

Dynamique du mouvement d'un anneau aimanté sur une tige verticale

ORODEL Olivia & WERLÉ Bernard
UFR de Physique, Université Paris-Cité, Paris, France
(Dated: 13 mai 2025)

Cette étude explore la dynamique d'un anneau aimanté en rotation autour d'une tige ferromagnétique, mettant en évidence trois régimes de chute stables : oscillant, linéaire et avec remontée. En combinant une modélisation mécanique et magnétique, nous avons analysé l'influence des forces magnétiques et des conditions initiales sur ces régimes. Les expériences ont révélé que les forces magnétiques favorisent la stabilisation des régimes, en réduisant la vitesse de chute et en modifiant les seuils critiques de transition. En guise de comparaison, nous avons également étudié la dynamique d'un anneau non magnétique, montrant que les régimes observés en présence d'un champ magnétique ne peuvent être atteints qu'en raison des interactions électromagnétiques. Ces résultats offrent des perspectives pour l'étude des systèmes non linéaires soumis à des forces couplées.

I. INTRODUCTION

L'étude de la dynamique des anneaux en rotation sur des tiges verticales offre un exemple complexe de système non linéaire, où la gravité, la friction, et la géométrie interagissent pour produire des régimes de mouvement variés. Les recherches précédentes se sont concentrées sur des systèmes purement mécaniques, mettant en évidence des transitions entre différents modes de contact, notamment des régimes stables à un ou deux points de contact, souvent modélisés par l'équilibre entre forces gravitationnelles et centrifuges. Ces travaux fournissent une base théorique, mais négligent des effets tels que les frottements et les interactions électromagnétiques.

Dans cette étude, nous étendons cette analyse à des systèmes magnétiques en introduisant un anneau aimanté et une tige ferromagnétique. L'objectif principal est d'identifier les régimes stables propres aux systèmes magnétiques, tout en explorant comment ces interactions influencent la transition entre différents modes de chute.

Nous avons également étudié un anneau non magnétique aux dimensions et à la masse similaires à celles des anneaux magnétiques, servant de référence mécanique pour comparer les dynamiques observées. Cette comparaison permet de quantifier l'impact des forces magnétiques et d'isoler les effets liés à l'aimantation.

L'analyse proposée combine des observations expérimentales et une modélisation théorique. En particulier, nous avons identifié trois régimes stables distincts en présence d'un champ magnétique : un mode oscillant, un mode linéaire, et un mode avec remontées. Ces résultats enrichissent notre compréhension des systèmes non linéaires soumis à des forces couplées, avec des implications potentielles pour des applications en mécanique et en électromagnétisme.

II. MODÉLISATION ET THÉORIE

Le système étudié présente les caractéristiques d'un système chaotique déterministe, où les lois mécaniques et électromagnétiques gouvernent la dynamique, tout en restant sensibles aux conditions initiales.

A. Discussion qualitative préliminaire

Contrairement aux études précédentes qui négligent les frottements et les forces magnétiques, nous prenons en compte ces effets pour analyser la stabilité des régimes observés. Les interactions magnétiques jouent un rôle clé dans la régulation de la chute, tandis que les frottements influencent le glissement et la transition entre les modes.

Un régime stable est défini comme un état de mouvement régulier ou périodique de l'anneau, caractérisé par une trajectoire répétitive et des paramètres mesurables tels que la vitesse angulaire et la vitesse de chute. Ces régimes se distinguent des régimes chaotiques par l'absence de variations imprévisibles et non périodiques.

Les régimes stables observés dans cette étude incluent des modes oscillants réguliers, des trajectoires linéaires à vitesse constante, et des cycles d'inversion du sens de rotation suivis de stabilisations successives. Ces comportements sont déterminés par l'équilibre entre les forces mécaniques (gravité, force centrifuge, frottements) et les forces magnétiques.

Les régimes non stables, ou chaotiques, ne seront pas modélisés dans cette étude en raison de leur complexité et de leur imprévisibilité, mais ils sont observés expérimentalement comme des états transitoires ou intermédiaires.

B. Modélisation mécanique

Dans un contexte purement mécanique, un anneau non magnétique est soumis à la gravité et à la force centrifuge. En négligeant les frottements dans le référentiel de l'anneau, la force centrifuge F_c , agissant radialement pour maintenir le contact entre l'anneau et la tige, est donnée par :

$$F_c = mR\omega^2 \quad (1)$$

où m est la masse de l'anneau, R le rayon de la tige et ω la vitesse angulaire de l'anneau.

La vitesse angulaire $\omega(t)$ constante en l'absence de dissipation, s'exprime par :

$$\omega(t) = \omega_0 \quad (2)$$

où $\omega(t)$ est la vitesse angulaire de l'anneau à l'instant t et ω_0 est la vitesse angulaire initiale de l'anneau au moment où il est mis en rotation.

L'angle de précession $\theta(t)$ varie alors linéairement avec le temps :

$$\theta(t) = \theta_0 + \omega_0 t \quad (3)$$

avec, $\theta(t)$ l'angle de précession à l'instant t , θ_0 l'angle de précession initial.

Lorsque la force centrifuge F_c est minimale de telle sorte à ce que l'anneau n'adhère plus à la tige, il chute.

C. Modélisation magnétique

En présence d'un champ magnétique, des forces supplémentaires modifient la dynamique. L'attraction magnétique F_m entre l'anneau et la tige est donnée par :

$$F_m = \frac{\mu_0 m_1 m_2}{4\pi d^2} \quad (4)$$

où F_m est la force magnétique entre l'anneau et la tige, μ_0 est la perméabilité magnétique du vide, m_1 et m_2 sont respectivement les moments magnétiques de l'anneau et de la tige, et d est la distance entre l'anneau et la tige.

