

Propulsion à air par réaction

Préambule

Extrait du programme d'enseignement spécifique de physique-chimie de la série scientifique en classe terminale ([Bulletin officiel spécial n°8 du 13 octobre 2011](#))

Temps, mouvement et évolution

Notions et contenus	Compétences exigibles
[...] Conservation de la quantité de mouvement d'un système isolé. [...]	[...] <i>Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour interpréter un mode de propulsion par réaction à l'aide d'un bilan qualitatif de quantité de mouvement.</i> [...]

Mesures et incertitudes

Notions et contenus	Compétences expérimentales exigibles
Erreurs et notions associées	Identifier les différentes sources d'erreur (de limites à la précision) lors d'une mesure : variabilités du phénomène et de l'acte de mesure (facteurs liés à l'opérateur, aux instruments,...).
Incertitudes et notions associées	Évaluer et comparer les incertitudes associées à chaque source d'erreur. Évaluer l'incertitude de répétabilité à l'aide d'une formule d'évaluation fournie. Évaluer l'incertitude d'une mesure unique obtenue à l'aide d'un instrument de mesure. Évaluer, à l'aide d'une formule fournie, l'incertitude d'une mesure obtenue lors de la réalisation d'un protocole dans lequel interviennent plusieurs sources d'erreurs.
Expression et acceptabilité du résultat	Maîtriser l'usage des chiffres significatifs et l'écriture scientifique. Associer l'incertitude à cette écriture. Exprimer le résultat d'une opération de mesure par une valeur issue éventuellement d'une moyenne, et une incertitude de mesure associée à un niveau de confiance. Évaluer la précision relative. Déterminer les mesures à conserver en fonction d'un critère donné. Commenter le résultat d'une opération de mesure en le comparant à une valeur de référence. Faire des propositions pour améliorer la démarche.

La référence utilisée pour les calculs d'incertitudes est la suivante :

<http://eduscol.education.fr/pid23213-cid60323/ressources-pour-le-lycee.html>

Pré-requis :

- maîtrise d'une technique de mesure de vitesse d'un mobile en translation sur un plan horizontal ;
- lois de Newton et conservation de la quantité de mouvement d'un système isolé

Mots clefs :

Quantité de mouvement, propulsion par réaction, approche qualitative, bilan, mesures, incertitudes.

Compétences abordées

Cette activité permet d'évaluer les compétences suivantes :

Compétences attendues :				
1 – non maîtrisées				
2 – insuffisamment maîtrisées				
3 – maîtrisées				
4 – bien maîtrisées	1	2	3	4
Compétences générales :				
Raisonner, argumenter et faire preuve d'esprit critique				
Compétences expérimentales :				
Concevoir et réaliser un protocole expérimental dans le respect des mesures de sécurité				
Analyser les phénomènes, protocoles et résultats				
Valider ou invalider une hypothèse, des résultats d'expérience				

1. Le principe

Dans une première partie, 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.

Deux investigations expérimentales différentes sont proposées : l'une assez rudimentaire et plutôt qualitative et l'autre plus élaborée utilisant les TIC. Les résultats sont validés à partir de critères s'appuyant sur les sources d'erreurs identifiées et l'analyse des incertitudes qui leur sont liées.

La deuxième partie propose d'étendre le champ d'étude de la propulsion par réaction à un autre dispositif de modèle réduit : la fusée à air.

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.

Une description détaillée du chariot à réaction fabriqué pour l'activité est donnée en annexe 1. Après une première approche visant à préciser les hypothèses simplificatrices requises pour un cadre expérimental abordable, le document présente une activité s'articulant autour d'un bilan de quantité de mouvement, dont la mise en œuvre est envisageable par binôme en séance de TP. Le document présente en annexe 2 des exemples de protocoles et de mesures réalisées. Pour la démarche donnée, on tente de valider les résultats obtenus à l'aide d'une évaluation de l'incertitude.

2. La situation expérimentale

L'expérience montre que la pression à l'intérieur d'un ballon de baudruche après quelques gonflages (3 à 5) ne dépend quasiment pas du volume si celui-ci n'est pas trop proche du volume maximal avant éclatement. La surpression à l'intérieur du ballon est de l'ordre de 10 hPa ce qui est très faible devant la pression atmosphérique (1%) et ce qui permet donc de négliger les variations de volume d'air lorsque l'on gonfle le ballon ou lorsque celui-ci se dégonfle. On pourra, pour s'en convaincre, visualiser la vidéo : *Pression.avi*, qui 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 est également confirmée pour un ballon se dégonflant plus rapidement.

