

Machines thermiques

Buts du TP

Étude des lois régissant la conversion de la chaleur en énergie mécanique directement utilisable, et inversement :

1. Vérification des premier et second principes, qui permet d'aboutir à l'énoncé de Lord Kelvin concernant les moteurs thermiques, grâce à l'utilisation d'un convertisseur thermoélectrique.
2. Mise en évidence des lois de Carnot sur les machines thermiques et notion d'énergie utilisable.

Rappels Théoriques:

Principes de la thermodynamique

- Le principe zéro de la thermodynamique concerne la notion d'équilibre thermique et est à la base de la thermométrie. Si deux systèmes sont en équilibre thermique avec un troisième, alors ils sont aussi ensemble en équilibre thermique.
- Le premier principe de la thermodynamique ou le principe de conservation de l'énergie affirme que l'énergie est toujours conservée.
- Le deuxième principe de la thermodynamique ou principe d'évolution des systèmes affirme la dégradation de l'énergie : l'énergie ne peut pas passer spontanément d'une zone froide à une zone chaude. Le second principe en forme d'énoncé de Kelvin: Le procédé ne peut pas donner un seul résultat: l'absorption de chaleur est la transformation complète de cette énergie au travail. (voir aussi un article en Wikipedia - http://fr.wikipedia.org/wiki/Deuxi%C3%A8me_principe_de_la_thermodynamique).

Rendement

Le théorème de Carnot a pour but de préciser le rendement d'une machine ditherme dans le cas d'un système quelconque.

Théorème : *Le rendement d'un moteur réel est inférieur au rendement d'un moteur réversible fonctionnant entre les deux mêmes sources. Le rendement du moteur réversible, qui ne dépend que des températures T_1 de la source froide et T_2 de la source chaude, et non de l'agent de la transformation, a pour expression :*

$$e_{\text{Carnot}} = \frac{T_H - T_C}{T_H} \quad (1)$$

En effet, dans le cas de transformations réversibles, l'inégalité de Carnot-Clausius devient une égalité, ce qui s'exprime par :

$$\frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_C}{T_C} = 0 \quad (2)$$

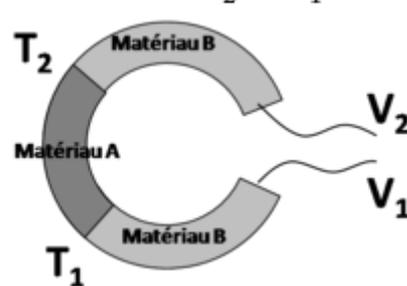
où Q_C et Q_H sont les quantités de chaleur reçues par le système de la part des sources froide (T_C) et chaude (T_H).

Thermoélectricité

Découvert puis compris au cours du XIXe siècle grâce aux travaux de Seebeck, Peltier ou encore Lord Kelvin, l'effet thermoélectrique est un phénomène physique présent dans certains matériaux : il y lie le flux de chaleur qui les traverse au courant électrique qui les parcourt. Cet effet est à la base d'applications, dont très majoritairement la thermométrie, puis la réfrigération (ex. module Peltier) et enfin, très marginalement, la génération d'électricité (aussi appelée « thermopile »).

Coefficient Seebeck

Une différence de température $dT=T_2-T_1$ entre les jonctions de deux matériaux a et b implique une différence de potentiel électrique $dV=V_2-V_1$ selon :

$$S_{ab} = \frac{V_2 - V_1}{T_2 - T_1}$$


Le coefficient Seebeck, également appelé « Pouvoir Thermoélectrique » s'exprime en $V.K^{-1}$ (ou plus généralement en $\mu V.K^{-1}$ au vu des valeurs de ce coefficient dans les matériaux usuels).

Coefficient Peltier

Dans le cas de l'effet Peltier, un courant électrique I est imposé à un circuit composé de deux matériaux, ce qui entraîne une libération de chaleur Q à une jonction et une absorption de chaleur à l'autre jonction, selon :

$$\Pi_{ab} = \frac{Q}{I}$$

Relations entre les coefficients Seebeck et Peltier

Lord Kelvin a montré que les trois coefficients Seebeck et Peltier ne sont pas indépendants les uns des autres. Ils sont liés par les deux relations :

$$\Pi_{ab} = S_{ab}T$$

Partie A – Le second principe et l'énoncé de Kelvin

Dans cette partie, on utilise le convertisseur thermoélectrique (modèle PASCO TD 8550A) pour démontrer la seconde loi de la thermodynamique. Cet appareil permet de montrer qu'un différentiel de température est absolument nécessaire pour pouvoir extraire une énergie utilisable.

