



OLYMPIADES
DE PHYSIQUE FRANCE

XXIXe Olympiades de physique France

2021/2022

TUTO: Comment surfer sur le vent?



Kawtar Mestari Ghali Lahlou Ghali Bennani Ines Rhoulami Adam Khmassi

Professeur encadrant: Christophe Bruyas

Avec l'aide de: Hamid Elmir

 **Lycée Lyautey**
Casablanca

Résumé:

Nous avons tous déjà pris l'avion au moins une fois : observé le paysage, connu la pression du décollage... Tout le monde a été fasciné, enfant, en regardant par un hublot pour la première fois. Beaucoup se sont demandé à ce moment-là comment un appareil aussi lourd et imposant pouvait se déplacer avec autant d'aisance dans les airs. C'est la question que nous nous poserons dans ce travail de recherche.

En réalité, les avions se servent de l'air comme support, ils "glissent" sur le vent. Ainsi, nous étudierons le comportement des fluides, afin de comprendre comment les ailes empêchent les avions de s'écraser sur le sol.

Sommaire :

1 Introduction

2 D'un point de vue théorique...

2.1 Mouvement des fluides

2.2 Types d'écoulement

2.3 La viscosité

2.3.1 Expérience du miel

2.3.2 Force de viscosité

2.3.3 Ecoulement de Poiseuille

2.4 Nombre de Reynolds

2.5 Théorème de Bernoulli

2.5.1 Enonciation du théorème

2.5.2 Application du théorème sur l'aile d'un avion

3 D'un point de vue pratique...

3.1 Le tube de Pitot

3.1.1 Principe du tube de Pitot

3.1.2 Dispositif expérimental

3.2 Ecoulement de l'air autour d'une aile

3.2.1 Expérience du sèche-cheveux

3.2.2 Couche limite

4 Conclusion

5 Sources

6 Remerciements

1. Introduction :

Tout le monde aime voyager, découvrir de nouvelles cultures, changer un peu d'air... Malheureusement il est devenu très difficile de se déplacer au-delà des frontières. Et pour être honnête, nous sommes devenus nostalgiques du voyage en avion.

Vous souvenez-vous des moments où vous vous trouviez assis à côté du hublot ? Nous oui, et nous nous sommes souvent questionnés en observant l'aile de l'avion juste en dessous "comment se fait-il qu'un corps aussi massif puisse se déplacer aussi facilement dans les airs ?" Alors que si l'on essaie de lancer une plume contre le vent, on ne peut pas prévoir si elle va suivre la trajectoire de l'air ou tomber directement par terre. On suppose que la raison serait qu'un avion est un appareil possédant un moteur assez puissant pour lui permettre de s'élever dans les airs et de voler au travers. Pourtant, si on attribue le même type de moteur à une voiture, on peut directement affirmer qu'à partir du moment où celle-ci quittera le sol, elle s'écrasera tout de suite après.

Donc, qu'est ce qui explique qu'un avion arrive à s'élever et à contrer les forces du vent avec tant d'aise ? Est-ce un engin doté de capacités qui vont au-delà du savoir humain en mécanique ? Avons-nous entraîné ces appareils sur l'air pour les rendre aussi doués qu'un surfer sur une vague ? Nous allons répondre à tous ces questionnements à travers l'étude de l'écoulement de l'air autour d'une aile d'avion.

2. D'un point de vue théorique

2.1. Mouvement des fluides

Généralement, lorsqu'on veut prévoir comment un objet va se déplacer, on l'assimile à un point matériel - son centre de gravité - et de plus on sait depuis Newton que pour faire cela, il faut utiliser la relation vectorielle suivante :

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

Principe fondamental de la dynamique ou
Deuxième Loi de Newton

Avec : $\sum \vec{F}$ La somme vectorielle des forces qui s'appliquent sur l'objet

m La masse inerte de l'objet en grammes.

\vec{a} L'accélération de l'objet.

Cependant, lorsqu'il s'agit de fluides, la tâche devient relativement compliquée. On peut appliquer l'équation de Newton aux fluides, c'est ce qu'ont fait Henri Navier et George Stokes pour donner l'équation suivante, appelée équation de Navier-Stokes :

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \Delta \mathbf{v} + \mathbf{f}$$

densité
 ρ accélération Forces de pression Forces visqueuses Autres forces

Cette équation mobilise des outils mathématiques hors de portée d'un élève de terminale, c'est pourquoi nous n'allons pas nous pencher sur son explication. Cependant, il faut savoir que résoudre cette équation, c'est-à-dire déterminer la fonction $v(x,y,z,t)$ du temps et de l'espace qui décrit le mouvement du fluide à partir de certaines données, est un problème dit « du Millénaire ».

Ainsi, nous étudierons l'écoulement de l'air autour de l'aile d'un avion en admettant plusieurs simplifications permettant déjà de comprendre comment il peut voler.

2.2. Types d'écoulement

Tout d'abord, observons ces deux images :



Comparaison de l'écoulement de l'eau (gauche) et de l'écoulement de l'huile (droite)

Sur la première image, on voit de l'eau qu'on renverse sur les mains de quelqu'un. La partie de l'eau qui n'est pas encore entrée en contact avec la main semble se comporter de manière agitée et désordonnée : on voit des gouttes se séparer du flux général par exemple. On peut définir ce type de régime d'écoulement comme **turbulent**. D'un autre côté, sur la deuxième image, on voit de l'huile s'écouler sur une cuillère. A l'inverse, on a ici un écoulement bien plus lisse et ordonné. On peut définir ce type de régime d'écoulement comme **laminaire**. Notre objectif dans un premier temps sera de déterminer quels sont les facteurs qui déterminent si un fluide s'écoule de manière laminaire ou pas.

On peut déjà supposer certaines choses. Il y a plusieurs différences entre les écoulements de gauche et de droite, notamment sur le fluide qui s'écoule. En effet, l'eau diffère de l'huile par sa masse volumique. La densité de l'huile est de 0,9 ce qui veut dire que sa masse volumique est inférieure à celle de l'eau. Mais ils diffèrent aussi par ce qu'on pourra appeler la « viscosité ». Intuitivement, on peut comprendre ce que ce terme signifie mais nous le définirons formellement ultérieurement. Essayons de savoir s'il y a d'autres facteurs possibles.

