

## Détermination du rendement du moteur à air chaud comme machine frigorifique

### Objectifs expérimentaux

- Mesure de la chaleur  $Q_2$  prélevée de la culasse à chaque rotation.
- Mesure de la chaleur  $Q_1$  fournie à l'eau de refroidissement à chaque rotation.
- Détermination du rendement (facteur de puissance)  $\eta$  de la machine frigorifique.

### Notions de base

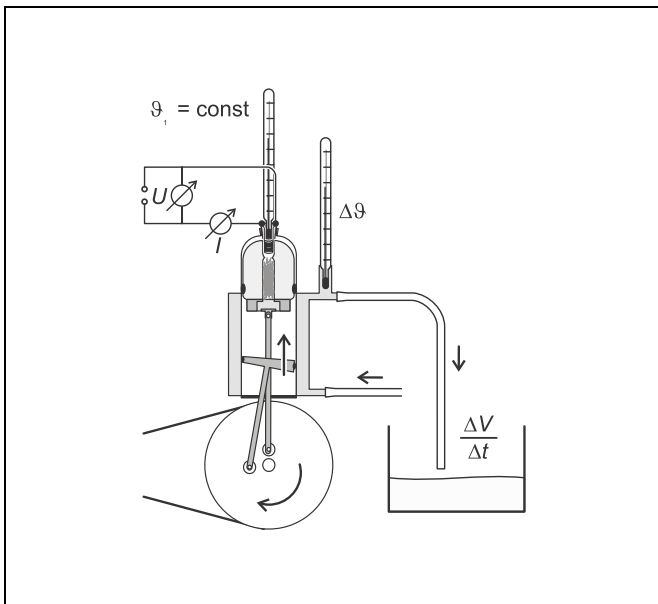
En tant que machine frigorifique, le moteur à air chaud prélève la chaleur  $Q_2$  de la culasse à chaque rotation et cède la chaleur  $Q_1$  à l'eau de refroidissement. Etant donné que le transfert de la chaleur du réservoir le plus froid vers le réservoir le plus chaud s'effectue inversement à la direction spontanée, le travail mécanique  $W$  doit être mis en œuvre à chaque rotation. La machine frigorifique est donc en principe un moteur thermique qui fonctionne en sens inverse. En l'absence de pertes, on a le rapport suivant pour les grandeurs qui interviennent:

$$Q_1 = Q_2 + W \quad (I).$$

Le rendement (ou mieux, le facteur de puissance) d'une machine frigorifique est défini comme suit:

$$\eta = \frac{Q_2}{W} \quad (II)$$

Détermination du rendement de la machine frigorifique



Pour la détermination du facteur de puissance, il convient de lancer le volant moteur du moteur à air chaud en marche à droite avec un moteur électrique, à une vitesse de rotation  $f$ , et de déterminer par une mesure de compensation la puissance de chauffage électrique qui maintient la température de la culasse à la température ambiante. Le travail électrique accompli à chaque rotation correspond à la chaleur  $Q_2$  prélevée de la culasse de la machine frigorifique. On a donc

$$Q_2 = \frac{U \cdot I}{f} \quad (III)$$

$U$ : tension de chauffage,  $I$ : courant de chauffage

On mesure en supplément la hausse de température  $\Delta\theta$  dans l'eau de refroidissement et on détermine la puissance cédée à l'eau de refroidissement

$$P = c \cdot \rho \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \cdot \Delta\theta \quad (IV)$$

$c = 4,185 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ : chaleur spécifique de l'eau,

$\rho = 1 \text{ g cm}^{-3}$ : densité de l'eau

$\frac{\Delta V}{\Delta t}$ : débit-volume de l'eau de refroidissement

Il s'ensuit la chaleur  $Q_1$  cédée à l'eau de refroidissement à chaque rotation:

$$Q_1 = \frac{P}{f} \quad (V).$$

$f$ : vitesse de rotation du moteur à air chaud

La différence  $W' = Q_1 - Q_2$  des chaleurs ainsi déterminées est tout le travail mécanique à mettre en œuvre pour une rotation. Elle comprend aussi le travail mécanique  $W_R$  à mettre en œuvre pour vaincre le frottement du piston et qui occasionne un réchauffement additionnel de l'eau de refroidissement (voir expérience P2.6.2.1). Le travail mécanique à mettre en œuvre pour le cycle, donc pour le transfert de la chaleur du réservoir le plus froid vers le réservoir le plus chaud, est par conséquent donné par

