

Vélocimétrie à fil chaud : Feuilles dans le vent

Quelles sont les questions scientifiques ou techniques?

Sillage derrière un obstacle.

Déformation d'une structure flexible soumise à un écoulement, évolution du coefficient de traînée avec la vitesse.

Par quelles expériences y répondre?

Expérience modèle quasi 2D en soufflerie sur des feuilles flexibles.

Quelles techniques expérimentales?

Vélocimétrie à fil chaud, jauge de contrainte, imagerie.

Quels sont les résultats?

À vous de les montrer à travers des graphes clairs.

Comment les interpréter?

Ingrédients physiques, lois d'échelle, ajustement de courbes expérimentales: à vous de jouer!



photographie G. Garcin

Quelques lois d'échelle

La stratégie du roseau qui diminue sa traînée en réduisant, par sa flexion, son exposition au vent a fait l'objet d'études récentes (voir les articles de Steinberg et Alben *et al.*, *Nature*, 2002). Nous résumons ici les grandeurs caractéristiques du problème.

Flexion de la feuille

Imposons un rayon courbure R à une feuille de rigidité κ (κ est homogène à un couple: $\kappa = Eh^3/12(1 - \nu^2)$, où E est le module de Young du matériau, h son épaisseur et ν son coefficient de Poisson). L'énergie élastique par unité de surface est de l'ordre κ/R^2 . Supposons que la pression exercée par le fluide déforme la feuille sur sa propre taille (fig. 1a). La feuille est ainsi courbée sur une longueur d'ordre R , ce qui conduit à l'énergie élastique :

$$E_b \sim \frac{\kappa}{R^2} RW \sim \kappa \frac{W}{R},$$

où W désigne la dimension latérale de la feuille . La surface d'attaque présentée par la feuille est dans ce cas d'ordre RW et la force de trainée correspondante :

$$f \sim \rho V^2 RW.$$

Cette force sert à déplacer la partie courbée de la feuille sur une distance d'ordre R , ce qui correspond à un travail : $W_f \sim \rho V^2 R^2 W$, qui compense l'énergie élastique E_b . Le rayon de courbure typique est donc donné par :

$$R^* \sim \left(\frac{\kappa}{\rho V^2} \right)^{1/3}.$$

Quelle est la signification physique de R^* ? Si la longueur L de la feuille est grande devant R^* , nous retrouvons notre hypothèse de calcul: la feuille est considérablement courbée. Si $L \ll R^*$, l'élasticité l'emporte et la feuille n'est quasiment pas déformée. Pour une longueur L donnée, il est également intéressant de déterminer la vitesse V^* à partir de laquelle la feuille se déforme sur sa propre longueur :

$$V^* \sim \left(\frac{\kappa}{\rho L^3} \right)^{1/2}.$$

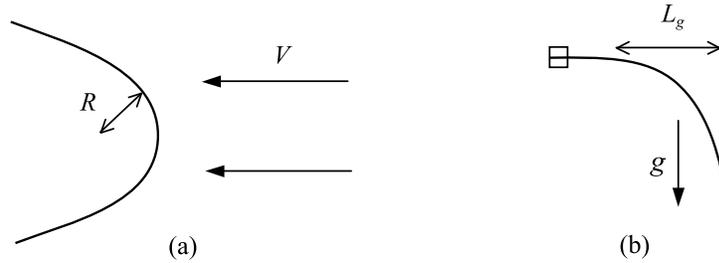


Figure 1: (a) Feuille fléchie par le vent, (b) Mesure de la rigidité.

Comment déterminer κ ? Il suffit d'observer la feuille fléchir sous son propre poids (1b). La longueur caractéristique L_g sur laquelle la feuille se courbe est donnée par : $L_g \sim (\kappa/\rho_s gh)^{1/3}$, où ρ_s est la masse volumique de la feuille. Une simple mesure de L_g nous donne ainsi κ .

Trainée

Lorsque $L \ll R^*$, on s'attend à ce que la force de trainée soit donnée par :

$$f \sim \rho V^2 LW.$$

Pour $L \gg R^*$, la surface exposée est plus faible et on attend :

$$f \sim \rho V^2 W \left(\frac{\kappa}{\rho V^2} \right)^{1/3} \sim V^{4/3}.$$

La traînée augmente ainsi moins rapidement avec la vitesse que dans le cas d'un corps rigide : c'est la stratégie du roseau! Pour comparer les différentes mesures, on détermine le coefficient de traînée :

$$C_x = \frac{f}{\rho V^2 LW/2}.$$

Lorsque $L \ll R^*$, on s'attend ainsi à un coefficient constant, alors que pour $L \gg R^*$ ce coefficient devrait varier comme :

$$C_x \sim \frac{R}{L} \sim \left(\frac{V}{V^*}\right)^{-2/3}.$$

Instrumentation

La soufflerie dont vous disposez se compose essentiellement d'un ventilateur dont la vitesse peut être ajustée à l'aide d'un rhéostat, de filtres et d'un convergent (fig. 2). La section en sortie de convergent est 100 mm × 100 mm.

