

Titre : Physique du vol : portance et traînée

Présentée par : Guilhem Mariette

Rapport écrit par : Izia Pétillon

Correcteur : Marc Rabaud

Date : 20/05/21

Bibliographie		
Titre	Auteurs	Éditeur
Tout-en-un PSI		Dunod
Physique Spé PC	S. Olivier	G00845

Plan détaillé

(indiquer parties, sous-parties, 1 ou 2 phrases d'explications par sous-partie, et références)

Niveau choisi pour la leçon : CPGE

Pré-requis : Mécanique des fluides

Intro : Montgolfière : poussée d'Archimède qui permet de la faire voler.
Négligeable pour un avion, on va voir comment ça fonctionne.

I/ Force de traînée

1) Origine de la force de traînée :

Schéma : dans le plan du tableau, écoulement du fluide.
Force parallèle à la vitesse d'écoulement

a) Traînée de frottement :

$$\text{Nombre de Reynolds : } \Re = \frac{|\mu(\vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}})\vec{v}|}{|\eta \Delta \vec{v}|} = \frac{LU}{\nu}$$

Schéma couche limite :

- loin de l'aile : écoulement libre
- dans la couche limite δ , écoulement visqueux

$$\delta = \sqrt{(\nu \tau)} = \sqrt{(\nu L/U)} = L/\sqrt{(\Re)} \text{ avec tau temps caractéristique } \tau = L/U$$

$$\text{Reynolds spécifique : } \Re_{CL} = \frac{U\delta}{\nu} = \frac{UL}{\nu\sqrt{\Re}} = \sqrt{\Re}$$

b) Traînée de pression ou de forme (9')

Définition du coefficient de traînée :

$$\vec{F}_{tr} = \frac{-1}{2} \mu S U^2 C_x(\Re) \vec{t} \text{ où } \vec{t} = \frac{\vec{U}}{U}$$

Dépendance du coefficient de traînée en fonction du Reynolds. On va s'intéresser d'abord au comportement à petit Reynolds.

2) Formule de Stokes (15')

$$\Re \ll 10 \text{ où } C_x \approx \frac{25}{\Re}$$

$$F_{tr} = \frac{-1}{2} \mu S U^2 \frac{25}{\Re}$$

Dans le cas d'une sphère : $S = \pi R^2$

$$F_{tr} = \frac{1}{2} \mu \pi R^2 \eta U^2 \frac{25}{\mu 2RU}$$

$$\Re = \frac{\mu 2RU}{\eta}$$

$$F_{tr} = -6\pi\eta R^2 \vec{v}_{solide/fluide} \text{ Formule de Stokes}$$

Remarque : Re intermédiaires : 10^3 à 10^5 , C_x à peu près constante

$$F_{tr} = \frac{1}{2} \mu S U^2 C_x \vec{t} \text{ quadratique}$$

3) Chute brutale du C_x :

Schéma avec distinction de cas, selon la valeur du nombre de Reynolds par rapport au Reynolds critique.

Application dans les sports : on joue sur la rugosité.

II/ Force de portance (24')

1) Portance d'une aile d'avion :

Différentes allures d'aile d'avion : forme symétrique, biconvexe dissymétrique, convexe et concave (schéma au tableau).

Définition des termes spécifiques aux ailes d'avion : bord d'attaque et bord de fuite. On les relie par une ligne droite, appelée « corde ». Cette droite permet aussi de définir l'angle d'inclinaison, i , entre la parallèle à l'écoulement et la corde.

Force de portance perpendiculaire à l'écoulement et force de traînée parallèle. La force totale subie par l'aile est la somme de ces deux forces.

Force de portance s'explique par une surpression sous l'aile et une dépression au-dessus.

Définition du coefficient de portance :

$$\overrightarrow{F_{portance}} = \frac{1}{2} \rho S C_z U^2 \vec{n} \quad \text{avec } n \text{ perpendiculaire à la vitesse d'écoulement.}$$

On observe un maximum à partir duquel la portance va diminuer à partir d'une valeur d'angle d'incidence, c'est ce qu'on appelle l'angle de décrochage.