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 connaît la section **S** de la tuyère, on peut facilement

déterminer la vitesse d'éjection $u = \frac{\Delta V}{S \cdot \Delta t}$ de l'air.

Dans ces conditions, on peut connaître la quantité de mouvement de l'air éjecté : $\vec{p} = m \cdot \vec{u}$

3. Activités envisageables avec les élèves

On peut imaginer une séance d'activité expérimentale sur 1h30 à 2h sur le thème de la propulsion par réaction. Il paraît alors intéressant d'utiliser, par binôme, un chariot, très simple à fabriquer, monté sur de petites roues et propulsé par un ballon de baudruche. La description détaillée du chariot à réaction est faite en annexe 1. Parmi les objectifs recherchés pour la séance, on peut recenser :

- mesurer la vitesse acquise par un chariot modèle réduit, initialement immobile, propulsé par un ballon de baudruche ;
- mesurer la masse d'air éjectée pendant l'intervalle de temps écoulé entre le départ et l'instant de mesure de la vitesse ;
- tenter la vérification de la conservation de la quantité de mouvement du système (jouet + ballon + air contenu au départ), porter un regard critique sur les résultats obtenus et discuter des causes d'erreurs possibles.

1. Scénario libre

On peut alors démarrer la séance en énonçant la situation-problème suivante :

"On souhaite mettre en œuvre une démarche expérimentale pour interpréter un mode de propulsion par réaction à l'aide d'un bilan de quantité de mouvement. Pour cela, on dispose d'un chariot à réaction, équipé de petites roues, propulsé par un moteur à réaction. Le moteur à réaction est constitué d'un ballon de baudruche, équipé d'un embout de section **S** qui joue le rôle de tuyère et qui permet d'éjecter l'air à vitesse **u** constante.

Des mesures montrent en effet que la surpression de l'air contenue dans le ballon est faible et quasiment constante ce qui implique que le volume ainsi que la masse d'air éjecté sont proportionnelle à l'intervalle de temps écoulé (les débits volumiques et massiques sont constants)."

Mais avant de commencer le travail expérimental, il sera nécessaire d'orienter la réflexion en demandant aux élèves de considérer la question du bilan de quantité de mouvement entre le moment

ou le mouvement du chariot commence (chariot initialement au repos) et une date où 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:

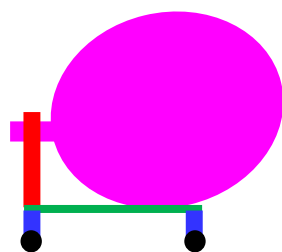
(1) l'ensemble chariot + ballon se déplacent sans frottements sur la paillasse ce qui permet d'affirmer que l'on est en présence d'un système pseudo-isolé en translation ;

(2) la vitesse du chariot v est négligeable devant la vitesse d'éjection u de l'air à la sortie du ballon.

2. Scénario guidé

Dans le cas où les élèves ne seraient pas eux mêmes en mesure de réaliser ce bilan de quantité de mouvement ou dans le cas d'une séance prévue sur un temps plus limité, on pourra proposer de l'aide sous la forme suivante :

" 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 (1) et (2), faire 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 . "



État initial

État initial : repos

vitesse =

masse =

quantité de mouvement totale =

État final

vitesse air éjecté =

vitesse chariot + ballon =

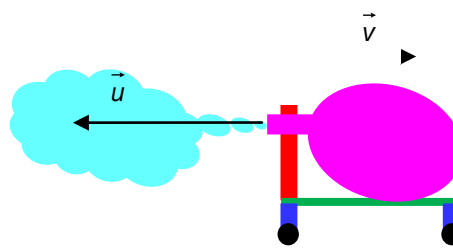
masse air éjecté =

masse chariot + ballon =

quantité de mouvement air éjecté =

quantité de mouvement de C + B =

quantité de mouvement totale =



État final

"Montrer que le bilan de quantité de mouvement permet d'obtenir l'égalité suivante : $m \times u = M \times v$ (3)"