Expérience n°1 : Le ballon de baudruche.

Matériel utilisé :

- Un ballon de baudruche
- Du scotch épais
- Une aiguille
- Robinet d'eau

Protocole réalisé :

- Remplir le ballon de baudruche avec le plus d'eau possible (sans le faire éclater).
- Placer le ballon de baudruche sur un support plan.
- Coller deux bouts de scotch sur le ballon de sorte qu'ils soient parallèles et espacés de 1 cm.
- Coller ensuite deux autres bouts de scotch perpendiculairement aux deux premiers et eux aussi espacés d'un centimètre. On voit alors apparaître au centre un carré de surface $S = 1 \text{ cm}^2$.
- Percer le centre du carré avec une aiguille.

Les observations à deux instants différents sont disponibles dans l'annexe (voir Annexe 1).

On remarque à l'origine de l'écoulement une eau qui paraît comme statique. L'écoulement semble gelé. Cependant, plus loin dans le flux, on observe un type d'écoulement différent (voir Annexe 2).

L'écoulement n'est plus du tout aussi ordonné qu'avant. On en déduit alors que l'écoulement à l'origine est laminaire, mais devient de plus en plus turbulent à mesure que le fluide parcourt une plus longue distance. Nous avons mis en évidence un nouveau facteur. L'eau peut donc aussi s'écouler de manière laminaire si on la met dans certaines conditions.

En résumé, nous cherchions les paramètres à mettre en place pour observer un écoulement laminaire. Nous avons déduit de nos expériences que l'écoulement est moins laminaire lorsque la distance parcourue par le fluide augmente.

D'autres paramètres exercent une influence sur le régime d'écoulement, c'est par exemple le cas de la viscosité du fluide.

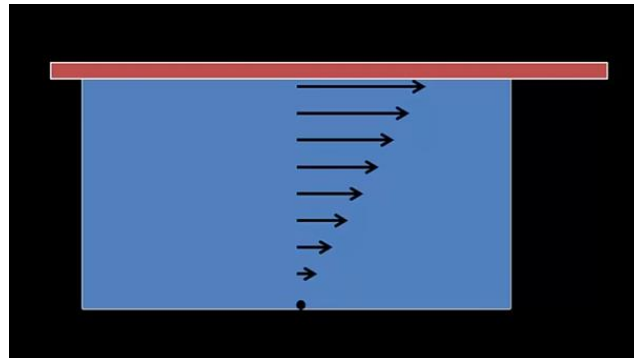
2.3. La viscosité

L'une des nombreuses propriétés d'un fluide est la viscosité. Elle se caractérise par différentes grandeurs physiques mais c'est la viscosité dynamique (de symbole η) qui a l'utilisation la plus courante. Cette dernière correspond à une mesure des forces de frottements entre les molécules d'un fluide et avec les parois. Elle est extrêmement dépendante de la température.

En effet, comme on peut le voir sur l'image (Annexe 3), lorsqu'on verse du miel à température ambiante (25°C) sur une assiette, cette dernière s'étale beaucoup moins que pour du miel chauffé à 35°C. Le miel à température ambiante montre donc une plus grande résistance face à l'assiette que le miel chauffé. Cela démontre donc une influence de la température puisque plus cette dernière augmente, plus la viscosité diminue et inversement.

L'utilisation d'un autre fluide que le miel aurait été compliqué bien qu'en théorie possible. En effet, la viscosité de certains fluides est difficilement mesurable par distance d'étalement sur une assiette. Le choix du miel pour cette expérience n'est donc pas anodin. En effet, puisque ce dernier est très visqueux il permet de bien démontrer l'influence de la température sur la viscosité d'un fluide. Afin d'illustrer le choix du miel, un tableau des ordres de grandeur de nombreux fluides communs est en annexe (voir Annexe 4)

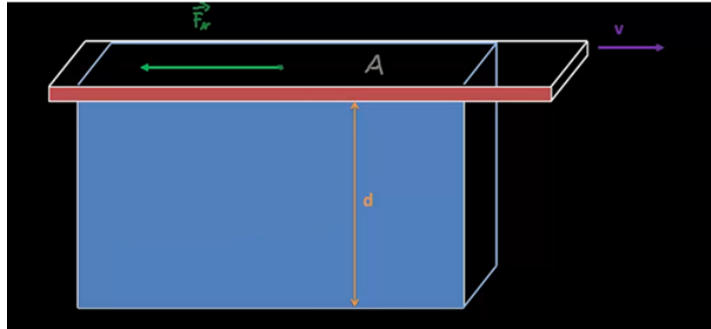
La viscosité peut être mise en évidence par la modélisation ci-dessous : lorsqu'on déplace le couvercle rouge du récipient rempli d'eau, cette dernière va entraîner la couche supérieure d'eau se déplaçant à une certaine vitesse ce qui va affecter la couche d'eau inférieure et ainsi de suite jusqu'au fond du récipient en contact avec une paroi fixe et qui n'est donc pas en mouvement. Cette situation résulte en un gradient de vitesse, soit une variation de la vitesse sur l'axe vertical. Il est représenté sur le schéma par des flèches noires représentant le vecteur vitesse de l'eau sur les différentes couches, puisque les flèches sont de plus en plus petites ce qui démontre ainsi une résistance de l'eau caractérisée par la viscosité dynamique.