Décollement de la couche limite. Apparition d'une grande force de traînée.

video

Manipulation illustrative avec une aile sur la balance et la soufflerie.

La force de portance vient ici lutter contre le poids, on observe donc une diminution de la masse indiquée par la balance lorsqu'on lance la soufflerie.

On va de 0 à 30°, la masse diminue, puis on dépasse le décrochage.

On essaie d'estimer l'inclinaison limite : de l'ordre de 30°.

2) Finesse aérodynamique : (35')

$$Finesse = \frac{C_z}{C_x}$$

Angle alpha entre la force de portance et la résultante. On se place dans le cas d'un planeur, où il n'y a pas de vent. On considère la vitesse de l'écoulement selon l'axe de la force résultante.

Soit A un point à l'horizontal de l'aile et B un point sur la droite de la force résultante, (on retrouve alpha), la finesse est alors :

$$Finesse = \tan(\alpha) = \frac{AG}{AB}$$

Conclusion :

winglet des ailes d'avion pour réduire la traînée induite

portance d'un hélicoptère

(40')

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

(l'étudiant liste les questions posées, ainsi que les réponses données par l'enseignant. Si certaines réponses manquent, l'enseignant pourra compléter le document)

Hélicoptère : est-ce qu'on peut expliquer comment la force de portance se retrouve vers le dessus ?

Les hélices sont incurvées pour obtenir une dépression sous les hélices et avoir une force de portance.

Est-ce qu'il y a aussi une force de traînée ?

Oui mais on essaie de la réduire.

Si on est en vol stationnaire, il n'y a pas de traînée ?

On rencontre peu de fluide de front donc il y a très peu de traînée. Si, une traînée sur les pales en rotation, c'est à dire un couple.

Mais les pales bougent quand même dans l'air ? Si on fait un dessin dans le référentiel d'une pale, est-ce que c'est très différent d'une aile d'avion ?

Non ça va être très similaire, c'est juste que le référentiel de la pale est un référentiel tournant.

Mais l'angle d'incidence dépend de la distance à l'axe de rotation.

Les éoliennes fonctionnent un peu sur le même principe que les hélicoptères. Supposons que les pales tournent à une certaine vitesse ω , quel est le vent apparent reçu ?

On n'a pas la même vitesse effectivement subie selon l'endroit considéré sur l'aile. Il faut intégrer sur la surface de l'aile pour obtenir ~~Une force puis on se ramène à une force en U^2~~ la portance totale

Hélicoptère, qui avance ou simplement une éolienne qui tourne avec du vent, il va se passer quelque chose dans la composition des vitesses

Il faut ajouter au vent senti, le vent réel, et on fait une composition des vitesses. On parle plutôt de vent réel, de vitesse de la pale et de vent apparent.

Qu'est-ce qu'il se passe en bout d'aile ?

~~Il est reçu moins fort qu'en centre d'aile.~~ Le vent apparent est plus dans le plan de rotation, d'où le besoin d'une plus forte incidence (vrillage de la pale).

Et en direction ?

Traînée beaucoup plus forte en bout d'aile, et vent réel toujours le même. Donc ça modifie la direction de la résultante (les 2 forces sont orthogonales). C'est pour ça qu'on déforme les ailes.

Subtilité des ailes d'hélicoptères : en rotation on modifie leur angle d'incidence, partie mécanique assez complexe.

Couche limite et profil de vitesse, pourquoi la vitesse est nulle à la paroi ?

On choisit une condition aux limites de non-glissement sur la paroi, ça implique que la vitesse du fluide en ce point soit nulle, car le fluide est visqueux.

Pour un fluide non visqueux, on a seulement la composante normale qui est continue.

Cette notion de couche limite elle a un sens à tout nombre de Reynolds ?

En régime turbulent on parle encore de couche limite mais turbulente.

Donc dans la force de Stokes on est dans le cas d'une couche limite ?

Oui La notion n'a d'intérêt qu'à haut Reynolds.

Et elle va jusqu'au où ?

Très faible nombre de Reynolds, couche limite tellement grande qu'elle prend tout l'espace.

Pourquoi on adimensionne les forces de portance et traînée en utilisant les coefficients $1/2 \rho U^2$?