Description du convertisseur

Cet appareil est constitué de semi-conducteurs thermoélectriques permettant de convertir la chaleur en énergie électrique. Ceux-ci sont reliés à un petit moteur électrique muni d'une hélice permettant de mettre en évidence l'existence d'une différence de potentiel.

Le convertisseur comporte par ailleurs un interrupteur qui autorise son utilisation soit comme moteur thermique (position A) $\Delta T \Rightarrow E$, soit comme extracteur d'énergie (position B) $E \Rightarrow \Delta T$.

Expérience

Matériel utilisé :
- Convertisseur TD 8550A
- Générateur de courant

- 2 béchers
- Plaque chauffante
- eau, glaçons

A.1) Utilisation en moteur thermique

Si on place une jambe du convertisseur dans de l'eau glacée, l'autre dans de l'eau chaude, l'hélice se met à tourner.

- 1) Quel est l'effet d'une variation de température de l'eau chaude ? Conclusion ?
- 2) Que se passe-t-il si on mélange dans les deux béchers de l'eau glacée et de l'eau plus chaude ? Conclusion ?

A.2) Utilisation en extracteur d'énergie

3) Nous sortons le convertisseur de l'eau. Faites passer un courant à travers l'appareil grâce aux bornes (5V/3A). Inverser alors l'interrupteur. Que se passe-t-il ? Conclusion ?

A-3) Conclusion

- 4) Quelles sont les lois que vous pouvez énoncer au vu des expériences précédentes ? Énoncer la loi de Lord Kelvin qui permet ensuite d'aboutir au théorème de Carnot sur les machines thermiques (partie suivante).
- 5) Expliquer quelles transformations d'énergie nous pouvons démontrer avec ce convertisseur.

Partie B – Principes de Carnot

Cette partie permet une réelle approche des lois de Carnot sur les moteurs et les pompes thermiques grâce à l'utilisation d'un appareil d'efficacité thermique PASCO TD-8564. En général, il n'y a aucun moyen de réaliser en laboratoire de moteur à chaleur idéal. Cet appareil permet de décrire les principes de Carnot de façon simple.

Description de l'appareil d'efficacité thermique

Cet appareil (voir la figure au-dessous et le manuel en anglais) peut fonctionner soit comme un moteur à chaleur convertissant la chaleur en travail ou à l'inverse comme une pompe à chaleur transférant la chaleur d'une source froide vers une source chaude.

L'élément clé est un dispositif Peltier à semi-conducteur qui transforme l'énergie thermique en énergie électrique.

Le système est intercalé entre deux blocs d'aluminium. L'un est refroidi par l'eau en utilisant la pompe intégrée. L'autre est réchauffé électriquement.

Un thermistor fixé dans chaque bloc permet de mesurer la température avec un ohmmètre digital.

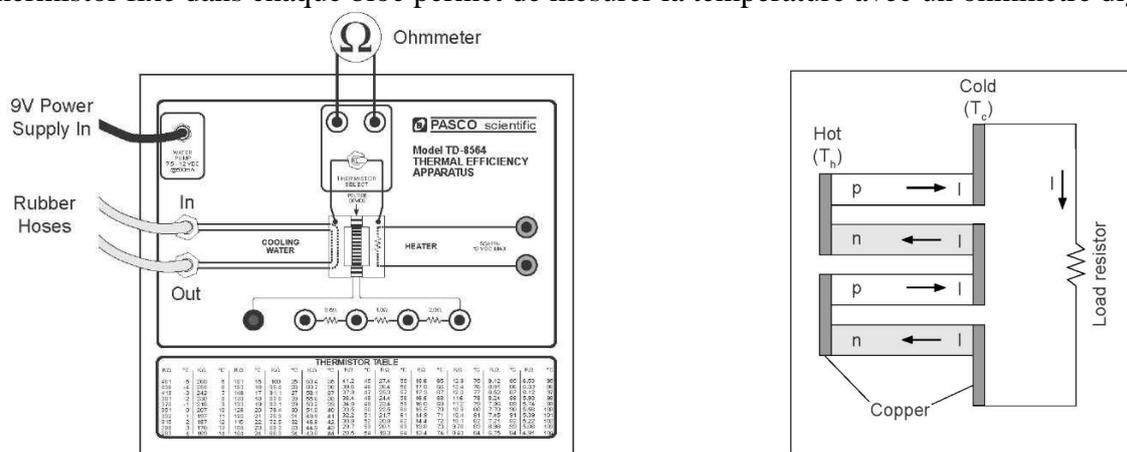


Figure 1. Appareil d'efficacité thermique PASCO TD-8564 et schéma des thermocouples de Peltier.

