

Compte rendu LP08 : Notion de viscosité d'un fluide, écoulement visqueux

Jean-Yonnel Chastaing, Eric Woillez

Rappel des rapports du Jury

2017 : Il peut être judicieux de présenter le fonctionnement d'un viscosimètre dans cette leçon.

2016 : Le jury invite les candidats à réfléchir d'avantage à l'origine des actions de contact mises en jeu entre un fluide et un solide.

2015 : Afficher un tableau d'ordres de grandeur de viscosité ne suffit pas en soi pour illustrer la leçon. Tout exemple donné d'écoulement visqueux doit être maîtrisé par le/la candidat(e).

2014 : L'exemple de l'écoulement de Poiseuille cylindrique n'est pas celui dont les conclusions sont les plus riches. Les candidats doivent avoir réfléchi aux différents mécanismes de dissipation qui peuvent avoir lieu dans un fluide. L'exposé doit porter sur les fluides Newtoniens : le cas des fluides non Newtoniens, s'il peut être brièvement mentionné ou exposé, ne doit pas prendre trop de temps et faire perdre de vue le message principal.

Remarques générales sur la leçon

La leçon était d'un très bon niveau, et la présentation était très claire, tant sur la forme (gestion du tableau, aisance orale, organisation du temps) que dans son contenu. Les calculs étaient faits au tableau, sans notes et sans fautes, ce qui est particulièrement remarquable. Des valeurs numériques étaient présentées tout au long de la leçon, ce qui est aussi un point positif. Le défaut principal de cette leçon était le manque de discussion physique autour des résultats. Un chiffre n'est rien s'il n'est pas interprété physiquement. Il faut savoir aussi illustrer les concepts physiques « avec les mains ». Par ailleurs, il nous semble important de parler de couche limite dans cette leçon. Enfin, les leçons de mécanique des fluides sont idéales pour montrer de belles photos d'écoulement comme on en voit dans tous les livres de cours.

Retour sur le développement

En CPGE, cette leçon est la plupart du temps présentée avant celle sur les écoulements parfaits. Par ailleurs, l'équation d'Euler ne nous semble pas nécessaire pour faire cette leçon. Il nous semblerait donc judicieux de ne pas mettre ces notions en pré-requis, et simplement de lister les forces qui s'appliquent à un fluide et d'écrire un bilan de quantité de mouvement pour obtenir Navier-Stokes.

Expérience initiale : Ne pas oublier que pour une expérience de débit de fluide à travers un orifice étroit, la tension de surface intervient si la force capillaire est comparable aux forces de pression.

Notion de viscosité

Montrer un tableau de valeurs numériques pour la viscosité ne suffit pas, il faut l'interpréter physiquement, par exemple en donnant les temps typiques d'écoulement pour les fluides considérés.

C'était très bien de montrer mathématiquement que le terme de viscosité dans l'équation de Navier-Stokes induit une diffusion de la quantité de mouvement, mais on aurait aimé voir une expérience où ce phénomène apparaît directement. On peut penser au régime transitoire du couette, où il faut attendre que la quantité de mouvement diffuse dans l'épaisseur pour atteindre le régime permanent. On peut aussi parler de la couche limite de Blasius avec son profil en $\sqrt{x}$ typique d'une diffusion.

Durant toute la leçon, il a été dit que les forces de viscosité sont des forces tangentielles à une surface de fluide. C'est vrai dans le cas d'un cisaillement parallèle à la surface considérée, mais le cisaillement peut aussi être normal à la surface. Par exemple, dans les expériences de chaînes de fluide visqueux.

Dans le modèle de viscosité du gaz parfait, illustrer le calcul avec les mains : la couche en $y+dl$ va plus vite que la couche en y , donc elle entraîne la couche inférieure, donc ça crée une force dans telle direction...etc.

Dynamique des fluides visqueux

Lorsqu'on introduit l'équation de Navier-Stokes, il faut toujours dire qu'il y a 4 inconnues, et donc qu'on a besoin de l'équation de conservation de la masse pour fermer le problème. Il faut absolument parler des conditions aux limites pour le fluide : non glissement sur une surface solide pour un fluide réel visqueux, contrainte nulle pour une interface libre, et donner les hypothèses (référentiel galiléen, incompressibilité, viscosité et masse volumique homogène isotrope ...)

