



Projet d'Ingénierie Simultanée

Slow Down Falling Card

Projet encadré par le Prof. Dr. **F. Gallaire**

Laboratory of Fluid Mechanics and Instabilities

Nom	Prénom	Numéro Sciper
Costa Pereira	Samantha Irène	362665
Latrouite	Maxence Marie Charles Amaury	346782
Vacek	Daniel	345533
Valente Jacot-Descombes	Arnaud	339436
Villa	César Jacques Hanakea Fomalhaut Melchior	334551
Zhang	Jingqi	364252

November 29, 2025

1 Abstract

Ce projet de bachelor s'inscrit dans le domaine de la mécanique des fluides et étudie la chute des disques. L'objectif principal est d'identifier comment la géométrie et la répartition des perforations influencent la vitesse, la stabilité, la rotation ou encore les oscillations d'un disque dans un fluide. Pour ce faire, nous avons effectué des expériences tout au long du semestre en usinant une vaste variété de disques. Nous les avons étudiés en procédant à des systèmes de mesures par caméra qui nous ont permis d'observer la vitesse de chute en fonction de la perméabilité et de la porosité, la rotation en fonction de l'inclinaison des fentes ainsi que d'observer la période d'oscillation de la rotation de disques pour lesquelles les trous sont disposés de manière asymétriques.

Table des matières

1	Abstract	1
2	Introduction	3
3	Matériel et méthode	3
3.1	Dispositif expérimental	3
3.2	Classification des disques	4
3.2.1	Disque I: variation de perméabilité-porosité	4
3.2.2	Disque II: différentes formes de fentes	4
3.2.3	Disque III: fentes inclinées	5
3.2.4	Disque IV: asymétriques	5
3.3	Protocole	6
3.4	Analyse par vidéo	7
3.4.1	Détection et Suivi Vidéo (Python)	7
3.4.2	Analyse Géométrique et Dynamique (MATLAB)	7
4	Résultats	8
4.1	Disques à variation de perméabilité-porosité	8
4.2	Disques avec différentes formes de fentes	9
4.3	Disques fentes inclinées	10
4.4	Disques asymétriques	11
5	Discussion	11
5.1	Validation des méthodes d'analyse	11
5.2	Discussion des résultats	12
5.2.1	Disque I: variation de perméabilité porosité	12
5.2.2	Disque II: différentes formes de fentes	13
5.2.3	Disque III: fentes inclinées	13
5.2.4	Disque IV: asymétriques	13
5.3	Améliorations possibles	14
6	Conclusion	14
7	Remerciements	14

2 Introduction

Ce rapport présente l'étude expérimentale de la chute d'un disque perforé dans un fluide, menée dans le cadre de notre projet de semestre. L'objectif principal de ce travail est d'analyser l'influence de la géométrie des trous présents dans le disque sur son comportement dynamique lors de la chute, en mettant en relation les paramètres géométriques avec des notions telles que la porosité et la perméabilité. De plus, nous avons mis en place les outils nécessaires à ces analyses.

Les disques utilisés sont percés de trous de différentes tailles, formes et répartitions, ce qui modifie l'interaction entre le fluide et la surface de l'objet. Ces variations peuvent notamment influencer la vitesse de chute, la stabilité, la traînée ainsi que l'apparition de phénomènes complexes tels que des oscillations ou des rotations.

Pour répondre à cette problématique, nous avons mené une série d'expériences consistant à lâcher différents disques dans un aquarium, tout en enregistrant leur trajectoire à l'aide d'un système de tracking par caméra. Les données récoltées ont été analysées afin d'extraire plusieurs données comme les vitesses moyennes, les trajectoires totales, ainsi que les comportements caractéristiques associés à chaque géométrie de disque.

Ce rapport détaille dans les sections suivantes le protocole expérimental, les méthodes d'analyse utilisées, ainsi que l'interprétation des résultats, en proposant si possible des lois empiriques ou des pistes de modélisation reliant géométrie et dynamique de chute.

3 Matériel et méthode

3.1 Dispositif expérimental

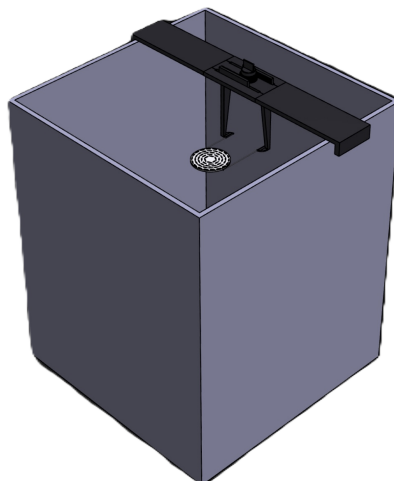


Figure 1: Schéma du dispositif expérimental

Nous disposons d'un aquarium de dimension 60 cm x 50 cm x 50 cm, sachant que l'eau est remplie à une hauteur de 55 cm. Un disque est ensuite lâché par une pince équipée de fines

tiges horizontales submergées qui le retienne à ses bords afin que lors de son ouverture, il n'y ait pas de remous. Ce dispositif nous permet également d'avoir une hauteur de chute de 50 cm, constante tout au long des expériences. De cette manière là, nous assurons aussi une standardisation des lâchés grâce à des conditions initiales homogènes.