D'après la troisième loi de Newton, il existe une force de l'eau sur le couvercle opposée à celle du couvercle sur l'eau. Celle-ci est appelée la force de Viscosité (F_v). Le vecteur modélisant cette force a la même direction et un sens opposé au vecteur modélisant la force du couvercle sur l'eau. Sa norme peut être calculée par la formule simplifiée suivante :

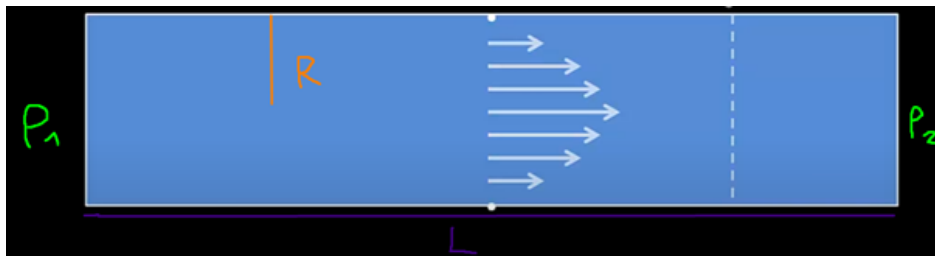
$$F_v = \frac{v * A * \eta}{d}$$

- Avec :
- v la vitesse de déplacement du couvercle en m/s
 - A l'aire de contact entre le couvercle et le fluide en m²
 - d la profondeur du bassin en m
 - η la viscosité dynamique



En procédant à une analyse dimensionnelle, on peut déterminer que η s'exprime en $s \cdot N \cdot m^{-2}$ ou en $Pa \cdot s$. (Il existe aussi une autre unité pour la viscosité dynamique, la poise, qui est égale à $0,1 Pa \cdot s$.)

Cette propriété permet de définir le concept de fluide Newtonien et non Newtonien. En effet, les fluides Newtonien ont une viscosité dynamique qui ne dépend pas de la contrainte appliquée par l'objet en contact avec le fluide tandis que les fluides non-newtoniens ont une viscosité qui varie en fonction de celle-ci. On peut par exemple citer le fameux exemple du mélange féculé de maïs-eau qui « durcit » lorsqu'on lui applique une force suffisante.



Un autre modèle faisant intervenir la viscosité est celui de l'écoulement de Poiseuille, permettant de déterminer le débit volumique d'écoulement Q d'un liquide dans un tuyau de rayon R dans la situation ci-dessus, grâce à la formule suivante :

$$Q = \frac{\Delta p * \pi * R^4}{8 * \eta * L}$$

- Avec :
- Q le débit volumique (en $m^3 \cdot s^{-1}$)
 - la variation de pression aux extrémités du tuyau (Pa)
 - R le rayon du tuyau (m)
 - η la viscosité dynamique (Pa.s)
 - Le longueur du tuyau (m)

Pour que cette loi s'applique il faut que le fluide étudié soit newtonien et que l'écoulement soit laminaire.

Cette nouvelle grandeur va alors nous permettre de déterminer le régime d'écoulement d'un fluide par calcul.

2.4. Le nombre de Reynolds

Mais alors, quel est le lien avec l'écoulement des fluides ? Et bien nous y voilà : nous avons tous remarqué qu'un fluide, par exemple l'eau, n'aura pas un écoulement identique dans des conditions différentes. En effet, l'énergie cinétique de l'écoulement du fluide entre en jeu et, bien évidemment, sa viscosité.

Pour schématiser la situation, on peut représenter l'écoulement d'un fluide par un skieur qui arrive sur une partie horizontale en bas d'une pente enneigée, et on se demande quelle distance il peut parcourir. On comprend intuitivement qu'il s'agit du rapport de l'énergie cinétique accumulée durant la descente sur les frottements de la neige sur les skis.



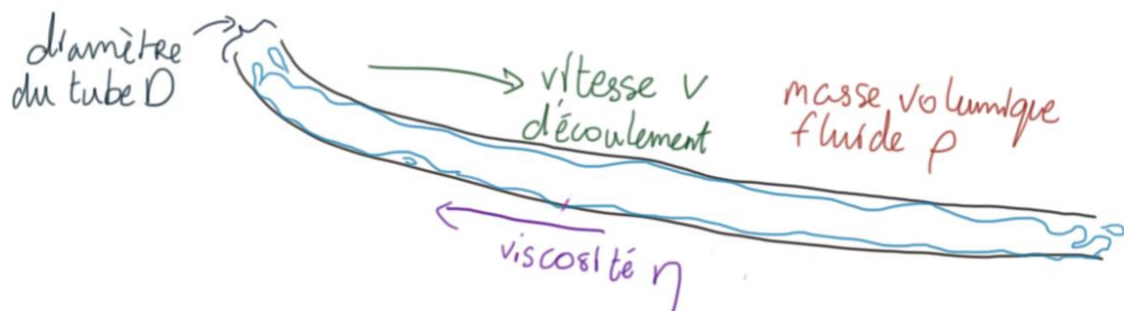
Soit

$$\text{distance parcourue} = \frac{\text{Energie cinétique}}{\text{Forces de frottement}}$$

Avec les forces d'inertie correspondant à l'énergie cinétique soit $(\frac{1}{2}).m.v^2$ et la force de frottement une valeur proportionnelle à la vitesse.

Et plus la masse du corps sera importante, et la neige glissante, plus on sera sûr que le corps en mouvement ira loin.

Revenons à nos fluides, si on devait schématiser l'écoulement d'un fluide de la même manière, voilà ce qu'on obtiendrait :



$$\text{Energie cinétique} = \frac{1}{2} \rho v^2$$

Les forces de viscosité sont des forces de frottements, c'est ce qui fait qu'un fluide sera plus ou moins collant aux parois qu'il touche. Donc, ces forces augmentent avec la viscosité η du fluide et avec sa vitesse v . Puisque les frottements sont de moins en moins importants à mesure que l'on s'éloigne de la paroi, on en déduit intuitivement que ces forces diminuent lorsque le diamètre du tube D augmente.

Ainsi, on peut proposer l'expression suivante pour les forces surfaciques de viscosité :

$$\text{Forces de viscosité} = \frac{\eta \times v}{D}$$

avec : η la viscosité en Pa.s
 v en m/s
 D en m

En divisant le terme lié à l'énergie cinétique par le terme de viscosité, on peut établir un quotient sans dimension qu'on appelle le nombre de Reynolds (Re).

