
B.U.P. PRATIQUE – B.U.P. PRATIQUE – B.U.P. PRATIQUE – B.U.P. PRATIQU

Expériences de mécanique des fluides *SPE PC et PSI*

par N. ABRAHAM, L. ANDRÉ, J. MARTY,
A. MARTIN et G. REQUIN
Lycée P. Corneille - 76000 Rouen

RÉSUMÉ

Les manipulations en mécanique des fluides doivent permettre aux élèves de Spé PC et PSI d'appréhender le concret dans cette partie du programme. Nous proposons deux manipulations, l'une sur les régimes turbulents ($Re \sim 10^4$) utilisant une jauge de Pitot de fabrication sommaire, l'autre en régime laminaire ($Re \sim 10^{-2}$) aboutissant à une mesure de viscosité. Dans les deux cas une discussion critique s'avère nécessaire pour valider les résultats.

Il s'agissait avec les nouvelles formulations du programme de mécanique des fluides de PC/PSI, de faire manipuler les élèves sur les deux grands types d'écoulements, turbulent et laminaire. Sans aucun crédit d'équipement nous avons été amené à ressortir du fond des placards des appareils «aspirateurs d'air» d'une dotation des années 60 distribués à l'époque par Eurosap-Deyrolle [1] et sans doute utilisés en terminale, pour étudier la résistance de l'air en mesurant la trainée de divers profils.

1. ÉTUDE DE RÉGIMES TURBULENTS

La soufflerie étant faite pour fonctionner à vitesse d'écoulement constante, nous avons réalisé l'alimentation du moteur par l'intermédiaire d'un alternostat pour lui trouver d'autres régimes de fonctionnement, ceci est possible mais seulement pour des valeurs assez voisines de la vitesse maximum (problème de décrochage du moteur asynchrone) soit environ 7 m/s indiqué par le constructeur pour la vitesse de l'air.

Pour la mesure de la vitesse d'écoulement nous avons réalisé nos propres tubes de Pitot, en récupérant des tubes de verre fins ($\varnothing_{ext} = 3,5 \text{ mm}$, $\varnothing_{int} = 2 \text{ mm}$), l'un courbé à angle droit, l'autre rectiligne et tous deux collés en ménageant un interstice pour l'ajustage des tubes de caoutchouc souples qui les relient à un manomètre à eau, lui-même construit à partir de vieux tubes à dégagement ébréchés en chimie. L'angle d'inclinaison

B.U.P. PRATIQUE – B.U.P. PRATIQUE – B.U.P. PRATIQUE – B.U.P. PRATIQ

son de la branche manométrique vaut environ 10° de manière à obtenir des variations de niveau de quelques centimètres pour les vitesses attendues :

$$h = \rho_{air} \frac{v^2}{2 \rho_{eau} g} \quad \text{et} \quad \delta l = h / \sin 10^\circ$$

La photo 1 montre la réalisation de la jauge de Pitot, l'eau est colorée par de l'indigo.

La sonde de Pitot peut être introduite dans la veine d'air par la fente laissée libre en l'absence de forme d'essai. On demande aux élèves de noter une correspondance entre trois graduations de l'alternostat et trois dénivellations du manomètre et d'en déduire la vitesse de l'air pour trois régimes du moteur.

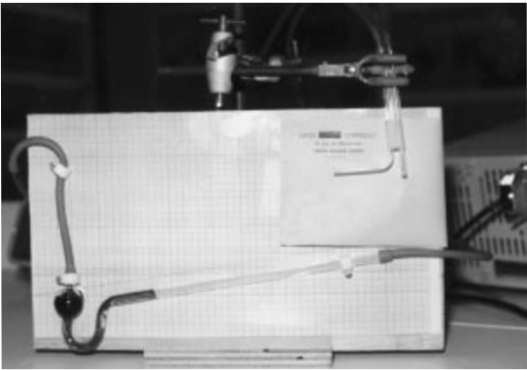


Photo 1 : Tube de Pitot et manomètre.

Exemple de résultats

(Le sinus de la pente est donné par le rapport 1,90/11,15 pour le manomètre utilisé).

Graduation de l'alternostat	100	70	60
Dénivellation δ / lue (mm)	28,0	21,5	14,0
Dénivellation h (mm)	4,63	3,47	2,27
Vitesse de l'air (m/s)	8,33	7,23	5,85

Après introduction de la forme d'essai sphérique, on retrouve les mêmes positions de l'alternostat et on mesure, selon la procédure décrite dans le mode d'emploi de l'appareil, les forces de traînée associées. On vérifie ensuite la loi de la force de traînée en v^2 , en calculant pour chaque régime le coefficient de traînée C [2] donné par l'expres-

B.U.P. PRATIQUE – B.U.P. PRATIQUE – B.U.P. PRATIQUE – B.U.P. PRATIQ

sion $F = C_{p_{air}} S v^2 / 2$ avec $S = 12 \text{ cm}^2$. Pour chaque régime également on demande aux élèves de calculer le nombre de Reynolds associé ($R_e = \rho r v / \eta$).

