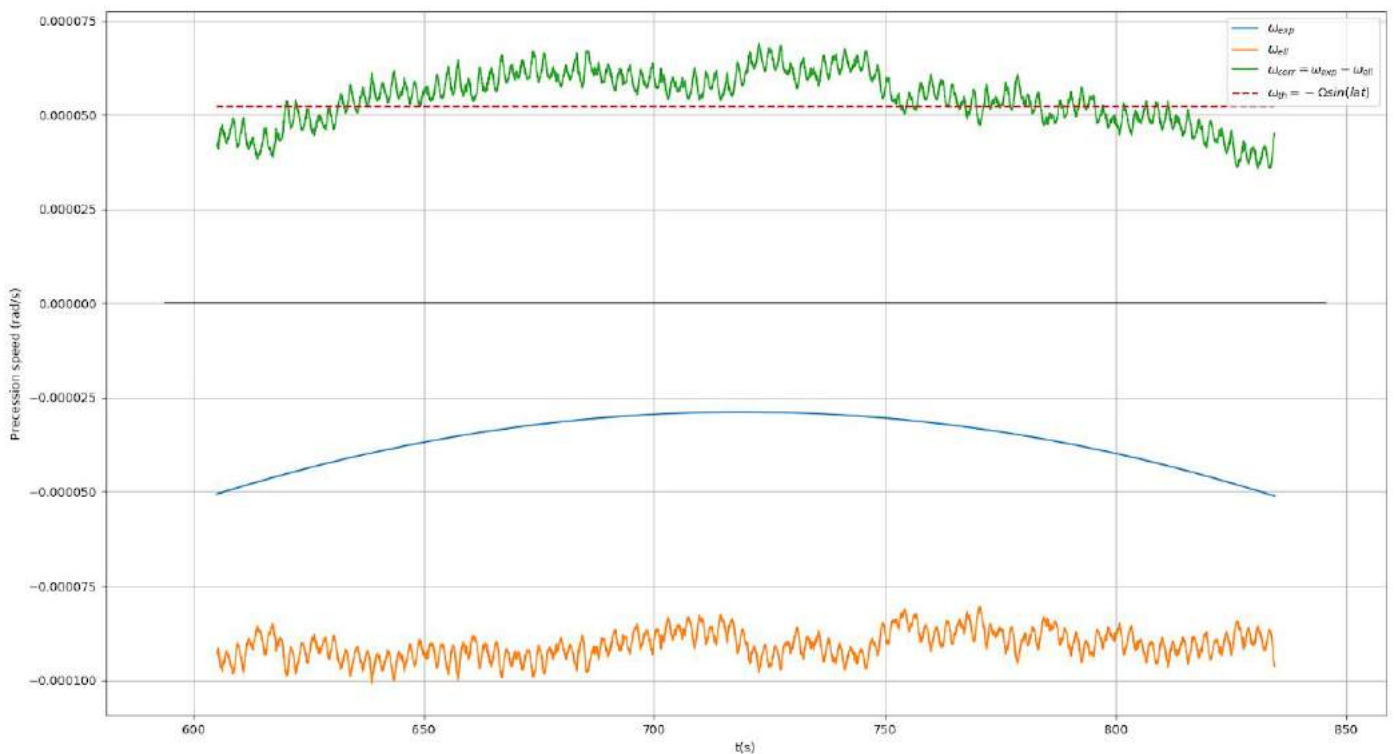
Nous constatons que ω_{exp} (en bleu) est négative et très éloignée de la valeur théorique (en rouge). Par contre lorsque nous enlevons à la valeur expérimentale la vitesse angulaire de rotation due à l'ellipse (en violet) nous trouvons une vitesse angulaire corrigée (en vert) en accord avec la valeur théorique pour presque toutes les valeurs de t. Les résultats sont donc très satisfaisants.

c) Résultats du lâcher N°3 et lâcher N°4 (reconnaissance des formes)