Une fois ce bilan réalisé, on passera alors à la phase de travail expérimental. On pourra, suivant les cas, soit proposer aux élèves d'élaborer un protocole expérimental à partir d'une liste de matériel donné, soit leur proposer un protocole guidé si le temps paraît trop limité. Si on opte pour démarche où les élèves doivent formuler leur propre protocole, on pourra proposer les consignes de la manière suivante :

"On souhaite vérifier expérimentalement le résultat théorique correspondant à l'égalité (3) établi à partir des hypothèses simplificatrices (1) et (2). En utilisant le matériel à disposition de la liste ci-dessous, proposer un protocole permettant de mesurer toutes les grandeurs intervenant dans l'égalité (3)

Matériel à disposition :

- une balance électronique au gramme (pour la classe).
- un chariot à réaction fabriqué (voir description en annexe 1) ;
- une règle graduée ;
- un mètre ruban de 2 m au moins ;
- un chronomètre au centième de seconde ;
- une pompe à vélo pour laquelle on a mesuré le volume donné pour un coup de pompe (0,10 L ici) ;
- un système de mesure de vitesse instantanée comportant deux fourches optiques et une horloge électronique ;
- une webcam associée à un ordinateur muni d'un logiciel de pointage et d'un logiciel tableur-grapheur ;
- etc...

Appeler le professeur pour faire valider votre protocole et obtenir son accord avant de le réaliser

Réalisation du protocole et des mesures

Réaliser le protocole et faire les mesures des masses m , M ainsi que les mesures des vitesses v et u .

Validation des résultats

Calculer les deux termes de l'égalité (3) à savoir $m \times u = M \times v$ et comparer leurs valeurs en prenant en compte les incertitudes associées aux mesures des différentes grandeurs.

Conclure sur la validité des mesures réalisées. "

Un exemple de protocole et de mesures réalisées pour le chariot est donné en Annexe 2.

Annexes

Annexe 1 : description détaillée du dispositif

Il s'agit d'un modèle réduit fabriqué à partir d'une boîte de jeu d'éléments de montage comportant quatre roues, une plaque et des briques enfichables. Les différents éléments sont collés pour éviter que le modèle ne s'éparpille en morceaux au moindre choc. Un ballon de baudruche est monté sur l'ensemble sans aucune fixation : seul un pneu de roue miniature monté au niveau du col du ballon permet de retenir celui-ci contre le chariot. Les photos ci-dessous montrent les détails de l'objet.

Photo 1

Vue d'ensemble des éléments composant le chariot à réaction ainsi que la pompe à vélo servant à gonfler le ballon.

L'ensemble a une masse de 31 g lorsque le ballon est dégonflé.

Les dimensions maximales du chariot sans le ballon sont de 9,6 cm de long et 6,6 cm de hauteur.

La position de l'axe du ballon par rapport au sol est de 5,2 cm.

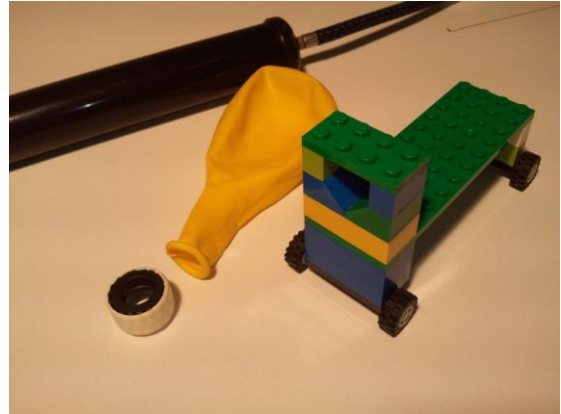


Photo 2

Vue d'ensemble du dragster à réaction avec le ballon gonflé à un volume de 4,0 L et relié à la pompe. On notera que le plateau joue deux rôles :

- assurer la liaison entre les deux trains de roues ;
- servir de support pour éviter que le ballon ne touche la surface sur laquelle roule le chariot.



Photo 3

Détail de la "tuyère" constituée d'un pneu de roue de diamètre intérieur 11,5 mm mesuré à la règle graduée au millimètre.

On peut également voir une marque faite au stylo bille noir sur le ballon qui servira au pointage lors de l'analyse du document vidéo.

