Travaux pratiques

Propulsion à air par réaction
Exemple de compte-rendu

Sciences-physiques MPSI_3

Dans ce TP, il s'agit d'étudier la conservation de la quantité de mouvement lors de la propulsion d'un modèle réduit roulant : le chariot à réaction.

Le but de cette activité est de mettre en œuvre une démarche expérimentale pour tenter de vérifier le principe de la conservation de la quantité de mouvement pour un chariot roulant, propulsé par réaction à l'aide d'un ballon de baudruche, que l'on assimile à un système pseudo-isolé

I Analyse

Il est nécessaire de commencer par un bilan de quantité de mouvement entre le moment où le mouvement du chariot commence (chariot initialement au repos) et une date ou le chariot est en mouvement, le ballon n'étant pas encore complètement dégonflé. Pour pouvoir faire un bilan simple de quantité de mouvement, il est nécessaire de faire un certain nombre d'hypothèses :

- l'ensemble chariot + ballon se déplacent sans frottements sur la paillasse ce qui permet d'affirmer que l'on est en présence d'un système pseudo-isolé en translation.
- la vitesse du chariot v est négligeable devant la vitesse d'éjection u de l'air à la sortie du ballon.

On considère que le système est constitué de l'ensemble (chariot C + ballon B + air contenu initialement à l'intérieur du ballon). En prenant en compte les deux hypothèses simplificatrices, nous faisons un bilan de quantité de mouvement entre un état initial où le système est au repos dans le référentiel du laboratoire et un état final où l'ensemble (chariot + ballon) de masse M a acquis une vitesse v alors qu'une masse d'air m a été éjectée du ballon à la vitesse u :

$$0 = Mv - m(u - v) \Leftrightarrow Mv = mu$$

L'expérience montre que la pression à l'intérieur d'un ballon de baudruche reste constante lorsque l'on gonfle le ballon ou lorsque celui ci se dégonfle. La vidéo *Pression.avi* montre un capteur de pression mesurant la pression dans un ballon gonflé initialement avec 4,0 L d'air et se dégonflant lentement (la pression atmosphérique était de 1012 hPa, la pression à l'intérieur du ballon est constante et égale à 1022 hPa à l'exception de la phase finale de dégonflage où la pression monte légèrement à 1023 hPa).

Cette observation préliminaire est très importante car elle permet de faire l'hypothèse que le débit d'air éjecté à l'extérieur du ballon est constant à la condition que la section S du conduit d'éjection (tuyère) de l'air vers l'extérieur le soit également. Le débit d'air étant constant, il est alors possible de le déterminer de manière simple en mesurant la variation du volume ΔV du ballon et l'intervalle de temps Δt qu'il faut pour obtenir cette variation.

On a donc le moyen de mesurer la variation de masse du ballon pendant un temps donné, c'est à dire la masse m d'air éjectée. De plus, si on connait la section S de la tuyère, on peut facilement déterminer la vitesse d'éjection :

$$u = \frac{\Delta V}{S\Delta t}$$

de l'air.

II Protocole et mesures

La vidéo *GDballon.avi* montrant le gonflage du ballon à 4,0 L d'air avec 40 coups de pompe suivi de son dégonflage montre que le temps de vidage complet des 4,0 L d'air contenu dans le ballon est de 0,767 s. Le débit est donc $D = 5,2 \pm 0,5\,\mathrm{L \cdot s^{-1}}$. L'incertitude de $0,5\,\mathrm{L \cdot s^{-1}}$ est estimée en considérant que l'incertitude sur la mesure du temps est de 0,033 s (le temps qui séparent deux images successives) et l'incertitude sur le volume du ballon est de l'ordre de 0,10 L d'après la méthode utilisée pour déterminer le volume d'un coup de pompe (40 coups de pompe pour remplir le ballon, incertitude de un coup de pompe). Le calcul de l'incertitude est ici fait en utilisant la formule sur l'incertitude-type :

$$u(D) = D\sqrt{\left(\frac{u(V)}{V}\right)^2 + \left(\frac{u(t)}{t}\right)^2} \approx 0,26\,\mathrm{L \cdot s^{-1}}.$$

Connaissant le diamètre $d = 11,5\,\mathrm{mm}$ du conduit d'éjection de l'air (voir description du chariot), la mesure du débit donne accès à la vitesse d'éjection de l'air u :

$$u = \frac{D}{S} = \frac{4D}{\pi d^2} \approx 50 \pm 10\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}.$$

Le calcul de l'incertitude se fait en considérant une incertitude de 0,5 mm sur la mesure du diamètre de la tuyère d, une incertitude de $0,3\,\mathrm{L \cdot s^{-1}}$ pour le débit D et en utilisant la formule sur l'incertitude-type composée :

$$u(u) = u\sqrt{\left(\frac{u(D)}{D}\right)^2 + \left(2\frac{u(d)}{d}\right)^2} \approx 5,1\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}.$$

