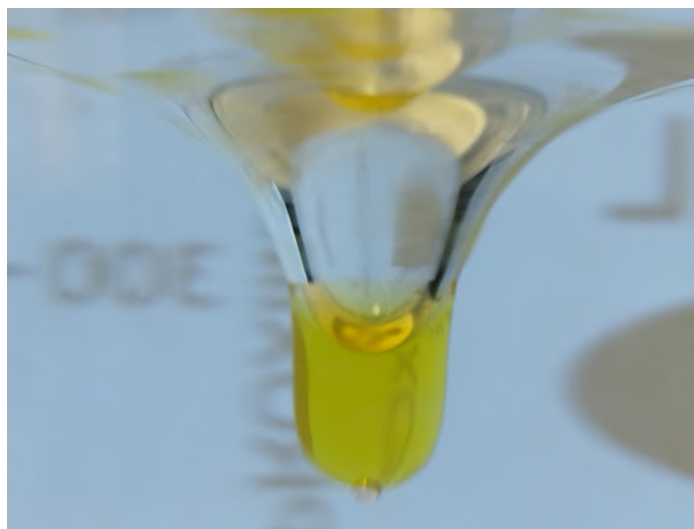




A travers les mystères de l'effet centrifuge : voyage au cœur des fluides



Afonso Maud Bernard-Massias Aymeric Durand Julien Valette Gabriel
Professeurs encadrants : *Belin Stéphane* *Pouquet Céline*

2024/2025

Table des matières

1	Introduction	2
2	Forme d'un liquide dans une cuve en rotation à vitesse angulaire constante	3
2.1	Montage de l'expérience et matériel	3
2.2	Première observation	5
2.3	Étude théorique	5
2.3.1	Notion de "force d'inertie"	5
2.3.2	Référentiel tournant : la force centrifuge	6
2.3.3	Démonstration de l'équation de la surface libre	6
2.4	Étude expérimentale	8
2.4.1	Forme obtenue avec des fluides newtoniens incompressibles	8
2.4.2	Forme obtenue avec un fluide non-newtonien	9
2.5	Conclusion	9
3	Mouvement d'une balle immergée	10
3.1	Étude expérimentale	10
3.2	Bilan des forces exercées sur le système étudié	11
3.2.1	Poussée d'Archimède	11
3.2.2	Poussée d'Archimède d'un point de vue qualitatif	12
3.2.3	Bilan des forces sur la balle	14
3.3	Exploitation des mesures	15
3.4	Conclusion	15
4	Seau de Newton	16
4.1	Étapes de l'expérience	16
4.2	Conclusion	17
5	Conclusion générale	18
6	Bibliographie et Remerciements	19
6.1	Bibliographie	19
6.2	Remerciements	19

Introduction

Imaginez-vous dans un manège à grande vitesse, projetés contre les parois de celui-ci ; vous ressentez une force appelée "centrifuge". Bien que familière, cette force nous a, dès le début de nos recherches, intrigués. C'est pourquoi nous avons choisi de l'expérimenter en la mettant en relation avec des fluides, newtoniens ou non.

En effet, les liquides nous ont semblé très intéressants, car en subissant la force centrifuge $\vec{F}_{cen} = m\omega^2 \vec{HM}$, où m représente la masse du système, ω la vitesse angulaire et $\|\vec{HM}\|$ la distance à l'axe de rotation, nous pourrions voir apparaître une courbure particulière qui pourrait varier en fonction de différents paramètres comme la vitesse angulaire ω , la masse volumique ρ ou la viscosité η .

Ainsi notre travail se construit autour de l'étude de la courbe obtenue. Nous verrons aussi si le mouvement d'un objet immergé soumis à la force d'inertie d'entraînement est le même qu'un objet non-immergé.

Nous nous sommes aussi intéressés à l'aspect historique de la notion de force centrifuge. Elle a suscité l'intérêt des physiciens et scientifiques, notamment Isaac Newton. Son expérience de pensée, le seau de Newton, illustre ce phénomène. Cette expérience consiste à faire tourner un seau rempli d'eau suspendu à une corde et à observer la surface de l'eau.

Nous sommes ainsi ravis de vous présenter notre étude ; toutefois, attention à bien vous accrocher car l'aventure va vous emporter !

Forme d'un liquide dans une cuve en rotation à vitesse angulaire constante

Comment réagit un fluide soumis à l'effet centrifuge ? Voici la première question à laquelle nous avons envie de répondre. Nous avons donc commencé à y réfléchir avec l'aide précieuse de nos professeurs référents, M. Belin et Mme Pouquet.

2.1 Montage de l'expérience et matériel

Pour la réalisation de cette expérience il nous a semblé intéressant de travailler avec l'IUT à Tulle, plus précisément avec M. Philippe Houillon, professeur de sciences de l'ingénieur de l'IUT, avec qui nous avons élaboré le dispositif d'étude.