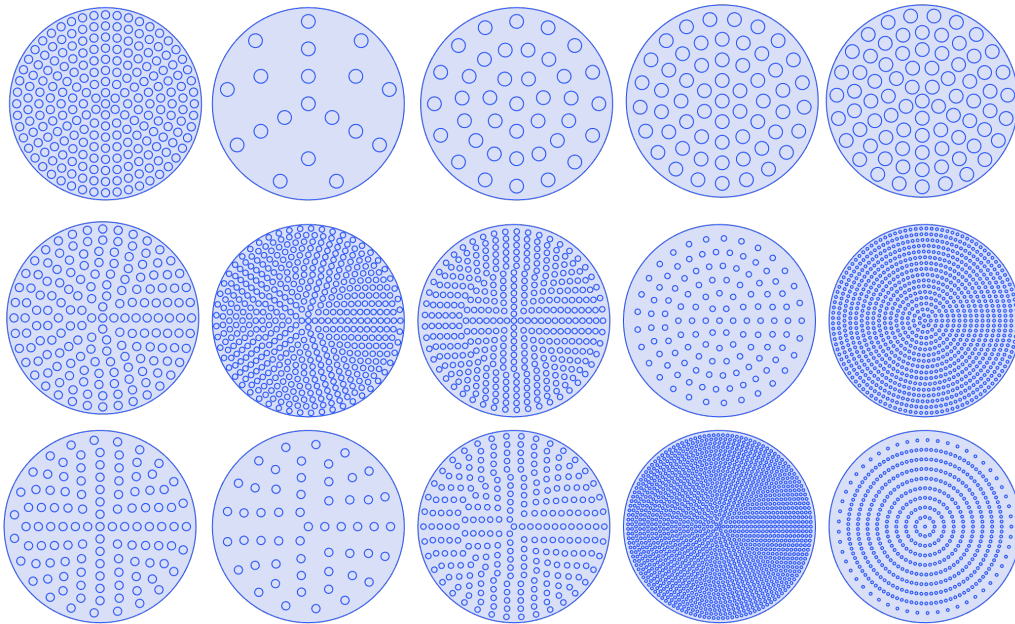
Pour cette étude nous avons choisi de standardiser certains paramètres. Nous nous concentrons donc sur des disques de diamètre 7 cm en PMMA d'épaisseur 3 mm dans de l'eau à température ambiante, soit environ 20°C afin de garantir un bon rapport de densité. La découpe laser étant rapide, suffisamment précise et peu onéreuse, nous avons décidé d'en faire notre procédé de production pour tous nos disques.

Afin d'obtenir des mesures plus précises, nous avons utilisé une caméra Canon EOS77D avec une fréquence d'acquisition de 50 fps.

3.2 Classification des disques

3.2.1 Disque I: variation de perméabilité-porosité

Pour ce type de disque, nous avons fait varier la porosité et la perméabilité séparément de manière à bien percevoir l'effet d'un paramètre sur l'autre. Les géométries ont été générées à l'aide d'une application Python développée spécifiquement pour produire des fichiers DXF. Cette application nous permet de choisir le nombre et le diamètre des trous, les répartir de manière homogène sur la surface du disque, et ainsi faire varier la porosité et la perméabilité.



3.2.2 Disque II: différentes formes de fentes

Dans le cadre de la recherche d'une solution bidimensionnel pour induire la mise en rotation d'un disque, nous nous sommes interrogés sur l'influence de la forme des fentes sur ce mouvement. Pour cela, nous avons étudié la chute de quatre disques, chacun muni de fentes de formes différentes. Les formes considérées sont : une forme d'œil, un triangle, une goutte d'eau et un cercle (forme de référence).

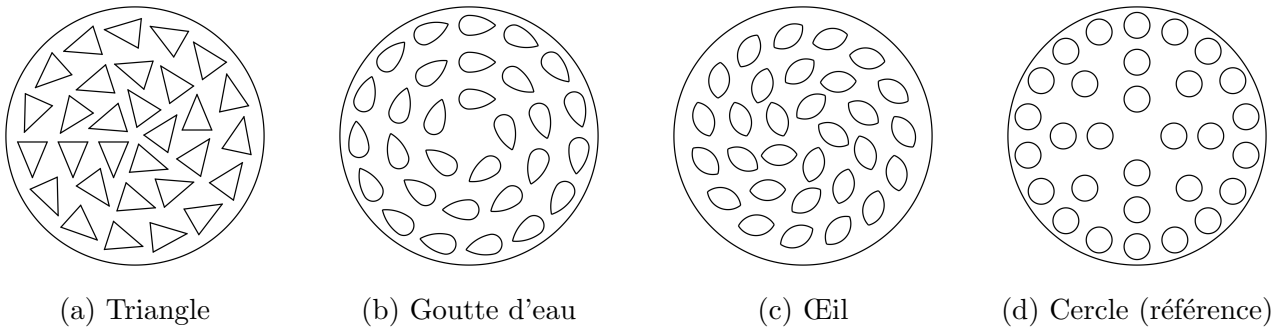


Figure 2: Les quatre types de disques testés selon la forme de leur fente.

