

Strouhal et les turbulences



Equipe D* :

CHAUX Loïc

PIARD Justine

MARQUES Léa

Lycée International Charles de Gaulle (Dijon)

Professeur : M. DUGUERY Alex

Sommaire :

| | |
|---|----|
| Résumé----- | 3 |
| Introduction----- | 4 |
| I] Ecoulement turbulent, caractérisation ?----- | 4 |
| 1) Sans obstacles----- | 4 |
| 2) Qu'est-ce qu'un écoulement turbulent ?----- | 5 |
| 3) Avec Strouhal : le nombre de Strouhal----- | 6 |
| II] Expérimentations----- | 7 |
| 1) Prototype et réglages des paramètres techniques----- | 7 |
| 2) Problèmes rencontrés dans le prototype----- | 8 |
| 3) Deuxième montage----- | 9 |
| 4) Mesure et interprétation des données----- | 10 |
| 5) Observation des turbulences en trois dimensions----- | 14 |
| III] Etude d'une application : les piles de pont----- | 15 |
| Conclusion----- | 17 |
| Remerciements----- | 18 |
| Bibliographie----- | 19 |

Résumé :

Le phénomène des turbulences est un domaine de la mécanique des fluides qui a attiré notre attention car il est impliqué dans de nombreux domaines (aéronautique, soufflerie, écoulement du sang, turbulences dans les gaz...). Nous nous sommes intéressés aux turbulences provoquées par la présence d'un obstacle dans l'écoulement d'un fluide et notamment au nombre de Strouhal qui se cache derrière ces tourbillons. Dans tous les articles que nous avons lus, le nombre de Strouhal était considéré comme constant ($\approx 0,2$), les mesures étant généralement faites sur des obstacles cylindriques. Cela signifie donc que, dans la théorie, pour deux obstacles de même longueur caractéristique, Strouhal doit être proche de 0,2. Cependant, nous n'avons pas trouvé d'études faites sur des obstacles autres que cylindriques et nous nous sommes alors demandé si Strouhal ne variait pas selon la forme de l'obstacle. Nous avons ensuite étendu cette étude à un cas plus concret, celui des piles de pont.

Introduction :

Si la maîtrise de l'air et de l'eau intéresse les humains depuis la préhistoire, l'étude de la turbulence en elle-même n'a réellement débuté qu'assez tard, au XVII^e siècle. Léonard de Vinci s'est en effet intéressé à ce phénomène et a laissé de nombreuses notes, croquis, schémas qui témoignent de sa tentative de comprendre le mouvement des fluides. La turbulence est ensuite plus ou moins laissée de côté pendant de nombreuses décennies. Quelques grands noms de la recherche sur les fluides turbulents sont Navier, Stokes ou encore Reynolds qui ont chacun contribué à la compréhension du phénomène. L'étude des fluides turbulents connaît ensuite un grand essor au XX^{ème} siècle lorsque sont abordés les écoulements de fluides visqueux dans des tuyaux cylindriques, et qu'est établie la différence entre un écoulement laminaire et un écoulement turbulent. L'étude de ces écoulements est particulièrement importante dans la construction d'ouvrages soumis à des courants turbulents comme les ponts car elles posent notamment le problème de l'érosion. Ces écoulements turbulents peuvent être étudiés en plaçant un obstacle dans un écoulement laminaire. Cependant, les expériences qui ont déjà été réalisées utilisaient uniquement des obstacles cylindriques. Les formules et nombres à notre disposition prévoient-ils une quelconque influence de la forme d'un obstacle sur les turbulences qu'il provoque ? La forme de l'obstacle a-t-elle une quelconque influence sur les caractéristiques de l'écoulement et des tourbillons observés ? Le nombre de Strouhal caractérise-t-il vraiment un écoulement turbulent ? Comment optimiser alors la forme des piles de ponts pour limiter le phénomène d'érosion autour de celles-ci ?

I. Écoulement turbulent, caractérisation ?

1) Sans obstacle

Lorsqu'un fluide s'écoule, cet écoulement peut être caractérisé par plusieurs nombres adimensionnés et autres paramètres.

- a) Le nombre de Reynolds : $R = \frac{v \cdot D_c}{\eta}$ avec v la vitesse de l'écoulement en $m \cdot s^{-1}$, D_c le diamètre de la conduite dans laquelle s'écoule le fluide en m et η la viscosité cinématique du fluide en $m^2 \cdot s^{-1}$. Reynolds permet de caractériser l'inertie et la convection d'un écoulement :

Si $R < 1$, l'écoulement est rampant

Si $R < 1000$, l'écoulement est laminaire

Si $R > 1000$, l'écoulement est turbulent

On peut également dire que le nombre de Reynolds est le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses soit $Re = \frac{F_i}{F_v} = \frac{m \cdot a}{\eta \cdot S}$. Ainsi, lorsque Reynolds est inférieur à 1, les forces visqueuses dominent et lorsque Reynolds est supérieur à 1, les forces d'inertie dominent.

b) Le nombre de Froude : $Fr = \frac{v}{\sqrt{g \frac{A}{B}}}$ avec v la vitesse d'écoulement en $m \cdot s^{-1}$, g

l'accélération de la pesanteur ($\approx 9.81 m \cdot s^{-2}$), A la section d'écoulement en m^2 et B la largeur de la surface libre en m. Froude caractérise l'effet de la gravité et de l'inertie d'un fluide sur l'écoulement. Il peut également s'écrire comme étant le rapport des forces d'inertie sur la force de gravité soit $Fr = \frac{F_i}{F_{gravité}}$.

c) La viscosité dynamique : μ caractérise l'aptitude d'un fluide à s'écouler. Elle s'exprime $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$

d) La viscosité cinématique : $\eta = \frac{\mu}{\rho}$, ρ étant la masse volumique du fluide en $kg \cdot m^{-3}$. Elle s'exprime donc en $m^2 \cdot s^{-1}$.

