
LE SOUFFLE D'ÉOLE

Comment créer un canon à vortex "parfait" ?

TRAVAIL DE

GALLÉE MONA

GALLÉE SAMI

TAIMESKHANOV MAGAMED

Lycée Masséna

Académie de Nice



OLYMPIADES
DE PHYSIQUE FRANCE

OLYMPIADES DE PHYSIQUE 2018-2019

AVEC L'AIDE DE :

MME ET M. BRUNEL

MME DOMBROWSKI

M. THORAVAL

M. MORABITO

L'ÉQUIPE DU LYCÉE MASSÉNA

Résumé

Notre choix de sujet s'est effectué aux détours de recherches, durant lesquelles nous travaillions un sujet à la fois demandant du travail expérimental, mais également un travail d'interprétation.

Notre sujet sur les vortex, phénomène à la fois impressionnant, et très susceptible aux facteurs extérieurs nous a plu. Nous nous sommes alors décidés d'essayer, aussi modestement que possible, de maîtriser ce phénomène, à savoir de le créer. Notre travail s'est étalé sur de nombreux mois, durant lesquels, nous avons pu faire de multiples expériences, en passant par de nombreux prototypes. Nous avons vraiment apprécié nos expérimentations atypiques, de part l'utilisation d'un fumigateur, permettant ainsi de rendre visibles ces phénomènes.

Nous avons donc eu le temps de pouvoir tester nos prototypes, et ainsi émettre des interprétations, "vérifiées" par de multiples essais.

Cette expérience a été très enrichissante sur le plan pratique, et nous avons beaucoup apprécié de travailler au sujet des vortex et de leur création.

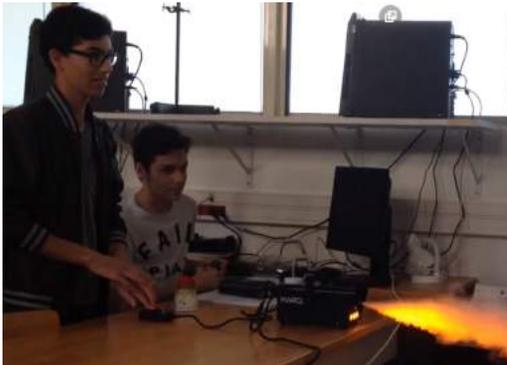


Table des matières

Introduction	3
1 Construction du canon	4
Prémisse	6
1.1 Forme du canon	6
1.2 Choix de l'embout	9
1.3 Validation du diamètre d'ouverture	11
1.4 Caractériser les vortex du canon final	12
2 Étude de vortex	13
2.1 Interactions Vortex/Environnement	14
2.2 Interactions entre vortex	16
Conclusion	18
Biblio/Sitographie	19

Introduction

Le vortex est observable à toutes les échelles, c'est un phénomène physique et météorologique. En dynamique des fluides, c'est une région dans laquelle l'écoulement est principalement un mouvement de rotation autour d'un axe. On en rencontre au quotidien, depuis le tourbillon de vidange d'une baignoire, également au bout des ailes des avions, jusqu'à ceux des atmosphères des planètes. Certains fumeurs sont doués pour faire des ronds de fumée. On peut aussi trouver des ronds de fumée dans la nature, formés par des volcans, par exemple, mais le phénomène reste toutefois très rare. Des versions aquatiques de vortex peuvent également exister en versant simplement à la pipette, dans de l'eau, un liquide bien coloré pour le distinguer. Toujours dans le monde aquatique, les dauphins et autres cétacés s'amuse parfois à réaliser ces anneaux, sous la forme de bulles d'air cette fois. Une fois formés, les vortex peuvent se déplacer, s'étirer, se tordre et interagir de manière complexe.

Il est important de noter que le vortex est un phénomène aléatoire. La difficulté réside dans la limitation des aléas. La fumée, maîtresse de notre étude, va permettre de rendre visible les vortex, phénomène normalement invisible car il découle d'un mouvement de fluide homogène, régi par la mécanique des fluides. La fumée est définie par l'ensemble des produits gazeux qui se dégagent de certains corps en combustion et qui sont rendus plus ou moins opaques par les particules solides ou liquides dont ils sont chargés. Ainsi, l'observation des expériences va être rendues possibles grâce à un fumigateur, préalablement acquis. Nous nous demanderons comment pouvons-nous aboutir à la réalisation d'un canon à vortex. Dans un premier temps, nous déterminerons quelle est la forme optimale pour le canon et l'embout de celui-ci. Puis nous finirons par étudier les différents phénomènes liés aux vortex qui ainsi maîtrisés, pourront être exploités avec le canon, préalablement fabriqué.

Nota bene : Afin d'éviter de nombreuses répétitions les vortex seront mentionnés comme anneaux tourbillonnaires dans un milieu gazeux. On parlera ainsi de tourbillons ou d'anneaux pour mentionner ce type de vortex.