Donc :

$$Re = \frac{\rho \times D \times v}{\eta}$$

Or, nous étudions la viscosité d'un fluide dans le cas où il traverse un canal cylindrique. Mais il peut exister d'autres formes de canaux par lequel peut passer ce fluide. Dans ce cas-là, on fait appel à une caractéristique plus généralisée du diamètre de canalisation qu'on appelle diamètre hydraulique qui s'exprime :

$$D_h = \frac{4a}{P}$$

avec a l'aire de la forme géométrique en m^2
 et P le périmètre de la surface traversée par le fluide en m

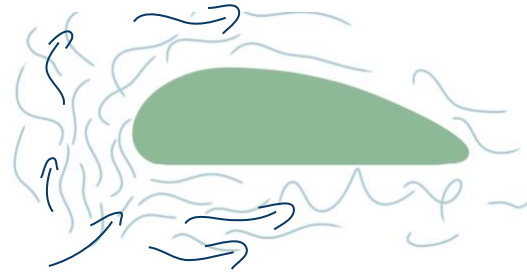
On obtient donc une formule plus généralisée du nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho \times D_h \times v}{\eta}$$

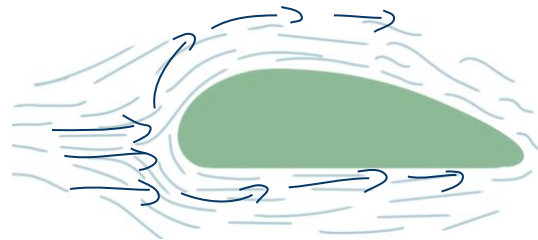
D'après la formule du nombre de Reynolds, le régime d'écoulement dépend à la fois de la nature du fluide (en particulier sa viscosité), de la vitesse et d'une distance caractéristique de l'écoulement (par exemple le diamètre de canalisation).

Et selon la valeur de ce nombre, l'écoulement du fluide se comportera de façon différente :

si $Re > 3500$, on a un écoulement turbulent, comme vu plus tôt ! Pour rappel, il se comporte de cette manière quand le fluide rencontre un obstacle :



et si $Re < 2000$, on a un écoulement laminaire, qui, on le rappelle, s'illustre de cette manière quand le fluide contourne un obstacle :



Il est important de connaître l'ordre de grandeur de ce nombre pour pouvoir déterminer le type d'écoulement obtenu du fluide, au voisinage d'un obstacle. Par exemple, dans le domaine aéronautique, le nombre de Reynolds est d'environ 10^7 , on peut donc conjecturer que l'écoulement de l'air se fera de façon turbulente autour de l'aile de l'avion.

Essayons maintenant d'appliquer les notions théoriques que nous venons de mentionner sur un cas pratique : notre première expérience sur le ballon de baudruche. L'objectif va être d'expliquer par le calcul les différents régimes d'écoulement observés pendant l'expérience. Rappelons d'abord la formule du nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho \times D \times v}{\eta}$$

L'écoulement étudié est celui de l'eau qui sort du ballon. Nous disposons déjà de la masse volumique du fluide $\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$ ainsi que de la viscosité de ce dernier $\eta = 10^{-3} \text{ Pa.s}$. Il reste alors à déterminer la vitesse de l'écoulement et la longueur D qui est une distance caractéristique de l'écoulement.

Essayons d'abord de calculer la vitesse de l'écoulement. Pour cela, on dispose des informations suivantes qui sont des approximations que nous avons effectuées. Le ballon contenait 1 L d'eau et a pris 120 s à se vider complètement. De plus, le trou par lequel s'est échappé le fluide s'apparente à un cercle de diamètre $D = 0.5 \text{ cm}$. Par ailleurs, on connaît deux expressions littérales du débit volumique de l'écoulement qui sont les suivantes :

$Dv = v \times S$ avec v la vitesse de l'écoulement et S la surface du trou.

Et $Dv = \frac{V}{t}$ avec V le volume d'eau au départ et t le temps que prend le ballon à se vider.

On obtient par calcul littéral : $v = \frac{V}{t \times S}$

$$v = \frac{10^{-3}}{120 \times \pi \times \left(\frac{0,5}{2} \times 10^{-2}\right)^2}$$
$$v = 0,4 \text{ m.s}^{-1}$$

Cette valeur est assez faible par rapport à nos observations. On peut expliquer cette différence par le fait que l'eau est soumise à l'accélération de la pesanteur au cours de sa chute.

En ce qui concerne la longueur caractéristique, si on cherche à étudier l'écoulement de l'eau à la sortie du ballon, on peut considérer D comme étant le diamètre du trou du ballon. On a donc D = 0,5 cm. On peut alors calculer le Reynolds :

$$Re = \frac{\rho \times D \times v}{\eta}$$
$$Re = \frac{10^3 \times 0,5 \times 10^{-2} \times 0,4}{10^{-3}}$$

$$Re = 2000 .$$

On retrouve bien un écoulement laminaire à l'origine du jet d'eau !

Par la suite, la vitesse de l'eau augmentera à cause de la gravité ce qui aura pour effet d'augmenter le nombre de Reynolds de l'écoulement. Cela explique alors bien pourquoi l'écoulement devient turbulent.

2.5. Théorème de Bernoulli

Nous avons cherché à comprendre comment l'écoulement de l'air permet à un avion de voler. Ce questionnement nous a mené à découvrir un nouveau théorème permettant d'expliquer en partie le fonctionnement du vol d'un avion.



Simulation SolidWorks de l'écoulement de l'air sur un profil d'aile réalisée par Benjamin Boyries

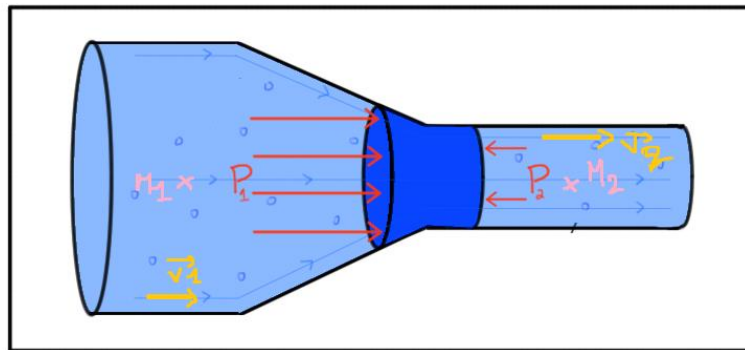
Supposons que l'air est un fluide parfait, c'est à dire qu'il s'agit d'un fluide incompressible en écoulement stationnaire et dont les effets de viscosité sont négligeables. Nous pouvons alors appliquer le principe de Bernoulli qui peut se simplifier ainsi : dans un fluide s'écoulant horizontalement, la pression du fluide aux points où sa vitesse est élevée, est plus faible que la pression du fluide aux points où sa vitesse est plus faible.