2) Qu'est-ce qu'un écoulement turbulent ?

Si le nombre de Reynolds est très élevé ou si l'écoulement est perturbé par un obstacle, il devient turbulent. Cela signifie que des structures tourbillonnaires apparaissent. Elles peuvent être observées en insérant de l'encre colorée comme on le voit sur la figure 1.

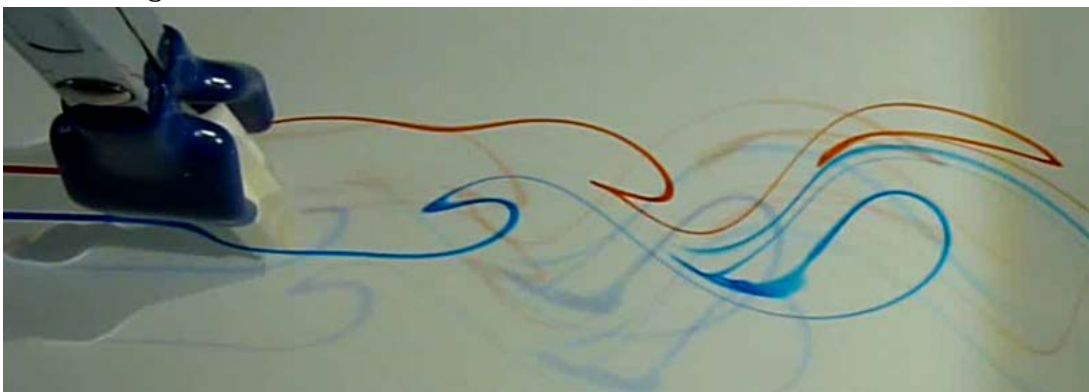


Figure 1 : Écoulement turbulent en aval d'un obstacle « étoile »

Lors d'un écoulement autour d'un obstacle, deux tourbillons symétriques apparaissent de chaque côté de cet obstacle avec une certaine fréquence (Figure 1). C'est ce qu'on appelle le phénomène des tourbillons alternés ou allée de tourbillons de Von Karman.

En observant de près les structures tourbillonnaires, le physicien Kolmogorov a remarqué que les tourbillons devenaient de plus en plus petits jusqu'à se dissiper complètement. Le tourbillon est en fait une structure permettant la dissipation de l'énergie cinétique des grandes échelles vers les petites échelles jusqu'à atteindre la dimension dite de Kolmogorov à laquelle les tourbillons disparaissent totalement, leur énergie cinétique étant entièrement dissipée. Un écoulement turbulent est donc une dissipation d'énergie.

3) Avec obstacle : le nombre de Strouhal

Si l'on insère un obstacle perpendiculairement au sens de l'écoulement, les nombres adimensionnés de Reynolds et de Froude sont toujours valables mais on peut ajouter le nombre de Strouhal qui va tout particulièrement nous intéresser dans notre étude.

Ce paramètre fut introduit par Lord Rayleigh en 1915. Il le nomma d'après Vincent Strouhal, un physicien tchèque de la deuxième moitié du XIX^{ème} siècle, spécialisé en physique expérimentale, qui étudia la relation entre les notes émises par un fil tendu soumis au vent, la vitesse du vent et le diamètre du fil.

Le nombre de Strouhal est un nombre adimensionnel décrivant les mécanismes d'écoulement oscillant. Il est défini selon la relation $St = \frac{fD}{v}$ avec f la fréquence d'apparition des tourbillons en s^{-1} , D le diamètre de la section de l'obstacle en m et v la vitesse d'écoulement du fluide en $m.s^{-1}$. Il traduit la stationnarité du fluide. Il peut s'exprimer comme le rapport entre les forces d'instationnarité et les forces d'inertie soit $St = \frac{F_{instationnarité}}{F_i}$. Si $St \ll 1$, l'écoulement est dit quasi-stationnaire, les forces d'inertie dominant.

Il est souvent mis en relation avec Reynolds dans des graphiques sur lesquels nous constatons que pour une large gamme du nombre de Reynolds, Strouhal vaut 0,2.

Cependant, les expériences sont presque tout le temps réalisées avec des obstacles cylindriques. Nous nous sommes donc posés les questions de savoir comment variait Strouhal pour d'autres obstacles, si la valeur 0,2 était spécifique aux cylindres et avons alors mis en place une expérience pour le savoir.

II. Expérimentation

1) Prototype et réglages des paramètres techniques

L'objectif de notre expérience était d'observer des turbulences créées par un obstacle dans un écoulement laminaire d'eau. Il a tout d'abord fallu concevoir un prototype. Il s'agissait d'un montage avec comme chambre d'écoulement principal un tuyau de PVC (gouttière PVC) de couleur blanche/jaune de 100 cm de long et de 75 mm de largeur (au diamètre).

Nous avons retenu l'idée d'utiliser une gouttière, et de la placer de manière complètement horizontale, car cela a résolu beaucoup de problème, concernant par exemple l'injection du colorant, ou encore le positionnement de l'objet dans le tube.