a) Fonctionnement en pompe à chaleur

Le fonctionnement est celui d'un moteur inversé et cette fois on utilise un travail (tension d'entrée V_w) pour prélever de la chaleur du réservoir froid vers le réservoir chaud. Dans ce cas, on définit plutôt un coefficient de performance K . Le schéma de fonctionnement est présenté sur la Fig. 3.

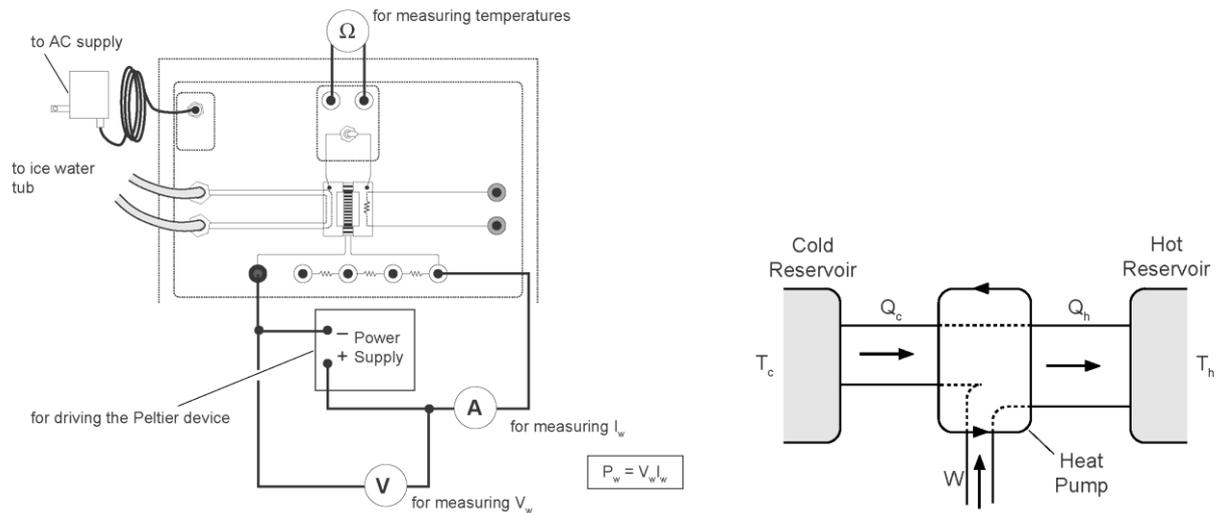


Figure 2. Montage et diagramme de fonctionnement d'une pompe à chaleur. Le coefficient de performance et le coefficient théorique maximum peuvent être définis.

b) Fonctionnement en moteur à chaleur

Il utilise la différence de température entre les deux réservoirs de chaleur pour produire du travail. Le travail est ici obtenu sous forme de courant électrique mesurable sous forme de tension aux bornes d'une résistance de charge. Le schéma de principe est représenté ci-après sur la Fig.3. La puissance de la source chaude est donnée par $P_h = V_h I_h$. La puissance de sortie est donnée par $P_w = V_w^2 / R_w$, R_w c'est la résistance de la charge.