$$W = Q_1 - Q_2 - W_R \quad (VI).$$

**Matériel**

|  |         |
|--|---------|
| 1 moteur à air chaud . . . . .                     | 388 182 |
| 1 lot d'accessoires pour le moteur à air chaud     | 388 221 |
| 1 moteur d'expériences . . . . .                   | 347 35  |
| 1 unité de commande et de réglage . . . . .        | 347 36  |
| 1 transformateur variable TBT, type S . . . . .    | 521 35  |
| 1 multimètre METRAMax 2 . . . . .                  | 531 100 |
| 1 multimètre METRAMax 3 . . . . .                  | 531 712 |
| 1 compteur P . . . . .                             | 575 45  |
| 1 barrière lumineuse, lumière infrarouge . . . . . | 337 46  |
| 1 transformateur, 6 V~, 12 V~/30 VA . . . . .      | 562 73  |
| 1 câble adaptateur, à 4 pôles, 1,5 m . . . . .     | 501 18  |
| 1 thermomètre, -10° à + 40 °C . . . . .            | 382 36  |
| 1 bécher en plastique, 1000 ml . . . . .           | 590 06  |
| 1 chronomètre manuel II, 60 s/30 min . . . . .     | 313 17  |
| 1 pied en V, petit modèle . . . . .                | 300 02  |
| 2 tiges, 25 cm . . . . .                           | 300 41  |

Câbles d'expérience (en partie avec une section de 2,5 mm<sup>2</sup>)

*Supplément nécessaire:*

|   |         |
|---|---------|
| Récipient d'eau ouvert (au moins 10 l)      |         |
| 1 pompe submersible 12 V . . . . .          | 388 181 |
| 1 alimentation TBT . . . . .                | 522 16  |
| 2 tuyaux en silicone Ø int. 7 × 1,5 mm, 1 m | 667 194 |

ou

arrivée et écoulement de l'eau de refroidissement

**Alimentation en eau de refroidissement:**

- Verser au moins 10 l d'eau dans le récipient d'eau ouvert et attacher la pompe submersible.
- Brancher la sortie de la pompe submersible à l'arrivée de l'eau de refroidissement du moteur à air chaud et canaliser l'écoulement de l'eau de refroidissement vers le récipient d'eau.
- Brancher la pompe submersible à l'alimentation TBT.

ou

- Brancher l'arrivée de l'eau de refroidissement du moteur à air chaud au robinet d'eau et canaliser l'écoulement de l'eau de refroidissement vers le déversoir.

**Montage du « thermomètre avec chauffage »:**

- Tirer le filament chauffant du «thermomètre avec chauffage» (d) (de 388 221) des tiges de contact (voir mode d'emploi 388 221).
- Dévisser le joint fileté du «couvercle pour culasse à joint fileté» et visser le «thermomètre avec chauffage».
- Remettre le filament chauffant sur les tiges de contact et veiller à ce qu'il n'entre pas en contact avec le corps en verre du thermomètre.
- Prudemment monter le couvercle pour culasse sur le cylindre du moteur à air chaud.
- Faire tourner le volant moteur du moteur à air chaud et s'assurer que le filament chauffant n'entre jamais en contact avec le piston de refoulement du moteur à air chaud, quelle que soit sa position.
- En faisant tourner le volant moteur, s'assurer en outre de l'étanchéité du moteur à air chaud; éventuellement fermer le collier de serrage pour le capteur de pression avec un bouchon.
- Brancher le transformateur variable TBT, type S, en association avec un ampèremètre-voltmètre (plage de mesure 10 A) au thermomètre avec chauffage.

**Commande:**

- Monter le moteur électrique et le brancher à l'unité de commande et de réglage.
- Placer la courroie d'entraînement sur le volant moteur et la poulie de commande et la tendre en faisant pivoter le moteur électrique.