L'anneau magnétique en rotation autour de la tige induit des courants de Foucault dans la tige, qui génèrent une force de freinage. Ce phénomène est décrit par la loi de Faraday :

$$\xi = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (5)$$

où ξ est la force électromotrice induite et Φ_B est le flux magnétique à travers l'anneau.

Les courants de Foucault créent une force de freinage F_e proportionnelle à la vitesse angulaire de l'anneau :

$$F_e = -k_e \omega \quad (6)$$

où k_e est un coefficient dépendant des propriétés matérielles de la tige et de l'anneau.

D. Considérations énergétiques

L'énergie mécanique totale du système anneau-tige inclut l'énergie cinétique de rotation, l'énergie cinétique de translation, énergie de dissipation liée aux frottements et l'énergie potentielle gravitationnelle :

$$E_{kin,rot} = \frac{1}{2} I \omega^2, E_{kin,trans} = \frac{1}{2} mv^2, E_{pot} = mgh \quad (7)$$

où h est la hauteur de l'anneau par rapport à une référence fixe, et v est la vitesse de chute.

Les régimes stables impliquent un équilibre dynamique où une partie de l'énergie potentielle est convertie en énergie cinétique, elle-même dissipée en frottements mécaniques et magnétiques. Ces dissipations stabilisent la chute en limitant les variations de vitesse et en réduisant l'accélération globale.

III. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Cette section décrit les spécificités des anneaux étudiés, le montage expérimental utilisé, les procédures de mesure, et les méthodes d'analyse appliquées.

1. Montage expérimental et matériels

Afin d'observer et mesurer les différents types de mouvements de l'anneau autour d'une tige verticale, tant dans des conditions mécaniques classiques que dans un contexte magnétique, on réalise le montage illustré sur la Figure 1.

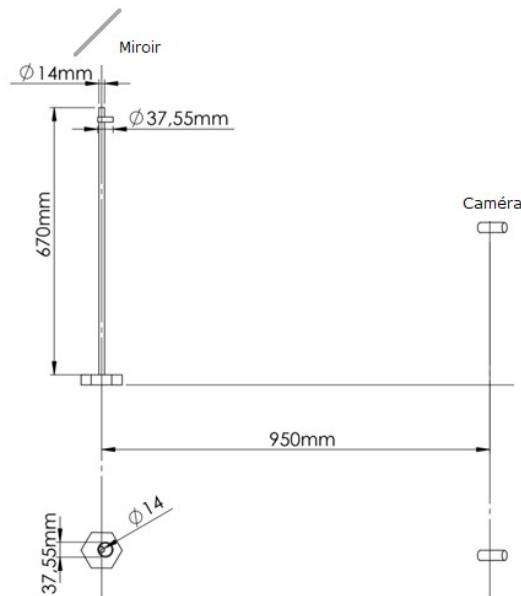


FIGURE 1 – Schéma du montage expérimental avec les dimensions de l'anneau 'Corsair', vue de côté et vue du dessus

La tige d'une potence en acier, de diamètre $d = 14\text{mm}$ et de hauteur $h = 0,65\text{m}$, est utilisée pour la brève phase des expériences sans interaction magnétique. La tige est non rugueuse et sans imperfection afin de pouvoir négliger les frictions. Pour l'étude magnétique, cette même tige ainsi qu'une tige d'une plus petite potence en acier chromé, de diamètre $d = 12\text{mm}$ et de hauteur $h = 0,57\text{m}$ sont utilisées pour étudier les effets des interactions électromagnétiques avec des anneaux aimantés.

Pour l'approche mécanique, un anneau en aluminium aux dimensions similaires à celle des anneaux 'Corsair' est utilisé. Pour l'approche magnétique, deux types d'aimants sont utilisés, avec champs magnétiques et épaisseurs différents :

- Deux anneaux aimantés issus de ventilateurs 'Corsair' d'ordinateurs ayant une polarité radiale spécifique illustrée sur la Figure 2, et un revêtement en caoutchouc.
- Un anneau fabriqué par nos soins à champ radial uniforme.



FIGURE 2 – Détection de flux du champ magnétique de l'anneau 'Corsair'. Les zones claires correspondent aux lignes de champ dans le plan du film détecteur.

2. Spécificités des anneaux

Trois anneaux distincts ont été utilisés : deux anneaux 'Corsair' avec des champs magnétiques différents, mais de dimensions identiques, illustrés Figure 3, et un anneau fabriqué manuellement, illustré Figure 4.

Ring	Mass (g)	Magnetic field (mT)	Dimensions (cm)
Corsair 1	$18,60 \pm 0,06$	24 ± 5	$D_{\text{int}} = 3,1, D_{\text{ext}} = 3,7, \text{Thickness} = 1,3$
Corsair 2	$18,60 \pm 0,06$	36 ± 5	$D_{\text{int}} = 3,1, D_{\text{ext}} = 3,7, \text{Thickness} = 1,3$
Self-made	$10,10 \pm 0,06$	14 ± 5	$D_{\text{int}} = 3,3, D_{\text{ext}} = 4, \text{Thickness} = 1$
non-magnetic	$17,30 \pm 0,06$...	$D_{\text{int}} = 3,6, D_{\text{ext}} = 4, \text{Thickness} = 1,2$

TABLE I – Spécificités des anneaux étudiés.