On essaie de représenter l'écart à Bernoulli $C_z = \text{constante}$, d'où la forme de l'expression de la force.

Nom d'un français qui faisait partie des premiers à faire des mesures sur la traînée ?

Gustave Eiffel : depuis la Tour Eiffel puis a fait construire des souffleries (souffleries Eiffel).

Sur le cylindre, vous avez parlé de choc à l'avant.

Dans toute la leçon on se place dans un régime stationnaire donc il n'y a pas de notion de choc au cours du temps. Cependant il y a une différence entre l'avant et l'arrière, c'était une erreur de langage.

Est-ce que la compressibilité est importante ?

Navier-Stokes, on a besoin de l'incompressibilité du fluide.

Est-ce qu'il faut que l'air soit incompressible pour voler ?

Ce n'est pas nécessaire, il suffit de dépression et surpression, c'est la différence de pression qui est importante, qui éventuellement peut mener à une différence de masse volumique. **Significative uniquement lorsqu'on s'approche de la vitesse du son.**

Courbe de la force de traînée pour une sphère. Valable pour un cylindre ?

Oui, même allure, ça peut décaler les asymptotes et on peut obtenir un nombre de Reynolds critique différent, mais le descriptif est le même. Donc pas gênant et puis la force de Stokes sur un cylindre on ne l'a pas, donc bien de se ramener à une sphère.

Facteur 25, on peut le lire sur la courbe ?

Pour $Re = 1$, on voit à peu près le 25. Vous pouvez utiliser la courbe pour l'estimer.

Vous avez fait un développement à petit nombre de Reynolds pour Stokes. Est-ce qu'on peut voler à petit nombre de Reynolds ?

La force de traînée est proportionnelle à la vitesse à basse vitesse. La courbe de portance à bas Reynolds est faible.

Il n'y a pas de portance à bas nombre de Reynolds.

Sous-jacent à cette leçon, il faudra que le nombre de Reynolds ne soit pas faible.

Et Bernoulli aussi est sous-jacent à cette leçon, je pense qu'il faut le mentionner.

Est-ce qu'on peut voler avec un profil infiniment mince ou est-ce qu'il faut que l'aile soit ronde à l'avant et pointue à l'arrière ?

~~La pointe au bout est importante pour provoquer des turbulences???~~ Ce qui est important c'est d'avoir une asymétrie. **Non**

Donc dans l'absolu c'est possible.

Oui, la seule difficulté c'est d'avoir un bon angle d'attaque à l'avant, ce qui est plus facile avec un avant rond.

L'arrière peut-être rond, il y a des avions avec des ailes symétriques qui peuvent voler en marche arrière. Bord de fuite mince permet d'avoir moins de traînée.

Vous avez expliqué la portance par une différence de pression. Quel est le mécanisme qui fait qu'il y a une pression plus élevée en bas par rapport à un haut ?

Effet Venturi ?

Sur le schéma on dit que ce sont des pressions, pourquoi y a des vecteurs ?

Ce sont des gradients de pression, d'où les vecteurs. **Non, des forces -pds donc des vecteurs**

Si on dessine des lignes d'écoulement autour de l'aile : écartement sous l'aile donc surpression par Bernoulli, et au-dessus rapprochement : dépression.

Ou alors : l'aile dévie le vent vers le bas, on peut faire un bilan de quantité de mouvement, par principe d'action réciproque, l'air envoie l'aile vers le haut.

Dans la force de portance, vous avez mis une surface S , à quoi correspond-elle ?

Ce qui devrait compter, c'est la surface projetée. Dans la pratique, on met souvent la surface à plat de l'aile, le facteur géométrique est corrigé dans la constante, c'est une convention.

Limites de la manipulation ?

Vitesse uniforme en sortie de la soufflerie : on peut le vérifier avec un tube de Pitot, on voit que vers les bords de la soufflerie ont un écoulement non homogène. Section de sortie de même taille que l'aile donc pas super.

L'aile n'est pas infiniment longue.