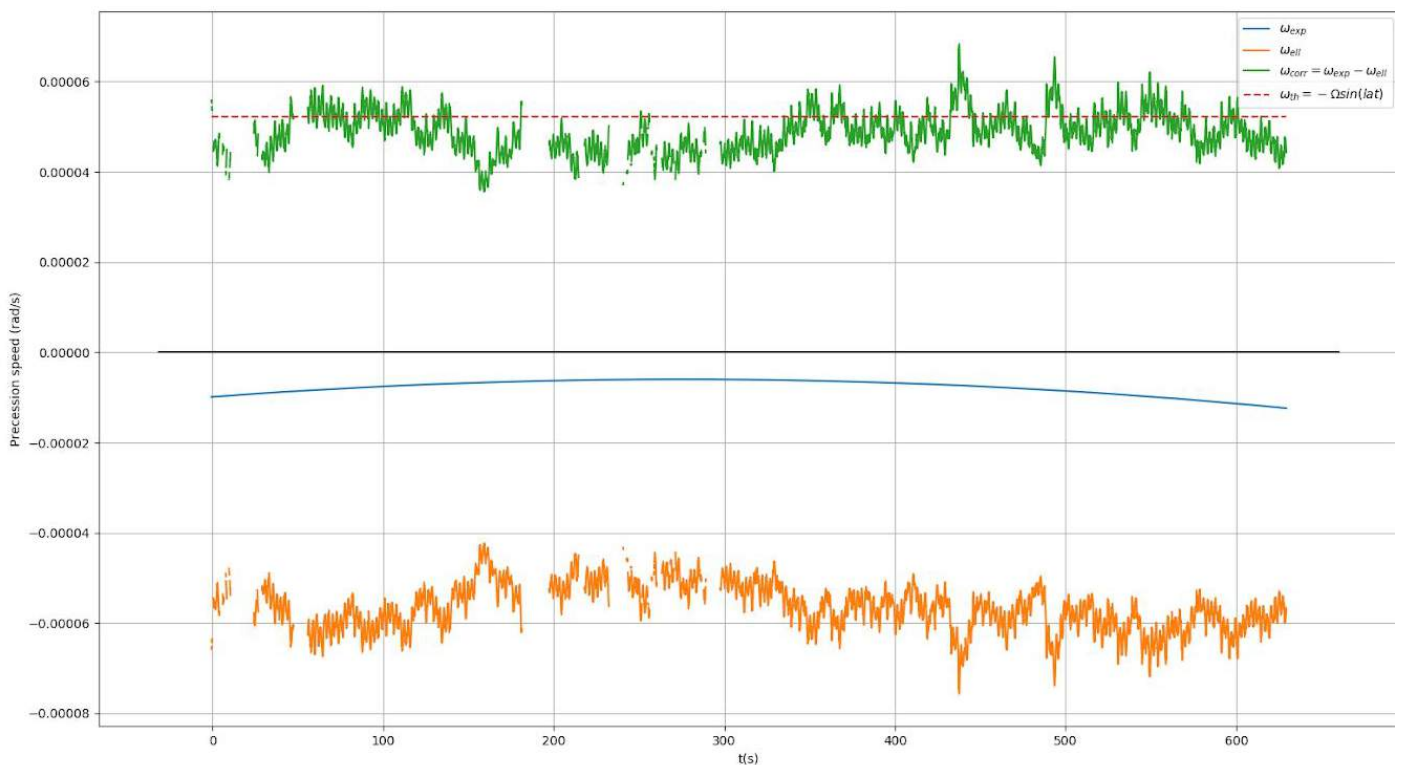
Nous avons réalisé deux lâchers avec un appareil photo fixé au plafond afin de pouvoir utiliser un algorithme de reconnaissance de forme.

Voici les graphiques obtenus à partir de ces résultats. La droite rouge en pointillés correspond à la vitesse angulaire de rotation à Lyon, qui est de $5,2 \cdot 10^{-5} \text{ rad.s}^{-1}$. La courbe bleue correspond à la vitesse de rotation mesurée à laquelle l'ellipse tourne (ω_{exp}) calculée en dérivant et lissant la courbe $\theta=f(t)$. La courbe orange correspond à la vitesse de rotation due seulement à l'ellipse (ω_{ell}) calculée grâce à l'équation (5). Et enfin, la courbe verte correspond à notre vitesse angulaire de rotation corrigée, soit $\omega_{corr} = \omega_{exp} - \omega_{ell}$.

Nous remarquons que notre ω_{corr} correspond bien à la vitesse angulaire de rotation à Lyon.



Graph 6: Les vitesses de rotation du plan du pendule pour le Lâcher 3 :
en bleu la vitesse angulaire mesurée expérimentalement, en rouge la vitesse théorique, en vert
vitesse obtenue en enlevant la vitesse due à l'ellipse (orange)



Graph 7: Les vitesses de rotation du plan du pendule pour le Lâcher 4 :
en bleu la vitesse angulaire mesurée expérimentalement, en rouge la vitesse théorique, en vert
vitesse obtenue en enlevant la vitesse due à l'ellipse (orange)

4. Conclusion sur nos résultats expérimentaux

Ainsi, nous avons mis en place deux modèles expérimentaux, dont l'un avec l'aide de M. GOSTIAUX. Grâce à la prise en compte de l'influence de l'ellipse, les deux méthodes nous ont permis de retrouver la valeur théorique de la rotation du plan du pendule pour trois lâchers différents, ce qui est très encourageant.