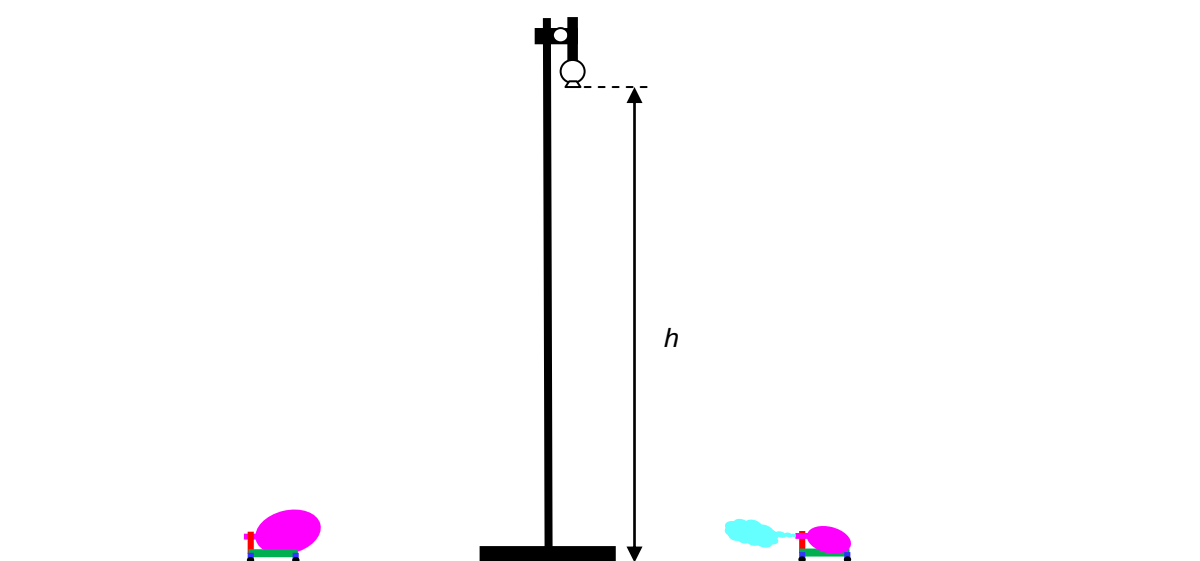


Annexe 2 : protocoles et mesures

L'utilisation de la vidéo permet de mesurer les différentes grandeurs intervenant dans l'égalité (3). On peut réaliser un seul enregistrement vidéo du mouvement du chariot à réaction donnant accès à la vitesse du chariot et au volume du ballon. Les mesures nécessaires pour accéder au volume du ballon demandent alors une réflexion approfondie et un traitement assez conséquent par un tableur grapheur.

On peut également faire deux enregistrements, l'un permettant de mesurer facilement le débit de l'air éjecté, l'autre permettant de mesurer la vitesse acquise par le chariot. C'est cette solution qui est présentée ci-dessous :

On gonfle donc le ballon avec 4,0 L d'air (40 coups de pompe de volume 0,10 L) et on réalise les enregistrements après avoir correctement réglé la webcam qui est située à la verticale de l'axe du mouvement et à une hauteur h (87 cm dans le cas de la vidéo réalisée) du plan sur lequel roule le chariot à réaction.



Les copies d'écran ci dessous expliquent les étapes de pointage et de traitements des données.

Détermination du débit de l'air éjecté par le ballon

t (s)	x (m)	y (m)
0,167		
0,200		
0,233		
0,267		
0,300		
0,333		
0,367		
0,400		
0,433		
0,467		
0,500		
0,533		
0,567		
0,600		
0,633		
0,667		
0,700		
0,733		
0,767		

Toutes les vidéos ont été réalisées à 30 images par seconde.

La vidéo montrant le gonflage du ballon à 4,0 L d'air avec 40 coups de pompe suivi de son dégonflage est disponible ici : GDballon.avi . Pour des raisons de taille du fichier vidéo, celui ci a été ré-encodé en format 320 par 240 ce qui n'est pas gênant pour l'exploitation que l'on veut en faire.