La photo 2 montre l'appareil de la maison Eurosap - Deyrolle, avec la forme sphérique en position dans la veine d'air.

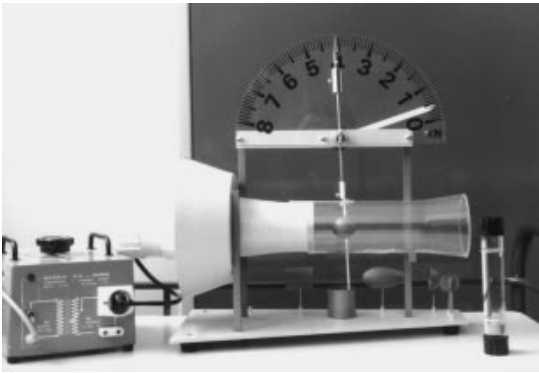


Photo 2 : Appareil pour l'étude de la résistance de l'air.

Exemple de résultats

Graduation de l'alternostat	100	70	60
Vitesse de l'air en m/s	8,33	7,23	5,85
Force de traînée en cN	3,7	3,1	2,4
Coefficient de traînée	0,70	0,76	0,94
Nombre de Reynolds	$1,4 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^4$	10^4

Nous n'obtenons pas $C \approx 1$ aux deux premières vitesses ; nous mettons ceci sur le compte d'une turbulence résiduelle, derrière la prise de pression dynamique, qui perturbe la prise de pression statique et entraîne une erreur sur la mesure de vitesse. Pour le vérifier, et en faisant l'hypothèse que la vitesse d'écoulement de l'air était proportionnelle à la vitesse de rotation des pales du ventilateur, nous avons mesuré la vitesse de rotation de l'arbre du ventilateur à l'aide d'un stroboscope électronique. Nous avons obtenu pour les trois mêmes graduations de l'alternostat des vitesses de rotation de 23,25 tr/s, 21,4 tr/s et 19,0 tr/s, ces trois nombres sont proportionnels aux trois racines des forces de traînée avec un écart inférieur à 2 %, alors que la proportionnalité aux vitesses déduites de notre jauge de Pitot est bien moins établie.

B.U.P. PRATIQUE – B.U.P. PRATIQUE – B.U.P. PRATIQUE – B.U.P. PRATIQU

Ensuite on peut proposer à l'élève de se servir de l'appareil dans les conditions normales, c'est-à-dire à pleine vitesse, et de faire une étude comparative des coefficients de traînée des diverses formes proposées par le constructeur.

Exemple de résultats (on reprend $C = 1$ pour la forme sphérique)

Profil	Sphère	demi-sphère creuse	Cylindre	Sphéroconique	Disque		
					12 cm ²	9 cm ²	6 cm ²
C	1	0,92	1,6	0,49	2,07	2,11	2,01

Si l'on dispose d'un élève fumeur (il en existe encore...) on peut visualiser avec de la fumée de cigarette les lignes de courant et noter une relation qualitative entre le «chahut» des lignes de courant derrière l'objet et l'importance de son coefficient de traînée. Ceci illustre aussi expérimentalement les procédés utilisés dans les photographies d'écoulement, par exemple dans la référence [3].

2. ÉTUDE D'UN RÉGIME LAMINAIRE

Pour observer un régime laminaire il faut utiliser un liquide très visqueux (la glycérine dont le coefficient η est compris entre 2,33 Pl à 15°C et 0,954 Pl à 25°C d'après le CRC Handbook of Chemistry and Physics), une faible dimension d'objet et une faible vitesse.

La chute d'une bille sphérique dans la glycérine nous a donné l'occasion d'effectuer un montage beaucoup plus sommaire que dans la référence [4]. Après de nombreux essais nous avons choisi deux billes de plomb de chasse (calibre 2 : $\varnothing$ 3,75 mm, masse 0,32 g et calibre 9 : $\varnothing$ = 2 mm, masse = 0,047 g) enfermées dans un tube de raccord Pyrex de $\varnothing$ 30 mm, de longueur 20 cm, rempli sans bulle d'air de glycérine et fermé à ses deux extrémités par des bouchons à vis [5] (cela permet une manipulation propre, les masse et diamètre des billes sont fournis aux élèves ou mesurés sur d'autres plombs de la cartouche après un tri soigneux car le calibrage des plombs de chasse est assez large). La hauteur de chute, repérée par deux élastiques, est réglable de 10 à 15 cm, ce qui donne des temps de chute d'environ 3 à 10 s mesurés au chronomètre.