Chapitre 1

Construction du canon

Prémisse

Dans toutes les expériences de cette partie, les canons à vortex seront constitués d'une membrane élastique, à l'origine de la compression et d'un embout de forme circulaire (voir 1.1) Pour pouvoir faire les expériences dans les mêmes conditions, il nous fallait isoler le milieu dans lequel le vortex se propage pour le protéger des perturbations extérieures. C'est pour cela qu'on a commencé par prendre un carton dans lequel on a découpé une ouverture pour observer les vortex avec le carton fermé (voir 1.2).

Nos premières expérimentations avec les canons en carton ont permis de remarquer qu'une pression élevée aux abords de l'ouverture de l'embout entraîne un effondrement du vortex, à contrario, lorsque celle-ci est faible, le tourbillon, nécessaire à la création d'un vortex, ne s'enclenche pas.



FIGURE 1.1 – Photo du canon à vortex



FIGURE 1.2 – Photo de la boîte

Mais cela n'était pas suffisant, il nous fallait une force d'appui constante sur la membrane du canon à vortex, c'est pour cela qu'on a monté sur vérin magnétique la membrane du canon à vortex qui remplace nos doigts (voir 1.3). En effet, en s'activant, le vérin va tirer puis relâcher la membrane du canon à vortex. C'est en réunissant ces deux montages qu'on obtient le système qui va permettre d'évaluer les différents composants du canon à vortex dans les expériences qui suivent.

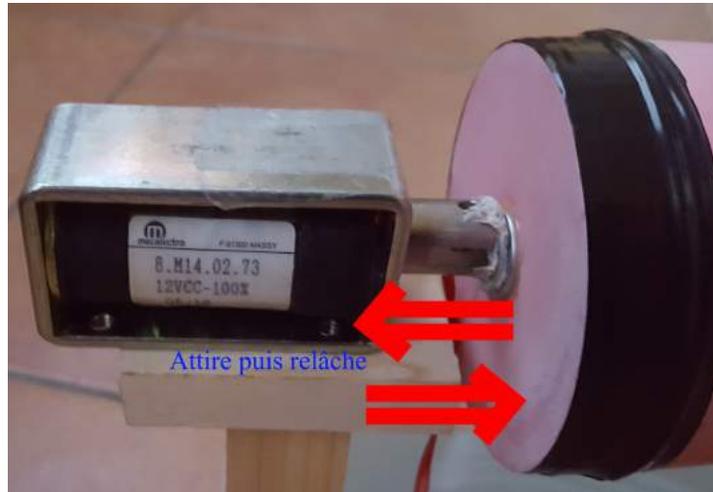


FIGURE 1.3 – Photo du vérin magnétique

De plus les expériences faites au départ de notre sujet avec des gobelets en carton (voir 1.4), nous ont orientés à utiliser dans cette partie une ouverture circulaire de diamètre 2 cm, mais le diamètre de l'ouverture ronde sera concrètement choisit dans la partie suivante après avoir préalablement décidé de la forme du canon. La version actuelle du canon est une version imprimée en 3D.



FIGURE 1.4 – Photo des premiers canons à vortex

1.1 Forme du canon

1.1.1 Déduction

Dans un premier temps, il nous a fallu étudier la forme la plus optimale afin de faire un canon à vortex. Une forme cylindrique, permettait une compression de l'air optimale, comprimant ainsi par couches parallèles les molécules d'air, en minimisant les turbulences à l'intérieur du canon (voir 1.5). Le choix d'un côté plus petit que son homologue parallèle, par soucis de praticité, a conduit à la création d'une forme conique (voir 1.6).

Après avoir obtenu une forme optimale du canon, nous nous sommes intéressés à une autre forme qu'on appellera "exotique".

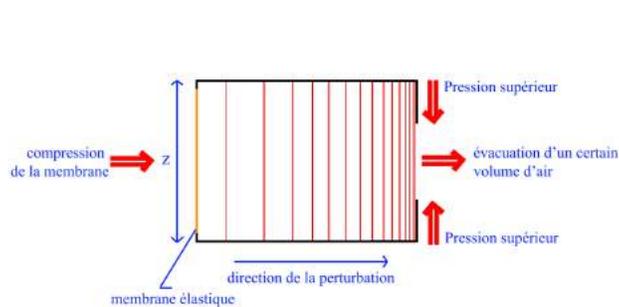


FIGURE 1.5 – Schéma de l'évacuation d'un certain volume d'air lors de la compression de la membrane

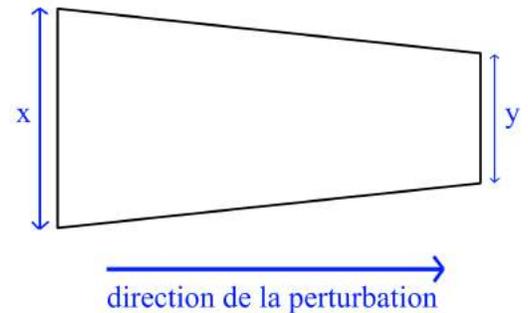


FIGURE 1.6 – Schéma d'un canon à vortex de forme conique

1.1.2 Protocole

1. Prendre le canon à vortex de forme triangulaire ou conique et l'assembler avec le vérin magnétique.
2. Mettre de la fumée dans le canon puis placer le canon devant l'ouverture ronde faite dans la boîte.
3. Placer la caméra comme montré sur le schéma (voir 1.7) et l'activer.
4. Activer le vérin magnétique à intervalles de temps réguliers pour créer les vortex.
5. Filmer l'expérience pour recueillir un échantillon important de vortex afin d'extraire leur diamètre, leur vitesse et leur visibilité.
6. Mesurer la vitesse ainsi que le diamètre du vortex, permis grâce au logiciel Kinovea qui décompose et ralentit les vidéos en images. (voir 1.8)