**Mesure de la fréquence:**

- Apposer sur le vilebrequin le disque à trous inclus aux accessoires pour le moteur à air chaud.
- Monter la barrière lumineuse sur le matériel support et l'orienter vers un trou du disque immobile.
- A l'aide d'un câble adaptateur à quatre pôles, brancher la barrière lumineuse à la sortie 6 V du transformateur pour l'alimentation en tension (connecteur noir) et à l'entrée de mise en marche du compteur P pour la mesure de la fréquence (connecteurs rouge et gris).
- Relier l'entrée de mise en marche à l'entrée d'arrêt, positionner le commutateur sur « f » et enclencher le compteur P.

**Mesure du débit de l'eau de refroidissement:**

- Garder le bécher en plastique et le chronomètre manuel à portée de la main.

**Montage**

Le montage expérimental est représenté sur la fig. 1.

**Mesure de la température dans l'eau de refroidissement:**

- Dévisser le raccord à filetage GL14 de l'écoulement de l'eau de refroidissement de la culasse et monter l'adaptateur pour température (c) fourni avec les accessoires pour le moteur à air chaud (voir mode d'emploi 388 221).
- Introduire le thermomètre, -10° à + 40 °C, dans l'adaptateur pour température et le fixer avec le raccord à filetage GL18.

**Conseils de sécurité**

Les éléments en verre du moteur à air chaud ne doivent pas être soumis à une trop grande sollicitation thermique.

- Respecter les instructions spécifiées dans le mode d'emploi du moteur à air chaud.
- Ne pas faire fonctionner le moteur à air chaud sans eau de refroidissement et s'assurer du bon fonctionnement du circuit d'eau de refroidissement.
- Veiller à ce que la température de l'eau de refroidissement alimentée ne dépasse pas 30 °C.