Le temps de vidage complet des 4,0 L d'air contenu dans le ballon est directement accessible dans le logiciel : il est de 0,767 s. Le débit est donc $D = 5,2 \pm 0,3 \text{ L.s}^{-1}$

L'incertitude de $0,3 \text{ L.s}^{-1}$ est estimée en considérant que l'incertitude sur la mesure du temps est de 0,033 s (le temps qui sépare 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 (20 coups de pompe pour remplir d'air une bouteille de 2,0 L remplie d'eau et retournée sur cuve à eau, incertitude de un demi coup de pompe). Le calcul de l'incertitude est ici fait en utilisant la formule sur l'incertitude-type composée du document « Nombres, mesures et incertitudes » (§ 2.3) :

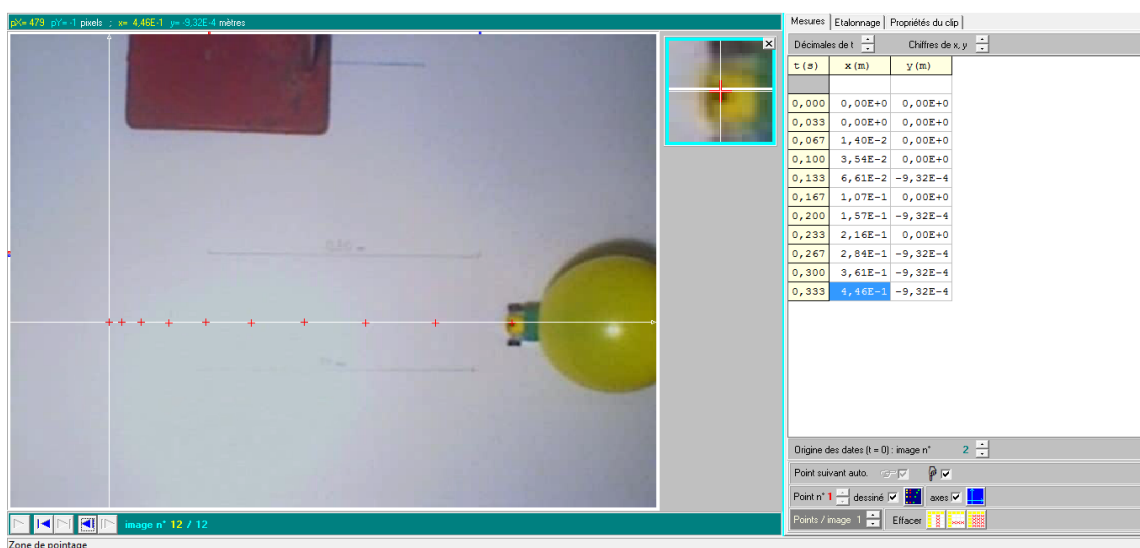
<http://eduscol.education.fr/pid23213-cid60323/ressources-pour-le-lycee.html>

Connaissant le diamètre $d = 11,5 \text{ mm}$ du conduit d'éjection de l'air (voir description du chariot en annexe 2), la mesure du débit donne accès à la vitesse d'éjection de l'air u :

$$u = \frac{D}{S} = \frac{D}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \frac{5,2 \cdot 10^{-3}}{\pi \left(\frac{0,0115}{2}\right)^2} = 50 \pm 9 \text{ m.s}^{-1}$$