3.2.3 Disque III: fentes inclinées

Dans ce cas d'étude, nous nous sommes intéressés à la tendance de rotation des disques durant leurs chutes. Pour ce faire, nous avons utilisé une forme de trou profilée en "œil", décrite dans la section précédente, et l'avons placée sur chaque disque selon un angle d'orientation différent. Avec une chiralité des disques, ces angles varient -60° à 60° , par incréments de 10° , tout en maintenant constants les autres paramètres, notamment la porosité fixée à 30%, afin d'isoler l'effet de l'inclinaison.

Nous définissons ici l'angle d'inclinaison des fentes comme l'angle formé entre le tangente du disque et l'axe longitudinal de la fente, l'origine étant située au centre de celle-ci.

3.2.4 Disque IV: asymétriques

Des tests exploratoires menés sur certains disques présentant des défauts de fabrication, notamment une distribution asymétrique de fentes, ont révélé une dynamique de chute particulière, marquée par une rotation induite par l'instabilité. Cette observation nous a conduit à explorer l'influence de la distribution des trous sur la mise en rotation du disque.

Afin d'approfondir cette piste, nous avons conçu une série de disques perforés, chacun doté d'un agencement spécifique de trous circulaires (Figure 3) tout en conservant une porosité de 30%. Les disques numérotés de 2 à 6 diffèrent d'un unique trou déplacé latéralement vers la droite, tandis que pour les deux derniers l'ensemble de la structure des trous est translatée de $2mm$ vers la droite.

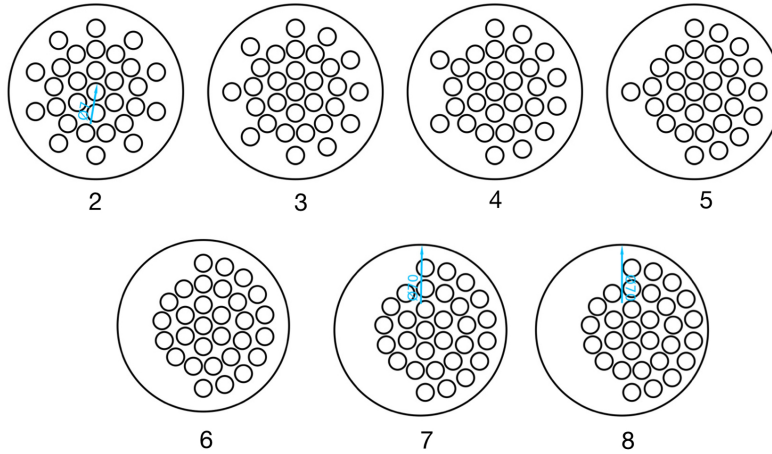


Figure 3: Disques Asymétriques, numérotés de 2 à 8.

3.3 Protocole

Les disques I et II ont été testés selon un premier protocole, tandis que les disques III et IV ont suivi un second protocole, différent du premier.

1. Disque I et II

- **Mise en place du disque**
 - Rapprochement des pinces sur les extremums du disque pour minimiser le frottement lors du lâcher
- **Lâcher du disque**
 - Attendre qu'il n'y ait plus de perturbation
 - Activer le chronomètre au moment du lâcher
- **Prise de données**
 - Arrêter le chronomètre au moment où le disque touche le fond
 - Évaluer qualitativement la stabilité
 - Répéter 3 à 5 fois par cas en fonction de la qualité des conditions initiales

2. Disques III et IV

- **Mise en place de la caméra**
 - Vérification du champs de vision
- **Mise en place du disque**
 - Extinction de toutes les lumières, sauf la lampe-torche
 - Rapprochement des pinces sur les extremums du disque pour minimiser le frottement lors du lâcher
 - Éclairage du disque par la lampe-torche pendant quelques minutes afin de charger la peinture phosphorescente.
- **Lâcher du disque**
 - Mise au point sur le disque par la caméra
 - Démarrage de la vidéo
 - Extinction de la lampe-torche
 - Ouverture délicate des pinces
 - Vérification visuelle du tracking par la caméra tout au long de la chute
 - Lorsque le disque arrive au fond de l'aquarium, attente de l'immobilisation de celui-ci puis arrêt de la vidéo.

- **Répétition**

- Répéter 3 à 5 fois par cas en fonction de la qualité des conditions initiales

3.4 Analyse par vidéo

L'analyse du mouvement des disques est structurée en deux étapes principales : (1) l'extraction des coordonnées des points fluorescents sur les vidéos par traitement d'image, et (2) le post-traitement des trajectoires pour en déduire les paramètres géométriques et dynamiques recherchés.

3.4.1 Détection et Suivi Vidéo (Python)

Une interface interactive développée en Python permet d'analyser une vidéo contenant un disque en chute muni de marqueurs fluorescents. L'utilisateur sélectionne une plage de couleur RGB caractéristique des marqueurs à l'aide d'un outil dédié.

Le traitement s'effectue image par image, selon les étapes suivantes :

1. Génération d'un masque binaire à partir des seuils RGB spécifiés ;
2. Calcul d'une carte de score locale via une moyenne glissante sur une fenêtre carrée de taille $n \times n$ pixels ;
3. Détection des maxima locaux de cette carte (régions les plus fluorescentes) ;
4. Sélection des points à suivre en appliquant un critère de non-chevauchement spatial ;
5. Suivi temporel des points par appariement au plus proche voisin entre deux frames, sous contrainte de distance maximale autorisée.