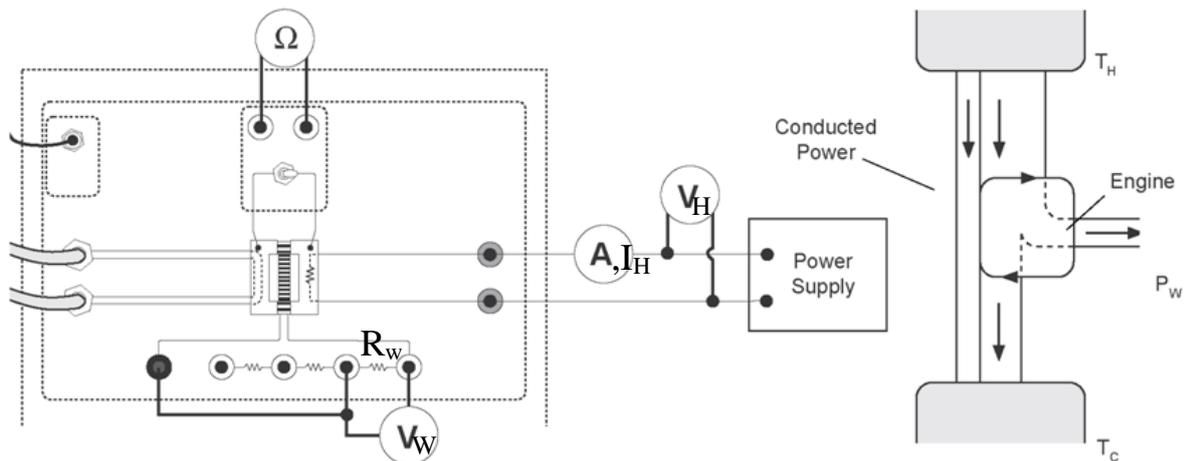


Figure 3. Montage et diagramme de fonctionnement d'un moteur à chaleur. Efficacité réelle et efficacité de Carnot peuvent être déterminées chaque série de températures.

- 6) Donner l'expression du rendement ou efficacité réelle comme une fonction des puissances.
- 7) Exprimer l'efficacité idéale en fonction des températures des sources.

Expérience B.1. Le rendement de moteur à chaleur et la différence des températures

Dans l'expérience qui suit, on se propose de déterminer les efficacités réelles et de Carnot (idéale) du moteur thermique en fonction des températures. Le montage à effectuer est représenté sur Fig.3. Nous prenons la résistance de charge $R_w=2\Omega$.

N. B. Le voltage (Power Supply) ne doit pas excéder 12V. La température du réservoir chaude ne doit pas dépasser 80 °C. Utiliser un bain d'eau glacée comme source froide. Après mise en équilibre thermique du système (5-10 minutes), réaliser une étude complète de la variation des efficacités en fonction de la température de la source chaude (4-6 mesures).

- 8) Relever les températures des réservoirs chaude et froide, la tension et le courant d'alimentation du réservoir chaude, ainsi que la tension de sortie V_w remplir le tableau 1.1.

N exp	T_H (k Ω)	T_C (k Ω)	T_H (°C)	T_C (°C)	V_H	I_H	V_w
...							

Tableau 1.1. Valeurs mesurées

Faire ces mesures pour les températures différentes du réservoir chaud. Pour modifier la température, on ajustera la valeur de la tension d'alimentation.

- 9) Faire les calculs de :

la différence des températures $\Delta T=T_h-T_c$

les efficacités réelles et idéale

et les mettre dans le tableau ci-dessous.

N exp	P_H	P_w	T_H (K)	T_C (K)	ΔT (K)	$e_{R\acute{e}el}$	e_{Carnot}
...							

Tableau 1.2. Valeurs calculées

- 10) Tracer la figure pour comparer les efficacités réelle et de Carnot comme une fonction de ΔT .

11) Est-ce que l'efficacité idéale augmente ou diminue quand la différence des températures augmente ?

12) Est-ce que l'efficacité réelle augmente ou diminue quand ΔT augmente ?

13) Quel pourcentage de l'énergie disponible utilise ce moteur à chaleur ? Conclusions ?

Expérience B.2. L'efficacité de moteur à chaleur (étude détaille)

Dans l'expérience qui suit, on se propose de déterminer les efficacités réelles et compenser pour les pertes d'énergie pour monter que l'efficacité obtenue approche l'efficacité de Carnot.

L'appareil doit fonctionner en deux modes pour obtenir les données nécessaires:

- Mode de moteur à chaleur (voir Fig. 2) pour déterminer le rendement réel (l'expérience précédente).
- Mode ouverte afin que déterminer les pertes par conductibilité thermique et le rayonnement le schéma des mesures et présenter sur Fig. 4 ci-dessous.

Nous avons deux raisons pour la perte d'énergie :

- l'échange de chaleur entre les réservoirs chaude et froid,
- l'énergie dégagée à cause de la résistance interne r du dispositif Peltier à semi-conducteur.