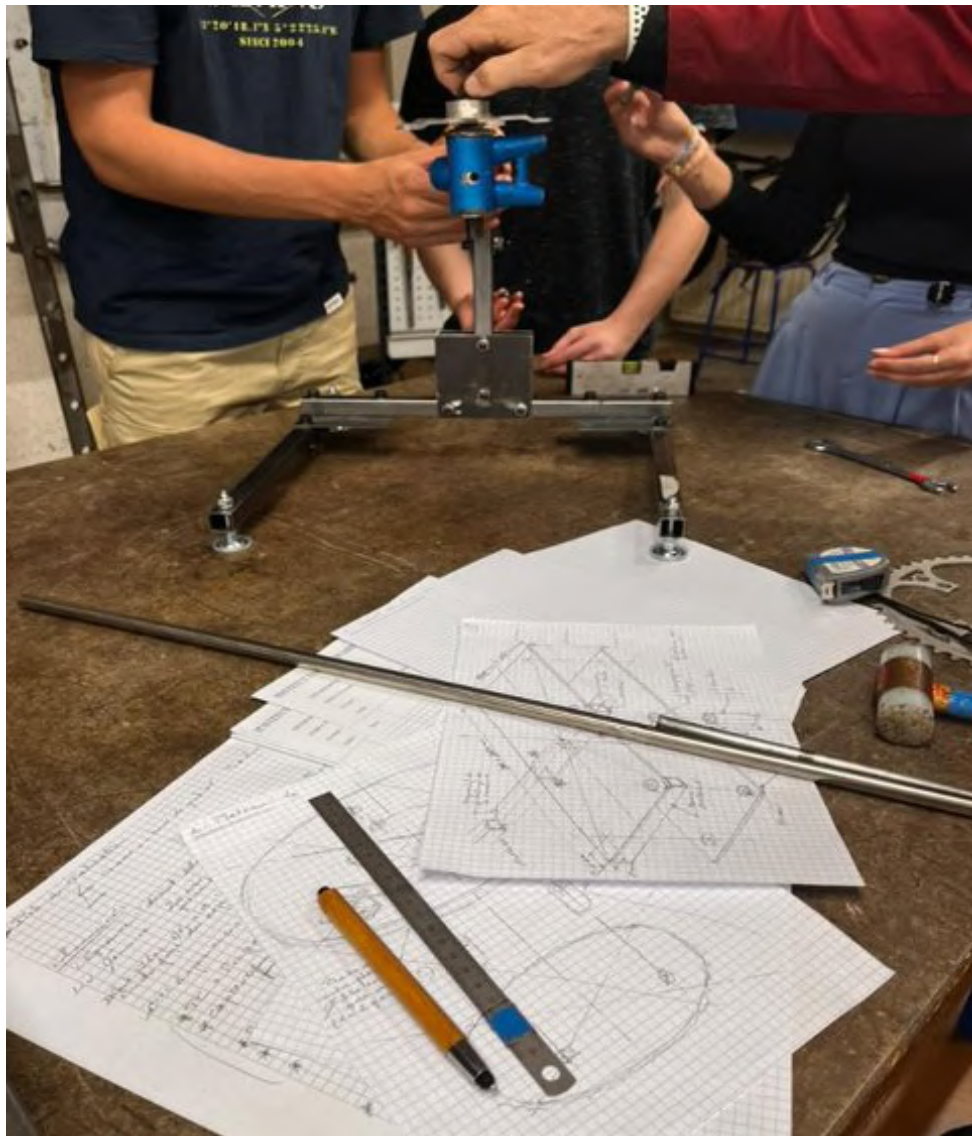


FIGURE 2.1 – Montage de la machine à l'atelier de l'IUT

Afin de mesurer la vitesse angulaire de rotation, nous avons utilisé un micro-contrôleur M5Stack. Celui-ci est programmé en langage Python. Il mesure la vitesse angulaire grâce au gyroscope intégré par intervalle de temps de 0.1s, et il permet aussi de calculer l'accélération en divisant les vitesses successives par la différence de temps dt . Voici le code :

```
import mpu6886
from machine import I2C, Pin
from m5stack import *
import time
import math

i2c = I2C(scl=Pin(22), sda=Pin(21))
sensor = mpu6886.MPU6886(i2c, gyro_fs=mpu6886.GYRO_FS_SEL_2000DPS)

t0 = time.time()
prev_gyr = sensor.gyro
prev_time = time.time()

# Initialisation de l'écran
lcd.clear()
lcd.font(lcd.FONT_DejaVu24)
lcd.text(70, 90, "rad/s")
lcd.text(70, 170, "rad/s2")

while True:
    current_time = time.time()
    dt = current_time - prev_time

    gyr = sensor.gyro

    # Calculer l'accélération angulaire
    angular_acceleration = (gyr[1] - prev_gyr[1]) / dt
    # Afficher la vitesse angulaire
    lcd.font(lcd.FONT_7seg)

    gyr_text = str(round(-gyr[1], 5))
    lcd.text(70, 60, gyr_text)

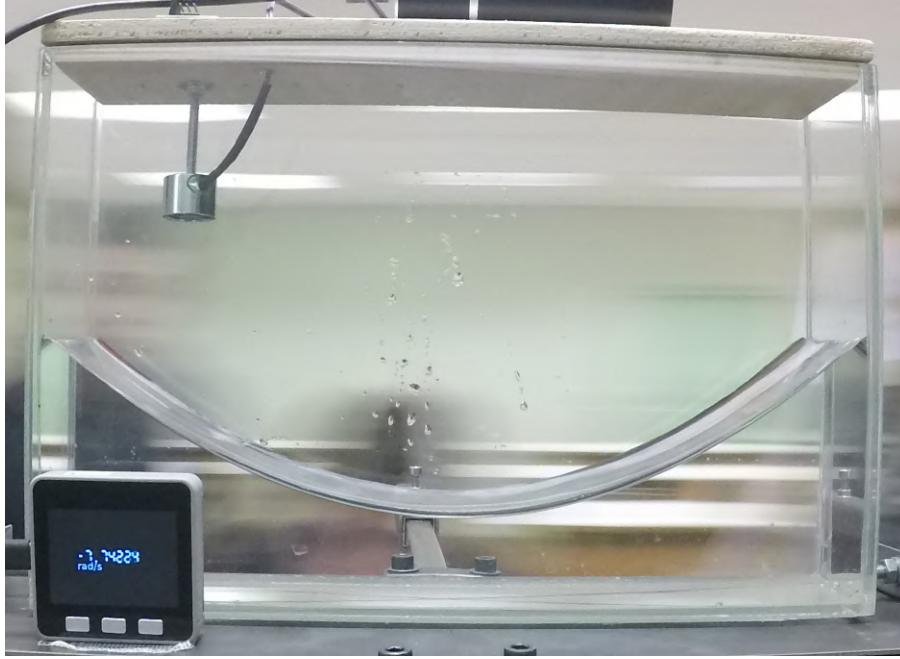
    # Afficher l'accélération angulaire
    acc_text = str(round(angular_acceleration, 2))
    lcd.text(70, 140, acc_text)

    prev_gyr = gyr
    prev_time = current_time

    time.sleep(0.1)
```

La liste du matériel utilisé, les photos du dispositif ainsi que le cahier des charges sont disponibles dans l'annexe A.

2.2 Première observation



Dès la mise en route de la machine avec de l'eau, qui a eu lieu dans l'atelier de l'IUT, nous avons constaté la formation d'une courbure parabolique, donnant ainsi un premier élément observable significatif.

2.3 Étude théorique

2.3.1 Notion de “force d'inertie”

La force d'inertie doit être distinguée des forces modélisant une interaction. Elle apparaît dans les référentiels non galiléens (comme un référentiel tournant) et résulte d'un choix de description plutôt que d'une interaction physique réelle. Elle est introduite pour expliquer les effets observés dans ces référentiels sans recourir à un référentiel inertiel.

On considère un point matériel M fixe dans la cuve. Il est donc animé d'un mouvement circulaire uniforme dans le référentiel terrestre. Dans le repère de Frenet, l'accélération du point matériel est donnée par :

$$\vec{a}(M) = \frac{v^2}{r} \vec{u}_n + \frac{dv}{dt} \vec{u}_t$$

Or dans notre situation : $v = r\omega = \text{cste}$. Alors l'expression devient :

$$\Rightarrow \vec{a}(M) = \frac{r^2\omega^2}{r} \vec{u}_n = \omega^2 r \vec{u}_n$$

Cette accélération est dirigée vers le centre de rotation.

Dans le référentiel galiléen on obtient, d'après le principe fondamentale de la dynamique :

$$\sum_i \vec{F}_i = m \vec{a} = m\omega^2 r \vec{u}_n \Leftrightarrow \sum_i \vec{F}_i - m\omega^2 r \vec{u}_n = \vec{0} \Leftrightarrow \sum_i \vec{F}_i + \vec{F}_{cen} = \vec{0} \quad \text{avec } \vec{F}_{cen} = -m\omega^2 r \vec{u}_n$$

Il est équivalent d'utiliser le principe fondamental de la dynamique pour un système en mouvement dans le référentiel terrestre et le principe fondamental de la dynamique pour le système immobile dans le référentiel de la cuve, en tenant compte de la force centrifuge.

2.3.2 Référentiel tournant : la force centrifuge

La force centrifuge est une force d'inertie apparaissant dans un référentiel en rotation. Elle est donnée par :

$$\vec{F}_{cen} = m\omega^2 r \vec{e}_r$$

où m est la masse, ω la vitesse angulaire, r la distance radiale à l'axe de rotation et $\vec{e}_r = -\vec{u}_t$ le vecteur unitaire selon l'axe Or (abscisses). Cette force tend à “pousser” les objets vers l'extérieur, mais il est crucial de noter qu'elle n'existe pas dans un référentiel inertiel galiléen.