Le résultat est une vidéo annotée et un fichier `.csv` contenant, pour chaque frame, les coordonnées (x, y) , les identifiants des points et leurs scores de détection.

3.4.2 Analyse Géométrique et Dynamique (MATLAB)

Les fichiers `.csv` générés sont ensuite traités via un script MATLAB qui reconstruit la dynamique du disque :

1. Les points sont appariés d'une frame à l'autre à l'aide de l'algorithme hongrois, permettant de reconstituer les trajectoires complètes.
2. Pour chaque image, une ellipse est ajustée aux points, permettant d'extraire :
 - les demi-axes $(R_{\text{ellipse}}, r_{\text{ellipse}})$,
 - le centre (X_0, Y_0) ,
 - l'inclinaison spatiale via le vecteur normal au disque.
3. Sous hypothèse que le disque est circulaire de rayon R connu, et en utilisant les paramètres de la caméra (focale f , taille de pixel α), on reconstruit :
 - la profondeur Z à chaque instant (via la variation du diamètre de l'ellipse)
4. Des métriques dynamiques sont extraites :
 - variation des rayons apparents (ΔR) ,
 - amplitude d'orientation $(\Delta \theta)$,
 - déplacement latéral (A_{xy}) ,
 - déplacement vertical (ΔZ) ,
 - amplitude de rotation $(\Delta \phi)$.
5. Un rapport PDF vectoriel est généré automatiquement, intégrant des figures annotées et un tableau de synthèse des grandeurs extraites.

Ce protocole permet de reconstruire de manière fiable la dynamique 3D du disque à partir d'une simple vidéo prise depuis le dessus.

4 Résultats

4.1 Disques à variation de perméabilité-porosité

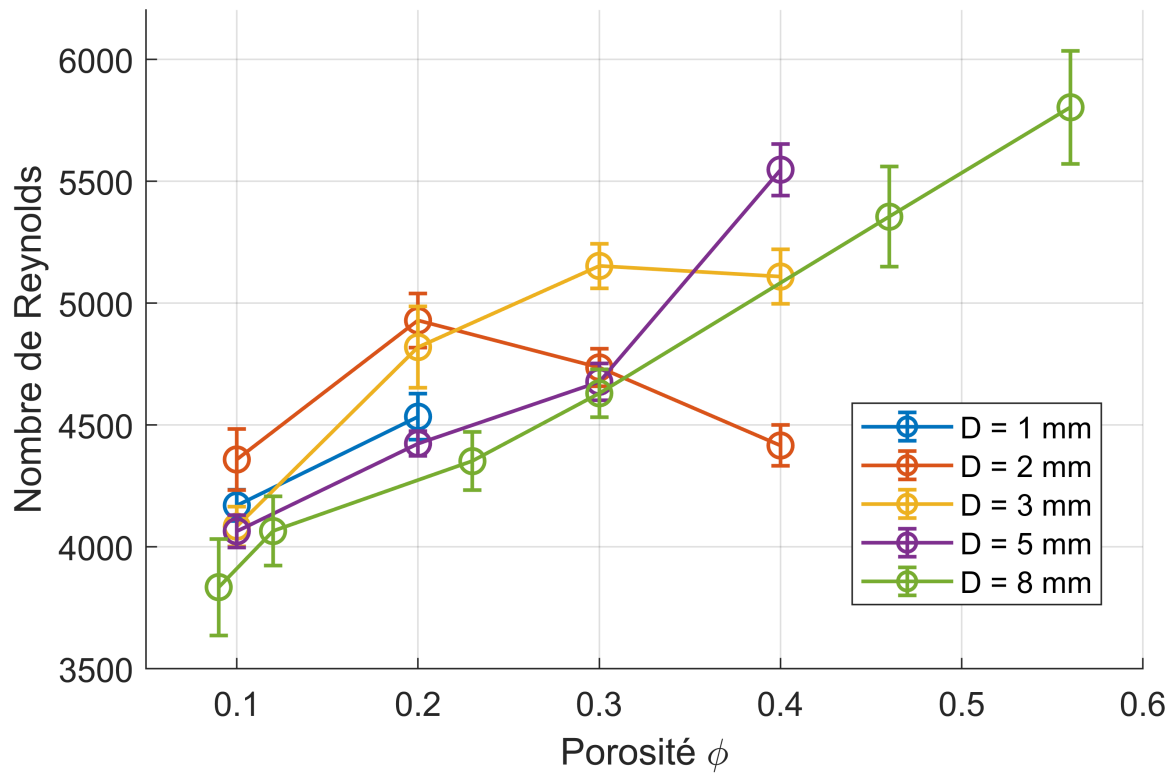


Figure 4: Données des lâchés de disque en fonction de la de la porosité et du nombre de Reynolds