Ce principe semble contre-intuitif et nous nous sommes demandés d'où provient l'énergie cinétique permettant l'augmentation de la vitesse. La réponse se trouve dans le théorème de l'énergie cinétique, puisque la seule façon d'obtenir de l'énergie cinétique est sous forme de travail.

$$W_{ext} = \Delta E_c = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$$

Comme nous nous plaçons dans une situation où l'écoulement de notre fluide est laminaire, nous considérons que les forces non conservatives comme les frottements sont négligeables, il n'y a donc pas de perte d'énergie. L'application du théorème de l'énergie cinétique nous permet alors de comprendre que c'est la force de pression qui permet de fournir le travail nécessaire à l'augmentation de la vitesse.

Nous considérons l'écoulement de l'eau le long d'un tube qui se rétrécit. Nous supposons que l'eau, comme l'air, est un fluide parfait ce qui nous permet l'analogie entre ces deux fluides.



Comme la vitesse d'écoulement de l'eau augmente à la sortie du tube, le travail fourni doit être positif. Nous avons une différence entre les forces pressantes exercées entre les points M_1 et M_2 , c'est -à -dire que le gradient de pression est vers la gauche sur le schéma, donc que P_1 est supérieur à P_2 . Cela permet de prouver que lorsque la pression diminue en un point, la vitesse d'écoulement du fluide augmente en ce même point et inversement. Cette relation entre la pression et la vitesse correspond au théorème de Bernoulli, qui s'écrit :

$$P_1 + \rho_{fluide}gz_1 + \frac{1}{2}\rho_{fluide}v_1^2 = P_2 + \rho_{fluide}gz_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

$$\Leftrightarrow P + \rho gz + \frac{1}{2}\rho v^2 = constante$$

Avec:

P_1 et P_2 les pressions en pascal à deux endroits de l'écoulement (en Pa)

La masse volumique ρ_{fluide} en $kg.m^{-3}$

z_1 et z_2 les altitudes en mètre à deux endroit de l'écoulement (en m)

v_1 et v_2 les vitesses d'écoulement du fluide à ces deux points en $m.s^{-1}$

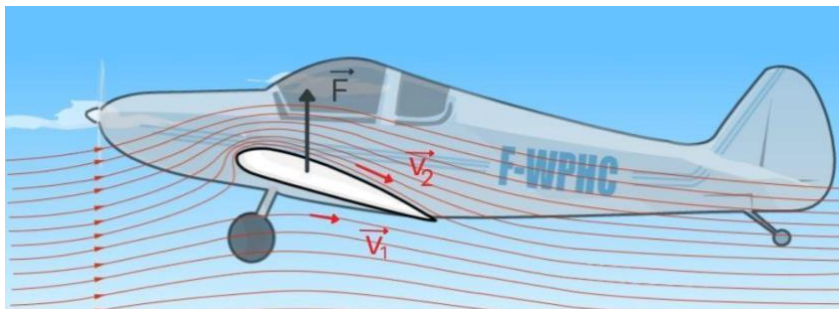
$g = 9,81 N.kg^{-1}$ l'intensité de la pesanteur terrestre

Cette équation peut être considérée comme l'application du principe de conservation de l'énergie adapté aux fluides où :

P_1 et P_2 représentent l'énergie mécanique volumique,
 $\rho_{\text{fluide}}gz_1$ et $\rho_{\text{fluide}}gz_2$ représentent l'énergie volumique potentielle,
 $\frac{1}{2}\rho_{\text{fluide}}v_1^2$ et $\frac{1}{2}\rho v_2^2$ représentent l'énergie volumique cinétique.

La forme du profil d'aile, plat en dessous (l'intrados) et bombé sur le dessus (l'extrados) crée une différence de vitesse dans le passage de l'air. Pour une même hauteur, la vitesse augmente pour l'écoulement d'une même quantité de fluide au niveau de l'extrados.

Cela mène à un phénomène de dépression sur cette partie de l'aile. Ce qu'on appelle l'effet Venturi résulte alors en une force globale de pression vers le haut : la portance.



On a : $v_2 > v_1 \Rightarrow P_2 < P_1$

Ce modèle, très simplifié, permet alors d'expliquer la spécificité de la forme du profil d'aile : elle est dite "aérodynamique". Cependant, pour appliquer ce théorème, nous nous plaçons dans des conditions dites parfaites, ce qui crée quelques zones d'ombres à notre modélisation.

Pour comprendre ce phénomène de portance plus amplement nous devons alors replonger dans les lois de Newton.

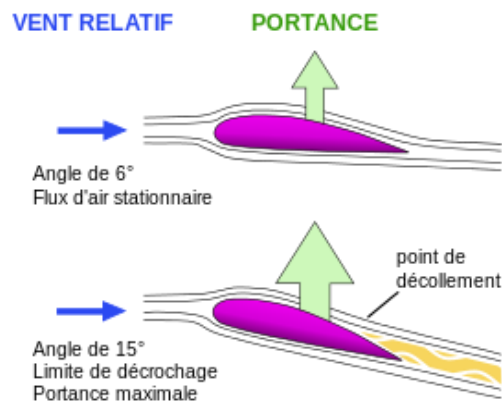
1^{ère} loi : Tout objet non soumis à des forces qui se compensent conserve son état de repos ou de mouvement rectiligne et uniforme.

3^{ème} loi : Action et réaction : si un objet exerce une force \vec{F} sur un second objet, celui-ci exerce à son tour une force $-\vec{F}$ sur le premier.