Les anneaux Corsair servent à comparer l'effet de l'intensité du champ magnétique, tandis que l'anneau fabriqué explore l'impact d'un champ uniforme sur la dynamique

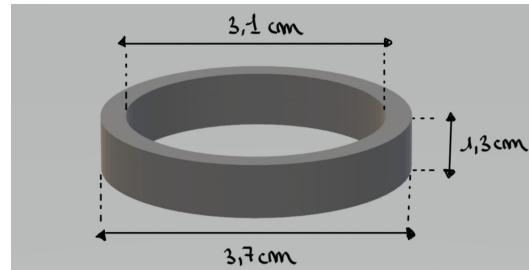


FIGURE 3 – Structure et dimensions des anneaux 'Corsair'.

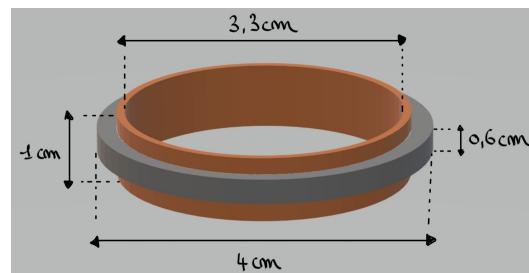
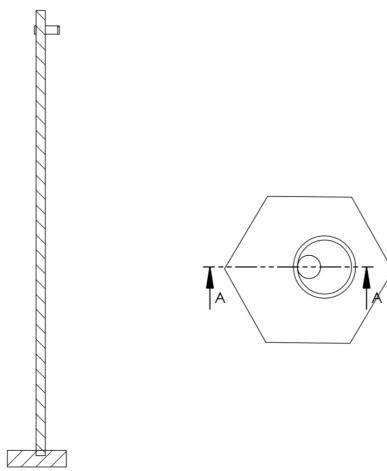


FIGURE 4 – Structure et dimensions de l'anneau fabriqué.

3. Procédure de mesure et contrôle des paramètres

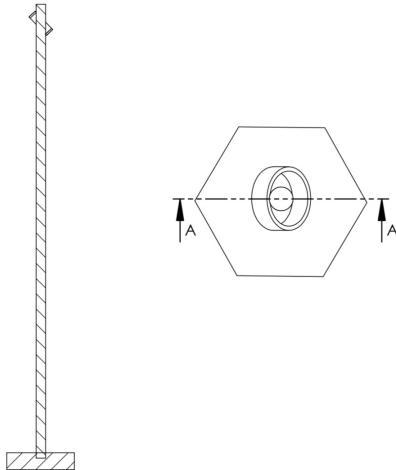
La mise en mouvement est manuelle, bien que ce mode de lancer soit imparfait. Pour chaque essai, l'anneau est placé au sommet de la tige et mis en mouvement manuellement. La mise en mouvement étant elle-même un paramètre de contrôle, on identifie deux modes de lancer, illustrés sur les Figures 5 et 6.



COUPE A-A
ÉCHELLE 1 : 5

FIGURE 5 – Mode "plein contact" avant lancer, vue de coupe et vue du dessus

Une caméra haute vitesse IDS UI-3040CP d'environ 240 images par seconde est positionnée perpendiculairement à la tige pour suivre le mouvement de l'anneau dans un plan latéral. Un miroir est placé à 45° par rapport au sol, permettant de suivre la rotation de l'anneau même lorsque celui-ci passe derrière la tige.



COUPE A-A
ÉCHELLE 1 : 5

FIGURE 6 – Mode "deux contacts" avant lancer, vue de coupe et vue du dessus

Les séquences vidéo sont analysées avec le logiciel Tracker. Un suivi de l'anneau est effectué image par image afin d'extraire les données relatives à sa position, sa trajectoire et sa vitesse tangentielle. Ce traitement permet de reconstituer les différentes phases de la chute.

4. Traitement de données

Les données obtenues à partir du suivi vidéo sont exportées sous forme de tableaux et sont ensuite exploitées pour tracer les courbes des différents trackings, permettant ainsi d'analyser les intercations considérées et d'évaluer l'impact des interactions magnétiques.

Le traitement des données est systématique afin d'assurer la reproductibilité des résultats, essentiel pour la comparaison entre les différents champs magnétiques d'anneaux aimantés et pour évaluer leur impact sur la dynamique de chute.

IV. RÉSULTATS

Dans cette section, nous présentons les observations expérimentales sur la dynamique de l'anneau en chute autour de la tige, dans les régimes non magnétique et magnétique. Les graphiques suivants montrent les différents modes de chute stables identifiés pour chaque configuration, mettant en évidence les variations de trajectoire, de vitesse et d'échanges d'énergie.

1. Régime non magnétique : référence de dynamique

Nous avons tout d'abord étudié la chute d'un anneau non magnétique, dont les dimensions et la masse sont quasi-similaires à celles des bagues magnétiques utilisées par la suite, afin d'établir une référence de dynamique sans interaction magnétique.

