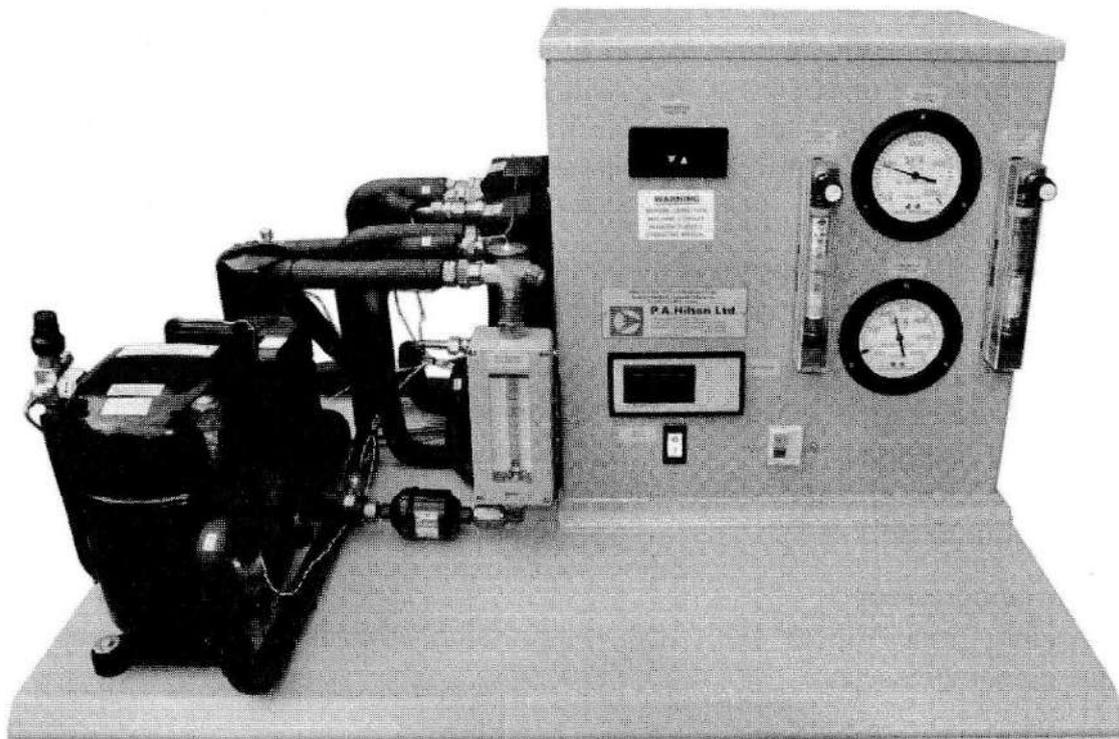


**MOTS-CLES : système ouvert, machine thermique, diagrammes thermodynamiques.**

Une machine thermique cyclique ditherme fonctionne sur le principe des transitions de phase d'un fluide réfrigérant. Les applications sont nombreuses, de la machine frigorifique au climatiseur réversible ou à la pompe à chaleur. L'étude pratique de la liquéfaction (ou condensation) ou de la vaporisation du fluide réfrigérant est grandement facilitée par l'analyse de diagrammes thermodynamiques. On propose ici une étude expérimentale complète d'une machine thermique de laboratoire, jouant le rôle à la fois de machine frigorifique et de pompe à chaleur.

**Exemple de machine thermique de laboratoire**

*On distingue les différentes parties correspondant aux évolutions du fluide réfrigérant ainsi que les appareils de mesure (manomètres, thermomètres et débitmètres).*