Pour le Lâcher N°3, nous avons également enregistré le mouvement du spot, de façon à pouvoir comparer les résultats donnés par les deux méthodes. Malheureusement, pour ce lâcher, l'ellipse était très réduite et les valeurs de b étaient plus petites que celles de nos incertitudes.

Ceci montre d'ailleurs les limites de notre méthode de pointage, en plus de sa durée : la réalisation complète d'un pointage de face et de côté dure 4h sans compter au moins 2h de traitement de données !

Notons néanmoins que pour 3 autres lâchers nous avons obtenus des valeurs de la vitesse angulaire de rotation corrigée en moins bon accord avec la valeur théorique, bien que toujours bien plus proches que sans la correction. Pour un de ces lâchers nous avons par ailleurs pu comparer les deux méthodes de traitements et nous avons vu qu'elles donnaient des résultats très proches.

V) La danse du pendule

Avant de nous plonger sur une dimension artistique axée sur la danse, nous voulions intégrer le pendule dans un art "plastique" assez contemporain. Nous avons donc cherché des travaux artistiques autour du pendule de Foucault ou en relation avec celui-ci. Ceux-ci sont présentés dans l'annexe 4.

Dans le cadre de nos Travaux Pratiques Encadrés, nous avons choisi de mettre en relation l'art de la danse et le pendule avec les différentes forces qui agissent sur ce dernier. Ainsi avec l'aide d'un danseur Jules MAJANI en filière TMD, nous avons réalisé une vidéo illustrant les différentes forces. Voici le lien de la vidéo :

<https://youtu.be/vK4h3rgHWug>

Voici trois photos, qui montrent clairement, en complément du film, comment les mouvements du corps du danseur ont pu illustrer les forces qui agissent sur le pendule.



Le poids / la force de la gravité due à sa masse

Nous voyons sur cette photo que le danseur se tient à terre, et qu'il prend en compte son poids. Le danseur exploite donc ici pleinement son rapport au sol et à la gravité. Son genou droit et son pied droit sont entièrement ancrés au sol. Cela illustre donc bien la force de pesanteur. (Photos du 9 février 2018, Gymnase Roland-Garros)

La tension du fil

Nous pouvons observer, sur la photo de droite, que le danseur est en tension avec son corps, ses bras et ses jambes sont tendus pouvant illustrer la tension du fil.



La force de CORIOLIS

Sur cette photo, le danseur réalise une pirouette. Ses bras étaient positionnés un vers le bas, et un vers le haut de son corps. En tournant, cela a donc donné un effet spectaculaire, accentué par sa chemise volante. Ainsi, nous voyons tout son corps en mouvement, en train de tourner. Nous avons trouvé que cette image illustre bien la force de Coriolis.



Conclusion

Nous nous sommes beaucoup investis dans ce projet sur le pendule de Foucault, aussi bien pour notre TPE que pour les Olympiades de Physique France. Cela nous a demandé une grande quantité de travail en plus de nos cours de terminale, mais cette expérience a été très enrichissante de part les connaissances que nous avons acquises, ainsi que par les rencontres que nous avons pu faire. Il s'agit donc d'un très beau projet, qui pourra même encore être approfondi par la suite, car nous pouvons encore exploiter de nombreux résultats d'expériences déjà réalisées.

Pour conclure, l'étude du pendule de Foucault dépend du référentiel dans lequel on se place. En effet, s'il s'agit d'un référentiel galiléen, le pendule va garder le même plan d'oscillation, alors que sinon il va changer, suite à l'intervention de la force de Coriolis. Cependant, si le pendule oscillait pendant longtemps, ni le référentiel géocentrique ni le référentiel héliocentrique ne serait galiléen, et le plan d'oscillation du pendule ne serait alors pas immobile. Il faudrait en toute rigueur se placer au centre de tout l'Univers pour avoir réellement un référentiel galiléen.

La question du pendule de Foucault a fasciné de nombreux artistes et scientifiques, puisque aujourd'hui encore des chercheurs s'intéressent toujours à ce cas très complexe, et qu'il existe également de nombreuses oeuvres artistiques illustrant le pendule.