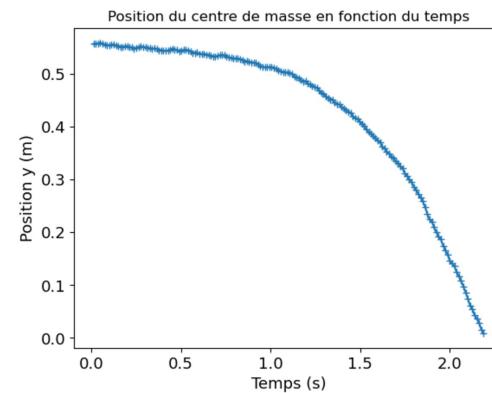


FIGURE 7 – Position du centre de masse de l'anneau non magnétique en fonction du temps

La trajectoire de l'anneau (Figure 7), présente une descente initialement stable à faible vitesse verticale (Figure 8), suivie d'une accélération progressive. Au début de la chute, la force centrifuge perçue par l'anneau le fait adhérer à la tige, si bien qu'il descend la tige lentement, en un roulement hélicoïdal. Lorsque la rotation ralentit, la force centrifuge diminue, il y a perte d'adhérence,

l'anneau dérape, la gravité domine, entraînant une accélération marquée. Ce comportement est visible dans la courbe de position, où la trajectoire passe d'une quasi-linéarité à une courbure accentuée, typique d'un mouvement sous accélération gravitationnelle une fois la contrainte du roulement disparue.

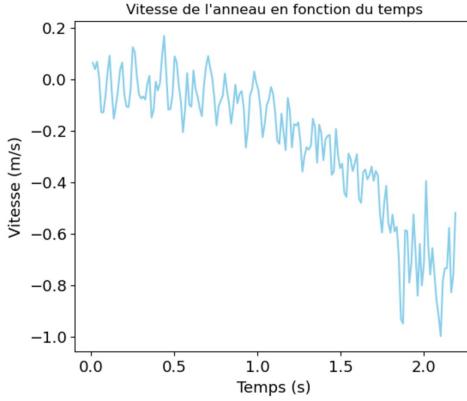


FIGURE 8 – Vitesse de chute de l'anneau non magnétique en fonction du temps

La transition entre ces deux "phases" met en évidence le rôle de la force centrifuge initiale dans la stabilisation temporaire de l'anneau et montre que, sans magnétisme, cette stabilisation est brève et rapidement surpassée par la gravité. Cette dynamique est donc représentative d'une chute classique, influencée seulement par la gravité et les forces de friction entre l'anneau et la tige.

2. Régime magnétique : observation de modes stables

Lorsque l'anneau magnétique est en chute autour de la tige ferromagnétique, nous avons identifié trois modes de mouvement stables distincts. Ces modes sont caractérisés par des comportements dynamiques spécifiques influencés par les interactions magnétiques. Dans cette configuration, les forces magnétiques modifient les trajectoires observées par rapport au régime non magnétique, en introduisant notamment des effets de freinage et des oscillations.

a. Mode oscillant Dans le mode oscillant, l'anneau descend le long de la tige en suivant une trajectoire caractérisée par des oscillations régulières. La Figure 9, montre une trajectoire non linéaire, présentant des paliers et des points d'inflexion qui coïncident avec des inversions de rotation. Le temps total de chute est d'environ 7 secondes, ce qui est environ 3,5 fois plus long que dans le régime non magnétique. Ce régime a été observé sur la petite potence avec la première bague magnétique de type "Corsair", caractérisée par un champ magnétique plus faible.

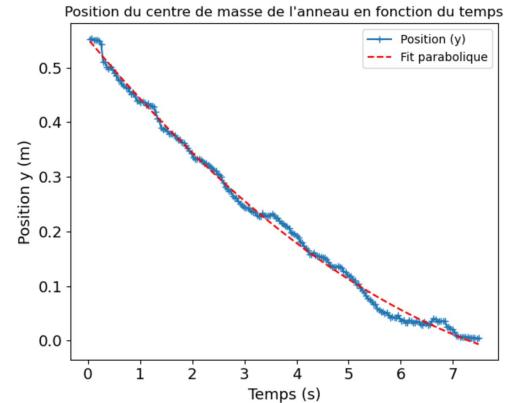


FIGURE 9 – Position du centre de masse en fonction du temps avec ajustement parabolique de l'anneau 1 'Corsair'

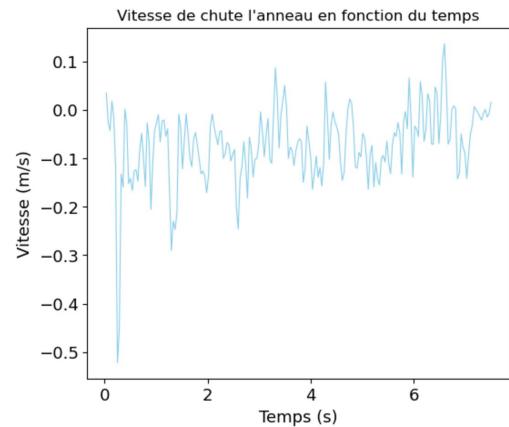


FIGURE 10 – Vitesse de chute de l'anneau 1 'Corsair'

La vitesse de chute de l'anneau oscille entre $-0,2 \text{ m.s}^{-1}$ et $+0,1 \text{ m.s}^{-1}$, avec des changements de signe réguliers signalant de brève remontées. Les faibles amplitudes des fluctuations témoignent d'un régime de descente contrôlé par des forces dissipatives importantes, notamment le frottement statique et les forces de freinage magnétique.



FIGURE 11 – Cycle de phases dynamiques de l'anneau 1 'Corsair'

Lors de sa chute, l'anneau magnétique en interaction avec la tige ferromagnétique suit un cycle de phases dynamiques répétées, illustré sur la Figure 11. Initialement, il oscille autour de la tige (Phase 1) dans une descente stabilisée. Sous l'effet combiné de la force centrifuge et du magnétisme, il atteint une phase d'adhérence maximale (Phase 2), où la vitesse de descente diminue.

Lorsque cet équilibre se rompt, l'anneau glisse le long de la tige (Phase 3), entraînant une accélération visible sur la courbe de position. Ce glissement est suivi d'une inversion de rotation (Phase 4), avant un retour au comportement oscillant de la Phase 1, rétablissant le cycle.

