

# Feuilles, maquettes et ailes dans le vent

*Quelles sont les questions scientifiques ou techniques ?*

Déformation d'une structure flexible soumise à un écoulement, évolution du coefficient de traînée avec la vitesse, influence de la forme d'un objet sur son coefficient de trainée et sa portance.

*Par quelles expériences y répondre ?*

Expériences modèles quasi 2D en soufflerie sur des feuilles flexibles et sur des maquettes réalisées par imprimante 3D.

*Quelles techniques expérimentales ?*

Soufflerie, jauge de contrainte, imagerie.

*Quels sont les résultats ?*

À vous de les montrer à travers des graphes clairs.

*Comment les interpréter ?*

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



photographie G. Garcin

Ce TP illustre une interaction fluide/structure : dans quelle mesure une force aérodynamique peut-elle déformer une structure. L'un des pionniers dans le domaine est Gustave Eiffel. Lors de la création de sa fameuse tour, sa principale préoccupation était de veiller à ce qu'elle résiste à un vent latéral. Néanmoins les déformations d'édifices humains sous l'effet du vent restent relativement modestes (même si monter au dernier étage de la Tour un jour de tempête peut donner mal au cœur!). Le couplage avec l'écoulement est alors relativement simple car ces déformations ne modifient pas sensiblement l'écoulement.

Dans la nature, des structures très souples sont néanmoins fréquentes (feuilles d'arbre, ailes d'insectes, nageoire de poissons...). Leur déformation peut modifier l'écoulement qui lui-même induit les déformations. Il s'agit alors d'un problème couplé complexe que l'on résout généralement par des algorithmes numériques récursifs. Ce thème est actuellement très en vogue (voir les articles de Steinberg et Alben *et al.*, *Nature*, 2002). D'une certaine manière, le but du TP est d'étudier la stratégie du roseau qui diminue sa traînée en réduisant, par sa flexion, son exposition au vent.

## Quelques lois d'échelle

### Flexion de la feuille

Imposons un rayon courbure  $R$  à une feuille de rigidité  $\kappa$  ( $\kappa$  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  $\nu$  son coefficient de Poisson). Le moment nécessaire à flétrir la feuille sur un rayon de courbure typique  $R$  est en loi d'échelle :

$$\mathcal{M}_{feuille} \sim \frac{\kappa b}{R},$$

où  $b$  est la dimension latérale de la feuille. À grand nombre de Reynolds, cette courbure est induite par la pression dynamique du vent  $\frac{1}{2}\rho V^2$ . Dans la limite des faibles déformations, le moment correspondant à cette pression est donné par :

$$\mathcal{M}_{vent} \sim \rho V^2 L^2 b$$

Nous nous attendons donc à ce que le rayon de courbure de la feuille suive une loi de la forme :

$$R \sim \frac{\kappa}{\rho V^2 L^2}$$

Quelle est la vitesse caractéristique qui permet de courber la feuille sur sa propre longueur ? Il suffit de déterminer  $V^*$  tel que  $R \sim L$  :

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

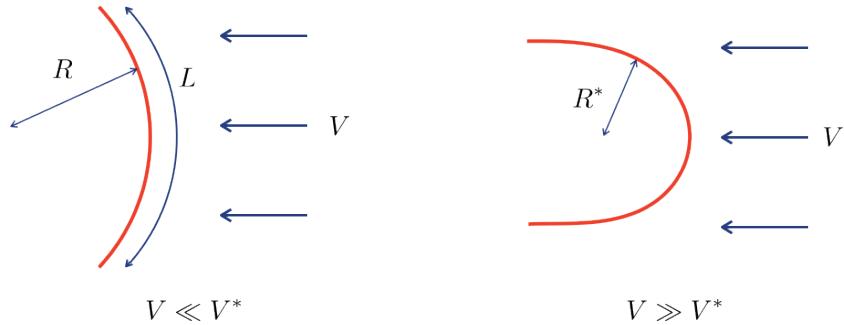


FIGURE 1 – Feuille fléchie par le vent. Gauche, pour  $V \ll V^*$ . Droite, pour  $V \gg V^*$ .

### Trainée

Lorsque  $V \ll V^*$ , on s'attend à ce que la force de trainée (grand  $Re$ ) soit donnée par :

$$f \sim \rho V^2 L b.$$

Pour  $V \gg V^*$ , la feuille prend une forme d'un U de courbure  $R^*$ . Pour estimer cette courbure, on va négliger les contraintes exercées sur les bras du U (ce qui revient à négliger la friction

de couche limite, ça marche tant que les bras ne sont pas trop longs). Dans ce cas, la taille  $L$  à prendre en compte dans l'expression du rayon de courbure est  $R^*$ . Nous trouvons ainsi :

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

La force attendue devient ainsi :

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

La trainée augmente ainsi moins rapidement avec la vitesse que dans le cas d'un corps rigide : c'est la stratégie du roseau.

Comment comparer des mesures effectuées avec des plaques de taille et de rigidités différentes ? Peut-on adapter nos mesures en soufflerie réalisées avec des maquettes centimétriques à une structure en tôle métallique immergée dans un courant marin ? Il faut pour cela adimensionner les données.

Comme nous sommes à grand nombre de Reynolds, il est a priori pertinent d'adimensionner la force de traînée sous la forme d'un coefficient de traînée :

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

Pour adimensionner la vitesse du vent, nous pouvons la diviser par  $V^*$  qui prend en compte la rigidité de la feuille. Si les ingrédients physiques sont les bons (essentiellement pression dynamique contre rigidité en flexion), la courbe  $C_x = f(V/V^*)$  devrait être universelle.