Figure 2 : Prototype expérimental

A l'entrée de ce tuyau, nous avons mis des pailles qui avaient pour rôle de créer un flux laminaire. Ensuite, en amont de ces pailles nous avons rajouté un morceau de mousse circulaire (la partie verte d'une éponge), censé unifier le flux d'eau dans les pailles. Puis, pour pouvoir envoyer de l'eau dans la gouttière, nous avons adapté des embouts de bouteille et percé les bouchons, pour pouvoir y brancher un tuyau d'eau relié au robinet. L'opération a été répétée pour l'autre extrémité de la gouttière. Ainsi l'eau atteint une hauteur stable correspondant à celle du bouchon de la bouteille, par rapport au fond de la chambre d'écoulement.

Pour pouvoir observer les turbulences créées par l'obstacle, nous avons pensé à insérer du colorant dans le flux d'eau (censé être laminaire). Tout d'abord, nous avons fait quelques tests de contraste des colorants sur fond blanc, pour choisir celui qui ressortait le mieux (Figure 3). Nous avons retenu le colorant vert. Nous avons de plus regardé les spectres d'absorption de chacun de ces colorants et constaté que l'absorbance au niveau du pic était la plus élevée pour le colorant vert (Figure 4). Nous avons décidé de le diluer dans de l'eau (d'un facteur 10), puis nous en avons rempli un petit réservoir en hauteur. Le colorant a ensuite été injecté grâce à un petit tuyau relié à une pipette pasteur (Figure 5). Nous avons réussi à observer nos premières turbulences.

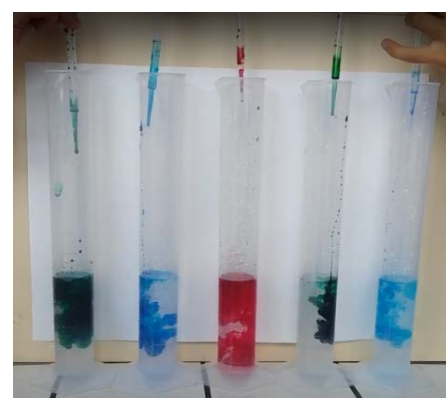


Figure 3 : Contraste de différents colorants

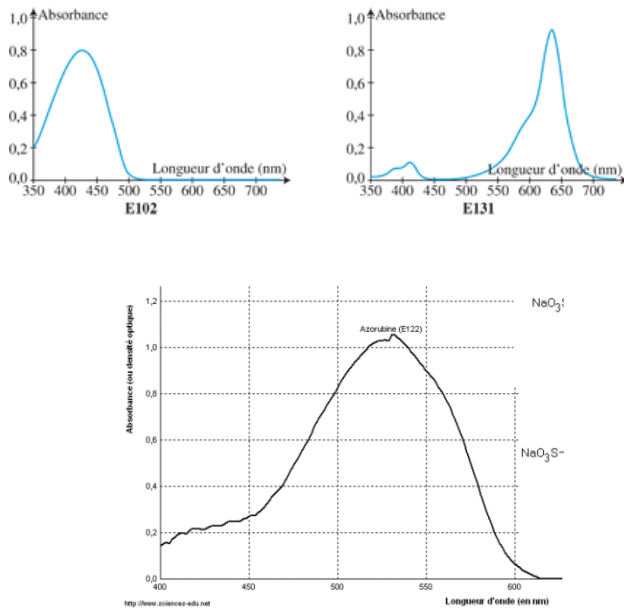


Figure 4 : Spectres d'absorption des colorants testés

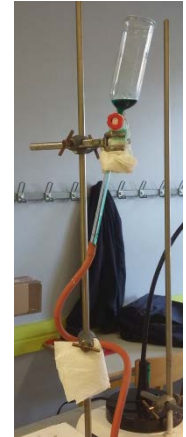


Figure 5 : Système d'injection d'encre

2) Problèmes rencontrés dans le prototype

La réalisation de ce prototype ne fut pas concluante du premier coup. Nous avons en effet rencontré plusieurs difficultés :

- Maintien des pailles dans la gouttière : le tube n'étant pas fermé, il fallait maintenir les pailles par le dessus. Nous les avons donc accrochées avec des rilsans.
- Oscillation à la sortie : pour l'arrivée d'eau, tout se passait bien, mais à la sortie, il y avait de l'air qui rentrait avec l'eau dans le petit tuyau. Cela créait des vibrations dans le tube entraînant du bruit. Pour corriger ce problème, nous avons enlevé le bouchon du bout de bouteille, pour placer l'extrémité du tube au-dessus de l'évier, pour avoir un écoulement libre dans ce dernier.
- Ajout du tampon Gex : cela a créé une pression vers l'extérieur du tube, et le bout de bouteille que l'on avait fabriqué pour faire rentrer l'eau dans le tuyau se détachait. Nous avons donc eu l'idée de collé au joint silicone le tout, ce qui a également eu pour effet de rendre totalement étanche l'installation.
- Profil de vitesses : nous ne savions pas si le débit d'eau aux robinets du lycée était constant. Ce problème a été réglé grâce au tampon Gex que nous avons rajouté en amont des pailles, qui donnait une vitesse plutôt constante à l'eau. Mais la paroi intérieure du tube n'étant pas très lisse, la vitesse

d'écoulement était moins élevée vers les parois, que dans le reste du tube, créant un profil de vitesses a priori déroutant puisque c'est cela même qui peut rendre un écoulement turbulent. Cependant, l'observation des premières turbulences se faisait relativement poche de la surface, où la différence de vitesse se faisait peu ressentir. La vitesse de l'écoulement était contrôlée par le degré d'ouverture du robinet.