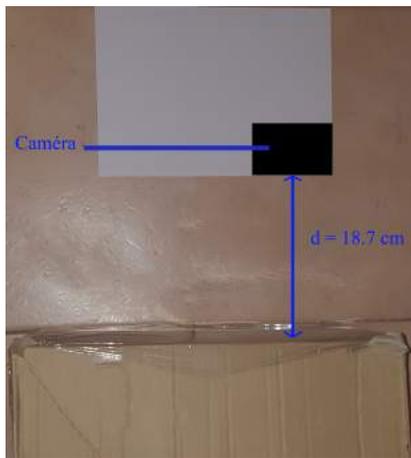


FIGURE 1.7 – Photo de la situation spatiale de la caméra

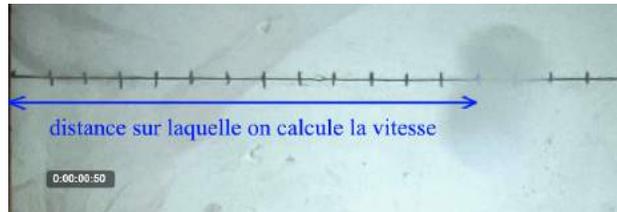


FIGURE 1.8 – Image montrant la manière de calculer la vitesse

1.1.3 Observations et Interprétation

Forme Triangulaire

Tableau 1 : Résultats de l'expérience avec une forme triangulaire

	Diamètre (en cm)	Vitesse (m/s)
Forme triangulaire	N/A	N/A

Dans la majorité des cas, le phénomène observé s'écroule dès sa sortie du canon de forme triangulaire (voir 1.9)

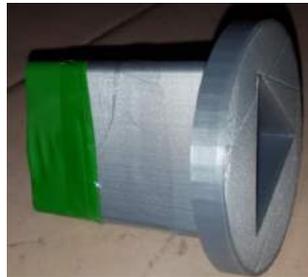


FIGURE 1.9 – Photo du canon à vortex triangulaire

On assiste à la formation d'un potentiel anneau instable. Ceci conduit à une annihilation prématurée du vortex (voir 1.10).

La distance séparant les bords du trou d'évacuation aux différents points de la surface triangulaire n'est pas la même en tout point. Les dernières molécules de gaz arrivant aux abords du trou de l'embout semblent interférer avec celles arrivées plus tôt, cela étant dû à leur proximité avec les bords du trou de l'embout (voir 1.11). Les résultats obtenus n'étaient pas concluants pour poursuivre sur ce modèle.



FIGURE 1.10 – Photo du "vortex" obtenu grâce au canon de forme triangulaire

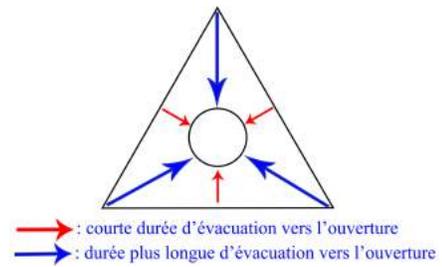


FIGURE 1.11 – Schéma de l'hypothèse du trajet des molécules de gaz à l'intérieur du canon au niveau de l'embout

Forme Conique

Tableau 2 : Résultats de l'expérience avec une forme conique

	Diamètre (en cm)	Vitesse (m/s)
Forme conique	4.25 ± 0.05	0.29 ± 0.01

Nos expériences avec la forme conique ont conduit à la création d'un vortex stable, visible, de forme et de taille régulière (voir 1.12). Notre choix s'est donc dirigé vers l'adoption définitive de la forme conique. Cependant une forme conique induit une face plus grande que l'autre. Pour des raisons de praticité et d'ergonomie, nous avons décidé d'inverser l'emplacement de la membrane et de l'embout.