Le calcul de la vitesse v se fait à partir de la coordonnée x (voir à gauche de la figure 1). On trace la courbe $x(t)$ et on en déduit la vitesse en estimant la dérivée (voir à droite de la figure 1). Pour être dans les conditions de la seconde hypothèse, on détermine l'intervalle de temps Δt nécessaire mis pour que le chariot passe d'une vitesse nulle de l'état initial à la vitesse v_0 de l'état final choisie ici égale à $1,00\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$ (la vitesse du chariot doit rester négligeable devant la vitesse d'éjection de l'air valant ici $50\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$). Le modèle donne $v(t) = 7,2t - 0,233$ ce qui donne une durée de :

$$\Delta t = (1,00 - 0,233)/7,2 = 0,106\,\mathrm{s}.$$

III Analyse

Les valeurs de Δt et du débit D obtenus ainsi que la masse volumique ρ de l'air, que l'on choisit égale à $1,2\,\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$, permettent de calculer la masse de d'air éjectée dans l'état final :

$$m = \rho \times D \times \Delta t \approx 0,66 \pm 0,08\,\mathrm{g},$$

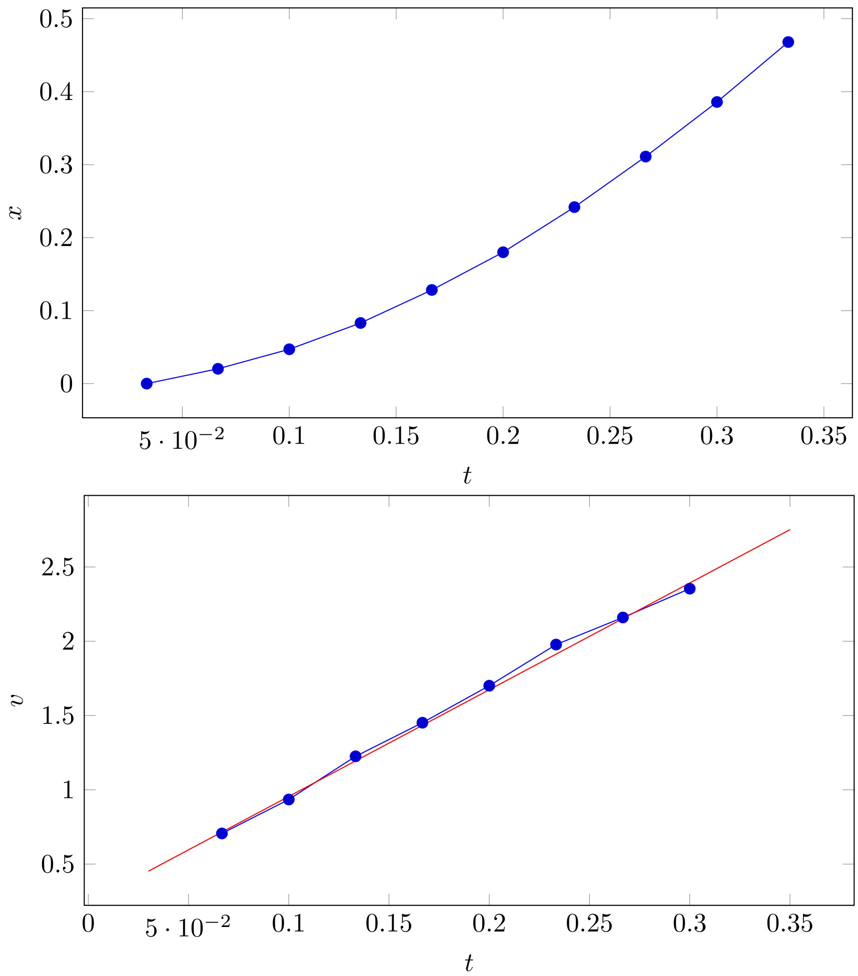

FIGURE 1 – Tracé de $x(t)$ pour le chariot puis de $v(t)$ par estimation de la dérivée

en considérant une incertitude relative de 1% sur Δt.

La quantité de mouvement de l'air éjecté à l'état final est donc de : $m \times u = 0,033 \pm 0{,}009\,\mathrm{kg \cdot m \cdot s^{-1}}$.

La masse du chariot à l'état final est égale à la masse à vide valant 31 g (mesurée au gramme près) à laquelle on ajoute la masse des 4,0 L d'air moins la masse $m = 0{,}79\,\mathrm{g}$ d'air éjecté : $M = 35 \pm 1\,\mathrm{g}$. La quantité de mouvement acquise par le chariot est donc de : $M \times v = 0,035 \pm 0{,}001\,\mathrm{kg \cdot m \cdot s^{-1}}$

Les deux valeurs sont compatibles avec la conservation de la quantité de mouvement. La différences entre les deux valeurs, de l'ordre de quelques % en valeur relative, est certainement due au fait que le système n'est pas parfaitement pseudo-isolé et qu'il existe un léger frottement au niveau des axes des roues. On peut également indiquer que le modèle utilisé comporte des approximations, en toute rigueur il conviendrait d'en analyser l'influence avant de conclure.