- Injection de l'encre : au départ nous avons utilisé de l'encre non diluée, dans une aiguille coudée (Figure 6). Le résultat était peu satisfaisant, car la pipette était trop épaisse et créait des turbulences. De plus, l'encre était trop concentrée, ce qui ne nous permettait pas de bien observer d'éventuelles turbulences



Figure 6 : Système d'arrivée d'encre du montage 1

3) Deuxième montage

Ce prototype nécessitant des améliorations, nous avons décidé de réaliser un nouveau montage qui tenait compte des différents problèmes rencontrés auparavant.

Tout d'abord, plutôt que de faire une gouttière sur l'ensemble du tuyau, nous avons laissé le tuyau complet aux extrémités ce qui permet un raccord plus simple au niveau de l'arrivée d'eau, un maintien des pailles plus efficace et ce qui évite une déformation de tuyau susceptible de fausser les observations. Nous avons ensuite, à l'aide de plusieurs raccords, fait un divergent s'enclenchant parfaitement dans le tuyau. Nous l'avons relié à l'aide d'un tuyau d'arrosage, au robinet.

Pour la sortie, afin de réguler le niveau d'eau, nous avons mis en place un plan incliné.

De plus, pour éviter des frottements trop élevés sur la surface du tuyau, celui-ci a été peint à l'intérieur dans le but qu'il soit le plus lisse possible. Cela a également permis d'avoir un fond blanc pour les prises de vue.

Quant à l'encre, nous avons acheté de l'encre en poudre. Au départ, nous avons préparé une solution de concentration massique 10 g/L mais elle restait très épaisse, nous l'avons donc diluée 5 fois.

4) Mesures et interprétation des données

Pour répondre à nos questions, il nous fallait mesurer la vitesse de l'écoulement ainsi que la fréquence des tourbillons obtenus.

Nous avons considéré 3 constantes :

- Le diamètre de la conduite $D_c=100$ mm
- Le diamètre de l'obstacle $D=10$ mm
- La viscosité de l'eau à 14°C $\eta=1,174 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Pour 7 formes d'obstacles différentes (figure 8) et 8 vitesses différentes, à l'aide des logiciels Regressi et AviMéca, nous avons mesuré les vitesses et les fréquences de tourbillons de manière à calculer par la suite les nombres de Reynolds et de Strouhal. Nous allons vous présenter les techniques de mesure pour une vitesse et une fréquence puis nous exposerons l'ensemble des résultats obtenus. Mais avant cela, quelques images de nos observations pour bien comprendre le phénomène :



Figure 7 : Ecoulement laminaire avant insertion de l'obstacle

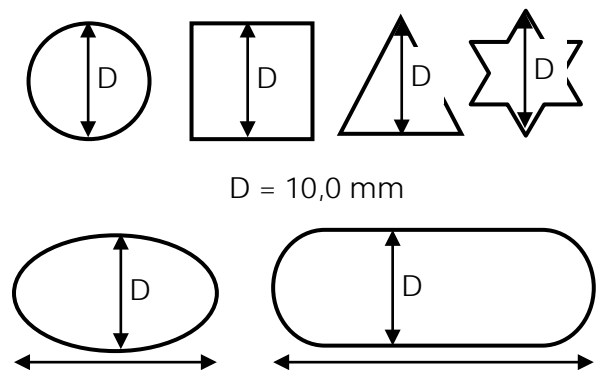


Figure 8 : Les obstacles et leurs cotes
(en ce qui concerne l'ovale et l'ellipse, 3 largeurs différentes ont été utilisées : $L = 2D$; $L = 3D$; $L = 4D$)



Figures 9 et 10 : Deux différents écoulements turbulents avec des allées de Von Karman



➤ **Mesure de la vitesse avec AviMéca et Regressi :**

Nous avons placé un objet dans l'écoulement ainsi qu'un mètre pour l'étalonnage. Nous avons ensuite pointé le flotteur sur un certain nombre d'images de la vidéo (Figure 11). AviMéca a alors créé un tableau de valeurs que nous avons exporté dans Regressi pour tracer une courbe d'étalonnage dont le coefficient directeur nous donne la vitesse de l'écoulement (Figure 12) :

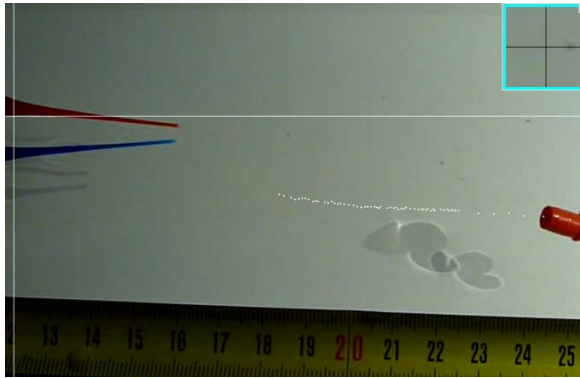


Figure 11 : Mesure de la vitesse sur AviMéca

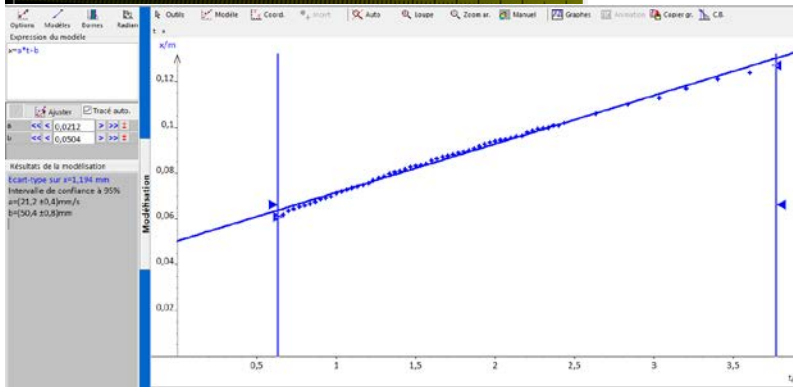


Figure 12 : tracé d'une courbe d'étalonnage sur Regressi

➤ **Mesure de la fréquence des tourbillons :**

De nouveau avec AviMéca, nous avons pointé le premier tourbillon se formant puis avons compté combien de tourbillons se formaient avant de pointer le dernier tourbillon (Figure 13). Le calcul $f = \frac{\text{nombre de tourbillons}}{\Delta t}$ nous donnait alors la fréquence (avec Δt l'écart temporel entre le premier tourbillon pointé et le dernier).