2.3.3 Démonstration de l'équation de la surface libre

Nos manipulations nous ont permis d'observer que la surface du fluide avait une forme parabolique sous l'effet de la force centrifuge. Par la suite, nous avons donc cherché à retrouver l'équation qui décrit cette courbe à l'aide de la modélisation ci-dessous :

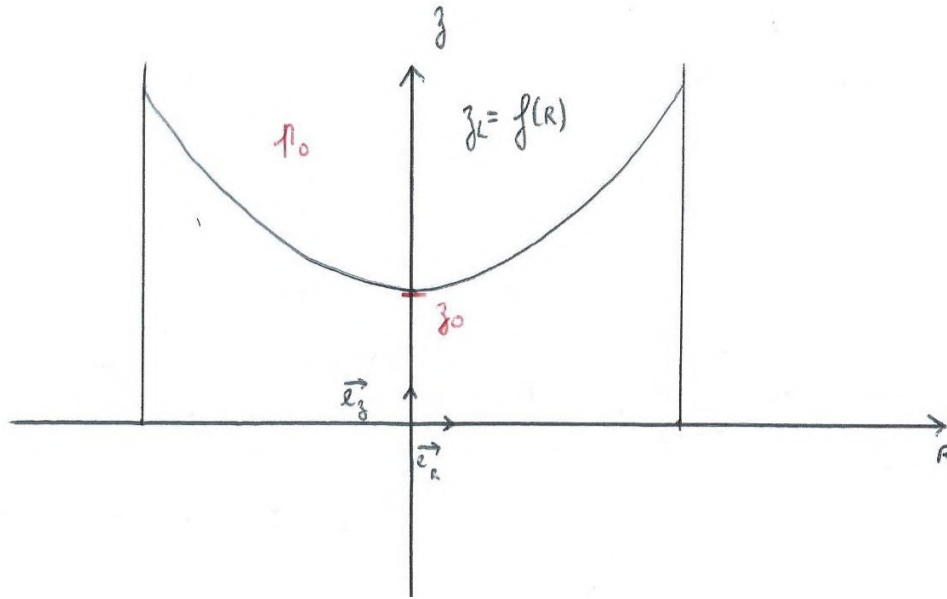


FIGURE 2.2 – Schéma (sans soucis d'échelle) de la courbe obtenue dans la cuve

Par hypothèse, le fluide est immobile dans le référentiel de la cuve, une fois la vitesse angulaire constante atteinte, les forces de viscosité $\vec{F}_\eta$ et de Coriolis $\vec{F}_C$ sont donc absentes. Nous allons donc supposer que, dans la cuve, les particules de fluide subissent l'action de trois forces : le poids $\vec{P}$, la force centrifuge $\vec{F}_{cen}$ et la force de pression $\vec{F}_p$. Ensuite, nous déterminons l'équivalent volumique de chaque force considérée :

$$\begin{cases} \vec{P} = -mg\vec{e}_z \\ \vec{F}_{cen} = m\omega^2 r \vec{e}_r \\ \vec{F}_p = - \iint_S p(r, z) d\vec{S} \end{cases} \iff \begin{cases} \vec{f}_{vol, pes} = -\rho g \vec{e}_z \\ \vec{f}_{vol, e} = \rho \omega^2 r \vec{e}_r \\ \vec{f}_{vol, p} = -\text{grad } p \end{cases}$$

En statique des fluides, la somme des forces appliquées à la particule est nulle :

$$\sum_i \vec{f}_{vol, i} = \vec{0} \iff -\rho g \vec{e}_z + \rho \omega^2 r \vec{e}_r - \text{grad } p = \vec{0} \iff \boxed{-\rho g \vec{e}_z + \rho \omega^2 r \vec{e}_r - \frac{\partial p}{\partial z} \vec{e}_z - \frac{\partial p}{\partial r} \vec{e}_r = \vec{0}}$$

Remarque : la composante du gradient de pression $\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} \vec{e}_\theta = \vec{0}$ car le système est invariant autour de l'axe Oz .

Grâce au produit scalaire, respectivement selon $\vec{e}_z$ puis selon $\vec{e}_r$, nous pouvons transformer l'unique expression vectorielle en deux expressions scalaires, puis isoler les dérivées partielles dans chacune d'elles :

$$\text{D'une part : } -\rho g - \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \Rightarrow \boxed{\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g} \quad \text{et d'autre part : } \rho \omega^2 r - \frac{\partial p}{\partial r} = 0 \Rightarrow \boxed{\frac{\partial p}{\partial r} = \rho \omega^2 r}$$

Désormais, cherchons l'expression de la pression p ; en primitivant la première équation, on obtient :

$$\Rightarrow p(r, z) = \int \frac{\partial p}{\partial z} dz = -\rho g z + C(r)$$

De plus, en dérivant par rapport à r :

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{dC(r)}{dr} = \rho \omega^2 r \Rightarrow C(r) = \rho \omega^2 \frac{r^2}{2} + A$$

Donc :

$$p = -\rho g z + \rho \omega^2 \frac{r^2}{2} + A$$

Or, en $r = 0$ et en $z = z_0$, $p = p_0$; donc :

$$p_0 = -\rho g z_0 + A \Leftrightarrow A = \rho g z_0 + p_0$$

Ainsi, on obtient l'expression complète de la pression :

$$\boxed{p = -\rho g z + \rho \omega^2 \frac{r^2}{2} + \rho g z_0 + p_0}$$

Ainsi, plus z est grand, plus la pression est faible ; et plus r est grand, plus la pression est élevée.

Forme des isobares :

$$\Rightarrow z = -\frac{p}{\rho g} + \frac{\omega^2 r^2}{2g} + z_0 + \frac{p_0}{\rho g}$$

Remarque : les isobares ont une forme de parabole.

Forme de la surface libre :

Soit z_L la surface de la courbe. En $z = z_L$, on a $p = p_0$

$$\Rightarrow p_0 = -\rho g z_L + \rho \omega^2 \frac{r^2}{2} + \rho g z_0 + p_0 \Leftrightarrow \boxed{z_L = \frac{\omega^2}{2g} r^2 + z_0}$$

Ainsi, l'équation de la courbe est de la forme $z_L = ar^2 + z_0$, avec $a = \frac{\omega^2}{2g}$.

Le paramètre étant r , élevé au carré, la courbe obtenue sera, a priori, une parabole. Ce seul paramètre de réglage de la position du foyer de la parabole est proportionnel à la vitesse de la rotation au carré.

2.4 Étude expérimentale

2.4.1 Forme obtenue avec des fluides newtoniens incompressibles

Après réalisation de mesures et de photographies, nous avons pu étudier les courbes obtenues de manière plus précise, et ce grâce au logiciel de traitement Regressi.

Résultats avec de l'eau

Voici un exemple de traitement graphique, à la vitesse angulaire de $11,24 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$. Les autres résultats sont disponibles dans le document " Annexe_B.pdf ".