4.2 Disques avec différentes formes de fentes

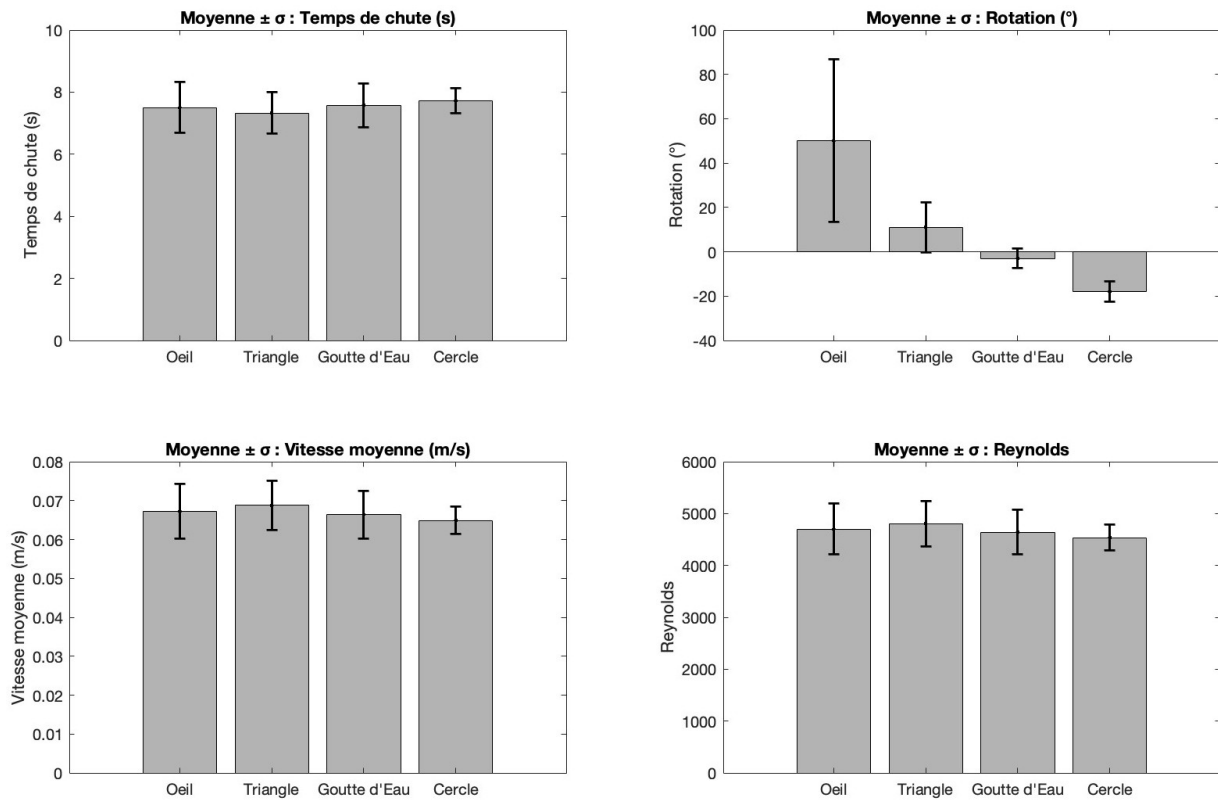
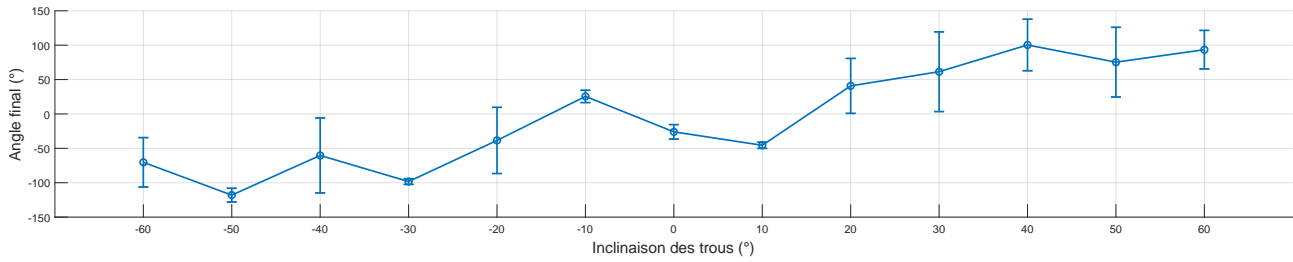
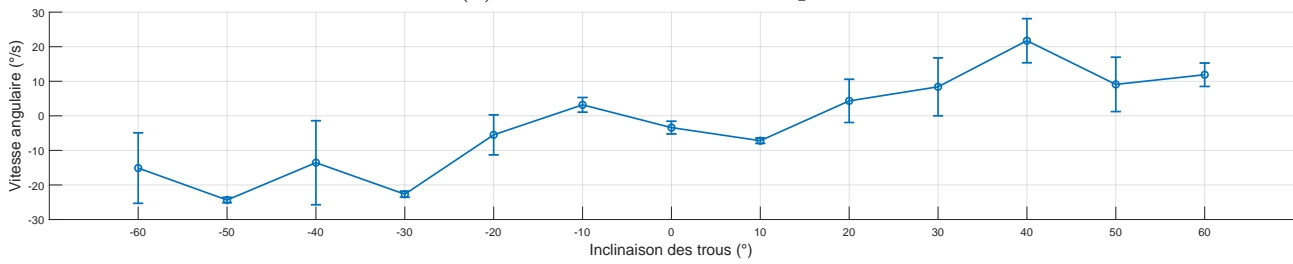


Figure 5: Comparaison des moyennes \pm écart-type pour chaque paramètre mesuré (temps de chute, rotation, vitesse moyenne et nombre de Reynolds), selon la forme de la fente.