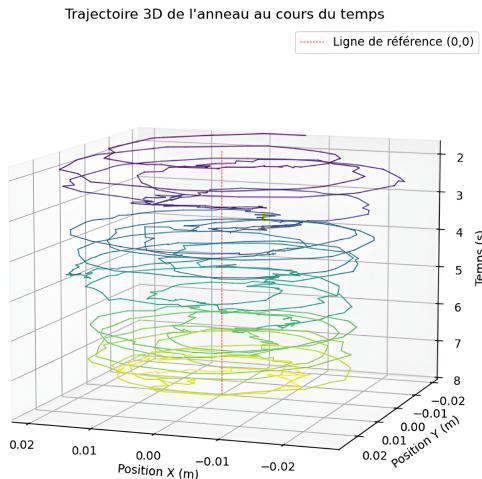


FIGURE 12 – Mouvement spiralé de l'anneau 1 'Corsair' avec gradient temporel

La Figure 12 illustre un mouvement spiralé autour de la tige, résultant de l'attraction magnétique radiale et des forces de freinage dues aux frottements et aux courants de Foucault. Les variations observées dans le rayon de la spirale traduisent les cycles dynamiques décrits dans la Figure 11, avec des rayons minimaux associés aux phases de glissement.

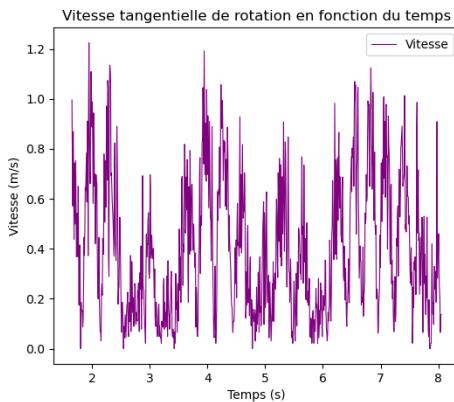


FIGURE 13 – Vitesse tangentielle de l'anneau 1 'Corsair' (en valeur absolue)

Les phases où la vitesse tangentielle, illustrée Figure 13, tend vers des valeurs minimales correspondent aux inversions de rotation et aux phases de glissement, où l'énergie cinétique de rotation est temporairement dissipée par le frottement.

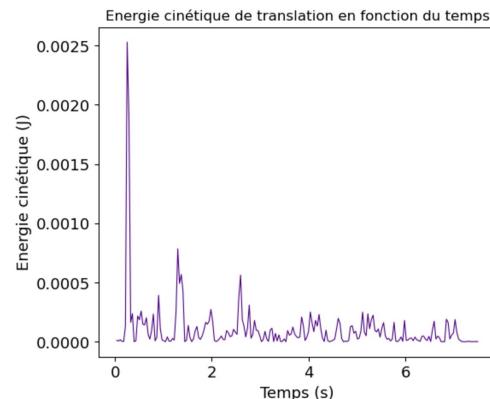


FIGURE 14 – Energie cinétique de translation de l'anneau 1 'Corsair'

L'énergie cinétique de translation (Figure 14) reste très faible, autour de $0,0005J$, reflétant une contribution négligeable au mouvement global de l'anneau, en particulier comparée à l'énergie cinétique de rotation (Figure 15). L'observation est cohérente, la vitesse de chute étant modérée, la majeure partie de l'énergie est dissipée par les frottements et les interactions magnétiques. Les faibles fluctuations observées peuvent être attribuées aux phases transitoires d'accélération et de décélération lors des inversions de rotation.

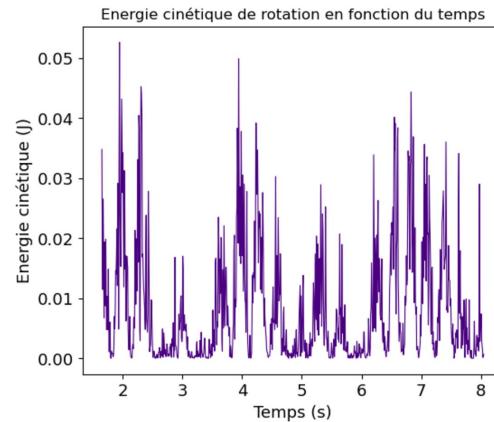


FIGURE 15 – Energie cinétique de rotation de l'anneau 1 'Corsair'

L'énergie cinétique de rotation (Figure 15) présente des variations significatives, atteignant des maxima d'environ $0,05J$, soit environ 100 fois supérieurs à l'énergie de translation. Ces maxima correspondent aux phases où l'anneau est en rotation rapide et stable, traduisant une conversion de l'énergie potentielle en énergie de rotation. Cependant les régions de faible énergie cinétique de rotation, suggèrent des pertes énergétiques importantes. Ces pertes peuvent être attribuées à des transferts d'énergie vers les forces de frottement, en particulier lors des phases de glissement ou de transition entre cycles. Cette dynamique met en évidence le rôle dominant de la

rotation dans le comportement global de l'anneau.

La force magnétique exercée par l'anneau sur la tige, estimée à $0,76N$, détermine le maintien de l'anneau en contact avec la tige. Associée à un coefficient de frottement de $0,57$ (caoutchouc contre acier), cette force contribue aux phases d'adhérence et limite la descente de l'anneau. Les transitions entre adhérence maximale et glissement traduisent un équilibre dynamique entre ces forces et l'énergie cinétique de rotation.