Nous nous positionnons dans une configuration où l'avion décolle, c'est-à-dire que nous avons une accélération vers le haut. D'après la première loi, si le profil d'aile n'est pas en mouvement rectiligne uniforme alors la résultante des forces subies par ce profil est non nulle. Comme nous l'avons compris, il existe une force de portance verticale vers le haut dont la norme est supérieure à celle du poids.

D'après la 3^{ème} loi de Newton, si le profil d'aile est soumis à une force (exercée par l'air), alors il exerce une force réciproque sur l'air. Cela permet de comprendre que l'air sous l'intrados est plus comprimé que l'air sur l'extrados. Cette force réciproque provoque alors la

déviations vers le bas de l'air par le profil d'aile qui dépend de l'incidence de l'angle formé par l'aile avec l'horizontale.



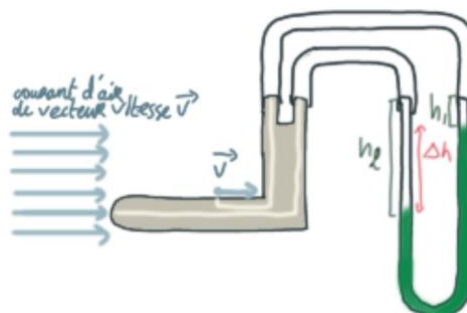
3. D'un point de vue pratique

3.1. Tube de Pitot

Comme nous nous sommes intéressés à la vitesse d'un avion en plein vol ainsi qu'à la pression exercée sur ses ailes, nous avons vite découvert l'existence d'un appareil permettant de mesurer ces grandeurs : le tube de Pitot.



Cet appareil fonctionne à l'aide de deux tubes placés à des hauteurs très proches dont l'un est dirigé face au vent relatif et l'autre perpendiculairement au vent relatif. Ce dispositif permet alors de mesurer la pression exercée sur l'aile d'un avion et ainsi d'en déduire la vitesse de l'avion en appliquant le théorème de Bernoulli.



Nous avons alors tenté de reproduire le fonctionnement du tube de Pitot à l'aide de tubes en plastique, d'un aspirateur et d'un baromètre. Les photos du montage réalisé sont dans l'annexe (voir annexe 5)

On nomme A le point de la prise de pression à gauche, et B à droite.
 La prise de pression P_A en A est axiale : la vitesse au point A est nulle. A l'inverse, la prise de pression P_B en B est latérale : la vitesse en B est celle du vent généré par l'aspirateur.
 On peut appliquer le théorème de Bernoulli :

$$P_A + \rho_{air}gz_A + \frac{1}{2}\rho_{air}v_A^2 = P_B + \rho_{air}gz_B + \frac{1}{2}\rho v_B^2$$

A et B sont à la même altitude, donc $\rho_{air}gz_A$ et $\rho_{air}gz_B$ s'annulent :

$$P_A + \frac{1}{2}\rho_{air}v_A^2 = P_B + \frac{1}{2}\rho v_B^2$$

L'expérience a été réalisée de sorte à ce que $v_A^2 = 0$, donc on peut simplifier :

$$P_A = P_B + \frac{1}{2}\rho v_B^2$$

Par ailleurs, le baromètre différentiel nous indique que $P_A = P_B + \rho_{eau}gh$

On lit $h = 11 \cdot 10^{-2} m$

On peut donc écrire :

$$P_B + \rho_{eau}gh = P_B + \frac{1}{2}\rho v_B^2$$

On arrive à :

$$v_B = \sqrt{\frac{2\rho_{eau}gh}{\rho}}$$

On procède à l'application numérique :

$$v_B = \sqrt{\frac{2 \cdot 997 \cdot 9.81 \cdot 11 \cdot 10^{-2}}{1.2}} = 42 m \cdot s^{-1}$$

On trouve ainsi une vitesse de l'air dans l'aspirateur de 42 m/s.

Cette même formule est utilisée pour mesurer la vitesse du vent incident sur les ailes d'avions grâce à de réels tubes de Pitot.

3.2 Ecoulement de l'air autour d'une aile

3.2.1 Expérience du sèche-cheveux

Après avoir découvert et compris toutes ces notions, nous avons mis en place une expérience visant à reproduire le vol d'une aile d'avion à petite échelle.

Matériel :

- Une feuille de papier pliée en forme de profil d'aile, trouée par deux bouts de paille qui lui sont attachés,
- Un sèche-cheveux,
- Un dispositif visant à immobiliser l'aile horizontalement, en lui permettant de bouger verticalement.

Les fils traversent les deux pailles qui trouent l'aile de sorte que l'aile puisse coulisser verticalement. La largeur des pailles permet de réduire les frottements avec les fils. (Voir montage en Annexe 6).

En activant le sèche-cheveux face à l'aile, l'air devrait ainsi théoriquement suivre la forme de l'aile, et selon ce que nous avons vu dans une précédente partie, conférer une force de portance à l'aile en papier, et ainsi la faire monter (Annexe 7).

C'est en effet ce que nous avons pu observer. En filmant l'expérience de profil, nous avons pu récupérer les valeurs de la position de l'aile, et à l'aide du logiciel de traitement de données Regressi, représenter la position en y en fonction du temps (voir Annexe 8).

L'altitude de l'aile semble proportionnelle au temps, donc on peut modéliser la courbe expérimentale par une fonction linéaire :

Sachant que le déplacement en x est négligeable :

Si la position en y en fonction du temps est modélisable par une fonction linéaire, alors on peut écrire :

$$y(t) = kt$$

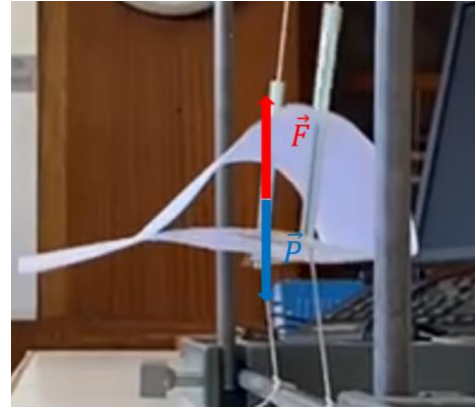
En dérivant $y(t)$, on peut obtenir la composante verticale de la vitesse en fonction du temps :

$$v_y(t) = y'(t) = k$$

En dérivant encore une fois, on obtient la composante verticale de l'accélération :

$$a_y(t) = v_y'(t) = 0$$

Par ailleurs, on peut établir le bilan des forces qui s'appliquent sur l'aile. On décide de négliger les frottements entre les pailles et les fils :
L'aile ne subit alors que la force de portance notée F et le poids.