La distinction turbulent, laminaire, rampant n'était pas maîtrisée. Il faut avoir en tête des idées simples sur le sujet :

$Re \ll 1$ signifie que les forces de viscosité dominent sur l'inertie, c'est donc un écoulement visqueux (ou rampant) régi par l'équation de Stokes.

$Re \gg 1$ signifie qu'on a un écoulement où l'inertie domine, du moins hors des couches limites. Lorsqu'on est en régime inertiel, l'écoulement peut être laminaire lorsque Re n'est pas trop grand. Ça signifie que les lignes de courant sont régulières, on le voit très bien sur des photos. Lorsqu'on augmente le Re , il va arriver un moment où l'écoulement laminaire devient instable, et la turbulence se développe (petits tourbillons, forts gradients de vitesse, écoulement instationnaire). Mais le Re critique pour lequel l'écoulement laminaire devient instable dépend de la géométrie ! Pour un écoulement de poiseuille dans un tube, c'est effectivement $Re=2040$, mais c'est différent pour un écoulement plan, ou autour d'une sphère, ou autour d'une voiture...

C'est bien d'avoir montré que le terme visqueux dissipe l'énergie. Il faut avoir en tête qu'un écoulement turbulent dissipe toujours l'énergie, même lorsque la viscosité tend vers zéro, parce qu'il y a des forts gradients de vitesse dans l'écoulement qui compensent la faible valeur de la viscosité. Pour ceux qui maîtrisent le sujet, vous pouvez parler de la cascade d'énergie aux petites échelles (théorie de Kolmogorov) mais ne lancez pas le jury sur le sujet si vous n'êtes pas sûr de vous !

Exemples d'écoulements visqueux

Les calculs pour établir l'expression du débit étaient un peu trop rapides. Notamment le fait que la pression ne dépend que de x .

Très bonne idée d'avoir fait une application à la biologie et à l'écoulement dans les capillaires, mais on aurait aimé une discussion physique plus précise sur les résultats. La perte de charge dans les capillaires est grande par rapport à quoi ? Est ce que les valeurs de perte de charge trouvées correspondent à la pression que peut fournir le cœur ? Quels autres mécanismes à prendre en compte dans le transport sanguin ?

Attention : il faut absolument faire un calcul de Reynolds a posteriori pour vérifier que l'écoulement est laminaire. Dans les cas contraire, toutes les hypothèses de symétrie et de vitesse parallèle au tube sont fausses !

Questions supplémentaires

- Comment fonctionne un rhéomètre (cf rapport de jury)? Quel appareil Couette a-t-il utilisé pour réaliser son expérience de viscosité ? (Couette cylindrique, rhéomètres avec des géométrie cône-plan, plan-plan, ...)

- Le nombre de Reynolds est-il le seul qui permette de caractériser un écoulement ? (Rosby : Coriolis-Inertie, Froude : inertie-pesanteur, Reynolds magnétique : inertie-diffusion électrons, ...)

- Qu'est ce qu'un fluide non Newtonien ? (viscosité variable avec la contrainte : rhéo-épaississant, rhéo-fluidifiant, à seuil, thixotrope, ...)

- Comment s'écrit l'équation de Navier-Stokes pour un fluide compressible ? (ajout d'un terme $(\xi + \eta)\text{grad}(\text{div}(\mathbf{u}))$ avec ξ la viscosité de volume)

- A grand Reynolds, la viscosité est négligeable. Alors pourquoi y a-t-il une force de trainée ? (dissipation turbulente)

Quelques idées

- On peut parler des forces de portance et de trainée, leur évolution avec le Reynolds. Bien sûr, tout cela ne peut pas être développé entièrement et précisément dans la leçon par manque de temps, mais il faut y penser.

- On peut parler de crise de trainée (application à la balle de golf à la surface non-lisse pour provoquer la crise de trainée à plus faible Reynolds) ou encore de chute de portance d'une aile avec l'inclinaison.

- Il nous semblerait opportun de discuter des transitoires dans les écoulements classiques présentés. On peut également faire un exemple instationnaire d'écoulement. : oscillation de la plaque dans le cas du Couette.

- On peut interpréter la longueur d'établissement du Poiseuille en terme de développement de la couche limite.