Ce mode oscillant met en évidence un équilibre complexe entre gravité, forces magnétiques et forces de freinage. Il se distingue par une alternance régulière entre phases stabilisées et transitions dynamiques, prolongeant la durée de chute de l'anneau par rapport au régime non magnétique. L'énergie cinétique de rotation, largement dominante, module les cycles de descente de l'anneau, tandis que l'énergie de translation reste marginale. Les cycles dynamiques observés, avec leurs phases d'adhérence et de glissement, reflètent un équilibre instable entre forces externes et dissipation énergétique. Ce mode met en évidence le rôle prépondérant des forces dissipatives dans le ralentissement et la régulation de la chute.

b. Mode linéaire Le mode linéaire se distingue par une descente stabilisée et uniforme de l'anneau le long de la tige, sans oscillations significatives ni inversions de sens de rotation, suggérant un équilibre dynamique entre les forces en jeu. Ce régime a été observé sur la grande potence avec la seconde bague magnétique de type "Corsair", caractérisée par un champ magnétique plus important.

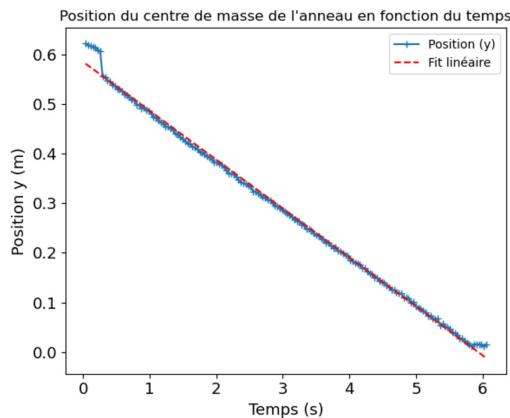


FIGURE 16 – Position en fonction du temps avec ajustement linéaire de l'anneau 2 'Corsair'

Au cours de sa descente, l'anneau suit une trajectoire linéaire (Figure 16) à vitesse quasi-constante indiquant que les forces en jeu — principalement la gravité, la friction, et le magnétisme — atteignent un équilibre stable, caractéristique d'un régime linéaire.

La vitesse de descente oscille autour d'une valeur moyenne d'environ $-0,1m.s^{-1}$, visible Figure 17. Ces faibles fluctuations, sont attribuées à des variations mineures d'adhérence de l'anneau à la tige. Néanmoins, l'amplitude de ces variations reste négligeable, corroborant la constance générale du mouvement.

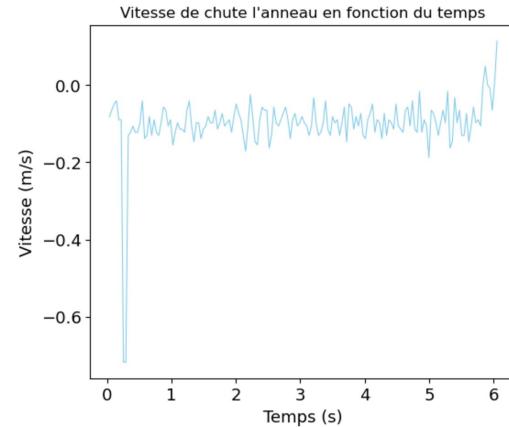


FIGURE 17 – Vitesse de chute de l'anneau 2 'Corsair'

Le mode linéaire est caractérisé par un mouvement régulier et uniforme de l'anneau autour de la tige, sans oscillations ni inversions de sens de rotation. Les phases illustrées Figure 18 montrent une rotation stable où l'anneau conserve une adhérence constante à la tige, soutenue par l'équilibre des forces gravitationnelles, centrifuges, et magnétiques. Cette régularité traduit une absence de perturbations dynamiques majeures.

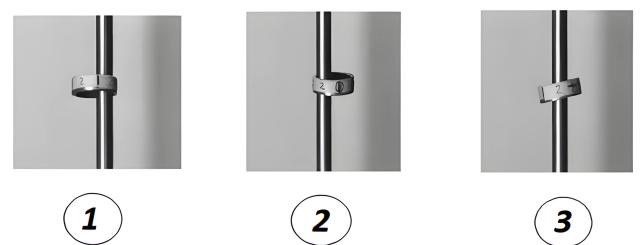


FIGURE 18 – Phases dynamiques de l'anneau 2 'Corsair'

Le mouvement spiralé (Figure 19) reste comparable à celui observé dans le mode oscillant, bien que l'occurrence des rayons minimaux soit significativement réduite. Ces rayons minimaux, associés à des phases de glissement ou de repositionnement relatif, apparaissent moins souvent en raison de la constance de l'adhérence et de l'absence de variations dynamiques majeures. Ce comportement confirme la prédominance d'un régime linéaire stable.

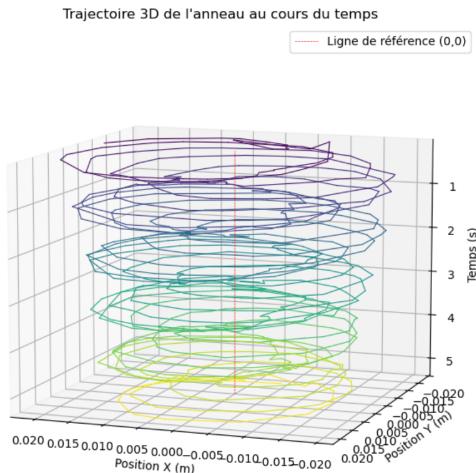


FIGURE 19 – Mouvement spiralé de l’anneau 2 ‘Corsair’ avec gradient temporel

L’énergie cinétique de translation, Figure 20, d’une valeur moyenne constante autour de $0,001J$, reste négligeable au mouvement global de l’anneau.