On considère qu'il faut que le diamètre de la soufflerie soit 10 fois supérieur à celui de l'objet pour s'affranchir des effets de bord, ce qui n'est pas du tout le cas ici. Ce qui explique sans doute le résultat de 30° pour le décrochage au lieu d'un ordre de grandeur de $10/15^\circ$.

Vous avez parlé d'écoulement décollé lorsque la couche limite devient turbulente. C'est la même chose écoulement décollé et régime turbulent ?

Non, on peut avoir un écoulement décollé sans turbulence. Dessin d'un écoulement sur cylindre à Reynolds environ 5, on montre les lignes de décollement. Ce sont des écoulement pour laquelle la couche limite est décollée mais l'écoulement est laminaire.

La turbulence a un gros effet sur le décollement, mais il peut effectivement y avoir décollement sans turbulence. Couche limite devient turbulente : crise de traînée.

Rugosité sur le ballon de basket, vous pouvez calculer des ordres de grandeurs du nombre de Reynolds ?

$$Re = 10^{-1} * 10 / 10^{-5} = 10^5$$

On est limite.

Le ballon est très lourd, l'effet de la variation de la force de traînée va être négligeable, c'est sûrement plus pour réussir à accrocher à la main.

Je ne pense pas qu'on cherche la crise de traînée : pour le golf oui ça fait une différence. Pour les autres sports ça va très peu jouer, ce qui compte plus c'est la portance.

Vous avez des ordres de grandeur de finesse ?

Avec les deux courbes C_z et C_x à 10° et Reynolds $2*10^4$.

Facteur 10, la finesse vaut environ 10.

Les bons oiseaux c'est 10 ou 20, un planeur entre 20 et 40.

Commentaires lors de la correction de la leçon

*(l'étudiant note les commentaires relatifs au contenu de la leçon : niveau, sujets abordés, enchaînement, réponses aux questions, etc. **L'enseignant** relit, et rectifie si besoin)*

Avion, on peut aussi parler des hélicoptères à la fin. Éoliennes et voiliers. Mais aussi une grande partie des oiseaux planeurs.

Après les oiseaux ont aussi des propriétés de vol non stationnaire en battant des ailes. On a du mal à expliquer le comportement exact au niveau des ailes lorsqu'il y a des mouvements, certains papiers ont montré que d'après tous les calculs stationnaires, les oiseaux ne pouvaient pas voler... Oiseaux migrateurs utilisent les turbulences ou les effets thermiques ou de pente et aussi l'instationnarité des écoulements. Aucun avion ne sait profiter des turbulences pour récupérer de l'énergie.

On peut rajouter des ordres de grandeur de force : une main sortie par la fenêtre de la voiture. Donner le nom et la forme de toutes les ailes : on tombe un peu dans le catalogue, il faut rester plus proche du cours.

Il y a eu un cours déjà de mécanique des fluides, ne pas hésiter à s'appuyer dessus (ne pas faire des rappels complets) mais s'en servir et faire des rapprochements.

Domage de ne pas avoir rappelé Bernoulli. La portance sans viscosité peut se montrer juste avec Bernoulli.

Faire plus le lien avec le cours avec mécanique des fluides de prépa.

Titre de leçon sympa dans le sens où y a pas mal de choses à raconter, il faut en profiter pour faire des liens avec la mécanique des fluides et intéresser les étudiants.

Bien préciser que c'est une description stationnaire dès le début.

On pourrait parler des cylindres tournants qui donnent aussi de la portance, la forme étirée des ailes n'est pas obligatoire.

Partie réservée au correcteur

Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.) :

Bonne leçon. Juste penser à rappeler Bernoulli et à se placer dans la limite des Reynolds élevés.

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates :

Parler de la condition de Kutta ? Le point de décollement, en fonctionnement normal doit être sur le bord de fuite.

La force de Stokes est plutôt hors sujet.

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur) :

Courbe quantitative de la masse apparente en fonction de l'angle pour l'aile en sortie de soufflerie, même si la veine est trop étroite.

Bibliographie conseillée :

S. Dalton. The Miracle of flight. New York: Mc Graw-Hill, 1977.

Superbe livre avec aussi de très belles photos. Malheureusement la version française est épuisée.