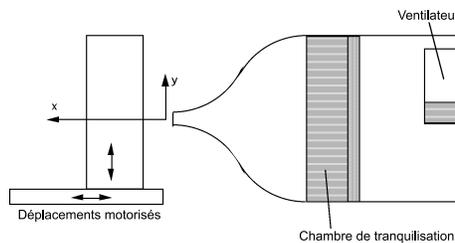


Figure 2: Schéma de la soufflerie

Un tube de Pitot permet de déterminer la vitesse en sortie de la soufflerie. Il est relié à un manomètre différentiel électronique. Une sonde à fil chaud est également placée sur une platine motorisée et permet une mesure locale de la vitesse.

Anémomètre à fil chaud

La sonde, dont l'élément actif est un fil de platine de quelques microns de diamètre, est placée dans un pont de Wheatstone. Avant de commencer la mesure, on équilibre le pont en l'absence d'écoulement. Ensuite, on déséquilibre le pont d'une valeur de résistance connue, de façon à ce que le sonde soit continuellement parcourue par un courant de surchauffe. Lorsque la vitesse du fluide augmente, le transfert thermique du fil chaud vers le fluide est accru et le fil a tendance à se refroidir, ce qui modifie sa résistance. Pour maintenir le fil à température constante et donc à résistance constante, il faut augmenter le courant de surchauffe. La tension de déséquilibre du pont de Wheatstone est ainsi utilisée pour commander l'amplificateur qui délivre la tension de surchauffe. La tension mesurée en sortie de l'amplificateur varie donc comme le flux de chaleur issu du fil et donc comme la vitesse du fluide. À partir de la tension aux bornes du pont, on obtient, par filtrage passe-bas une vitesse moyenne dans le temps U et par un filtrage passe-haut, la fluctuation de vitesse u' (fig. 3).

Attention, les sondes sont très fragiles! (le fil ne fait qu'une dizaine de microns de diamètre) Attention à **ne pas toucher la sonde** lors d'un changement de feuille. Lorsqu'on n'effectue pas de mesure, ramener le commutateur du boîtier sur la position "attente", ce

qui coupe l'alimentation de la sonde. Ne pas modifier la résistance de surchauffe, sinon le fil risque de griller.

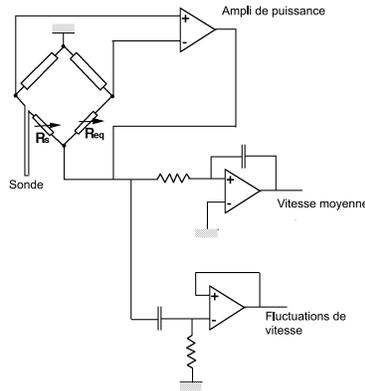


Figure 3: Schéma de principe du vélocimètre à fil chaud

Mesure de la traînée

La tige qui supporte les feuilles est monté sur un support déformable constitué de deux lames métalliques. Lorsque l'écoulement exerce une force de traînée sur l'obstacle, ces lames sont déformées en flexion et une jauge de contrainte permet de remonter, après étalonnage, à la force exercée sur l'obstacle.

Acquisition des données

L'acquisition des trois signaux (vitesse moyenne, fluctuation de vitesse et tube de Pitot) est pilotée par un programme écrit dans l'environnement LabView. Ce programme (Acq-simple.vi) vous permet de piloter la position de la sonde, les deux signaux de vitesse, la force et également de sauvegarder dans un fichier texte ces données.

Un autre programme LabView (etalonnage.vi) permet d'effectuer l'étalonnage des sondes à fil chaud par comparaison à la pression dynamique mesurée par le tube de Pitot.

Mesures à effectuer

À vitesse de vent fixée, réaliser un profil de vitesse vertical sans obstacle. Ce profil servira ainsi de référence.

Placer la plus petite feuille rigide sur son mât et réaliser des profils de vitesse verticaux en différentes positions à aval de l'obstacle (on utilisera une procédure sous Igor pour tracer le champ de vitesse). Comment les profils de vitesse évoluent-ils lorsqu'on déplace le point de mesure vers l'aval ? Essayer d'interpréter qualitativement cette évolution. Peut-on estimer la traînée à partir de ce champ de vitesse ?

Une calibration indique que la réponse de la jauge de contrainte est linéaire. Le facteur de proportionnalité est de 0.761mN par unité sur la jauge. La mesure directe de la traînée est-elle comparable avec l'estimation précédente ?

Comparons l'aérodynamisme des différentes feuilles. Mesurer pour cela la traînée subie par les feuilles en fonction de la vitesse du vent. Afin de "rescaler" les données obtenues pour les feuilles flexibles, on représentera le coefficient C_x en fonction du rapport V/V^* . En effet, ces nombres sans dimensions sont *a priori* les grandeurs physiques pertinentes du problème. La largeur W des feuilles est de 8 cm et leur "longueur" L de 8, 6 ou 4 cm. Plusieurs épaisseurs h sont disponibles, env. 1mm (rigide), $3000\mu\text{m}$ ($\kappa = 680\mu\text{N.m}$), $100\mu\text{m}$ ($\kappa = 440\mu\text{N.m}$), $90\mu\text{m}$ ($\kappa = 150\mu\text{N.m}$), $50\mu\text{m}$ ($\kappa = 30\mu\text{N.m}$), $30\mu\text{m}$ ($\kappa = 6\mu\text{N.m}$).

Pour une feuille flexible donnée, on pourra photographier sa forme pour quelques vitesses et superposer ces différents profils sur une même image grâce au logiciel ImageJ.