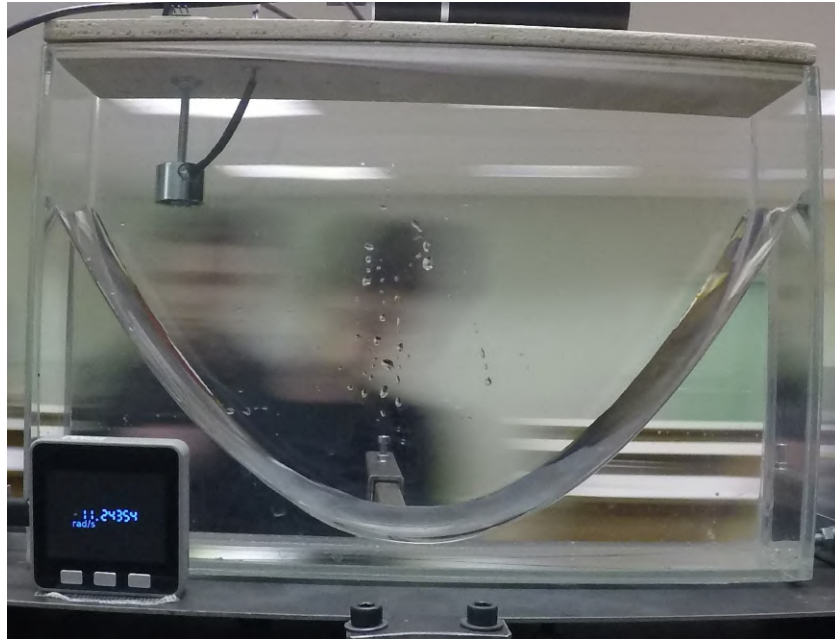


FIGURE 2.3 – Photo de la cuve en rotation à 11,24 rad/s

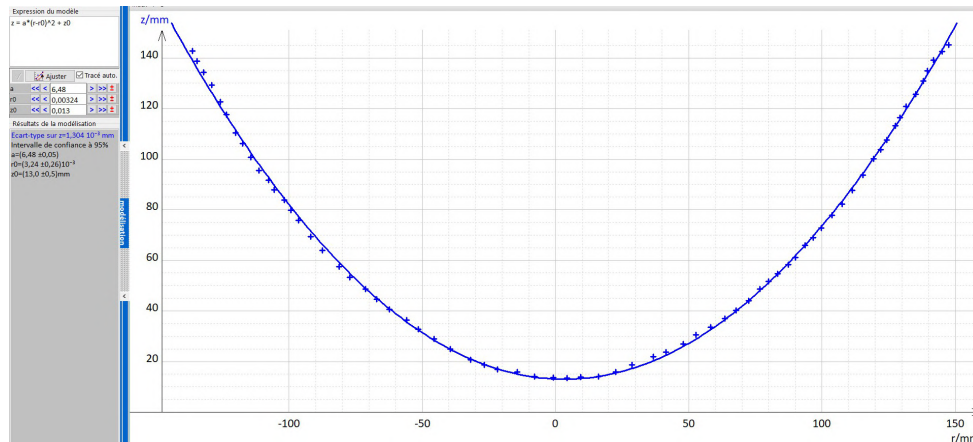
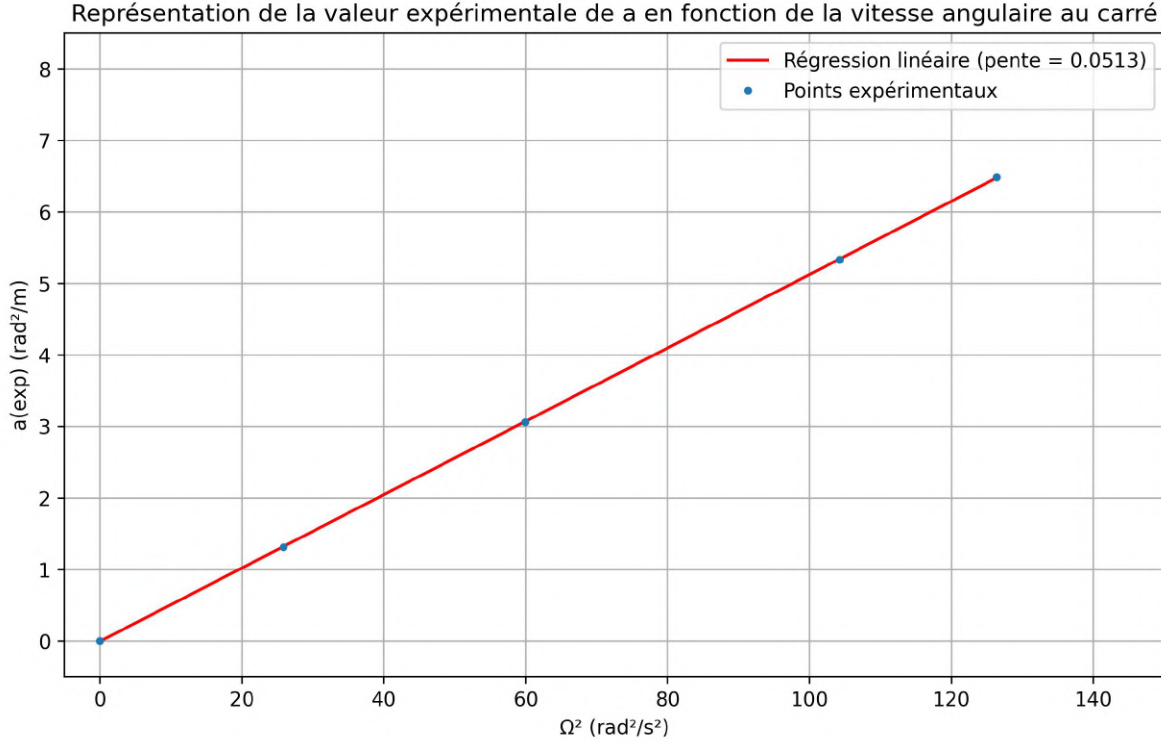


FIGURE 2.4 – Modélisation graphique avec le logiciel Regressi

Les valeurs affichées sur Regressi après la modélisation sont résumées dans le tableau suivant : on y retrouve les valeurs de a , théoriques ($a(th)$) et expérimentales ($a(exp)$), ainsi que les vitesses angulaires ω affichées par le micro-contrôleur. Les deux dernières colonnes concernent respectivement l'incertitude sur $a(exp)$ obtenue avec Regressi, ainsi que le Z-score $Z_{sc} = \frac{|a(exp)-a(th)|}{u(a(exp))}$.

ω en $rad.s^{-1}$	$a(th)$ en m^{-1}	$a(exp)$ en m^{-1}	$u(a(exp))$	Z_{sc}
5,08	1,316	1,311	0,024	0,21
7,74	3,054	3,058	0,022	0,18
10,21	5,315	5,330	0,030	0,50
11,24	6,441	6,480	0,050	0,78

La proximité entre les mesures théoriques et expérimentales semble valider le modèle prévu par la formule au 2.3.3 ($Z_{sc} < 2$). En outre, nous pouvons vérifier ce résultat graphiquement : Il nous suffit de tracer $a(exp)$ en fonction de ω^2 et de comparer avec la courbe $a_{th}(\omega^2)$. Voici le résultat :



Résultats avec d'autres fluides de viscosité différentes de celle de l'eau

Nous aurions pu tester avec de l'huile, mais on peut conjecturer une analogie des résultats que l'on obtiendrait avec d'autres types de fluides newtoniens incompressibles. En effet, dans l'équation de la parabole (cf 2.3), il n'y a pas de coefficient de viscosité η , c'est pourquoi la forme obtenue ne dépend pas de la viscosité du liquide. En d'autres termes, ce paramètre ne modifiera aucunement la forme parabolique obtenue.

2.4.2 Forme obtenue avec un fluide non-newtonien

Les résultats avec le fluide non-newtonien sont analogues à ceux obtenus avec l'eau. Ils sont disponibles dans l'annexe C.

2.5 Conclusion

Par conséquent, nous remarquons que les comportements prévus par notre modélisation sur les fluides incompressibles et soumis à l'effet centrifuge à vitesse angulaire constante, correspondent aux expériences que nous avons réalisées. De plus, nos observations sur les fluides non newtoniens, soumis eux aussi à cet effet centrifuge, montrent qu'ils réagissent étonnamment de la même manière que les fluides newtoniens. Ainsi, peu importe la viscosité du fluide, qu'il soit newtonien ou non, les expériences nous donnent une forme parabolique.

Mouvement d'une balle immergée

Dans le prolongement de ces recherches sur le comportement des fluides, nous décidons d'ajouter une balle en liège tenue par un fil de pêche au fond de la cuve. En effet, il nous semblait intéressant d'étudier le mouvement d'un objet immergé sous l'effet centrifuge. Nous nous attendions à ce que la balle se déplace dans le même sens que la force centrifuge, c'est-à-dire vers l'extérieur de la cuve.

L'observation nous a troublés : la balle se dirige vers le centre.