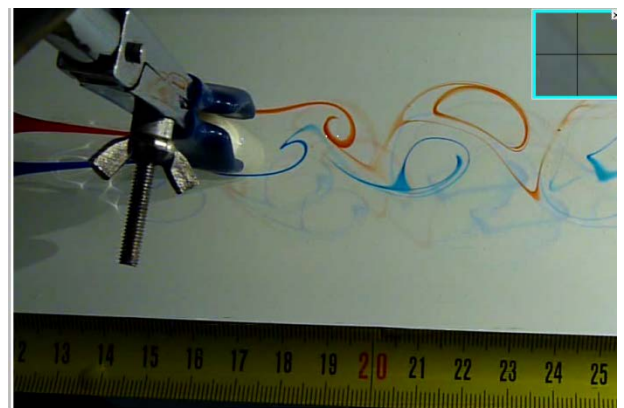


Figure 13 : Comptage des tourbillons sur AviMeca

Les mesures que nous effectuons sont sujettes à des incertitudes que nous nous devons de calculer pour évaluer la fiabilité de nos résultats.

Présentations des différentes incertitudes :

- Incertitudes sur les vitesses d'écoulement : $\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta \tau}{\tau}$ (les incertitudes sur les vitesses sont données par le logiciel Regressi)
- Incertitudes sur la fréquence des tourbillons : $\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta \tau'}{\tau'}$ (la valeur change pour chaque mesure de fréquence, τ' étant différent pour chaque fréquence.)
- Incertitude sur le diamètre des obstacles : d'après le constructeur $\Delta L = 0,5 \text{ mm}$
- Incertitude sur la viscosité : $\frac{\Delta \eta}{\eta} = \frac{0,033 \cdot 10^{-6}}{1,174 \cdot 10^{-6}} = 2,8\%$ (on considère que $\Delta \eta$ est la différence de viscosité entre une température de 14°C et 15°C sachant que notre eau avait une température de 14°C)
- Incertitude sur le diamètre de la conduite : $\frac{\Delta D}{D} = \frac{0,1}{96} = 0,1\%$
- Conséquences pour Reynolds et Strouhal : $\frac{\Delta St}{St} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta V}{V}$
 $\frac{\Delta Re}{Re} = \frac{\Delta \eta}{\eta} + \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta V}{V}$

Les incertitudes de Strouhal et de Reynolds apparaissent sur les graphiques sous forme d'ellipses.

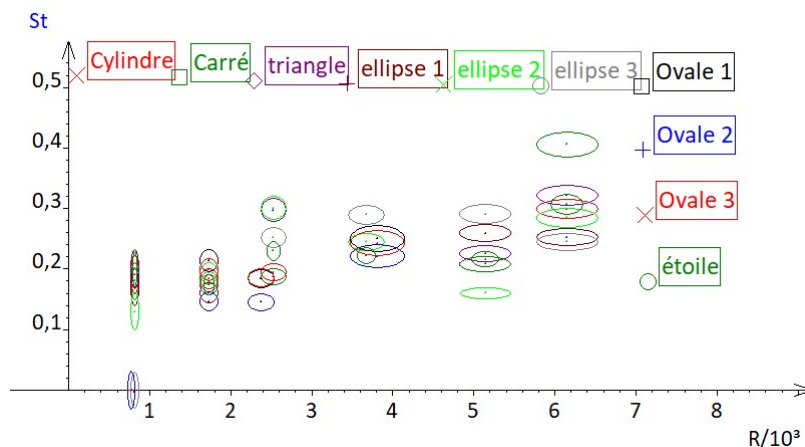


Figure 14 : Superposition des différents graphiques représentant Strouhal en fonction de Reynolds

Interprétation des résultats :

- ✓ Nous avons constaté plusieurs choses. Tout d'abord, pour les formes cylindre, carré, étoile et triangle, on observe un palier de Strouhal à 0,2 comme le prévoyait la théorie. On constate en effet, qu'au niveau de ce 0,2, les ellipses d'incertitudes de ces formes se recoupent (Figure 14).

- ✓ En ce qui concerne les ellipses, les résultats sont assez intéressants. En effet sur le graphique de l'ellipse 2 qui est telle que $L=3D$ (figure 15), on constate une chute assez significative de Strouhal dans les grands Reynolds (Figure 16). Or un physicien japonais qui a étudié Strouhal avec des obstacles rectangulaires de différentes dimensions, observe que pour un rectangle dont la longueur est égale à 3 fois la largeur, Strouhal chute dans les grands Reynolds (figure 17).