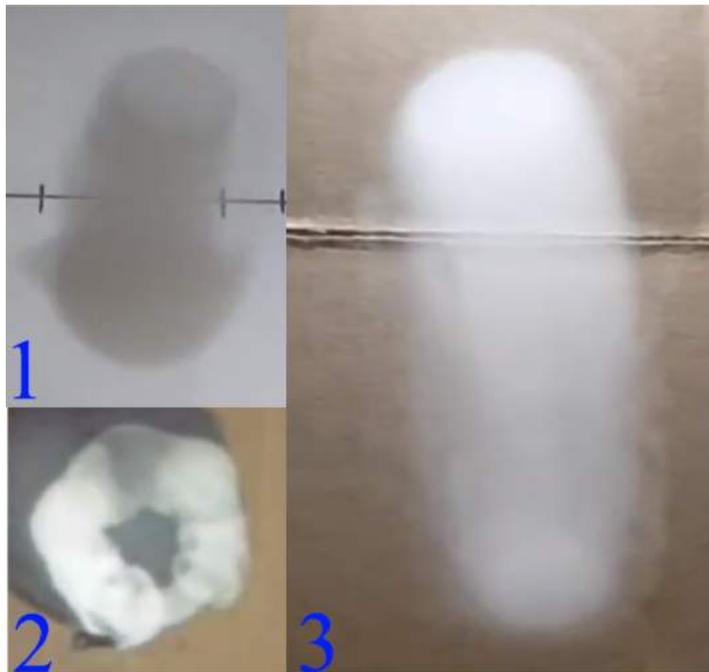


FIGURE 1.12 – (1)-Vue de côté / (2)-Vue de face / (3)-Vue de haut

Résumé des expériences

Tableau 3 : Données des 2 expériences précédentes :

	Diamètre (en cm)	Vitesse (m/s)
Forme triangulaire	N/A	N/A
Forme conique	4.25 ± 0.05	0.29 ± 0.01

1.2 Choix de l'embout

1.2.1 Protocole

1. Prendre le canon à vortex de forme conique et mettre un embout avec une ouverture circulaire (voir 1.13)
2. Mettre de la fumée dans le canon puis placer le canon devant l'ouverture circulaire faite dans la boîte.
3. Placer la caméra comme dans les expériences précédentes et l'activer
4. Activer le vérin magnétique à intervalles de temps réguliers pour créer les vortex.
5. Filmer l'expérience pour recueillir un échantillon important de vortex afin d'extraire leur diamètre, leur vitesse et leur visibilité.
6. Répéter l'expérience avec une ouverture triangulaire (voir 1.13)

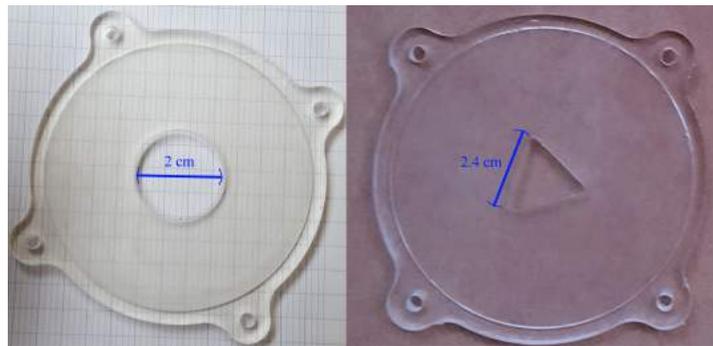


FIGURE 1.13 – Photo de l'ouverture triangulaire et circulaire

1.2.2 Observations et Interprétation

Ouverture Circulaire

Tableau 4 : Résultats de l'expérience avec un embout circulaire

	Diamètre (en cm)	Vitesse (m/s)
Ouverture ronde	4.25 ± 0.05	0.29 ± 0.01

L'embout de forme ronde est à l'origine de vortex stables et de rayons en moyenne constants dans le temps. Un écoulement laminaire en ses bords semble entraîner un déplacement symétrique, par rapport au centre du trou de l'embout, de masses de gaz (voir 1.14), où la viscosité prend part dans la création du vortex, dans ce qu'on appelle les rebords du trou de l'embout (voir 1.15). Lors de la diminution de la pression aux bords internes de l'embout, la pression extérieure semble sectionner le flux de gaz sortant du trou de l'embout, élément déclencheur de ce qu'on appelle vortex.

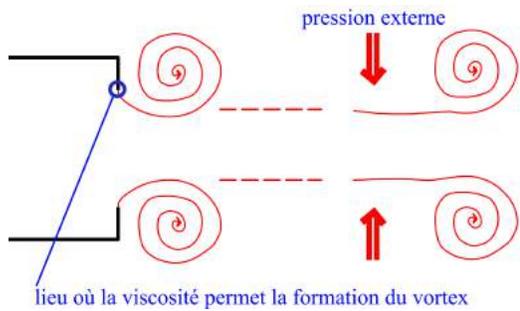


FIGURE 1.14 – Schéma de la formation du vortex au niveau de l'embout

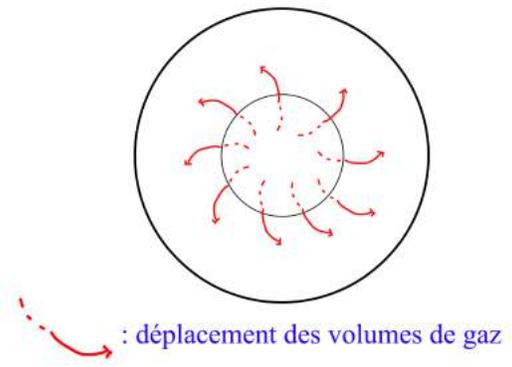


FIGURE 1.15 – Schéma de l'embout circulaire lors de la création du vortex

Ouverture Triangulaire

Tableau 5 : Résultats de l'expérience avec un embout triangulaire

	Diamètre (en cm)	Vitesse (m/s)
Ouverture triangulaire	3.28 ± 0.04	0.30 ± 0.01

Les résultats acquis par l'utilisation d'une forme triangulaire se rapprochent de ceux obtenus par l'utilisation de la forme ronde. Cependant, on assiste à une baisse remarquable de la densité de fumée dans l'anneau du vortex.