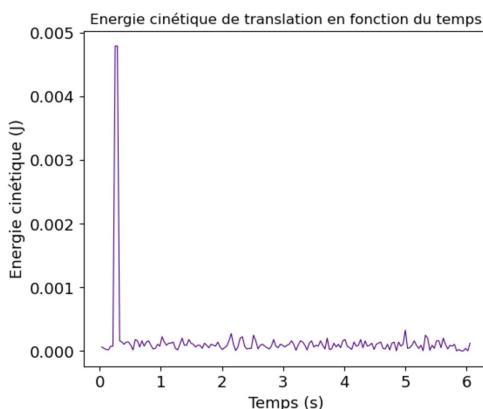


FIGURE 20 – Energie cinétique de translation de l’anneau 2 ‘Corsair’

L’énergie cinétique de rotation, Figure 21, présente des maxima atteignant $0,12J$, une valeur significativement plus élevée que celle du mode oscillant. Cela traduit une adhérence accrue et un transfert minimal vers les énergies dissipatives telles que les frottements.

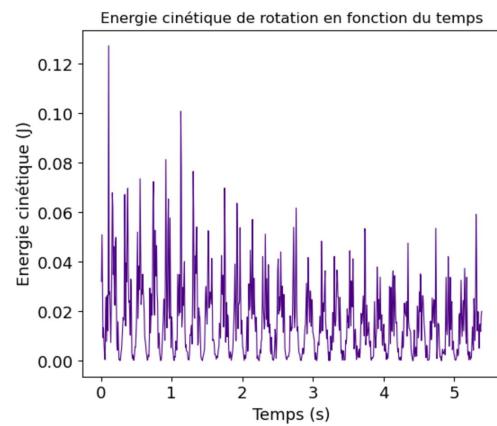


FIGURE 21 – Energie cinétique de rotation de l’anneau 2 ‘Corsair’

La force magnétique exercée par l’anneau sur la tige, mesurée à $0,96N$, est plus élevée que dans le mode oscillant, en raison du champ magnétique plus élevé de l’anneau. Le coefficient de frottement estimé à $0,65$ contribue également à maintenir une forte adhérence, limitant ainsi les phénomènes de glissement et permettant une descente régulière et contrôlée.

Le mode linéaire illustre un comportement dynamique stable et prévisible, caractérisé par une trajectoire uniformément spiralee et une vitesse de rotation faiblement oscillante autour d’une valeur constante. L’absence de transitions ou d’irrégularités majeures confirme que l’équilibre entre les forces en présence domine la dynamique de l’anneau. Ce régime met en évidence les conditions idéales où les forces stabilisatrices surpassent les effets perturbateurs.

c. **Mode avec remontées** Dans ce mode, l’anneau magnétique présente un comportement distinct marqué par des inversions périodiques de sa rotation et des phases de remontés sur la tige. Ce régime a été observé sur la petite potence avec l’anneau fabriqué.

La trajectoire (Figure 22), présente une courbure globale permettant un ajustement parabolique, indique une décélération moyenne constante. Cette courbure est superposée à des oscillations régulières, témoins d’un comportement dynamique complexe marqué par des inversions de rotation. Ces variations traduisent l’alternance entre phases de descente et de remontée partielle, soulignant un régime oscillatoire propre au mode avec remontées.

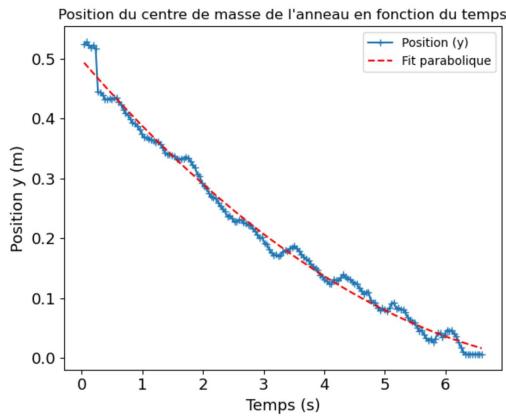


FIGURE 22 – Position en fonction du temps avec ajustement parabolique de l’anneau fabriqué

La Figure 23 montre ces transitions dynamiques. La vitesse de chute oscille autour des valeurs variant entre $-0,2 \text{ m.s}^{-1}$ et $+0,1 \text{ m.s}^{-1}$. Ces changements de signe traduisent les inversions dynamiques du mouvement, avec des phases de remontée significative de l’anneau alternant avec des descentes accélérées.

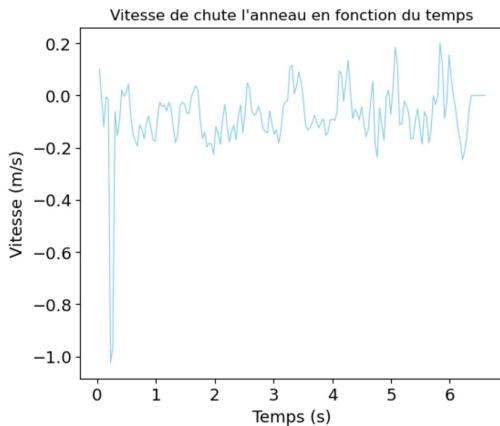


FIGURE 23 – Vitesse de chute de l’anneau fabriqué

Ces caractéristiques reflètent la compétition entre les forces centrifuges et magnétiques, qui stabilisent l’anneau, et les forces de frottement et de gravité, qui induisent le glissement et l’inversion de rotation. Ces inversions se produisent lorsque l’équilibre dynamique est rompu, menant à une réorganisation périodique de la trajectoire de l’anneau et à un rééquilibrage constant des forces présentes.