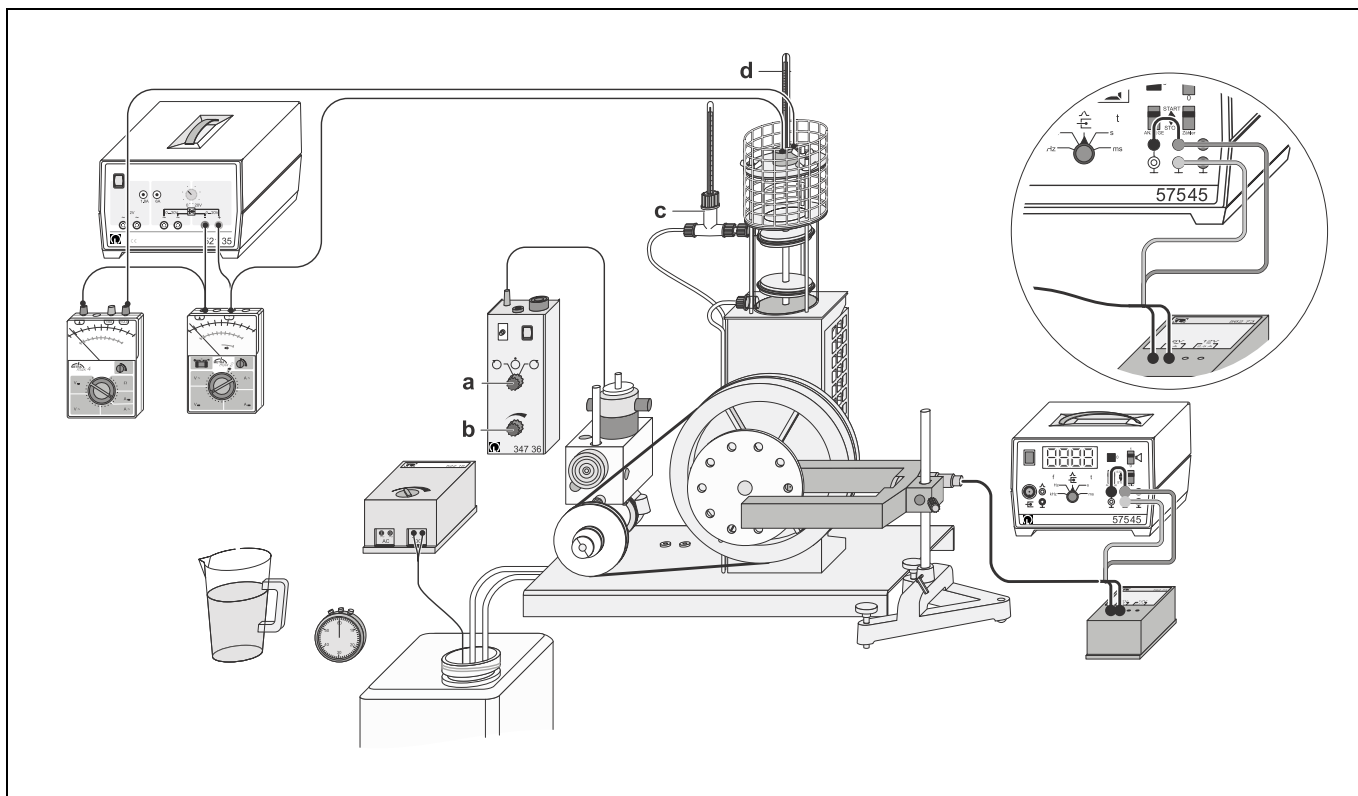


Fig. 1 Montage expérimental pour la détermination du rendement du moteur à air chaud comme machine frigorifique

## Réalisation

### D'abord:

- Enclencher l'alimentation en eau de refroidissement (pour ce faire, régler par ex. l'alimentation TBT pour la pompe submersible sur la position 2), vérifier le débit et attendre que l'eau reflue par le tuyau d'écoulement.
- Amener le tuyau d'écoulement dans le bécher en plastique et déterminer le débit-volume  $\Delta V$  de l'eau de refroidissement par intervalle de temps  $\Delta t$  (voir fig. 2).
- Mesurer la température  $\vartheta_1$  dans la culasse.
- Placer le sélecteur du sens de rotation (a) en position centrale (arrêt), en faire autant avec le sélecteur de la vitesse de rotation (b) puis mettre l'unité de commande et de réglage en marche.
- Mesurer la température  $\vartheta$  de l'eau de refroidissement toutes les 2 min et attendre que l'évolution soit clairement extrapolable.

### Ensuite:

- Lancer le moteur à air chaud en marche à droite à l'aide du sélecteur du sens de rotation (dans le sens horaire) puis mesurer la vitesse de rotation du moteur à air chaud.

La vitesse de rotation du moteur s'obtient à partir de la fréquence mesurée et du nombre de trous du disque à trous.

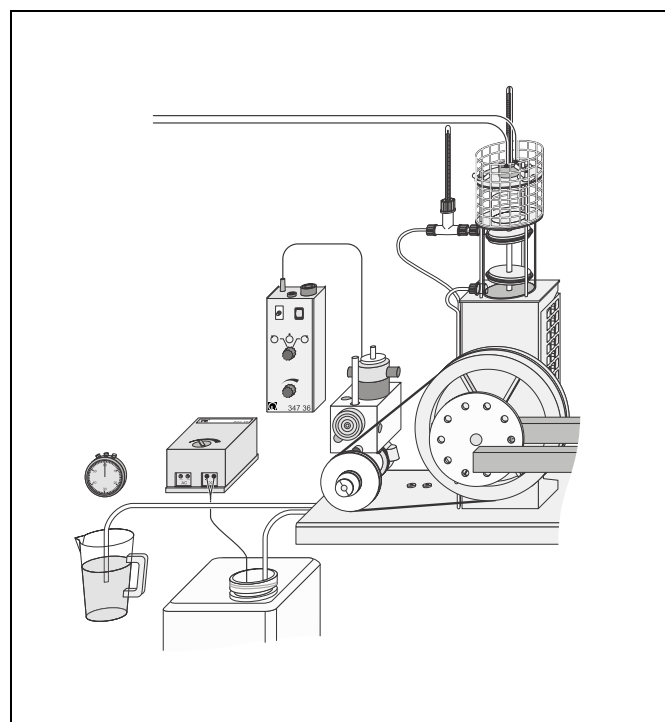
### Simultanément:

- Mettre le transformateur TBT, type S en route et sélectionner la tension de chauffage  $U$  de manière à ce que la température  $\vartheta_1$  reste constante malgré le fonctionnement du moteur à air chaud en machine frigorifique.
- Eventuellement ajuster la tension de chauffage  $U$  et la noter avec l'intensité du courant de chauffage  $I$ .

### Et:

- Continuer de mesurer la température  $\vartheta$  de l'eau de refroidissement toutes les 2 minutes, observer l'élévation de température et attendre que la valeur maximale soit atteinte.