Néanmoins la forme de l'embout ne semble pas grandement influencer dans la formation du vortex.

Ces résultats pourraient être liés aux bords arrondis (liés à l'imprécision de la fraiseuse, qui fournit un embout à ouverture triangulaire, dotée de sommets arrondis (voir 1.16))

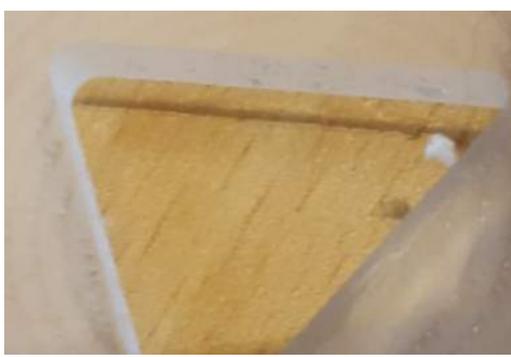


FIGURE 1.16 – Zoom sur l'ouverture triangulaire

1.3 Validation du diamètre d'ouverture

1.3.1 Protocole

1. Prendre le canon à vortex de forme conique et mettre un embout avec une ouverture circulaire de diamètre 2 cm.
2. Mettre de la fumée dans le canon puis placer le canon devant l'ouverture circulaire faite dans la boîte.
3. Placer la caméra comme dans les expériences précédentes et l'activer
4. Activer le vérin magnétique à intervalles de temps réguliers pour créer les vortex.
5. Filmer l'expérience pour recueillir un échantillon important de vortex afin d'extraire leur diamètre, leur vitesse et leur visibilité.
6. Répéter l'expérience avec un diamètre de 3 cm puis de 4 cm (voir 1.17).

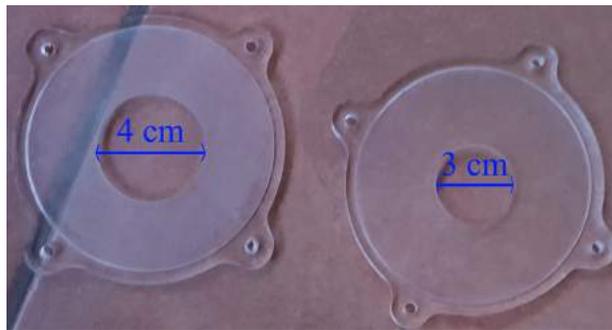


FIGURE 1.17 – Photo de deux ouvertures de diamètres différents

1.3.2 Observations et Interprétation

Tableau 6 : Résultats de l'expérience

	Diamètre (en cm)	Vitesse (m/s)
Ouverture D = 2cm	4.25 ± 0.05	0.29 ± 0.01
Ouverture D = 3cm	N/A	N/A
Ouverture D = 4cm	N/A	N/A

D'après nos expériences, avec la pression actuelle, seul l'embout de forme ronde et de diamètre 2 cm est fonctionnel.

Plus le diamètre de l'ouverture est grand et plus la force de pression effectuée sur la membrane doit être élevée. Ceci est justifié par nos premières expérimentations, où la force de pression effectuée sur la membrane était plus élevée, c'est pourquoi nous avons une ouverture circulaire de diamètre optimal 3 cm.

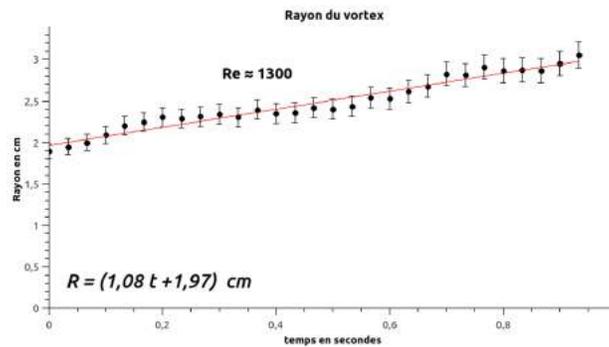
Le canon final est donc de forme conique avec une ouverture circulaire de diamètre optimal 2 cm.

1.4 Caractériser les vortex du canon final

1.4.1 Protocole et Objectif

Le protocole est le même que les précédents : on cherche à mesurer la vitesse et le rayon des vortex produits par le canon final. Tout cela nous permettra de caractériser les vortex formés grâce à notre canon.

1.4.2 Observations et Interprétation



Cette régression linéaire caractérise les vortex formés par notre canon. En effet, le rayon de ces vortex diminue avec le temps jusqu'à leur disparition.

