

MOTEUR THERMIQUE

Résumé

L'objectif de cette séance de travaux pratiques consiste à illustrer la notion de conservation de l'énergie totale à travers l'utilisation d'une machine thermique. Pour ce faire, de l'air considéré comme un gaz parfait est enfermé dans un réservoir et mis en contact alternativement avec deux sources de températures différentes avec lesquelles il échange de l'énergie sous forme de chaleur. Cet air est également en contact avec une paroi mobile (un piston) avec laquelle il échange de l'énergie sous forme de travail. Des masses sont disposées sur ce piston qui agit alors comme un monte-charge.

Mots-clés : pression, équilibre thermodynamique, gaz parfait, premier principe de la thermodynamique, bilans, rendement

1. Introduction

Vous allez étudier un moteur thermique, i.e. un système de conversion d'énergie d'origine thermique en énergie mécanique utilisable. Cette énergie utile est un travail qui résulte de la mise en oeuvre d'un cycle à 4 étapes (compression, chauffage, détente, refroidissement). Dans ce cas pratique, la fonction utile générée permet d'élever une masse, tel un ascenseur. Ce TP va vous permettre de vous familiariser avec la mise en oeuvre d'un cycle réel. Les résultats obtenus seront commentés à la lumière des différents biais expérimentaux constatés.

2. Présentation du dispositif

Le moteur thermique (Fig. 1) est constitué d'un cylindre transparent à l'intérieur duquel se déplace un piston de diamètre $D = 32.5$ mm. Une plateforme est attachée au dessus du piston afin d'y déposer les masses à soulever. La partie inférieure du cylindre est reliée par un tube flexible (de diamètre intérieur $D_t = 3$ mm et de longueur $L_t = 480$ mm) à un réservoir mobile (de diamètre intérieur $D_r = 40$ mm et de longueur $L_r = 160$ mm). L'air contenu sous le piston, dans le tube flexible et dans le réservoir mobile constitue un système thermodynamique fermé, i.e. l'ensemble est hermétique aux transferts de masse. Nous savons depuis le second principe de la thermodynamique qu'un cycle ne peut être moteur que si le système est en contact avec deux sources de températures différentes. Le réservoir mobile peut donc être plongé alternative-

ment dans deux grands bacs remplis d'eau faisant office de source froide et de source chaude.

2.1. Métrologie et acquisition des données

Trois types de capteurs permettent les mesures simultanées de la pression, de la température et du déplacement du piston. Chacun des capteurs produit une tension dont le signal est une application affine de la grandeur mesurée. Chacune des tensions est lue par un système d'acquisition, qui réalise la conversion analogique/numérique permettant l'acquisition sur un PC. Les capteurs et les raccords rapides reliant les tubes flexibles au cylindre sont tout particulièrement fragiles. Il est donc important de **procéder avec précaution** lors de vos manipulations.

La lecture et l'analyse des données est effectuée via un programme installé sous Windows, DataStudio¹. Toute la phase d'étalonnage a été réalisée au préalable et intégrée au logiciel. Vous aurez ainsi directement accès aux mesures de la pression (en kPa), de la température (en °C) et du volume (en m³), ce dernier étant estimé à partir de la mesure du déplacement du piston. Vous verrez ces grandeurs apparaître dans le menu "Données".

Pour visualiser en ligne l'évolution de n'importe quelle grandeur, il suffit de la faire glisser depuis le

1. Un raccourci appelé "version de base" devrait se trouver sur le bureau du PC. Faites un copier-coller de cette version en renommant la nouvelle avec vos initiales.