Fig. 2 Détermination du débit-volume  $\Delta V$  par unité de temps  $\Delta t$



**Pour finir:**

- Arrêter la marche à droite du moteur sans cesser d'observer l'évolution de la température de l'eau de refroidissement.
- Déterminer le changement de température  $\Delta\vartheta$  de l'eau de refroidissement et le noter.

*Note:*

*Si le volume de la réserve d'eau de refroidissement est trop faible, la température dans le réservoir augmentera elle aussi. Le changement de température  $\Delta\vartheta$  mesuré doit alors être corrigé en conséquence.*

- Régler une nouvelle vitesse de rotation avec le sélecteur de la vitesse de rotation (a) et recommencer la mesure.

**Exemple de mesure**

Débit-volume de l'eau de refroidissement: 780 cm<sup>3</sup> en 5 min

Température  $\vartheta_1$  dans la culasse: 20,0 °C.

Tableau 1: Tension de chauffage  $U$ , courant de chauffage  $I$  et élévation de la température  $\Delta\vartheta$  de l'eau de refroidissement en fonction de la vitesse de rotation  $f$ .

| $\frac{f}{s^{-1}}$ | $\frac{U}{V}$ | $\frac{I}{A}$ | $\frac{\Delta\vartheta}{^\circ C}$ |
|--------------------|---------------|---------------|------------------------------------|
| 2,7                | 7,5           | 1,7           | 2,4                                |
| 2,9                | 7,6           | 1,8           | 2,5                                |
| 3,2                | 8,0           | 1,9           | 2,7                                |
| 3,4                | 8,2           | 2,0           | 2,9                                |
| 3,7                | 8,6           | 2,1           | 3,2                                |
| 4,0                | 9,0           | 2,2           | 3,5                                |

**Exploitation et résultat**

Tableau 2: Chaleur  $Q_1$  cédée à l'eau de refroidissement, travail de frottement du piston  $W_R$ , chaleur  $Q_2$  prélevée de la culasse à chaque rotation et travail mécanique  $W$  pour le cycle en fonction de la vitesse de rotation  $f$ .

| $\frac{f}{s^{-1}}$ | $\frac{Q_1}{J}$ | $\frac{W_R}{J}$ | $\frac{Q_2}{J}$ | $\frac{W}{J}$ |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| 2,7                | 9,7             | 1,1             | 4,7             | 3,9           |
| 2,9                | 9,4             | 1,1             | 4,7             | 3,6           |
| 3,2                | 9,2             | 1,0             | 4,8             | 3,4           |
| 3,4                | 9,3             | 1,0             | 4,8             | 3,5           |
| 3,7                | 9,4             | 1,0             | 4,9             | 3,5           |
| 4,0                | 9,5             | 1,0             | 5,0             | 3,5           |

Tableau 3: Rendement (facteur de puissance)  $\eta$  de la machine frigorifique en fonction de la vitesse de rotation  $f$ .

| $\frac{f}{s^{-1}}$ | $\eta$ |
|--------------------|--------|
| 2,7                | 1,2    |
| 2,9                | 1,3    |
| 3,2                | 1,4    |
| 3,4                | 1,4    |
| 3,7                | 1,4    |
| 4,0                | 1,4    |

Le tableau 2 comporte la chaleur  $Q_1$  (calculée selon (V)) cédée à chaque rotation à l'eau de refroidissement, le travail de frottement du piston  $W_R$  (prélevé de l'expérience P2.6.1.1), la chaleur  $Q_2$  (calculée selon (III)) prélevée de la culasse à chaque rotation et le travail mécanique  $W$  pour le cycle (calculé selon (VI)). La fig. 3 illustre sous forme de graphique la subordination des deux dernières grandeurs à la vitesse de rotation  $f$ .

Le facteur de puissance  $\eta$  est calculé à partir de ces deux grandeurs selon l'équation (II). Il est constant dans le cadre de la précision de mesure pour des vitesses de rotation au-delà de  $f = 3,0 s^{-1}$  (voir tab. 3), mais est nettement inférieur aux valeurs atteintes avec les machines frigorifiques utilisées dans la pratique.

Fig. 3 Chaleur  $Q_2$  (●) et travail mécanique  $W$  (■) en fonction de la fréquence du moteur  $f$