3.1 Étude expérimentale

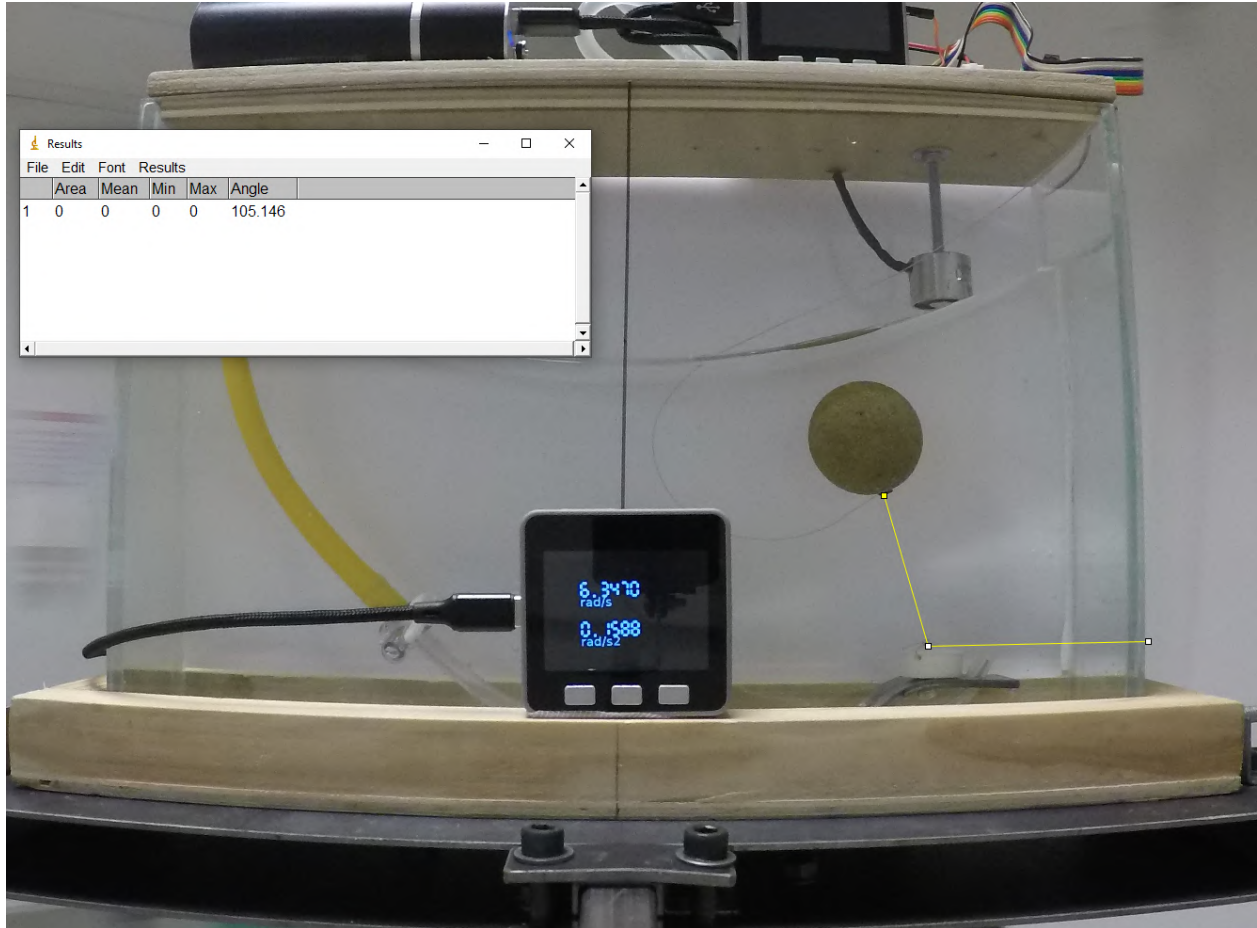


FIGURE 3.1 – Angle formé entre la position de la balle et la verticale (ici de $105,146^\circ - 90^\circ = 15,146^\circ$) Résultats obtenus grâce à *ImageJ*.

Les résultats permettent de dresser le tableau de données ci-dessous, qui résume les différents angles α mesurés en degré ($^\circ$), en fonction de la vitesse angulaire ω en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$

$\alpha (^\circ)$	0	6,19	6,45	8,88	9,9	11,31	11,25	13,81	13,42	19,98
$\omega (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	0	3,55	3,55	4,110	4,26	4,83	4,88	5,57	5,58	7,19

La suite de cette étude se concentre sur la détermination de l'expression de la poussée d'Archimède afin d'effectuer le bilan des forces exercées sur la balle. Celui-ci permettra l'obtention d'un modèle théorique, expliquant le mouvement contre-intuitif du système étudié.

3.2 Bilan des forces exercées sur le système étudié

Lorsque la cuve est en rotation, les forces s'exerçant sur la balle sont : le poids $\vec{P}$, la tension du fil $\vec{T}$ et la force centrifuge $\vec{f}_{ie}$, et il ne faut pas oublier la poussée d'Archimède $\vec{\Pi}$!

3.2.1 Poussée d'Archimède

Nous nous intéressons à une particule de fluide de volume V , dans le référentiel de la cuve, qui est non-galiléen. L'objectif est ici de déterminer l'expression vectorielle de la poussée d'Archimède.

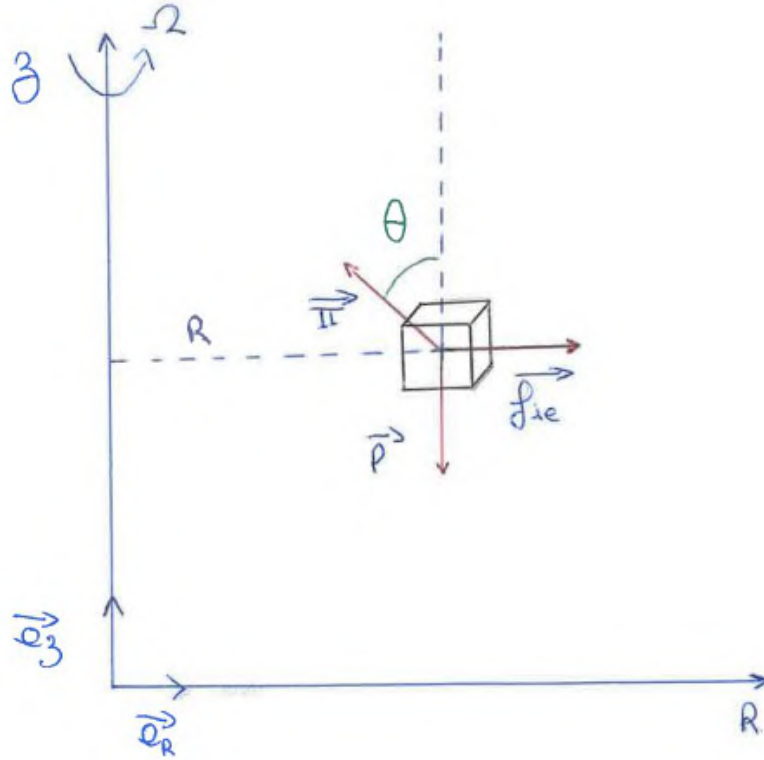


FIGURE 3.2 – Schéma (sans soucis d'échelle) des forces sur une particule de fluide

$$\vec{\Pi} = ? \quad ; \quad \vec{P} = -mg\vec{e}_z = -\rho V g \vec{e}_z \quad \text{et} \quad \vec{f}_{ie} = m\omega^2 r \vec{e}_r = \rho V \omega^2 r \vec{e}_r$$

La particule étant immobile :

$$\sum \vec{F} = \vec{0} \Leftrightarrow \vec{\Pi} + \vec{P} + \vec{f}_{ie} = \vec{0} \Rightarrow \vec{\Pi} = -\vec{P} - \vec{f}_{ie} \Rightarrow \boxed{\vec{\Pi} = \rho V g \vec{e}_z - \rho V \omega^2 r \vec{e}_r}$$

Maintenant que nous avons l'expression de $\vec{\Pi}$, nous pouvons déterminer l'angle θ (cf schéma) :

$$\tan(\theta) = \frac{\rho V \omega^2 r}{\rho V g} = \frac{\omega^2 r}{g} \Rightarrow \boxed{\theta = \arctan\left(\frac{\omega^2 r}{g}\right)}$$

3.2.2 Poussée d'Archimède d'un point de vue qualitatif

La poussée d'Archimède, qui est la résultante des forces de pressions, exercée par le fluide sur un corps immergé, peut être mieux comprise en comparant les cas d'un fluide statique et d'un fluide en rotation.