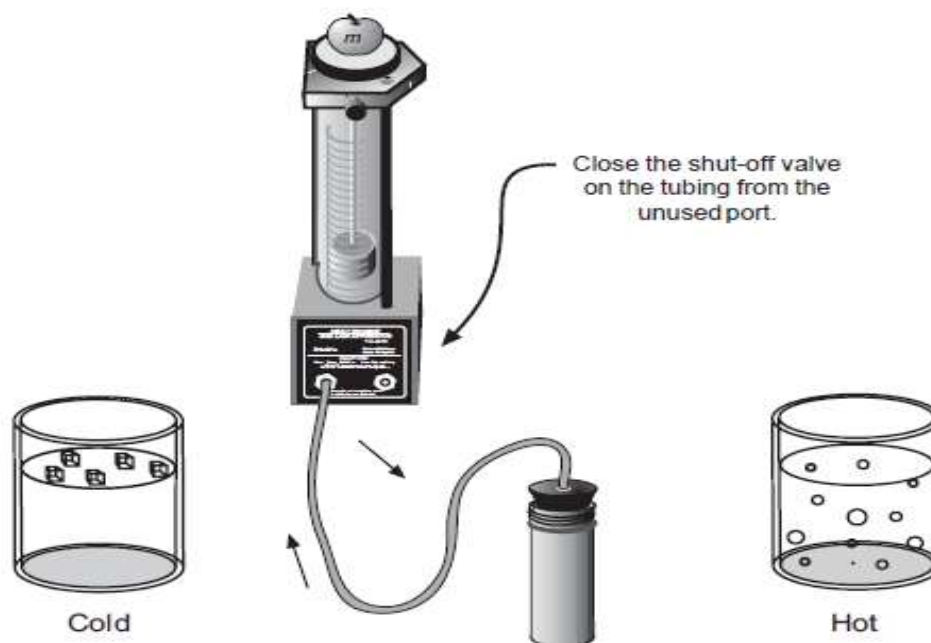


FIGURE 1 – Dispositif expérimental.

menu “Données” vers l’onglet *graphique* du menu “Affichages”, puis de cliquer sur “Démarrer”.

2.2. Démarrage du TP

Placer le réservoir en pyrex rempli d’eau sur la plaque chauffante et fixer la consigne à la valeur 370. Plonger une des sondes de température (canal B ou C) dans l’eau et suivre graphiquement son évolution. Lorsque la température atteint 50 °C, établir la consigne à 150 à l’aide du potentiomètre tout en poursuivant l’acquisition.

3. Eléments d’analyse théorique

Pour tout système fermé, le premier principe de la thermodynamique postule l’existence d’une grandeur d’état extensive, appelée énergie interne et notée U , contribuant à l’énergie totale E du système, telle que la variation de cette énergie totale au cours d’une transformation infinitésimale subie par le système soit la somme des échanges d’énergie sous forme de chaleur δQ et de travail δW entre le système et son extérieur :

$$dE = d(U + E_c + E_p) = \delta Q + \delta W$$

où E_p et E_c sont les énergies potentielle et cinétique macroscopiques du système.

En considérant les seules forces de pression agissant sur le système, le travail élémentaire δW d’origine hydrostatique échangé par le système avec son extérieur est :

$$\delta W = -p_{ext} dV.$$

Cette expression peut s’écrire

$$\delta W = -p dV$$

pour des transformations lentes (quasi-statiques) en absence de forces de frottements, i.e. pour des transformations réversibles. En première approximation, toutes les transformations sont ici considérées réversibles.

3.1. Pression du gaz

Il est proposé dans un premier temps de revenir sur la notion de pression. Vous devrez à l’issue de cette étape être capables de prédire son évolution (de manière quantitative) au cours de chaque transformation élémentaire du cycle étudié lors de ce TP.

1. A partir d’un bilan des forces appliqué au système piston + masse à l’équilibre, établir la relation liant la pression du gaz contenu sous le piston à la masse ajoutée.
2. Etablir la pression atmosphérique dans le réservoir. Il suffit pour cela de déconnecter un raccord rapide situé à la base du cylindre. Reconnectez-le afin de rendre le système hermétique.
3. Le système est alors “à vide” (c’est à dire sans masse additionnelle posée sur le plateau). Affichez graphiquement la pression du gaz puis lancez l’acquisition. Par intervalles de 15 s, ajoutez 3 masses différentes².
4. Comment la pression mesurée évolue-t-elle avec la masse ajoutée ? Vérifiez que la mesure obtenue est conforme à l’estimation théorique.

2. afin d’éviter de brusques variations de pression du gaz, il est conseillé lors de chaque manipulation des masses de maintenir le piston immobile en utilisant la vis de serrage prévue à cet effet

3.2. La chaîne de conversion énergétique

Une fois comprise la façon dont la pression est déterminée dans le gaz, il est indispensable de conclure cette analyse théorique préliminaire en appréhendant la chaîne de conversion d'énergie à l'oeuvre dans cette machine thermique.