4.3 Disques fentes inclinés



(a) Rotation finale des disques



(b) Vitesse angulaire

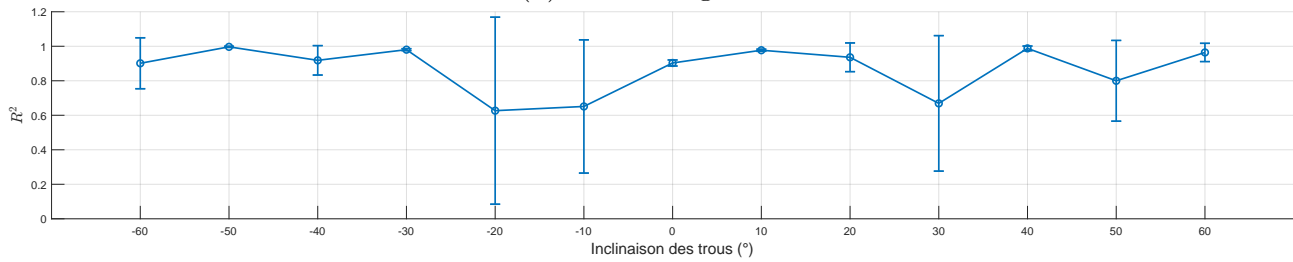
(c) R^2 de la régression linéaire

Figure 6: Rotation des disques en fonction de l'inclinaison des trous

4.4 Disques asymétriques

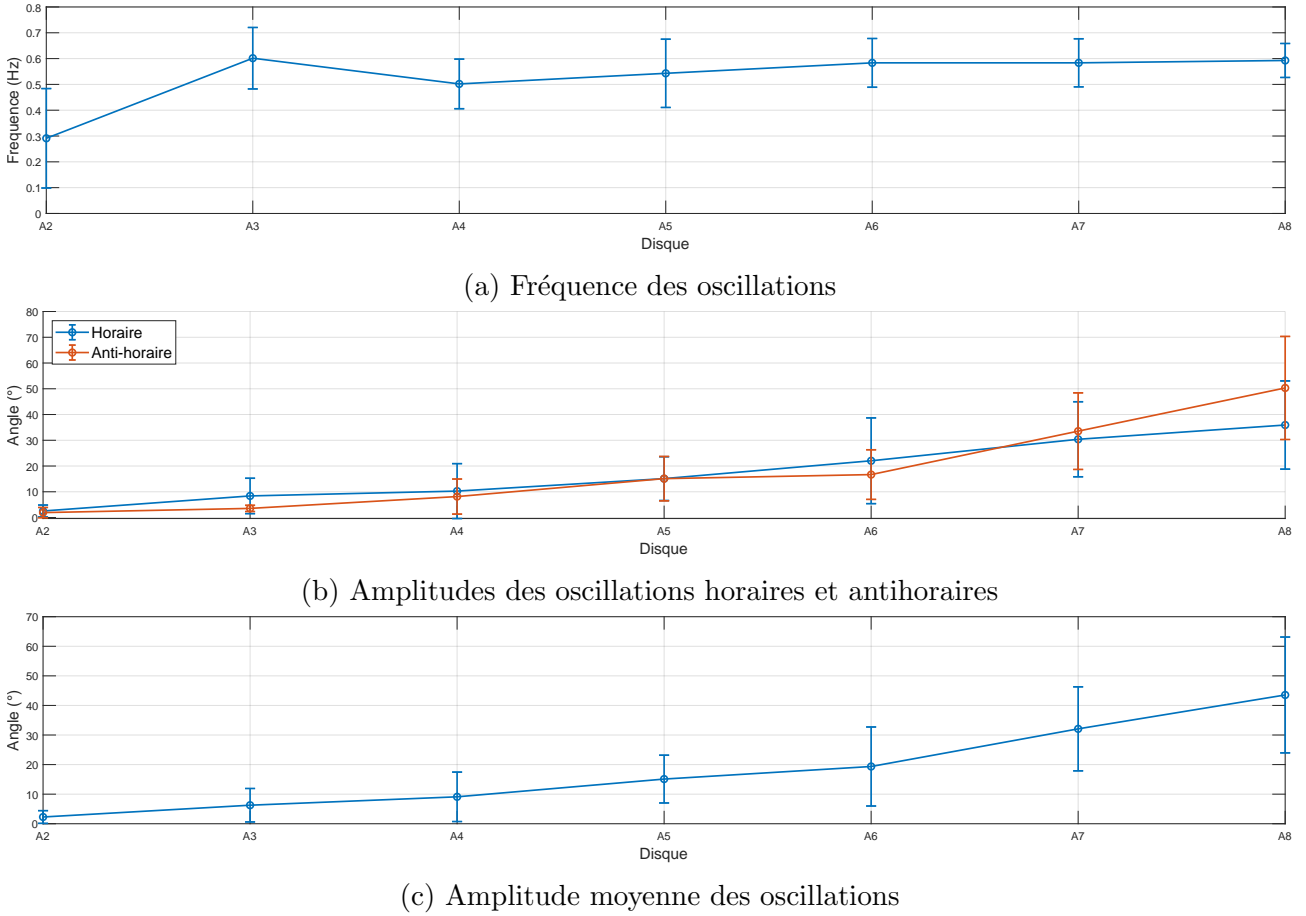


Figure 7: Fréquences et amplitudes des oscillations de rotation.

