Correction de la LP 9 : Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide

Mardi 13 Février 2018

Eric Woillez [1], **Jean-Yonnel Chastaing** [2]

Préparation à l'Agrégation de Physique option Physique 2017-2018, Ecole Normale Supérieure de Lyon

Remarque préliminaire : Les éléments de correction qui sont donnés à l'oral et dans cette fiche corrective portent sur la leçon qui a été présenté, et uniquement sur celle-ci. Le choix du contenu de la leçon et la façon dont elle a été présentée sont deux choses différentes. Par ailleurs, il n'y a pas de plan parfait pré-établi ; nous vous donnons uniquement des références et des pistes de réflexion pour qu'ensuite vous fassiez vos propres choix.

Rapports de Jury

2017 : La multiplication des expériences illustrant le théorème de Bernoulli n'est pas souhaitable, surtout si celles-ci ne sont pas correctement explicitées.
2016 : Les limites de ce modèle sont souvent méconnues.
2015 : Le jury invite les candidats à réfléchir davantage à l'interprétation de la portance et de l'effet Magnus. Les exemples cités doivent être correctement traités, une présentation superficielle de ceux-ci n'étant pas satisfaisante.
Jusqu'en 2013, le titre était : *Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide ; validité. Relation de Bernoulli ; limites et applications.*
2011, 2012, 2013, 2014 : La notion de viscosité peut être supposée acquise.
2010 : Il est difficile de bien dégager la physique du modèle de l'écoulement parfait et de ses limites sans faire appel à la notion de viscosité que l'on pourra supposer connue. Les conditions aux limites imposées à un fluide s'écoulant autour d'un obstacle solide doivent être justifiées. L'interprétation énergétique de la relation de Bernoulli est très mal connue.

Les remarques générales sur la leçon

Dans l'ensemble, le contenu de la leçon est cohérent par rapport aux attentes du jury sur cette leçon : les hypothèses nécessaires à l'écoulement parfait, le domaine de validité, les ordres de grandeurs, les applications diverses et leurs utilisations. La présentation était claire, le débit oral bon, le tableau bien géré (attention malgré tout à écrire suffisemment gros).
Pour autant, il reste un certain nombre de défauts à corriger : il est important de regarder beaucoup plus souvent son auditoire (plutôt que le tableau ou ses notes), de limiter peut-être un peu l'usage de couleurs au tableau (on écrit en blanc et on encadre/souligne les notions importantes d'une autre couleur), et d'aller au bout des interprétations sur chaque application présentée. Il n'est pas envisageable de conclure 1 min 30

1. *eric.woillez@ens-lyon.fr*
2. *jeanyonnel.chastaing@ens-lyon.fr*

s avant la fin du temps imparti en ayant un doute sur le sens de la force qui découle de l'effet Magnus. De même, il faut faire attention à prendre des ordres de grandeur plausibles (10 m/s pour une balle qui chute dans de l'huile ?) et être capable de calculer un nouvel ordre de grandeur rapidement à la demande du jury. Enfin, n'hésitez pas à multiplier les petites expriences et/ou les photographies issues de la littérature pour illustrer votre propos et rendre ainsi la leçon plus vivante (autant en profiter sur cette leçon, ce sera plus compliqué pour la relativité restreinte...).

Retour sur la leçon

Introduction : Il nous semble important de noter comme pré-requis à la leçon "viscosité", même si cela est supposé avec les notions de couche limite et de Reynolds.

1 Notion de fluide parfait

1.1 Fluide parfait

La définition est propre et bien expliquée. Il est important de faire la différence entre un fluide parfait et un écoulement parfait.

1.2 Validité du modèle de l'écoulement parfait

Vous avez dit que l'on se plaçait à grand Re "mais pas trop pour ne pas être turbulent". Un écoulement turbulent rentre encore dans la catégorie des écoulements parfaits tant que l'on atteint pas les échelles de dissipation visqueuse.
Attention sur les ordres de grandeurs choisis : ils doivent être réalistes !
Le rôle de la couche limite a été très bien expliqué et le fait que sa taille diminue avec Re est effectivement une notion à rappeler. Attention toutefois au décollement de la couche limite qui intervient à grand Re : la loi d'échelle $\frac{\delta}{L} \sim \frac{1}{\sqrt{Re}}$ n'est valable que pour une couche limite laminaire.

1.3 Equation d'Euler

Il est très bien de rappeler que cette équation reste valable pour un écoulement compressible, même si, dans les faits, on travaille souvent avec l'hypothèse "incompressible". En revanche, il faut recenser les inconnus et donner toutes les équations permettant de fermer le problème (ne pas oublier la conservation de la masse). Il est nécessaire de préciser, comme pour toute équation différentielle, les conditions initiales et conditions aux limites.

1.4 Effet Coanda

Responsable de la courbure du jet d'eau qui coule d'un bec de théière, cet effet est utile pour le profilage des ailes d'avion ou pour expliquer la stabilité d'une balle placée dans un jet d'air. Une fois démontré l'évolution du profil de vitesse dans le jet courbé, vous devez impérativement expliciter la force qui en découle (champ de pression tout autour de la balle) pour justifier l'obersvation expérimentale de la balle dans le jet d'eau.