Enfin, plusieurs philosophes ont aussi traité cette question, comme Trinh XUAN THUAN [9] par exemple, qui affirme que le pendule de Foucault ajuste son comportement non pas en fonction de son environnement local, mais des galaxies les plus éloignées et donc de l'Univers tout entier.

Ainsi ce qui se passe sur notre minuscule planète, sur notre Terre, dépend de la totalité des structures de l'Univers. D'après lui, il existe dans le monde macroscopique, une interaction de toute autre nature que celle décrite par la physique que nous connaissons.

Bibliographie

- [1] Ferdinand Reich sur la chute de corps dans un puits de mine en 1831
<https://journals.openedition.org/bibnum/716>
- [2] Recueil des Travaux Scientifiques de Léon FOUCAULT, Gauthier-Villars, 1878
- [3] Pendule de Foucault Wikipedia https://fr.wikipedia.org/wiki/Pendule_de_Foucault
<https://www.techno-science.net/definition/1829.html>
- [4] Animation en ligne "Pendule sur plateau tournant":
http://www.ac-grenoble.fr/disciplines/spc/genevieve_tulloue/file/gtulloue/Meca/non_galileen/pendule_manege1.html
- [5] Animation "Pendule de Foucault":
http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Meca/RefTerre/Foucault0.php
- [6] https://fr.wikipedia.org/wiki/Ferdinand_Reich
- [7] "L'onde de marée" <http://www.ifremer.fr/lpo/cours/maree/ondes.html>
- [8] Plateforme Coriolis <http://www.grenoble-inp.fr/newsletter-grenoble-in-press/coriolis-un-equip>
- [9] Influence de la force de Coriolis sur les méandres
<https://hydrotopics.wordpress.com/.../10/05/how-and-why-rivers-meander>
- [10] "Gyroscopes et Projectiles", BOUASSE Henri, Delagrave, Paris (1923)
- [11] "Pendule de Foucault" Techno-Science.net <https://www.techno-science.net/definition/1829.html>
- [12] "Spherical pendulum revisited" Olsson M.G. , The American Journal of physics, Volume 49 (6) – Jun 1, 1981
- [13] "L'Infini dans la paume de la main", Matthieu RICARD et Trinh XUAN THUAN

Remerciements

Nous adressons nos sincères remerciements aux personnes qui nous ont aidés pour ce projet :

- Tout d'abord, Madame ARETTE-HOURQUET professeure de Sciences Physiques, pour son soutien, sa disponibilité, son aide ainsi que sa dévotion pour notre projet,
- Madame GOSTIAUX professeure de Sciences Physiques, pour son aide et sa disponibilité,
- Monsieur MADEC, professeur de Sciences Physiques pour son aide précieuse à la mise en place de notre projet,
- Monsieur GOSTIAUX, chercheur à l'École Centrale, qui nous a accompagné tout au long du projet,
- Monsieur EYRAUD, PRAG à l'ENS de Lyon pour ses conseils, le prêt de la boule et la réalisation du film,
- Monsieur LE TOURNEAU, technicien à l'ENS pour les plans de l'attache et les conseils techniques,
- Messieurs TELALI et POIREL, du département de mécanique de l'École Centrale de Lyon, pour la fabrication de la fixation du pendule de Foucault,
- Messieurs BOUZID et MANDARON, pour l'installation du pendule dans le gymnase Roland Garros,
- Madame AUGER, professeure de Musique, pour nous avoir aidés à monter notre projet final en lien avec la danse,
- Madame THERY, ancienne élève du lycée Saint-Exupéry, pour nous avoir aidés à filmer notre projet final,
- La compagnie KLAUSER, propriétaire du Carrousel du parc de la Tête d'Or, laquelle a accepté de privatiser leur manège pendant une heure afin d'expérimenter et de filmer notre démonstration sur la force de Coriolis,
- Monsieur Jules MAJANI, élève en seconde Technique de la Musique et de la Danse, qui a réalisé une improvisation contemporaine autour du pendule de Foucault, qui représente notre projet final,
- Mesdames FOUCAULT et COLIN, techniciennes de laboratoire, pour leur aide dans la réalisation de nos expériences et leurs disponibilités,
- Mesdames LACOMBE et DUPONT, professeures d'Arts Plastiques, pour nous avoir aidés dans la recherche de références artistiques autour du pendule.
- Madame BERNARD et Monsieur NADEAU, professeurs de Sciences Physiques, pour leurs corrections.