5 Discussion

5.1 Validation des méthodes d'analyse

La fiabilité des outils de traitement a été évaluée selon deux approches complémentaires : les validations visuelle du suivi et quantitative sur données synthétiques.

Validation du suivi vidéo

La validité du tracking a été contrôlée visuellement à l'aide de la vidéo annotée générée par le script Python. Celle-ci affiche les positions détectées, leurs identifiants et leur score à chaque frame, permettant ainsi de :

- s'assurer de la continuité du suivi pour chaque point,
- détecter d'éventuelles réassignations ou pertes de points,
- confirmer que le nombre de points reste constant tout au long de la vidéo.

Validation par données synthétiques

L'analyse MATLAB a été testée sur un jeu de données synthétiques généré à partir d'un disque rigide 3D animé par une rotation contrôlée autour des axes x , y et z , puis projeté orthog-

onalement au plan image. Les trajectoires des marqueurs ont été calculées analytiquement, fournissant une vérité terrain de référence.

Les résultats ont montré :

- une précision parfaite dans un cas sans bruit,
- une bonne robustesse aux perturbations réalistes (bruit gaussien sur les coordonnées).

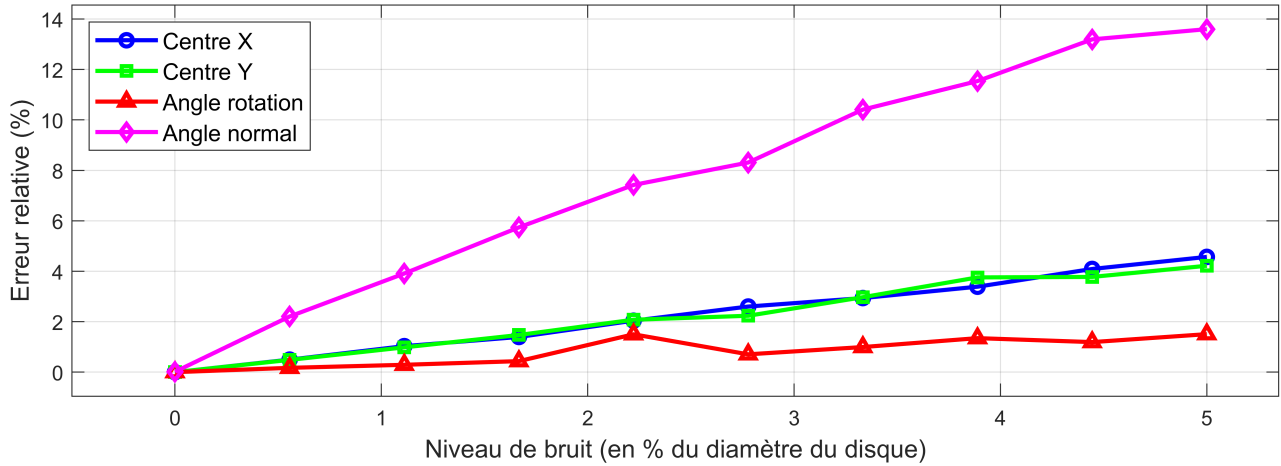


Figure 8: Erreur relative des métriques extraites par l'analyse MATLAB en fonction de l'intensité du bruit ajoutée aux coordonnées des points synthétiques. Le bruit est exprimé en pourcentage du diamètre du disque (en pixels).

La Figure 8 illustre la sensibilité de notre algorithme aux erreurs de mesure. On observe que l'erreur relative reste globalement faible pour des niveaux de bruit comparables à ceux rencontrés dans notre setup expérimental, où les principales perturbations proviennent du clapot engendré lors du lâcher du disque. Il est important de noter que des niveaux de bruit supérieurs ou égaux à 1% du diamètre du disque correspondent déjà à des perturbations significatives. Malgré cela, même en présence de bruit élevé, l'analyse restitue une tendance correcte : les estimations oscillent autour de la valeur réelle, ce qui permet de conserver une lecture globale fiable du comportement du disque.

5.2 Discussion des résultats

5.2.1 Disque I: variation de perméabilité porosité

De manière générale, on observe sur le graphe 4 une tendance croissante du nombre de Reynolds avec l'augmentation de la porosité, ce qui est attendu : une porosité plus élevée réduit la résistance au passage du fluide, facilitant l'écoulement et augmentant la vitesse de chute.

Toutefois, cette tendance n'est pas systématique : pour certaines tailles de trous, notamment $D = 2$ mm et $D = 3$ mm, on observe un maximum du nombre de Reynolds autour de $\phi = 0.2-0.3$, suivi d'une diminution. Cela suggère que la perméabilité, liée au diamètre des trous et à leur distribution, joue également un rôle déterminant.

À porosité équivalente, un trou de plus grand diamètre laisse passer le fluide plus facilement, augmentant la perméabilité, mais peut aussi perturber la stabilité de l'écoulement (zones de

recirculation, pertes de cohérence du sillage), ce qui pourrait expliquer certaines baisses du nombre de Reynolds observées à haute porosité.