D'après la deuxième loi de Newton, on peut écrire que :

$$\vec{P} + \vec{F} = m \times \vec{a}$$

$$\text{Or } \vec{a} = \vec{0}$$

$$\text{Donc : } \vec{P} + \vec{F} = \vec{0}$$

$$\Rightarrow \vec{F} = -\vec{P}$$

$$\Rightarrow F = P$$

En effet, puisque l'aile se déplace en mouvement rectiligne uniforme (approximativement), d'après le principe d'inertie, les forces de poids et de portance s'annulent.

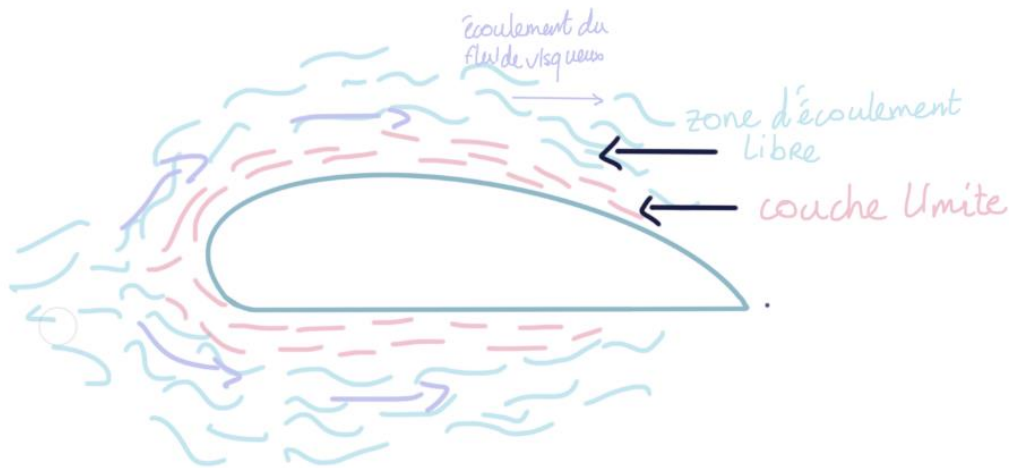
On déduit que la force de portance est environ égale au poids de l'aile. La situation est comparable au décollage d'un avion réel, lors de la phase où la vitesse d'ascension est constante. En phase de croisière, son déplacement sur l'axe vertical est nul, donc les forces de poids et de portance se compensent aussi.

Durant la réalisation de cette expérience, certains essais ont échoué. Nous nous sommes demandé pourquoi malgré le flux d'air qui passe autour de l'aile en papier, cette dernière finissait quand même par tomber. Après quelques recherches, nous avons découvert un facteur que l'on avait négligé.

3.2.2 La couche limite

Prenons un fluide qui s'écoule sur une surface plane. La partie du fluide en contact à la surface du support est soumise à la contrainte de cisaillement. Pour simplifier, cette contrainte explique que tout fluide en mouvement a une vitesse nulle au niveau de la zone de contact avec des solides.

Donc le fluide est immobilisé par la paroi qu'il rencontre et cette région du fluide est ce qu'on appelle la couche limite.



La couche limite s'étend jusqu'à la distance où la vitesse d'écoulement est égale à celle du flux qui n'a pas été influencée par les frottements à la paroi. On en déduit que la zone du fluide exposée à l'air présente la vitesse maximale de l'écoulement puisqu'elle n'est soumise à aucune contrainte de cisaillement. L'épaisseur de la couche limite se caractérise par la distance entre la paroi et le point où la vitesse du fluide est à 99% de la vitesse du fluide de la zone d'écoulement libre. L'accélération de l'écoulement du fluide hors de la couche limite contribue à son amincissement. Dans le cas contraire, la décélération de cet écoulement entraîne un épaissement de la couche limite. Son épaisseur dépend de deux variables : la vitesse et l'état de la surface. Plus la vitesse du fluide est élevée, plus la couche limite est fine, de même que plus la surface sur laquelle s'écoule le fluide est lisse, plus la couche limite est fine.

La couche limite peut être laminaire ou turbulente en fonction du nombre de Reynolds.

Si ce dernier est inférieur à 2000, la couche limite est évidemment laminaire. Elle se caractérise par le fait que tous les vecteurs vitesses sont parallèles au même plan et par une couche limite épaisse. On calcule cette épaisseur par la solution de l'équation de Blasius

$$\delta \approx \frac{5,0}{\sqrt{Re_x}} x$$

avec x la distance parcourue par le fluide sur la surface
 Re_x le nombre de Reynolds du fluide au ras de la surface

A mesure que l'on s'éloigne de la paroi, la vitesse de l'écoulement augmente ainsi que la distance entre la surface et le fluide, par conséquent le nombre de Reynolds aussi. Ce qui rend l'écoulement instable sur les zones éloignées des parois comme à la surface du fluide sur le schéma ci-dessus. Donc, si $Re > 3500$, la couche limite est dite turbulente, et elle est très fine autour de la paroi. On calcule cette épaisseur par l'expression suivante :

$$\delta \approx \frac{0,37}{\sqrt[5]{Re_x}} x$$

Si l'on revient à nos avions, il existe une couche limite autour d'une aile. Au-delà de cette couche, le nombre de Reynolds du fluide atteint l'ordre de grandeur de 10^7 .

Pour mieux comprendre cette notion, nous allons étudier un moment où notre aile en papier est tombée malgré le flux d'air projeté sur elle.