Pour calculer l'efficacité corrigée, il faut, alors, corriger les puissances P_W et P_H .

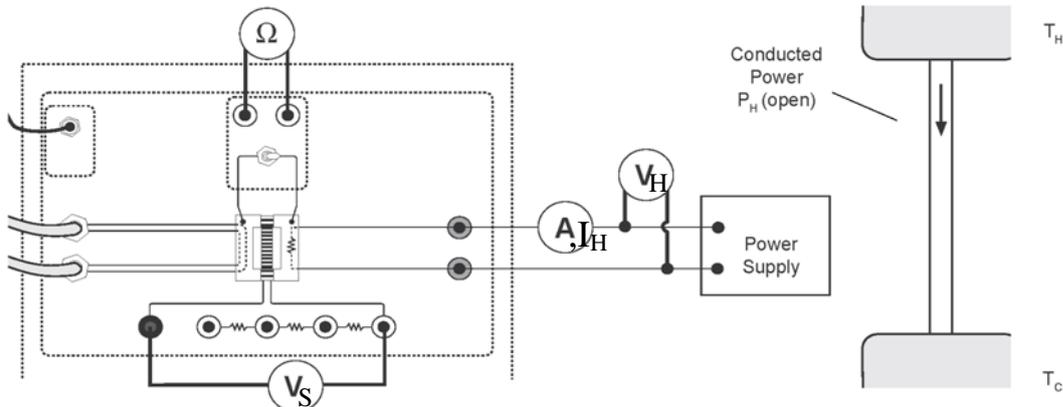


Figure 4. Mode ouverte

14) Faire les mesures en mode de moteur à chaleur avec $R_W = 2\Omega$, $T_H \approx 75^\circ\text{C}$. pour remplir la première ligne de tableau 2.1

15) Déconnecter le câble de la résistance de la charge. Maintenant, toute la puissance P_H fournie à la résistance de la source chaude est soit menée sur le côté froid soit rayonné. Laissez le voltmètre mesurer la tension de Seebeck (V_S , voir figure 4).

Diminuer la tension appliquée à la partie chaude de sorte pour que le système reste à l'équilibre à la même température chaude comme dans le mode de moteur à chaleur. Étant donné que la différence de température est la même, la quantité pareille de chaleur est maintenant menée à travers le dispositif. Enregistrer les valeurs de la mode ouverte dans le tableau 2.1

Mode	T_H (k Ω)	T_C (k Ω)	T_H ($^\circ\text{C}$)	T_C ($^\circ\text{C}$)	V_H	I_H	V_W	V_S
Moteur								N/A
Ouverte							N/A	

Tableau 2.1. Valeurs mesurées

16) Calculer et enregistrer aux tableaux 2.2 et 2.3 les puissances P_W et P_H l'efficacité réelle $e_{\text{Réal}}$.

Mode	T_H (K)	T_C (K)	P_H	P_W	I_W
Moteur (charge 2Ω)					
Ouverte				N/A	N/A

Tableau 2.2. Valeurs calculées

	Réel	Corrigé	Maximum (Carnot)	% Difference
Efficacité				

Tableau 2.3. Résultats

17) Calculer et enregistrer dans le tableau 2.3 aussi l'efficacité théorique maximale de Carnot.

18) Pour calculer l'efficacité corrigée, nous utilisons l'expression suivante:

$$e_{\text{Corrigé}} = \frac{P'_W}{P_H} = \frac{P_W + I_W^2 r}{P_H - P_H^{\text{ouvert}}}$$

avec courant en circuit de charge I_W , la résistance interne de thermocouple r ,

$$r = \frac{V_S - V_W}{I_W} R_W.$$

Démontrer ces formules, enregistrer l'efficacité corrigée au tableau 2.3.

19) Calculez un pourcentage de différence entre les efficacités maximal et corrigé. Conclusions ?

Expérience B.3. L'efficacité de pompe à chaleur (supplémentaire, pas obligatoire).

20) Voir manuel de l'appareil d'efficience thermique PASCO TD-8564 en anglais, "Experiment 3: Heat Pump Coefficient of Performance".

Expérience B.4. La résistance de charge pour la performance optimale (supplémentaire, pas obligatoire).

21) Voir manuel de l'appareil d'efficience thermique PASCO TD-8564 en anglais, " Experiment 5: Load for Optimum Performance ".