Ces résultats montrent donc que la porosité seule ne suffit pas à caractériser le comportement du disque en chute : la perméabilité, liée au diamètre des trous, doit également être prise en compte pour comprendre la dynamique globale.

5.2.2 Disque II: différentes formes de fentes

Nos résultats concernant l'étude de la chute des différents disques sont présentés en figures ?? et 5. Il est important de noter que les rotations comprises entre -20° et 20° présentent une incertitude significative, due au glissement des disques lorsqu'ils atteignent le fond du bassin. En dehors de cet effet, les temps de chute, les vitesses moyennes et les nombres de Reynolds associés sont restés globalement similaires pour l'ensemble des géométries testées.

Ainsi, nous avons constaté que les disques découpés avec des fentes en forme de triangle, de goutte d'eau ou de cercle ne présentent pratiquement aucune rotation spontanée, en dehors des effets de glissement observés en fin de chute. En revanche, les disques munis des fentes en forme d'œil présentent une rotation notable, plus marquée et relativement constante. Lors d'une analyse plus précise de ce dernier cas, nous avons remarqué que ces fentes étaient légèrement inclinées par rapport aux autres formes. Cela nous a conduit à émettre l'hypothèse que cette inclinaison pourrait être responsable de la mise en rotation observée, ce qui a motivé l'étude approfondie présentée ci-dessous.

5.2.3 Disque III: fentes inclinées

Sur les graphes de la figure 6, les expériences ont révélé un phénomène principal: une révolution des disques autour d'un axe vertical durant la chute, induisant une rotation. Comme anticipé, l'inclinaison des fentes ont influencé cette rotation, avec un effet d'autant plus marqué que l'angle est important. De plus, outre l'amplitude de la révolution, le signe de l'angle d'inclinaison influence également sur le sens de rotation observé sur 6a. Ce dernier devient toutefois plus aléatoire à proximité de 0° , en effet comme la régression linéaire nous l'indique par l'écart-type significatif.

5.2.4 Disque IV: asymétriques

Nos résultats expérimentaux sont rassemblés dans la Figure 7. Lors des essais en chute libre, nous avons observé un comportement de rotation sinusoïdal, que nous avons surnommé effet "Tic-Tac" en référence au mouvement pendulaire régulier d'un métronome. Concrètement, certains disques initiaient une rotation dans un sens en début de chute, ralentissaient, puis inversaient leur rotation dans l'autre sens, et répétaient ce cycle. Toutefois, l'amplitude de la rotation dans un sens était, en général, légèrement supérieure à celle dans le sens opposé. Ce déséquilibre progressif d'amplitude est dû à une asymétrie géométrique subtile dans la répartition des trous. En effet, l'excentricité du centre de masse et une distribution dissymétrique du flux induit un cumul de rotation net au fil du temps.

Nous pouvons voir la mise en évidence de deux tendances. D'une part, la fréquence des oscillations reste à peu près constante, se stabilisant autour de 0.6 Hz à l'exception du disque A2 étant quasi-symétrique. D'autre part, nous avons pu remarquer que l'amplitude des oscillations augmente nettement avec le degré d'asymétrie. Nous pouvons affirmer que plus les fentes sont

disposées de façon déséquilibrée, plus le disque effectue une oscillation importante à chaque cycle.

5.3 Améliorations possibles

Étant donné que nos observations de stabilité ont été faites de manière qualitative sans tracking sur les disques I et II, nous ne pouvons pas apporter de conclusion au phénomène observé sur la figure 4. Il serait cependant intéressant d'étudier en détail les trajectoires absolues de chacun des disques ainsi que leur vecteur normal afin d'identifier les possibles dissipations d'énergies ou potentielles perturbations.

Il serait aussi intéressant de faire varier les paramètres gardés constants ici, tels que la densité du disque, son diamètre ou alors le fluide dans lequel il est immergé afin d'en observer les effets.

Le système de lâcher pourrait être amélioré, en effet celui-ci a été optimisé pour créer le moins de remous possible. Cependant il reste difficile à manipuler avec précision et engendre toujours un peu de friction sur le disque au lâcher.

Un bassin plus profond pourrait être bénéfique à l'observation de la dynamique de chute à vitesse limite.

6 Conclusion

Ainsi, ce projet de bachelor nous a permis de nous familiariser avec non seulement le processus de recherche scientifique mais aussi tous les éléments techniques et théoriques étudiés.

Nous avons notamment développé un système de tracking adapté aux conditions d'obscurité, ce qui nous a permis d'analyser avec précision la dynamique de chute et de rotation des disques. Ce travail nous a permis de mieux appréhender les comportements induits par certaines géométries de disques poreux, tout en révélant la complexité du phénomène.

Toutefois, ces résultats soulèvent de nombreuses questions, et il reste encore beaucoup à explorer pour comprendre pleinement les mécanismes en jeu dans la rotation de corps poreux en milieu fluide.

7 Remerciements

Nous souhaitons remercier le professeur Gallaire ainsi que tous les membres du laboratoire LFMI de nous avoir permis d'apprendre au sein d'un cadre scientifique de qualité ainsi que de la confiance et du temps accordé.