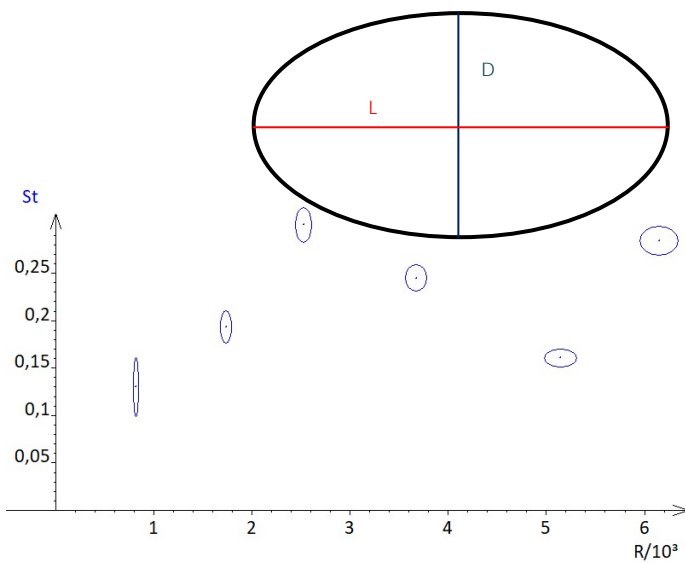


Figure 16 : Strouhal en fonction de Reynolds pour l'ellipse $L=3D$

Figure 15 : Ellipse telle que $L=3D$

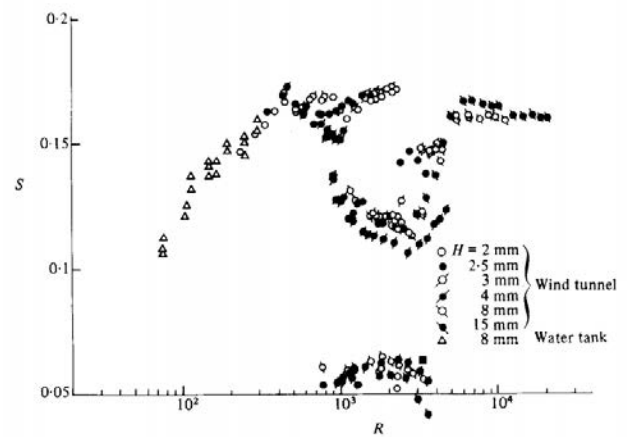


FIGURE 6. Variation of Strouhal number with Reynolds number for a rectangular cylinder with $B/H = 3$.

Figure 17 : Résultats du physicien japonais

Pour l'ellipse 3, nous n'avons pas eu de tourbillons à la plus faible vitesse d'écoulement. Strouhal est donc nul pour cette vitesse. Cette ellipse est telle que $L=4D$. Nous avons donc supposé que les tourbillons ne pouvaient pas se former, leur période spatiale étant sans doute du même ordre de grandeur que L (Figure 18).

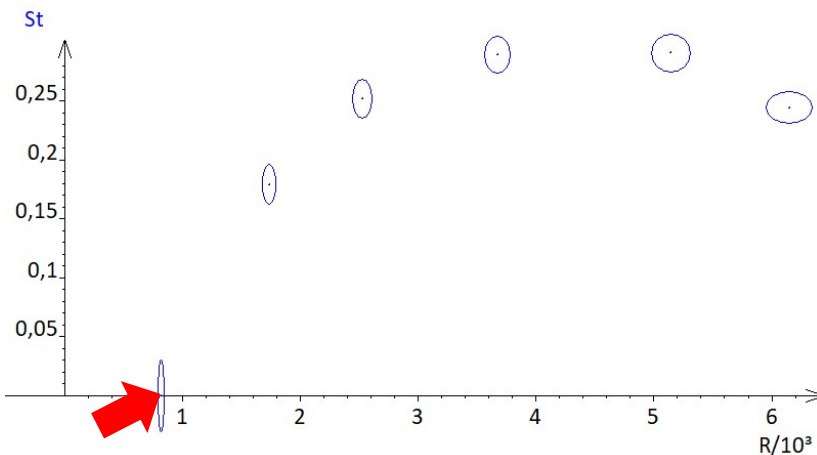


Figure 18 : Strouhal en fonction de Reynolds pour l'ellipse 3

- ✓ En ce qui concerne les ovales, nous avons constaté que pour la vitesse la plus faible, les tourbillons de Von Karman ne se forment pas, le nombre de Strouhal est donc nul. Cela confirme donc l'hypothèse que la longueur de l'obstacle dans le sens de l'écoulement modifie le régime d'écoulement après l'obstacle. Pour expliquer alors l'apparition de tourbillons pour les ellipses $L=2D$ et $L=3D$ à la vitesse la plus faible, nous avons supposé que la forme d'attaque ou l'angle de courbure en était l'origine.

5) Observations des turbulences en trois dimensions

Suite aux recommandations du jury du concours interacadémique, nous avons changé le tuyau PVC pour un tuyau en PMMA transparent de 1000 mm de longueur et de 80 mm de largeur intérieure, afin d'observer les turbulences en trois dimensions.