FIGURE 24 – Cycle de phases dynamiques de l’anneau fabriqué

Lors de sa descente, l’anneau alterne entre différentes phases dynamiques, illustrées Figure 24. Il débute par une rotation descendante stable (Phase 1), avant d’entrer dans une phase d’adhérence accrue (Phase 2) où une remontée le long de la tige est observée, due à un rééquilibrage des forces magnétiques et de frottement. Cette remontée est suivie d’une reprise de la rotation descendante stabilisée (Phase 3). Enfin, un bref glissement le long de la tige (Phase 4) marque la transition vers un nouveau cycle, soulignant l’aspect périodique de ce mode.

Trajectoire 3D de l’anneau au cours du temps
Ligne de référence (0,0)

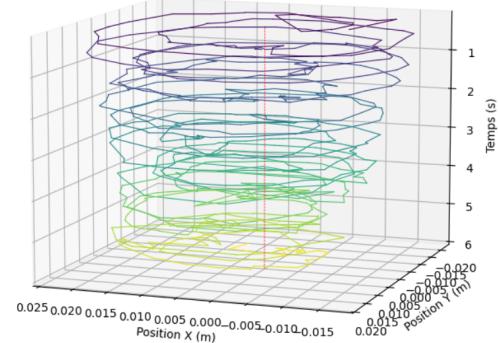


FIGURE 25 – Mouvement spiralé de l’anneau fabriqué avec gradient temporel

Le mouvement spiralé observé (Figure 25), bien qu’analognes aux autres modes, est davantage perturbé. Le nombre important de rayons minimaux dans le graphique correspond à des points de contact étroits entre l’anneau et la tige, liés aux transitions entre les phases dynamiques. Ces variations accrues indiquent un régime plus instable mais néanmoins périodique.

L’énergie cinétique de translation reste faible, de l’ordre de $0,001J$, comme dans les modes oscillant et linéaire. Sa contribution négligeable confirme que le mouvement de l’anneau est principalement influencé par des forces de rotation et de frottement.

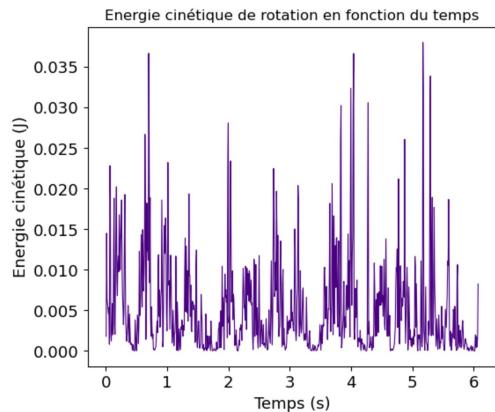


FIGURE 26 – Energie cinétique de rotation de l’anneau fabriqué

De façon similaire au mode oscillant, l’énergie cinétique de rotation (Figure 26) atteint environ $0,03J$. Les maxima observés correspondent aux phases de rotation active, tandis que les régions de faible énergie cinétique traduisent des périodes de dissipation énergétique, notamment par le frottement.

Avec une force magnétique de $0,2N$, plus faible que dans les autres modes, et un coefficient de frottement modéré, l’anneau montre néanmoins un régime stable. Cette stabilité s’explique par l’uniformité du champ magnétique et par la géométrie spécifique de l’anneau, qui réduisent les perturbations dynamiques tout en maintenant les oscillations caractéristiques du mode.

Le mode avec remontées met en évidence une dynamique périodique résultant d’un équilibre entre forces gravitationnelles, centrifuges, et magnétiques. L’alternance entre adhérence, glissements et inversions traduit les transitions critiques de l’anneau, soulignant l’influence dominante des interactions magnétiques sur la stabilité et la modulation du mouvement. Ce régime reflète l’im-

pact des forces magnétiques sur la régularité et la nature oscillatoire de la chute.

V. DISCUSSIONS

Les graphiques des positions (et des vitesses de chute) présentent un léger pic précédant un mouvement stable, en partie dû à l’impulsion donnée manuellement. La précision et la reproductibilité des mesures sont des aspects essentiels de toute étude. L’un des défis majeurs réside dans le contrôle des paramètres initiaux, notamment l’impulsion donnée à l’anneau. Afin de garantir la répétabilité des expériences et de minimiser les erreurs humaines, un système automatisé de mise en mouvement serait souhaitable. Ce dispositif permettrait de contrôler et de quantifier avec précision les conditions initiales. De plus, les considérations énergétiques resteraient à approfondir.

Références

- [1] X.Li, S.Jindal et L.Yang, Nonlinear dynamics and onset of steady precession of a ring on a vertical rod, *Phys. Rev. E* 109 : 054214, **2024**
- [2] H.Takano, Analyzing the Motion of a Washer on a Rod, *Regular and Chaotic Dynamics* 28 : 227-250, **2023**
- [3] R.Cross, Rotating ring on a horizontal rod, *Phys. Educ.* 59 015037, **2024**
- [4] R.Cross, Physics of a hula hoop, *Phys. Educ.* 56 025015, **2021**
- [5] Y. Xingxing et al., The motion of a washer on a vertical steel rod, *Eur. J. Phys.* 45 015002, **2024**
- [6] J.-P. Yonnet, Paliers et butées magnétiques passifs, *Techniques de l’Ingénieur* D3568 V1, **2002**