Fluide en référentiel galiléen

La pression dans un fluide statique augmente avec la profondeur en raison du poids de la colonne de fluide au-dessus :

$$p = p_0 - \rho g z$$

où ρ est la densité du fluide, g l'accélération due à la gravité, et h la profondeur. La poussée d'Archimède est donc proportionnelle au volume immergé et à la masse volumique du fluide :

$$\vec{\Pi} = \rho V g \vec{e}_z \quad (\text{dirigée vers le haut.})$$

Fluide en rotation par rapport au référentiel galiléen

Dans un fluide en rotation, la pression dépend à la fois de la gravité et de l'effet centrifuge. D'après l'étude théorique faite précédemment, on a montré que la pression et la poussée d'Archimède s'expriment sous la forme, respectivement :

$$p(r, z) = p_0 + \rho \left(-gz + \frac{\omega^2 r^2}{2} \right)$$

$$\vec{\Pi} = \rho V (g \vec{e}_z - \omega^2 r \vec{e}_r)$$

Elle présente une composante radiale en raison de la rotation, ce qui pourrait expliquer le déplacement latéral des corps immergés.

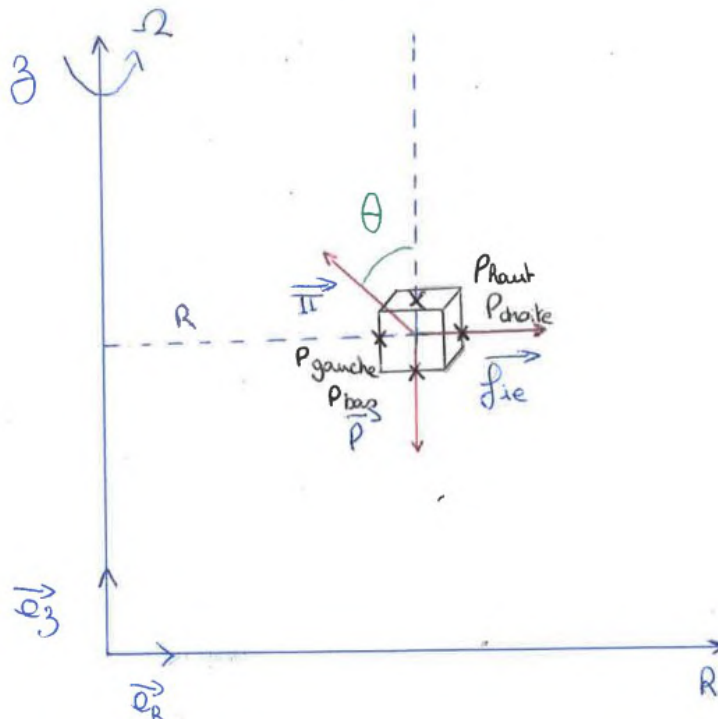


FIGURE 3.3 – Schéma (sans soucis d'échelle) des pressions autour d'une particule de fluide

Le schéma ci-dessus montre les pressions se situant autour de la particule de fluide : à gauche (p_{gauche}), à droite (p_{droite}), en haut (p_{haut}) et en bas (p_{bas}).

La pression en haut est inférieure à la pression en bas, due à la profondeur, d'où une composante verticale vers le haut de la poussée d'Archimède ($\vec{\Pi}_z$). Mais il faut aussi considérer les pressions radiales. p_{gauche} est inférieure à p_{droite} illustrant une composante horizontale de la poussée d'Archimède ($\vec{\Pi}_r$), orientée vers le centre.

La résultante de ces deux composantes nous donne ainsi une poussée positive selon $\vec{e}_z$ et négative selon $\vec{e}_r$.

Ainsi nous savons que :

- Pour un fluide statique, la poussée d'Archimède est purement verticale.
- Pour un fluide en rotation, la force a une composante horizontale due à l'effet centrifuge, influençant le mouvement du corps immergé.

Hypothèses testées et explications

Les corps moins denses que le fluide se déplacent vers le centre de la cuve

Exemple : Une goutte d'huile.

Explication : Dans un fluide en rotation, la poussée d'Archimède possède une composante radiale dirigée vers le centre de la cuve, car la distribution de la pression est influencée par l'effet centrifuge. Pour un corps moins dense que le fluide, cette poussée radiale est plus grande que la force centrifuge, ce qui entraîne le déplacement du corps vers le centre.

Les corps plus denses que le fluide se déplacent vers les bords de la cuve

Exemple : Une goutte de glycérol.

Explication : Pour les corps plus denses que le fluide, la force centrifuge, qui augmente avec la masse, domine la poussée d'Archimède. Par conséquent, ces corps se déplacent vers l'extérieur de la cuve, suivant la direction radiale imposée par la force centrifuge.

Les corps de densité proche de celle du fluide restent en équilibre

Lorsque la densité du corps est similaire à celle du fluide, la force centrifuge et la composante radiale de la poussée d'Archimède s'équilibrent. Le corps peut rester stable à une certaine position radiale, sans se déplacer ni vers le centre ni vers les bords.

3.2.3 Bilan des forces sur la balle

Le bilan des forces exercées sur la balle de baby foot dans le référentiel de la cuve en rotation nous permettra de déterminer l'expression de la tension $\vec{T}$ due au fil. On a :

$$\vec{T} = ? \quad ; \quad \vec{P} = -mg\vec{e}_z \quad ; \quad \vec{\Pi} = \rho V g \vec{e}_z - \rho V \omega^2 r \vec{e}_r \quad \text{et} \quad \vec{f}_{ie} = m\omega^2 r \vec{e}_r$$

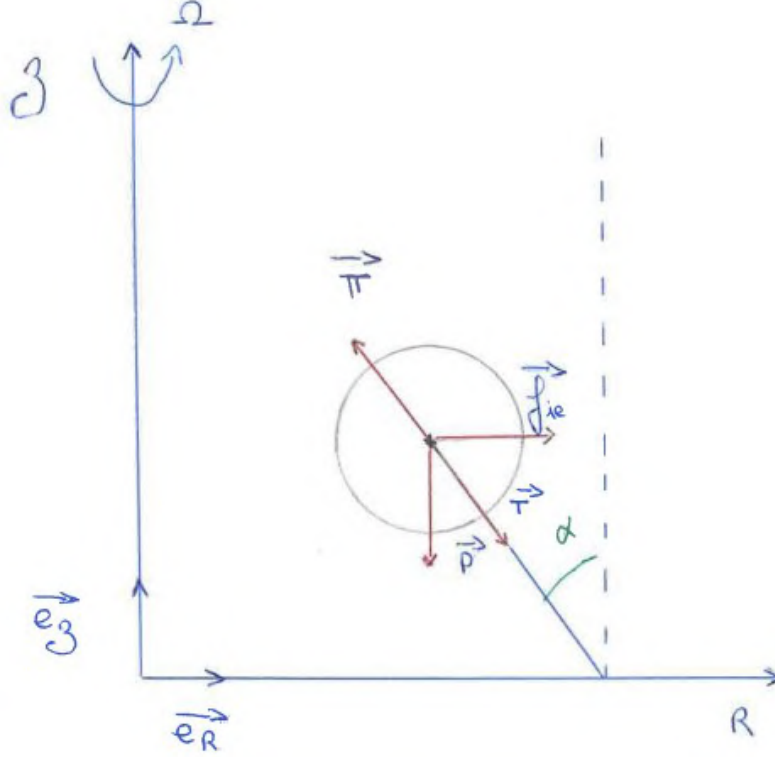


FIGURE 3.4 – Schéma (sans soucis d'échelle) des forces exercées sur la balle immergée