Nous avons en même temps rendu le montage démontable et donc plus facilement transportable (ce qui ne fut pas sans difficultés techniques pour l'étanchéité de l'assemblage)

Voici les images obtenues :

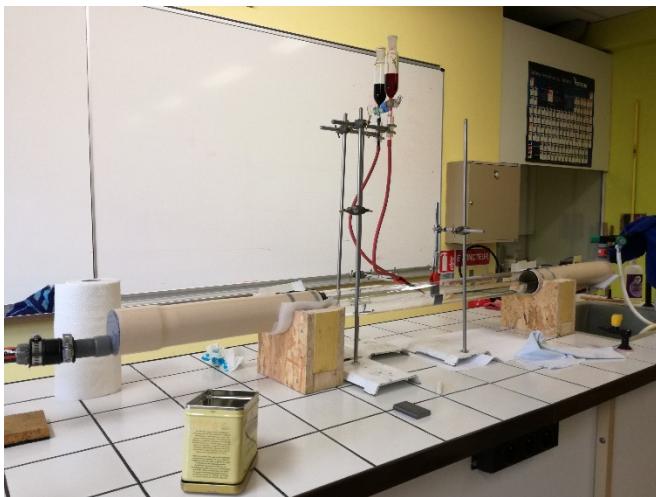


Figure 19 : Montage numéro 3

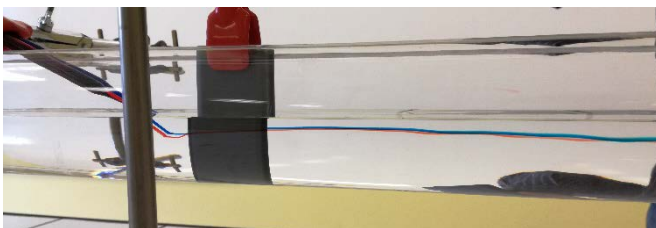


Figure 20 : Observation d'un écoulement laminaire en aval d'un ovale de diamètre D et de longueur $L=4D$

On observe bien deux lignes de courant colorées, qui passent de chaque côté de l'obstacle ovale sans être perturbées. Les lignes colorées restent à la même profondeur au long du parcours en aval de l'obstacle.

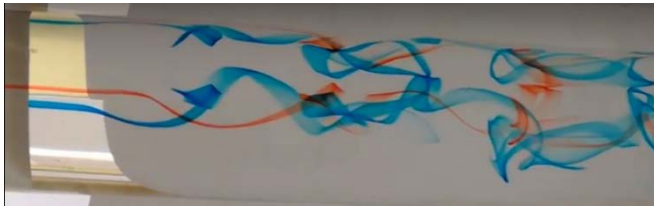


Figure 21 : Observation de turbulences en 3 dimensions en aval d'un obstacle cylindrique de diamètre D .

Avec le même réglage de débit au robinet et donc la même vitesse d'écoulement dans la conduite, on observe maintenant, avec un obstacle cylindrique de diamètre D , des turbulences qui font apparaître des boucles de lignes de courant, qui se forment périodiquement (T) avec la même géométrie. Les boucles rouges et bleues sont les mêmes de chaque côté de l'obstacle et elles se forment avec un décalage temporel de $T/2$. On observe au bout d'un certain temps une allée de Von Karman en trois dimensions.

III. Etude d'une application : les piles de pont

Dans la nature, les turbulences sont omniprésentes et l'Homme doit adapter ses technologies en les prenant en compte. Par exemple, lors de la construction de ponts, les structures porteuses du tablier, appelées « piles de pont », sont soumises aux courants turbulents de la rivière. Dans notre étude, la rivière peut être assimilée à la conduite et une pile de pont à l'obstacle. On peut ainsi simuler l'effet des turbulences sur le lit granulaire de la rivière autour de cette pile de pont en le reproduisant avec du sable.

Deux types de tourbillons peuvent agir aux alentours des piles de ponts :

- Le tourbillon en fer à cheval se formant près du lit granulaire
- Les tourbillons de sillage à l'origine de l'allée de Von Karman que nous avons observée dans la partie I. (Figure 9-10)

Ces tourbillons provoquent l'érosion du lit granulaire que l'on appelle affouillement. D'après les travaux d'autres physiciens (comme ceux de F. LACHAUSSEE), l'affouillement peut prendre différentes formes :

- Une fosse d'affouillement entourant le cylindre causée par le tourbillon en fer à cheval. C'est l'affouillement le plus profond et le plus dangereux quant à la stabilité du pont.
- Deux fosses allongées communément appelées « oreilles de lapin » causées par les tourbillons de sillage. Elles se forment beaucoup plus en aval de l'obstacle et ne constituent pas un grand danger du fait de leur faible profondeur.

Cette étude expérimentale a été effectuée avec un obstacle cylindrique.

Pourtant, on remarque que la majorité des ponts sont construits, depuis longtemps, sur des piles de forme ovale, sans doute car les études qualitatives ont montré que l'affouillement est moins prononcé pour des piles de pont de cette forme. Cela est d'ailleurs cohérent avec nos premiers résultats expérimentaux : un obstacle ovale, pour des vitesses faibles, ne modifie pas le régime de l'écoulement,

et ne provoque ainsi aucune turbulence en aval. L'affouillement serait ainsi limité par une turbulence plus faible.

Nous avons expérimenté avec différents types de sables. Nos résultats actuels ne sont pas pertinents car le sable est pour l'instant de granulométrie trop importante ou trop irrégulière à l'échelle de l'obstacle. Aucun affouillement n'est constaté après 4 h00 d'écoulement. Nous avons sélectionné finalement du sable siliceux de rivière dit "0,2" dans le bâtiment, mais qui est composé encore de beaucoup de grains nettement plus gros. Nous allons donc, dans le temps qui nous reste, sécher ce sable et le tamisé (tamis encore à trouver) pour obtenir une granulométrie au maximum égale à 0,2 mm et recommencer les expériences avec différents obstacles.

On a aussi conscience que pour ce type d'expérience, la consommation d'eau est grande et qu'il serait judicieux de faire une autre expérience, vraiment différente, en circuit fermé, qui permettrait de consommer beaucoup moins d'eau.