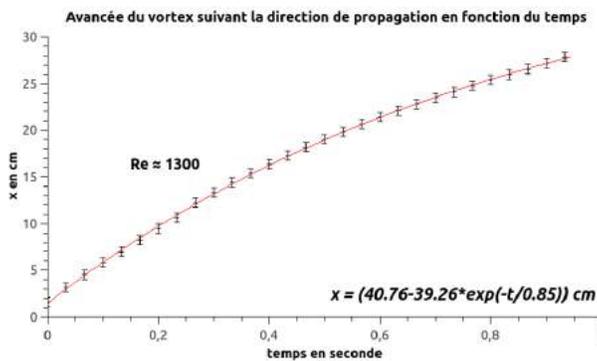


FIGURE 1.18 – (1)

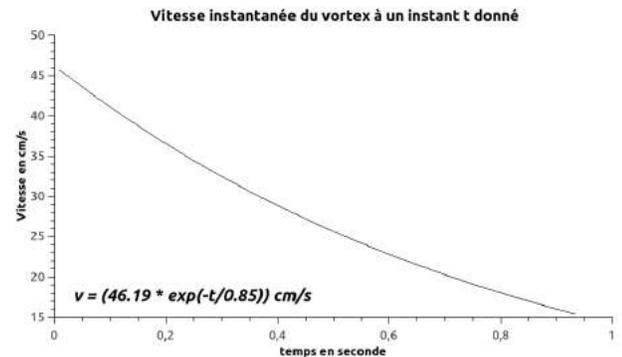


FIGURE 1.19 – (2)

En modélisant l'avancée du vortex, suivant la direction de propagation en fonction du temps (voir 1.18) par une décroissance exponentielle, on a pu dériver le modèle et obtenir la vitesse instantanée du vortex en fonction du temps (voir 1.19). On remarque que celle-ci diminue rapidement, le vortex dans notre cas a subsisté pendant environ 1 seconde avant de rencontrer un obstacle.

Le modèle de décroissance exponentielle est justifié théoriquement : Soit m du vortex constant, α la constante de frottement et v la vitesse du vortex, alors :

$$m\alpha = \Sigma F \Rightarrow m\dot{v} = -\alpha v \Rightarrow v = Ae^{-t/\tau} \Rightarrow x = -\tau Ae^{-t/\tau} + B \quad (1.1)$$

Chapitre 2

Étude de vortex

Prémisse

Les vortex sont généralement formés grâce à un tube de petit diamètre a assimilable à une ligne constituant le coeur du tourbillon (voir 2.1).

Le déplacement de chaque point du vortex est induit par les autres éléments du coeur du vortex. Comme dit précédemment, la viscosité intervient dans la formation du vortex aux bords du tube de vorticité. Mais par la suite, les forces de viscosité sont nulles dans ce type d'écoulement.

Nous allons maintenant étudier un certain nombre de phénomènes liés aux vortex pour pouvoir mieux les comprendre et les exploiter avec notre canon.

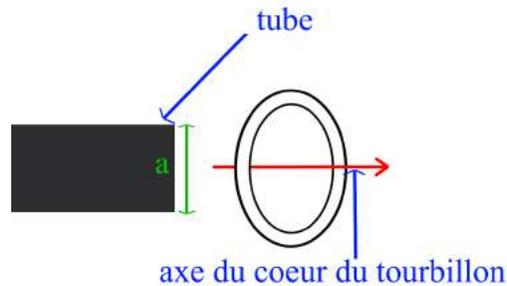


FIGURE 2.1 – Schéma de l'axe du coeur du tourbillon

2.1 Interactions Vortex/Environnement

2.1.1 Interaction d'un anneau avec une paroi

Objectif

Nous avons voulu dans cette expérience observer le comportement lors de la rencontre d'un vortex avec une paroi solide.

Protocole

1. Mettre de la fumée dans le canon puis le placer devant l'ouverture ronde faite dans la boîte (voir 2.2, photo 1).
2. Placer la caméra devant la vitre en face du canon (voir 2.2, photo 2).
3. Activer le vérin magnétique pour créer les anneaux tourbillonnaires.
4. Filmer l'expérience au ralenti pour observer l'écrasement des anneaux contre le plan solide.



FIGURE 2.2 – Photos des ouvertures de la boîte

Résultat(s)/Observation(s)

Voici ce que nous avons obtenu :



FIGURE 2.3 – Photos à différents instants de la collision d'un vortex avec une paroi

Interprétation

L'anneau tourbillonnaire s'ouvre sur le plan du solide, il ne rebondit pas. Ceci s'explique par le fait que l'impact de l'anneau sur le solide peut être décrit en lui ajoutant un anneau image dans le plan. L'anneau imaginaire permet de décrire une vitesse vers le haut.

2.1.2 Anneau et tube de vorticité de diamètre a

Objectif

Nous avons voulu ici vérifier une possible relation entre le diamètre a du tube et le diamètre des vortex dont il est à l'origine. Mais également le temps de parcours d'une distance D (voir 2.6) par plusieurs vortex cr s, grâce à un tube percé de plusieurs trous, espacés équitablement et de diamètres différents (voir 2.4).