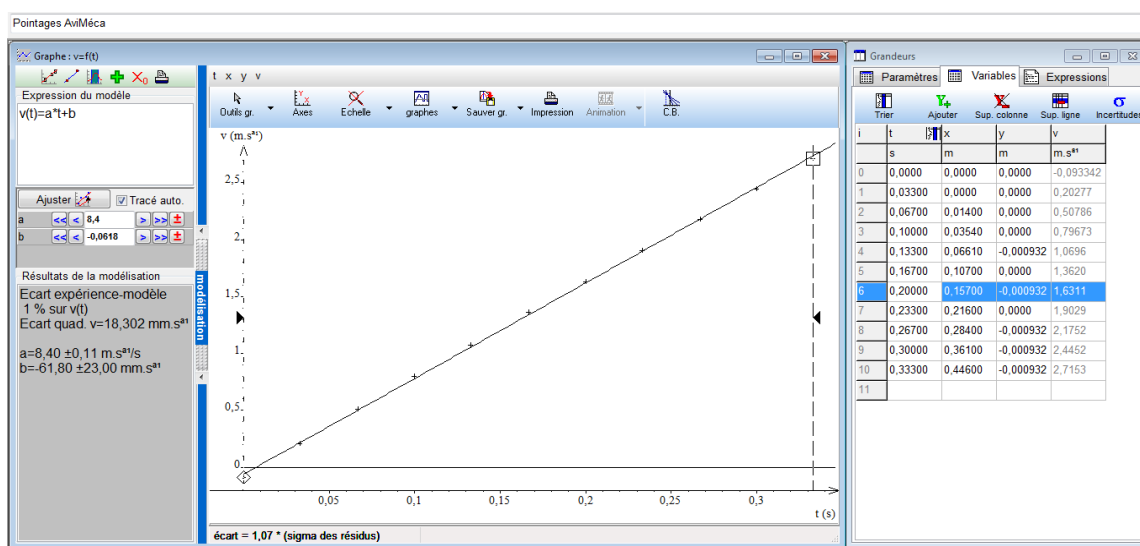
Le calcul de l'incertitude se fait en considérant une incertitude de 0,5 mm sur la mesure du diamètre de la tuyère d , une incertitude de $0,3 \text{ L.s}^{-1}$ pour le débit D et en utilisant la formule sur l'incertitude-type composée comme précédemment.

Pointage de la vidéo du mouvement du chariot à réaction



- L'axe du mouvement est l'axe x est horizontal vers la droite et l'axe y vertical vers le haut ;
- Le repère est le trait de 30,0 cm.
- La vidéo : Chariot.avi

Représentation graphique de la vitesse v en fonction du temps



Le calcul de la vitesse v se fait à partir de la coordonnée x (le mode de calcul de la dérivée est parabolique sur 5 points). On remarque que l'évolution $v = f(t)$ est sensiblement linéaire. Pour être dans les conditions de l'hypothèse (2), 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 $1,00 \text{ m.s}^{-1}$ (vitesse du chariot doit rester négligeable devant la vitesse d'éjection de l'air valant ici 50 m.s^{-1}). Le modèle donne $v(t) = 8,4t - 0,0618$ ce qui donne une durée de :

$$\Delta t = (1,00 + 0,0618)/8,4 = 0,126 \text{ s} \pm 1\%$$

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 $1,2 \text{ kg.m}^{-3}$, permettent de calculer la masse de d'air éjectée dans l'état final :

$$m = \rho \times D \times \Delta t = 1,2 \times 5,2 \cdot 10^{-3} \times 0,126 = 7,8 \pm 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ kg}$$

La quantité de mouvement de l'air éjecté à l'état final est donc de :

$$m \times u = 7,8 \cdot 10^{-4} \times 50 = 0,039 \pm 0,007 \text{ kg.m.s}^{-1}$$

Le calcul de l'incertitude se fait avec les incertitudes de 9 m.s^{-1} sur u et $0,05 \text{ g}$ sur m calculées précédemment et en utilisant la formule sur l'incertitude-type composée.

La masse du chariot à l'état final est égale à la masse à vide valant 31 g (mesurée au gramme près avec la balance utilisée) à laquelle on ajoute la masse des $4,0 \text{ L}$ d'air moins la masse $m = 0,78 \text{ g}$ d'air éjecté :

$$M = 31 + 4,0 \times 1,2 - 0,78 = 35 \pm 1 \text{ g}$$

La quantité de mouvement acquise par le chariot est donc de :

$$M \times v = 0,035 \times 1,00 = 0,035 \pm 0,001 \text{ kg.m.s}^{-1}$$

On peut cependant faire remarquer aux élèves que la différences entre les deux valeurs, de l'ordre de 10 % 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 facilement montrer ceci en faisant tourner les roues librement: celles ci finissent par s'arrêter plus où moins rapidement. Dans le cas de l'expérience réalisée ici, une attention toute particulière a été portée pour minimiser au maximum ces frottements ... On peut également indiquer que le modèle utilisé comporte des approximations, en toute rigueur il conviendrait d'en analyser l'influence avant de conclure.

Il est à prévoir que la vérification du bilan ne marche pas systématiquement et dans ce cas on peut envisager de prolonger l'activité en prenant en compte un terme de frottement dans le bilan de quantité de mouvement. Un fichier vidéo, Frotchar.avi, montre le chariot s'arrêtant sous l'action des seuls frottements aux niveaux des roues.