CONCLUSION

Durant nos travaux, nous nous sommes intéressés aux turbulences induites par la présence d'un obstacle dans un écoulement d'eau. Ce genre de phénomène est aujourd'hui essentiellement caractérisé par un paramètre adimensionné : le nombre de Strouhal. Dans la littérature, il est étudié presque uniquement dans le cadre de turbulences provoquées par un obstacle cylindrique. Pourtant, il nous semblait "cohérent" que la forme de l'obstacle influence les tourbillons qu'il provoque.

Nos expériences étaient basées sur l'observation de turbulences provoquées par sept objets de forme différentes à différentes vitesses (donc différents nombres de Reynolds). Nous sommes alors parvenus à la conclusion que Strouhal caractérise sans surprise un écoulement turbulent, mais pas de manière complète.

Nous avons bien observé, comme la littérature le prédisait, la présence d'un palier du nombre de Strouhal à 0,2 pour un large intervalle de nombre de Reynolds, et pour un obstacle pas trop long dans le sens de l'écoulement. Cependant, pour un certain ratio entre la largeur et la longueur de l'obstacle, Strouhal sort de cet intervalle. La forme influence donc parfois le nombre de Strouhal, quand bien même cela n'est pas prévu par sa formule.

De plus, l'étude des turbulences est indispensable avant la construction de ponts dans des rivières. En effet, les piles de pont sont sujettes aux turbulences induites par le cours d'eau. Ces dernières sont responsables d'une érosion autour de la pile nommée affouillement. Tout comme le nombre de Strouhal est influencé par la longueur de l'obstacle dans le sens de l'écoulement, l'érosion varie selon l'ampleur des turbulences et donc de la longueur des piles de ponts. De manière empirique, les piles de pont ont d'ailleurs été construites avec une forme allongée.

Ces longues semaines de travail nous ont donc à la fois fait découvrir un sujet non évoqué ou étudié tardivement dans le cursus scolaire, mais nous ont également permis de découvrir la démarche scientifique. Monter entièrement une expérience, analyser puis interpréter les résultats autant d'étapes qui nous plongent dans l'univers de la recherche scientifique.

Remerciements

C'est pour nous une très belle expérience de mener un projet scientifique qui nous tenait à cœur dans un domaine qui nous inspire et éveille notre curiosité. Nous voudrions tout d'abord remercier M. Duguery, notre professeur de physique au sein du lycée, qui, toujours de bonne humeur et avec beaucoup d'enthousiasme, nous transmet ses connaissances et sa passion pour la physique.

De plus, c'est en partie grâce à David Château, professeur de Physique en classe préparatoire, ami et collègue de M. Duguery, que nous avons connu Strouhal et c'est pourquoi nous tenions tout particulièrement à le remercier.

Nous souhaitons également remercier M. Lachaussée, doctorant en physique, qui nous a permis d'approfondir la partie appliquée de notre étude concernant l'effet des turbulences autour des piles de pont.

Nous voulons aussi remercier Viviane et Julianne, les deux préparatrices du laboratoire de Physique-Chimie du Lycée, qui n'ont pas hésité à apporter leur aide quand nous en avons besoin et qui nous ont fait gagner un temps précieux, notamment dans la recherche, la mise en place du matériel et le rangement de celui-ci.

Nous voulons également souligner le travail précieux de l'entreprise Matrix 3D qui a conçu et fabriqué les obstacles nécessaires à l'expérience.

Nous sommes reconnaissants envers le Lycée Charles de Gaulle, et notamment notre proviseur M. Meunier-Larlotte, qui a mis à notre disposition des moyens matériels et financiers nous permettant de mener à bien notre projet.

Mais c'est aussi grâce à toute l'équipe qui organise les Olympiades que nous avons pu vivre cette expérience unique, de concevoir une expérience de A à Z, et de nous rendre compte de toutes les difficultés que cela implique.

BIBLIOGRAPHIE

Articles Internet ou informatisés :

CORUM Jonathan, *The Strouhal Number in Cruising Flight*, 27 octobre 2003
<http://style.org/strouhalflight/>

ELOY Christophe, *Optimal Strouhal Number for swimming animals*, 1 février 2011

GRANIER Olivier, http://olivier.granier.free.fr/cariboost_files/meca-flu-PC.pdf

HEMON Pascal, *Vibrations couplées avec le vent*, octobre 2004 (cours Polytechnique Palaiseau) <http://www.ladhyx.polytechnique.fr/people/pascal/pdf/poly-aeroelasticite.pdf>

LACHAUSSÉE Florent, *Motifs d'érosion dans le sillage d'un cylindre*, 2017,
http://www.fast.u-psud.fr/~bertho/papers/Bertho_RNL2017.pdf

OKAJIMA Atsushi, *Strouhal numbers of rectangular cylinders*, 18 mars 1982
<http://www.hds.bme.hu/~fhegedus/VortexShedding/Irodalom/1982%20Strouhal%20numbers%20of%20rectangular%20cylinders.pdf>

ROQUES Michel, *Mécanique des fluides*, 2005 (cours BTS)

TADRIST Loïc, *Léonard de Vinci, homme de science : L'instigateur de la turbulence ?*, septembre 2011 <http://loic.tadrists.pagesperso-orange.fr/Files/Other/Master%20Philosophie.pdf>

TAYLOR Graham, NUDDS Roberts, THOMAS Adrian, *Flying and swimming animals cruise at a Strouhal number tuned for high power efficiency*, 16 octobre 2003
<https://www.nature.com/articles/nature02000>

Vidéo :

MORTIER-DUMONT Baptiste, *Créer un jet d'eau parfait*, 23 août 2014 (vidéo)
<https://www.youtube.com/watch?v=rscpnV5DBSo&feature=youtu.be>