La balle étant immobile :

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} = \vec{0} \Rightarrow \vec{T} = -\vec{P} - \vec{f}_{ie} - \vec{\Pi} \Rightarrow \vec{T} = mg\vec{e}_z - m\omega^2 r \vec{e}_r - \rho V g \vec{e}_z + \rho V \omega^2 r \vec{e}_r$$

$$\Rightarrow \boxed{\vec{T} = (m - \rho V) g \vec{e}_z + (\rho V - m) r \omega^2 \vec{e}_r} \quad \text{avec} \quad m - \rho V < 0 \quad \text{et} \quad \rho V - m > 0$$

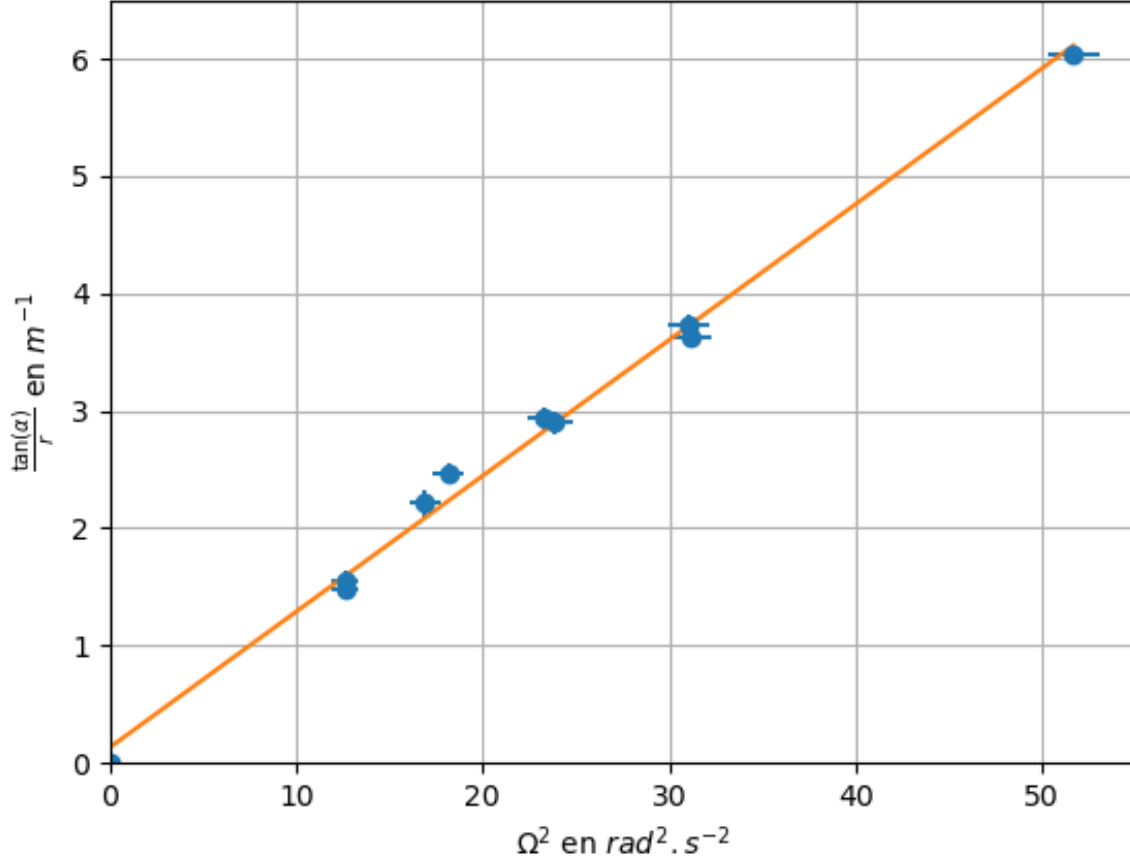
La composante de $\vec{T}$ selon le vecteur unitaire $\vec{e}_r$ est positive, celle selon $\vec{e}_z$ est négative. Le vecteur $\vec{T}$ est orienté comme indiqué sur le schéma. Le fil est bien dirigé vers le centre de la cuve. Enfin, nous pouvons de la même manière vérifier que l'angle α est exprimé par :

$$\Rightarrow \boxed{\tan(\alpha) = \frac{r\omega^2}{g}}$$

Remarque : $\alpha = \theta$, c'est-à-dire que la direction du fil est identique à celle de la poussée d'Archimède.

3.3 Exploitation des mesures

La vérification de notre modèle peut se faire graphiquement, en traçant $\frac{\tan(\alpha)}{r}$ en fonction de ω^2 . Nous devrions trouver une fonction linéaire de pente $\frac{1}{g}$.

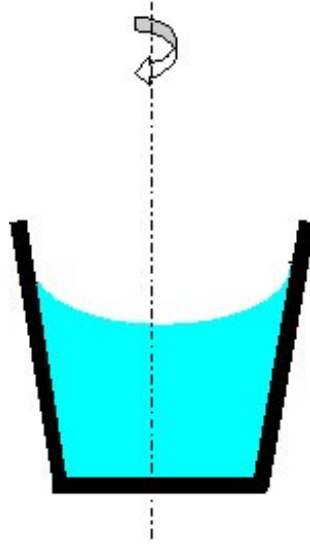


Le modèle linéaire prévu par notre modélisation semble compatible avec les points expérimentaux. Mais la pente obtenue est de $0,115 s^2 \cdot m^{-1}$ alors qu'en théorie elle devrait être de $\frac{1}{g} = 0,102 s^2 \cdot m^{-1}$. Une explication pourrait être l'imprécision due à la courbure de l'image. Pour y remédier, il faudrait reculer davantage la caméra.

3.4 Conclusion

Ainsi, le comportement d'une balle en équilibre maintenue par un fil à l'intérieur de la cuve, met en évidence l'aspect contre-intuitif de notre postulat de départ dû à la poussée d'Archimède en référentiel non-galiléen. Plus la vitesse angulaire est élevée, plus la balle se rapproche du centre de l'axe de rotation, contrairement à ce que l'on pourrait penser, validant ainsi le modèle proposé au 3.2.

Seau de Newton

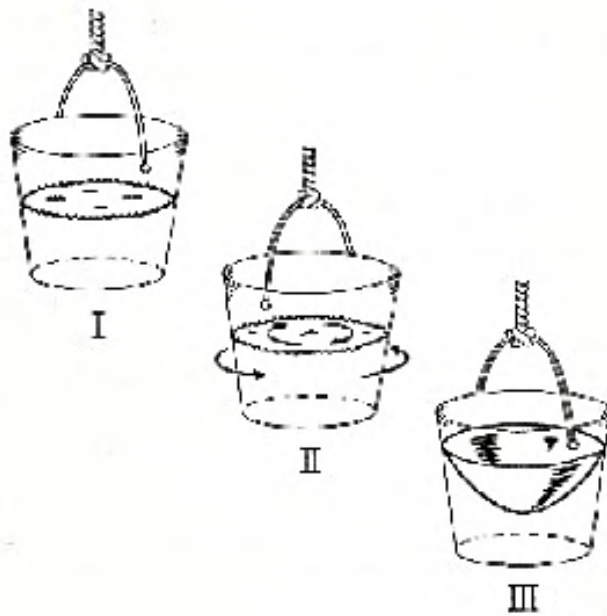


Cette expérience soulève des questions fondamentales voire philosophiques sur la nature du mouvement et de l'espace. Newton l'utilisait pour argumenter en faveur de l'existence d'un espace absolu : lorsque le seau est en rotation, l'eau adopte une forme parabolique. Pour Newton, cette déformation prouvait que l'eau "sent" une rotation absolue, par rapport à un espace absolu, et non simplement un mouvement relatif entre l'eau et le seau.