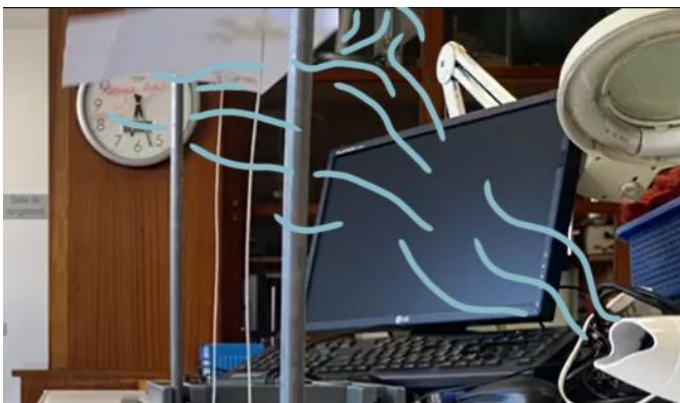
Dans le domaine aéronautique, la nature de la couche limite permet d'estimer sa fragilité autour d'une aile d'avion. La couche limite se distingue par trois zones :



zone laminaire
zone de transition
zone turbulente

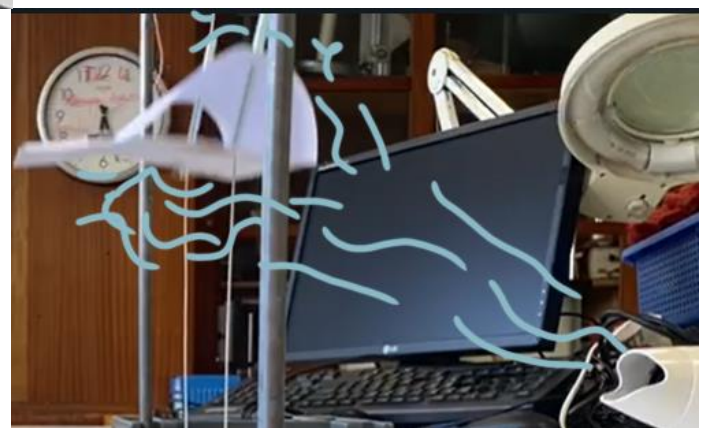
On peut alors déterminer la fragilité de la couche en fonction de ces zones. Ce qui fait que (1) est moins fragile que (2) qui elle-même est moins fragile que (3)

On remarque que pour qu'il y ait une portance de l'aile, il faut un déplacement rapide du flux d'air et une adhérence du flux à l'aile pour qu'il suive du haut vers le bas. L'angle d'attaque de l'aile a alors son importance puisqu'il influe sur l'adhésion du flux.



Sur l'image ci-contre, on note que l'angle d'attaque de l'aile par rapport au flux d'air est beaucoup trop grand. L'air ne suit plus le profil de l'aile et la couche limite n'est plus entraînée par le flux, elle s'est décollée de la paroi.

La conséquence de ce phénomène est qu'il entraîne la chute de notre aile, comme on peut l'observer sur l'image ci-contre qui suit la précédente dans le temps, ainsi que la formation de flux turbulents et chaotiques.



Donc, lorsque l'angle d'attaque de l'aile devient trop important, on constate une baisse notable des performances aérodynamiques par le décollement de la couche limite, qui ne peut survenir que lors de l'atterrissage, et une baisse brutale de portance pouvant entraîner la perte de contrôle de l'appareil. Ce phénomène est à l'origine de nombreux accidents aériens.

4. Conclusion:

Finalement, en nous posant en quelques mots d'apparence simple, la question de la mécanique derrière le vol d'un avion nous avons ouvert une véritable boîte de Pandore dont le contenu en ferait fuir plus d'un !

Mais, courageux comme nous sommes, et surtout, extrêmement curieux d'apprendre, nous avons fait face à cette problématique.

En effet, nous avons tout d'abord étudié l'air et les différentes caractéristiques qui régissent un fluide en général, son régime d'écoulement, laminaire ou turbulent, sa viscosité dynamique, son nombre de Reynolds...

Ce qui nous a permis ensuite de comprendre les interactions entre un fluide et une aile de l'avion avec le théorème de Bernoulli. L'effet Venturi nous a permis de comprendre la force de portance d'un avion et la couche limite nous indique que son absence cause une perte de portance et peut donc engendrer la chute de notre appareil. Par ailleurs, l'expérience du tube de Pitot nous a montré comment déterminer la vitesse de l'avion grâce à des mesures de pression.

Tout cela nous a permis comprendre le déplacement d'un avion dans l'air et de démentir la fameuse idée reçue qui dit que les avions "volent" comme des oiseaux puisque, malgré l'absence de cheveux blond, ils sont en vérité de véritables surfeurs !

5. Sources:

<https://www.lavionnaire.fr/>

[Nombre de Reynolds — Wikipédia](#)

[Profil à laminarité étendue — Wikipédia](#)

[Écoulement laminaire — Wikipédia](#)

[Écoulement de Poiseuille — Wikipédia](#)

[Qu'est-ce que l'écoulement laminaire - Écoulement visqueux - Définition](#)

[🔍 Écoulement laminaire : définition et explications](#)

[Chapitre 6 : écoulements laminaires et turbulents](#)

[PC/PSI Nombre de Reynolds. Etude descriptive des écoulements autour d'un obstacle](#)

[Un fluide newtonien, c'est quoi ? Navier Stokes et Euler](#)

[La physique animée : Équation de Navier-Stokes, forces de viscosité pour un fluide](#)

[Écoulement de l'air](#)

[MK Flu 4 - 2.A - Régimes d'écoulement laminaire et turbulent - Nombre de Reynolds](#)

[Le nombre de Reynolds – Science étonnante](#)

[Chapitre IX : Régimes d'Écoulement Un régime d'écoulement peut être défini comme étant le mode de mouvement des particules](#)

<https://www.edumedia-sciences.com/fr/media/512-portance>

6. Remerciements:

Nous tenons à remercier notre professeur encadrant, Monsieur Christophe Bruyas ainsi que le technicien de laboratoire de notre lycée, Monsieur Hamid Elmir, sans qui nous n'aurions pu réaliser ce projet.