5. En considérant le modèle thermoélastique cylindre + piston, montrez que l'énergie utile nécessaire à l'élévation du piston sur lequel repose une masse m provient du travail des forces de pression fourni par le gaz chauffé.

4. Mise en pratique

Nous allons maintenant tenter de mettre en oeuvre un cycle thermodynamique capable de fournir l'énergie nécessaire à l'élévation d'un système massif.

4.1. Fonctionnement à vide

On considère dans un premier temps un fonctionnement sans masse ajoutée.

- Positionner le piston 20 mm au dessus de la base du cylindre tout en établissant la pression du gaz à la pression atmosphérique, le réservoir étant plongé dans la source froide. S'assurer de l'étanchéité du système. Utiliser l'affichage graphique du diagramme (p-V). Lancer l'acquisition.
 - Plonger ensuite le réservoir dans la source chaude. Puis, une fois la position du piston établie, plonger à nouveau le réservoir dans la source froide.
6. Comment la pression a-t-elle évoluée au cours de ces deux transformations ?
 7. Quel est le travail fourni par le gaz ?
 8. Appliquer le premier principe de la thermodynamique au système gaz. Quelle est la condition sur les échanges de chaleur entre le gaz et les deux sources pour que le travail échangé sur un cycle soit strictement négatif, c'est à dire qu'il soit moteur ?

4.2. Fonctionnement en charge

Nous allons maintenant étudier deux nouveaux cycles par l'ajout de deux masses différentes et obtenir expérimentalement leur tracé selon le protocole suivant :

- Positionner le piston 20 mm au dessus de la base du cylindre tout en établissant la pression du gaz à la pression atmosphérique, le réservoir étant plongé dans la source froide. S'assurer de l'étanchéité du système. Utiliser l'affichage graphique du diagramme (p-V). Lancer l'acquisition.
- En utilisant la vis de blocage du piston, disposer une masse sur le plateau. Relacher le plateau. Relancer le cylindre, la nouvelle hauteur du piston.

- Mettre le système gaz en contact de la source chaude. Relever la nouvelle hauteur du piston sur le cylindre.
 - En utilisant la vis de blocage du piston, extraire la masse du plateau. Relacher le piston. Relever la nouvelle hauteur du piston sur le cylindre.
 - Remettre le système gaz en contact de la source froide.
 - Arrêter l'acquisition.
 - Reproduire le même protocole pour le seconde masse.
9. De quelles natures sont les transformations thermodynamiques obtenues ?

5. Analyses et discussions

5.1. Bilan énergétique

Pour chacun des cycles étudiés (3 *a priori*) :

10. Déterminez le travail du cycle.
11. Estimez les quantités de chaleur échangées au cours des quatre transformations élémentaires.
12. Estimez le rendement énergétique de chaque cycle.
13. Comparez au rendement théorique du cycle de Carnot qui serait obtenu entre les mêmes sources froide et chaude.
14. Proposez une manipulation permettant d'améliorer les rendements des cycles mesurés.

5.2. Biais expérimentaux

L'analyse théorique de ces cycles repose sur un certain nombre d'hypothèses plus ou moins restrictives, parmi lesquelles :

- toutes les évolutions élémentaires sont supposées réversibles,
- le comportement de l'air peut être modélisé par la loi du gaz parfait,
- le système thermodynamique étudié est fermé,
- les forces de frottements demeurent négligeables.

On se propose ici de discuter de la validité de certaines de ces hypothèses et de prendre du recul par rapport aux mesures qui viennent d'être faites. Quels biais expérimentaux susceptibles de fausser notre analyse auraient pu nous échapper ?

15. Imaginer une manipulation permettant de vérifier que le système peut rigoureusement être qualifié de fermé.
16. Représenter pour un cycle de votre choix le rapport pV/T en fonction du volume.
17. Imaginer une expérience permettant d'estimer le temps de réponse caractéristique de la sonde de température dans l'air.
18. Quel est le temps caractéristique d'une transformation élémentaire ? Qu'en déduisez vous ?

n° essai	masse ajoutée [g]	T_{SF} [°C]	T_{SC} [°C]	Q_{SF} [J]	Q_{SC} [J]	W_{cycle} [J]	η_{cycle}
	0						

FIGURE 2 – Tableau récapitulatif des résultats.