4.1 Étapes de l'expérience

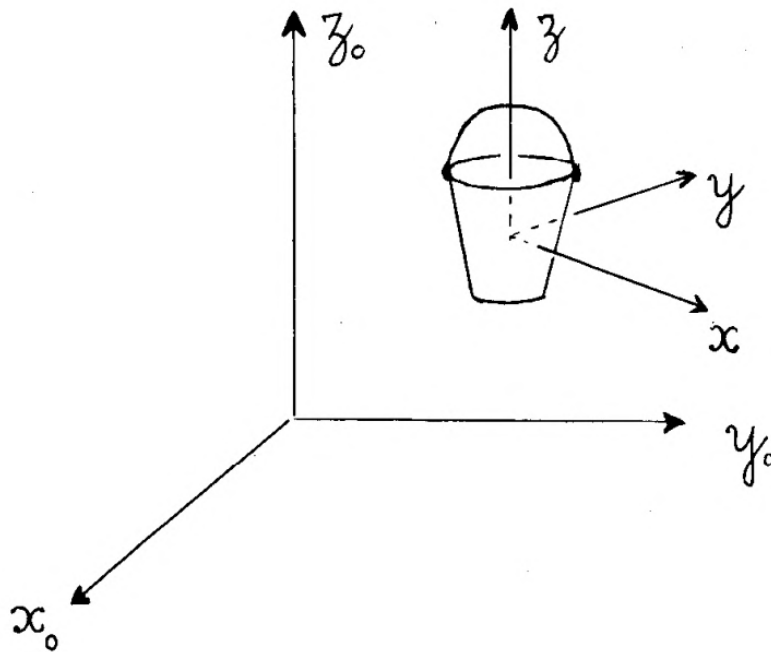
L'expérience du seau tournant de Newton est une démonstration célèbre qui illustre le concept de mouvement absolu. Elle se déroule en trois phases distinctes :

- 1) Étape initiale : Newton suspend un seau rempli d'eau à une corde qu'il a préalablement enroulé. À ce stade, le seau et l'eau sont immobiles, et la surface de l'eau est parfaitement plane.
- 2) Étape transitoire : Newton libère le seau, qui commence à tourner sous l'effet du déroulement de la corde. Pendant cette phase, le seau tourne, mais l'eau reste initialement immobile par inertie. La surface de l'eau demeure plane, malgré le mouvement relatif entre l'eau et le seau. Progressivement, l'eau est entraînée par le mouvement du seau et se met à tourner.
- 3) Étape finale : L'eau et le seau tournent alors à la même vitesse. La surface de l'eau prend alors une forme concave, créant un parabolôïde de révolution.



4.2 Conclusion

L'analyse moderne de cette expérience utilise deux référentiels : (R_0) lié au sol (supposé galiléen) et (R) lié au eau tournant. Cette analyse révèle une asymétrie fondamentale entre ces deux référentiels. La rotation de l'eau par rapport à un référentiel galiléen se manifeste par une courbure de sa surface, suggérant un caractère absolu du mouvement de rotation. Newton y voyait la preuve de l'existence d'un espace absolu, (R_0) étant fixe par rapport à cet espace, tandis que (R) serait en rotation.



Conclusion générale

Notre projet nous a permis de fabriquer un dispositif permettant d'étudier les fluides en rotation.

Nous avons obtenu des résultats significatifs sur le comportement des fluides sous l'effet de la force centrifuge. Les expériences ont confirmé que les fluides newtoniens et non-newtoniens, lorsqu'ils sont soumis à une rotation constante, adoptent une forme parabolique prévisible. Ils donnent des résultats similaires. Cette observation a été validée par des mesures expérimentales qui concordent étroitement avec les prédictions théoriques.

Nous avons également eu l'occasion d'étudier la poussée d'Archimède dans ces fluides en rotation. Nous avons notamment observé et expliqué le mouvement contre-intuitif d'une balle en liège tenue par un fil depuis le fond de la cuve.

L'expérience humaine et scolaire acquise au cours de ce projet a été inestimable. Travailler avec l'IUT à Tulle a non seulement renforcé nos compétences techniques, mais a aussi favorisé la collaboration et l'innovation. Nous avons appris à concevoir, réaliser et analyser des expériences scientifiques rigoureuses, tout en développant notre capacité à résoudre des problèmes complexes.

Ces travaux ouvrent ainsi la voie à de nouvelles expériences passionnantes, telles que l'étude du comportement de rayons lumineux sur un miroir parabolique. Cette prochaine étape pourrait approfondir notre compréhension des applications pratiques de la mécanique des fluides et de l'optique, consolidant ainsi notre engagement dans la recherche scientifique.

Bibliographie et Remerciements

6.1 Bibliographie

- Logiciels et applications utilisés : Regressi, ImageJ, Mu Editor, Spyder, TexStudio (LaTeX)
- Démonstration de l'équation de la surface libre : <https://www.youtube.com/watch?v=1LtiNcQd2yU>
- Article du BUP sur la poussée d'Archimède :
https://perso.ens-lyon.fr/thierry.dauxois/PAPERS/BUP870_1.pdf
- Documentation sur les fluides non-newtoniens :
https://www.sciencesalecole.org/wp-content/uploads/2019/10/LYC62_CR.pdf
- "Comment les fluides coulent-ils ?" de Nicolas Taberlet
<https://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/comment-coulent-les-fluides.xml>
- Sujet d'agrégation 2024 : problème de physique :
http://b.louchart.free.fr/Documents/CE/01/Agregation/Agreg_ext_Physique_2024_C_Enonce.pdf
- Vidéo sur l'expérience du Seau de Newton : <https://youtu.be/Jz3m0lU0GoY?si=y-qKCdR9xSTHywIU>
- Article du BUP sur le seau de Newton :
<http://matériel-physique.ens-lyon.fr/Logiciels/CD%20N%C2%B0%203%20BUP%20D0C%20V%204.0/Disk%202/TEXTES/1981/06310673.PDF>

6.2 Remerciements

- Nous remercions chaleureusement nos professeurs, Mme Céline Pouquet et M. Stéphane Belin, pour leur accompagnement, leur disponibilité et leurs conseils qui nous ont permis de progresser dans cette étude expérimentale.
- Nos remerciements les plus sincères vont aussi pour l'IUT à Tulle, et en particulier à M. Philippe Houillon, professeur de sciences de l'ingénieur à l'IUT, pour son aide précieuse en amont du projet. Sans lui, l'aboutissement de l'expérience aurait été impossible, ou alors les résultats obtenus n'auraient pas été de ce niveau de précision.
- Merci également à M. Rémy Fayet, de l'équipe technique du lycée, pour sa disponibilité lorsque nous cherchions du matériel et des outils.
- Merci à M. Christophe Vergnaud, écrivain et professeur de philosophie du lycée pour son aide sur la compréhension de l'aspect philosophique du problème du Seau de Newton.
- Nous remercions le Comité des Olympiades de Physique pour l'organisation et la gestion de cette 32ème édition du concours.
- Et enfin, merci à notre entourage pour le soutien et leurs encouragements.