À quoi peut ressembler cette courbe ? Lorsque  $V \ll V^*$ , la feuille se déforme à peine et on s'attend à un coefficient constant. Cependant lorsque  $V$  devient comparable à  $V^*$  la section apparente de la structure diminue si bien que le coefficient de traînée tel que défini au-dessus diminue. Dans la limite  $V \gg V^*$  on s'attend à une variation de la forme :

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

## 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.

Un tube de Pitot permet de déterminer la vitesse en sortie de la soufflerie. Il est relié à un manomètre différentiel électronique. Le signal récupéré sur une carte d'acquisition est ensuite traduit en vitesse du vent grâce à un oscilloscope numérique et un script Matlab Pitot(0).

## 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.

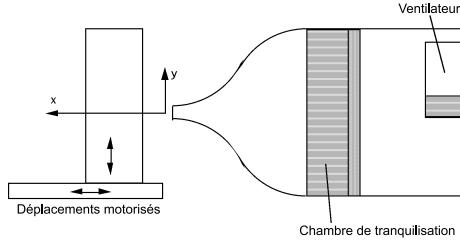


FIGURE 2 – Schéma de la soufflerie

## Mesures à effectuer

### Feuilles

On va essentiellement s'intéresser à l'évolution de la force de traînée subie par les feuilles en fonction de la vitesse du vent. Le support de la feuille est connecté au bâti par une poutre flexible sur laquelle des jauge de déformations ont été collées. Une calibration indique que la réponse des jauge est linéaire avec la charge. Le facteur de proportionnalité est de 1.21mN par unité sur le pont d'extensiométrie.

Dans le cas des plaques rigides, l'évolution de la force de traînée est-elle compatible avec la formule  $T = \frac{1}{2}\rho U^2 S C_x$ ? Si oui, quelle est la valeur du  $C_x$ ?

Intéressons-nous aux feuilles flexibles. Mesurez pour cela la traînée subie par les feuilles en fonction de la vitesse du vent. Afin de “rescaler” les données obtenues pour les différentes feuilles, on représentera le coefficient  $C_x$  en fonction du rapport  $V/V^*$ . La largeur  $b$  des feuilles est de 8 cm et leur “longueur”  $L$  de 8, 6 ou 4 cm. Plusieurs épaisseurs  $h$  sont disponibles : 1mm (rigide), 150 $\mu$ m ( $\kappa = 1400\mu\text{N.m}$ ), 100 $\mu$ m ( $\kappa = 440\mu\text{N.m}$ ), 90 $\mu$ m ( $\kappa = 150\mu\text{N.m}$ ), 50 $\mu$ m ( $\kappa = 30\mu\text{N.m}$ ), 30 $\mu$ m ( $\kappa = 6\mu\text{N.m}$ ). Dans les derniers modèles, la valeur de  $\kappa$  est inscrite sur la feuille.

Obtient-on une courbe universelle  $C_x = f(V/V^*)$ ?

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.

Que ce passe-t-il pour certaines feuilles quand la vitesse du vent est élevée. Quels ingrédients physique faudrait-il intégrer pour prendre en compte ce phénomène?

### Maquettes

Dans une seconde partie, nous vous proposons de comparer la force de trainée que le vent exerce sur des objets plus ou moins profilés. Vous avez à votre disposition des objets ayant une symétrie de révolution que vous pouvez assembler 2 à 2 pour former des objets variés : demi-sphère seule, ellipsoïde seul, demi-sphère-ellipsoïde, double ellipsoïde. Mesurer le coefficient de trainée des différents objets. On s'attachera à mesurer par ailleurs la force de trainée sur la barre de maintien des maquettes. Commenter les résultats obtenus.

### Traînée et Portance

Dans une dernière partie, nous nous intéresserons à la mesure de la portance et de la traînée de différents objets à l'aide d'un capteur de force 3 axes. Vous pourrez mesurer les

forces s'appliquant sur une sphère ou une aile de profil symétrique... Quelle est la condition pour obtenir une portance ? Comment la portance varie-t-elle avec la vitesse de l'écoulement ? Quelle configuration permet d'optimiser le ratio portance/trainée ? Commenter les résultats obtenus.

#### **Protocole : Acquisition de données avec le capteur de force 3 axes**

1. Lancez le logiciel GSVmultichannel (icône sur le Bureau).
2. Cliquez sur Open Session.
3. Choisissez le fichier Session2023 dans le dossier Session\_GSVmulti sur le bureau. Le logiciel reconnaît ainsi les 3 forces mesurées ( $F_x, F_y, F_z$ ).
4. Choisissez l'onglet Recorder Yt puis sauvez une acquisition dans un fichier tdms (Start Measuring/Stop Measuring).
5. Sur Matlab, utilisez la fonction `tdms2mat('filename',f)` pour exporter le fichier tdms en fichier mat.  $f$  est la fréquence d'acquisition  $f = 12.5\text{Hz}$  par défaut.

#### **Protocole : Acquisition de la vitesse de vent avec le tube de Pitot**

1. Sur Matlab, tapez `Pitot(0)`
2. Suivez les instructions pour mesurer d'abord la tension du capteur de pression différentielle à zéro vent avant de mesurer la vitesse du vent.
3. Vous pouvez ensuite lancer l'acquisition d'une vitesse de vent sans la mesure à zéro vent en tapant `Pitot( $U_{\text{off}}$ )` avec  $U_{\text{off}}$  la valeur de l'offset à zéro vent.