Questions :
- Existe-t-il des fluides parfaits ? (Hélium superfluide ?)
- Démontrer la loi d'échelle $\frac{\delta}{L} \sim \frac{1}{\sqrt{Re}}$ pour une couche limite laminaire (dimensions)

— Dans l'effet Coanda, vous avez supposé le jet courbé. Pourquoi ? (cf Fruchart *et al.*) A quel endroit le jet se décolle-t-il de la balle ?

2 Relation de Bernoulli

2.1 Démonstration

Le théorème de Bernoulli est le sujet central de cette leçon. Il est possible d'en faire la présentation d'une version en utilisant les équations d'Euler puis en démontrer une autre version grâce à un bilan d'énergie. Lors de la présentation avec l'équation d'Euler c'est l'occasion de bien écrire les hypothèses une par une (stationnaire ou non, irrotationnel ou non, ligne de courant ou non). Il est nécessaire de dire que vous faites un bilan d'enthalpie (lors de la démonstration ou de l'interprétation) et d'évoquer le travail des forces de pression. Dire que $\frac{P}{\rho}$ est "une sorte d'énergie de pression" est imprécis : $u + \frac{P}{\rho}$ est l'enthalipe massique du fluide. L'intéret d'une démonstration de Bernoulli par un bilan d'énergie permet de montrer au jury que vous êtes à l'aise avec les bilans sur les systèmes ouverts et d'apporter un complément à l'équation d'Euler.

2.2 Interprétation énergétique

cf ci-dessus

2.3 Effet Venturi

L'illustration expérimentale n'était pas nécessairement très convaincante. Malgré tout, il faut interpréter ce qui est interprétable (cf Fruchart *et al.*). Vous pouvez résumer l'effet Venturi en une phrase : "le long d'une ligne de champ horizontale, une sur-vitesse implique une sous-pression et inversement".

Questions :

— Bernoulli en compressible ?

— Dans l'expérience de Venturi : les tubes de prélevements ne perturbent-ils pas l'écoulement ? Pourquoi une perte de charge au col ? Pourquoi la hauteur d'eau dans les capillaires diminue le long du tube ?

3 Applications

3.1 Tube Pitot

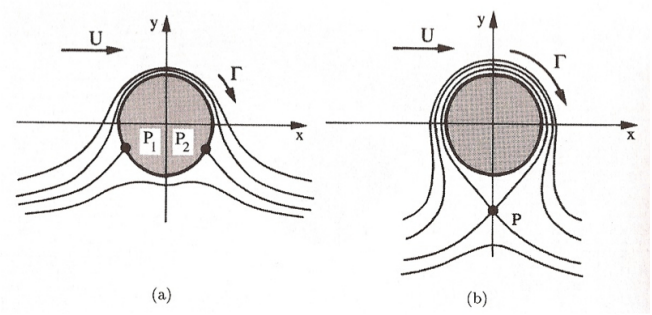
Pensez à justifier le fait que la pression est constante dans l'épaisseur de la couche limite pour conclure.

3.2 Effet Magnus

Il faut être très clair quant à la conclusion du raisonnement : dans quel sens est orientée la force résultante ? Est un "coupé" ou un "lift" ? Pour cela, il faut dire que l'on intègre le champ de pression tout autur de la balle. Pour faire le lien avec "coupé" ou "lift", il faut à tout prix être capable de changer de référentiel (balle ou sol). Attention également à la symétrie des lignes de courant : la symétrie amont-aval est toujours présente (en laminaire) mais la symétrie haut-bas disparait avec la rotation de la balle.

Questions :

— Dans l'effet Magnus, comment se crée la sur/sous-vitesse du fluide au dessus/dessous de la balle ? (viscosité dans la couche limite : le fluide est entrainé par la balle)



— As-t-on une force de portance même sans viscosité ? (oui : le fait d'introdire une circulation non nulle impose une sur-pression (sous-pression). La portance vient de Γ et non de la couche limite)
— Peut-il y avoir de la portance/trainée dans un fluide parfait, autour d'un obstacle qui ne tourne pas, loin de bords ? (oui, le paradoxe de d'Alemnbert n'est valable que pour un écoulement laminaire : questions de symétrie).

Quelques pistes

On pourrait évoquer dans cette leçon ou en ouverture :
— Le Théorème de Kutta-Jukowski sur la portance d'une aile et la circulation.
— Le traitement du signal est présent dès qu'on fait une moyenne sur un oscilloscope. On pourrait utiliser cet outil comme fil conducteur pour la leçon.
— Parler de cavitation dans l'expérience de Venturi et les problèmes liés pour les bateaux et sous-marins.
— Parler de décollement de couche limite, d'évolution de la trainée avec le Reynolds.

Quelques questions à se poser

— Quelle est la pression minimale atteinte à l'aide d'une trompe à eau (application de Venturi) ?
— Comment corriger Euler avec les forces Coriolis et d'accélération d'entrainement ?
— Comment sont les lignes de courant autour d'une aile d'avion ? D'où vient la portance ? (attention, c'est plus complexe que ça a en a l'air : les lois de Bernoulli, Venturi et Coanda ne sont pas suffisantes pour expliquer qu'une aile plate a une portance ! Il faut aller voir du coté de la théorie de Kutta-Jukowski et de l'écope (ou de Newton) : voir www.lavionnaire.fr/TheorieFredMon.php)
— Parler de décollement de couche limite, d'évolution de la trainée avec le Reynolds...