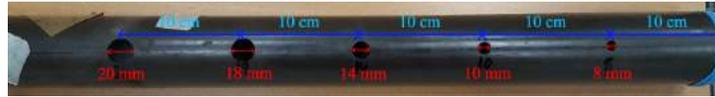


FIGURE 2.4 – Photo du tube légendé

Protocole

1. Mettre de la fumée dans le tube et le placer dans le carton conçu pour cette expérience (voir 2.5).
2. Placer la caméra devant les vitres prévues à cet effet.
3. Exercer une pression sur la membrane du tube pour créer les anneaux.
4. Filmer l'expérience et mesurer le diamètre des différents anneaux tourbillonnaires et la durée de parcours de la distance D grâce au logiciel tracker (voir 2.6).



FIGURE 2.5 – Photo de la nouvelle boîte

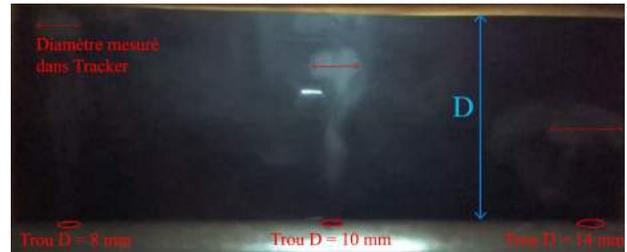


FIGURE 2.6 – Mesure des diamètres et des temps de parcours sur Tracker

Résultat(s)/Observation(s)

Voici les graphiques obtenus :

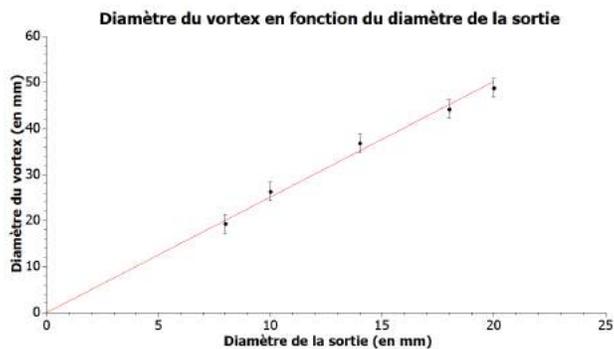


FIGURE 2.7 – (1)

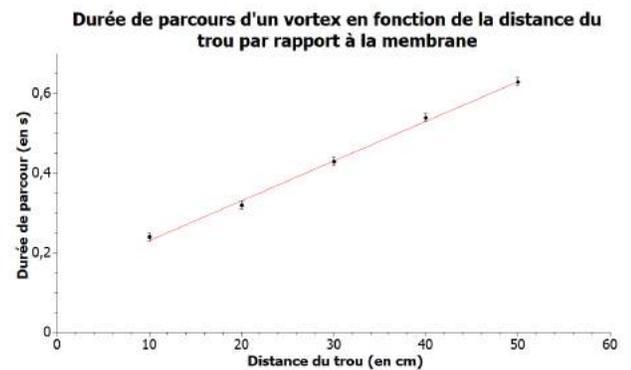


FIGURE 2.8 – (2)

Interprétation

Le graphique (voir 2.7) confirme le fait que le diamètre du vortex dépend du diamètre a du tube (ici modélisé par les trous dans le tube cylindrique). C'est pourquoi, on remarque une relation linéaire entre le diamètre du vortex et le diamètre du tube. De plus, le graphique (voir 2.8) nous permet de remarquer que la distance d'un trou du tube par rapport à la membrane plastique fait varier la durée de parcours de la distance D d'un vortex, car les points suivent une droite.

2.2 Interactions entre vortex

2.2.1 Saute-Mouton

Objectif

Nous nous sommes intéressés au phénomène qui résulterait de la rencontre entre deux vortex se propageant dans la même direction et le même sens. Nous appellerons cette expérience « saute-mouton ». Ici, seuls les vitesses des deux vortex, leurs instants d'émissions et la distance qui les séparent, varient.

Protocole

1. Remplir notre canon à vortex de fumée et l'assembler avec la boîte(voir 1.2).
2. Placer la caméra devant les vitres prévues à cet effet.
3. Grâce à un montage électrique, émettre les deux vortex (voir 2.9).
4. Filmer l'expérience au ralenti pour observer le "saute-mouton".