Un exemplaire de notre viscosimètre est photographié à côté de la soufflerie.

Le travail demandé aux élèves est d'établir la loi de la chute avec la formule de Stokes et sans oublier la poussée d'Archimède ($\rho_{\text{glycérine}} = 1,26 \text{ g.cm}^{-3}$), d'en déduire

B.U.P. PRATIQUE – B.U.P. PRATIQUE – B.U.P. PRATIQUE – B.U.P. PRATIQU

que la durée du régime transitoire est très faible ($\tau < 0,01 \text{ s}$), et d'établir l'expression de la vitesse limite qui sert de support à l'expérience.

Exemple de résultats (sur deux séries de dix mesures et une hauteur de chute de 11 cm)

Calibre	2	9
$\langle \Delta t \rangle$ en s	2,53	6,32
écart-type σ	0,19	0,12
τ (s)	$6 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
v (cm/s)	4,35	1,74
R_e	$7 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$
η	1,82	1,31

La chute est déclenchée par le renversement du tube placé en position verticale, l'influence des conditions initiales est négligeable vu la faible valeur de τ ; dans les essais effectués, on ne retient que ceux pour lesquels la descente s'est déroulée loin des parois. La manipulation étant facilement répétitive on peut envisager un traitement statistique des mesures.

Remarques : Dans le calcul de τ , on peut corriger la masse inertielle de la bille en modifiant ρ_{pb} par $\rho_{pb} + \rho_{gly} / 2$ pour tenir compte de la mise en mouvement du fluide [6] mais cela ne change pas l'ordre de grandeur de τ .

De même on peut appliquer la correction d'Oseen [7] en $(1 + 3 R_e / 8)$ de la formule de Stokes.

Nous avons envisagé dans un premier temps la manipulation avec des billes de verre ou d'acier de plus grande dimension ($\varnothing = 7,14 \text{ mm}$) dans les mêmes tubes, mais des effets de bord prédominant et aboutissent à une surestimation d'un facteur supérieur à deux dans le résultat de la mesure de viscosité. Un modèle simple prenant en compte la «recirculation» de la glycérine entre la bille et les parois ne l'explique pas alors qu'apparemment les conditions de régime laminaire sont encore remplies avec $R_e \approx 0,20$ [8].

Les deux valeurs obtenues pour la viscosité de la glycérine, après correction, sont donc 1,74 et 1,31 alors qu'une interpolation exponentielle des valeurs de η données par le Handbook entre 15°C et 25°C (le module de modélisation du logiciel Physcope four-

B.U.P. PRATIQUE – B.U.P. PRATIQUE – B.U.P. PRATIQUE – B.U.P. PRATIQU

nit $\eta = 8.8916 \exp(-8,9296 \cdot 10^{-2} T)$ avec $\chi^2 = 2,5 \cdot 10^{-7}$) donne pour une température de 18,6°C le jour de l'expérience, $\eta = 1,69$. On constate surtout que la viscosité est très sensible à de petits écarts de température entre le tube d'expérience et le reste de la salle, ou à une évolution notamment au fur et à mesure de l'avancement de la séance de TP si les deux séries de mesures avec les deux tailles de bille ne sont pas faites simultanément (ce qui a malheureusement été le cas dans l'exemple cité), la valeur 1,74 correspond à 18,3°C et 1,31 à 21,4°C !

Avec ces manipulations, nous avons l'ambition de mettre du concret dans le programme de mécanique des fluides que les élèves considèrent souvent comme assez abstrait en se limitant aux équations ; cela a été aussi l'occasion de faire des manipulations dont les résultats doivent être critiqués pour dépasser les contradictions apparentes.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Dominique THOREZ et Denise DISDET pour toutes les discussions, essais et critiques constructives qui ont accompagné la mise au point de ce TP.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Ce même appareil, à peine «relooké», figure maintenant sur le catalogue DMS Didalab, référence 645 pour un prix d'environ 11 000 F TTC.
- [2] H. GIÉ et J.-P. SARMANT : *«Mécanique deuxième année»* - Tec & Doc-Lavoisier.
- [3] M. Van DYKE : *«An Album of fluid motion»* - The parabolic Press (distributeur : Lavoisier)
- [4] *«Le viscosimètre à bille»* - BUP n° 514, avril 1969.
- [5] Tube à vis à double filetage SVL référencé chez Prolabo au prix de 48 F TTC, glycérol technique d = 1,26 OSI 164 F/L, cartouches (17 F les douze !), consulter l'agenda Gevelot pour la description des calibres.
- [6] Concours 87 Mines-Ponts Physique II - M.
- [7] LANDAU et LIFCHITZ : *«Mécanique des Fluides»*.
- [8] R. BLANC et E. GUYON : *«La physique de la sédimentation»* - La Recherche n° 234, juillet 1991.