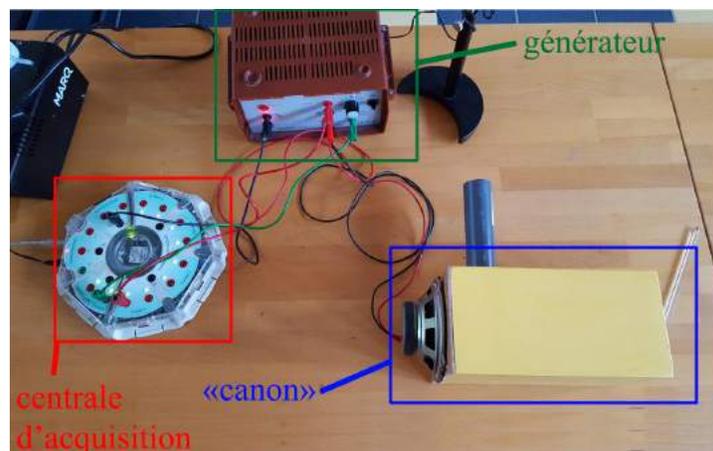


FIGURE 2.9 – Montage de l'expérience

Résultat(s)/Observation(s)

Nos expérimentations ont permis l'observation d'un phénomène distinct. Le deuxième vortex ainsi émis, rattrape le premier, et en arrivant dans le sillage de ce dernier, est aspiré et passe au travers de celui-ci, en son centre. Le meilleur phénomène de "saute-mouton" que nous ayons obtenu s'est produit avec une fusion des deux vortex une fois le phénomène terminé (voir 2.10).

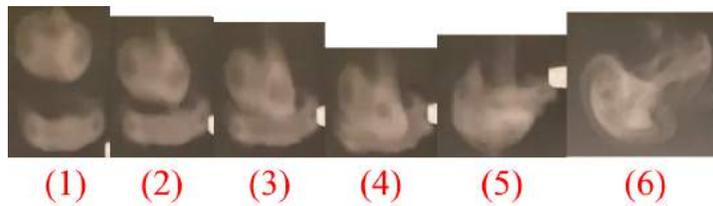


FIGURE 2.10 – Évolution temporelle de la rencontre de deux vortex (Saute-mouton)

Interprétation

Soit A1 le vortex de derrière et A2 le vortex de devant :

1. Le vortex A2 est émis avant le vortex A1 (voir 2.10, (1)).
2. Celui-ci va ralentir en se propageant dans le milieu, mais va aussi jouer le rôle de "bouclier" pour A1, qui va voir sa vitesse augmenter (voir 2.10, (2) et (3)).
3. C'est ainsi que A1 va rattraper A2, et passer à l'intérieur de celui-ci (voir 2.10, (4) et (5)).

Si les deux vortex sont dans un système isolé (ce qui est possible numériquement), le phénomène de saute-mouton se répète indéfiniment. Ce qui n'est pas le cas avec nos conditions expérimentales, puisqu'on en réussit un difficilement, après quoi les deux vortex fusionnent (voir 2.10, (6)). On constate que le deuxième vortex s'introduit dans le premier vortex émis si et seulement si il est suffisamment "plus puissant" que ce dernier.

Conclusion

Comment créer un canon à vortex "parfait" ?

Nos résultats ainsi que nos déductions nous ont mené à la réalisation d'un canon à vortex dit "parfait" de par la régularité et la pérennité des formes de vortex obtenues.

Concernant le canon, élément clé de la compression gazeuse, notre étude a montré qu'il se devait être de forme conique, avec, pour allier praticité et ergonomie, une membrane sur le rayon le plus petit ; et, sur le rayon le plus grand, un embout doté d'une ouverture. L'embout, élément déclencheur, grâce à la viscosité agissant aux bords de l'ouverture, permet la création du vortex. Le diamètre d'ouverture de cet embout doit varier en fonction de la pression appliquée à la membrane. En effet, plus la pression exercée sur la membrane est élevée, entraînant alors un déplacement de volume de gaz plus important, plus le diamètre de l'ouverture de l'embout peut être grand. À contrario, plus la pression exercée sur la membrane est faible, entraînant donc un faible déplacement de volume de gaz, plus le diamètre de l'ouverture doit être petit.

Dans notre étude, la pression concédée par le vérin magnétique est faible, ce qui a conduit au choix d'une ouverture d'embout plus petite, à savoir 2 cm. De plus, la longueur de ce cône se doit de ne pas être trop grande, afin que le volume de gaz contenu dans ce cône ne soit pas trop important.

Par la suite, l'étude de différents phénomènes en lien avec les anneaux tourbillonnaires tels que le "saute-mouton", nous ont permis de dégager la complexité de cet amas de fluide en rotation. En effet, la maîtrise de ces différents phénomènes pourrait être utile dans de nombreux domaines tels que les effets spéciaux ou l'étalonnage d'appareils de mesure.

Biblio/Sitographie

- ["Deux anneaux tourbillonnant se heurtant au RALENTIS - Smarter Every Day 195"](#)
- [Page wikipédia anglaise sur les vortex](#)
- "THE VORTICITY OF A VORTEX RING CORE" de John CATER, Julio SORIA et T.T LIM
- "Dynamics of a Class of Vortex Rings" de Karim SHARIFF, Anthony LEONARD et Joel H. FERZIGER
- "The Ring Vortex : Concepts for a Novel Complex Flow Phantom for Medical Imaging" de Simone FERRARI, Simone AMBROGIO, Adrian WALKER, Prashant VERMA, Andrew J.NARRACOTT, Lain WILKINSON et John W. Fenner

(Les textes en bleu sont des liens cliquables)