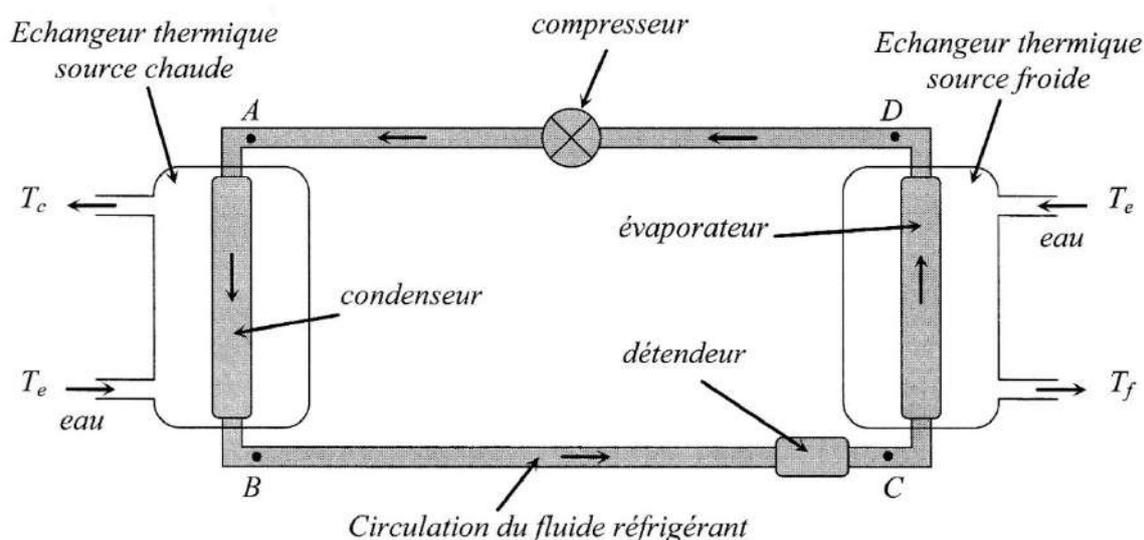


*(avec l'aimable autorisation de la société P.A.Hilton Ltd, représentée en France par Prodidac)*

La machine étudiée (non représentée ici) est un récepteur ditherme cyclique qui utilise la circulation forcée d'un fluide réfrigérant, le *dichlorodifluorométhane* ( $\text{CCl}_2\text{F}_2$ , appelé aussi *fréon R-12*, qui n'est plus utilisé dans les machines récentes), entre une source chaude et une source froide, constituées par une circulation d'eau dans des échangeurs thermiques. La puissance électrique fournie à la machine est transmise à un compresseur qui entraîne le fluide à travers un condenseur, un détendeur puis un évaporateur. Un schéma simplifié du dispositif est présenté ci-après.

Les appareils de mesure permettent de caractériser le fluide réfrigérant à différents stades du cycle, notamment son débit massique, sa température et sa pression.

## Schéma de principe de la machine thermique



Le fluide réfrigérant subit les évolutions suivantes :

de  $A$  à  $B$  : le condenseur

Le fluide en  $A$ , sous forme de vapeur sous pression, est mis en contact avec la circulation d'eau dans l'échangeur thermique de la « source chaude » et subit une condensation isobare de l'état vapeur à l'état liquide. L'énergie thermique libérée par la condensation est en partie transférée à l'eau qui voit sa température augmenter de  $T_e$  à  $T_c$ .

de  $B$  à  $C$  : le détendeur

Le liquide subit une détente isenthalpique à travers une vanne d'expansion. Le fluide en  $C$  se retrouve alors partiellement vaporisé.

de  $C$  à  $D$  : l'évaporateur

Le mélange liquide-vapeur est mis en contact avec l'eau en circulation dans l'échangeur thermique de la « source froide » et se vaporise entièrement de façon isobare. L'énergie thermique nécessaire à cette vaporisation est partiellement apportée par l'eau dont la température diminue de  $T_e$  à  $T_f$ .

de  $D$  à  $A$  : le compresseur

Le fluide sous forme vapeur subit une compression adiabatique en recevant l'énergie mécanique du compresseur.

On a reporté les mesures expérimentales dans le tableau ci-dessous :

Compresseur			
Puissance électrique consommée		500 W	
Circulations d'eau			
Source chaude		Source froide	
Débit massique $D_{mc} = 72 \text{ kg.h}^{-1}$		Débit massique $D_{mf} = 40 \text{ kg.h}^{-1}$	
$T_e = 18,5^\circ\text{C}$	$T_c = 28,0^\circ\text{C}$	$T_e = 18,5^\circ\text{C}$	$T_f = 6,0^\circ\text{C}$
Circulation du fluide réfrigérant			
Condenseur		Evaporateur	
Pression en $A$ : 10 bars		Pression en $C$ : 2,5 bars	
$T_A = 64,0^\circ\text{C}$	$T_B = 42,0^\circ\text{C}$	$T_C = -7,0^\circ\text{C}$	$T_D = 0,0^\circ\text{C}$
Débit massique $D_m = 25 \text{ kg.h}^{-1}$			

Les températures sont mesurées à 0,5°C près et les pressions à 0,1 bar près. Les débits massiques sont obtenus à 10 % près. Le constructeur précise que le compresseur a un rendement mécanique de l'ordre de 45 %. La machine thermique est supposée avoir atteint son régime de fonctionnement stationnaire.

On donne la capacité thermique massique de l'eau  $c_{eau} = 4,18.10^3 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ .

### **Premier principe de la thermodynamique**

On considère un fluide circulant de façon stationnaire dans une canalisation avec le débit massique  $D_m$  et recevant une puissance thermique  $P_{th}$  et une puissance mécanique  $P_{méca}$ . On note  $h_e$  et  $h_s$  les enthalpies massiques du fluide à l'entrée et à la sortie de la canalisation. On néglige les variations d'énergie cinétique du fluide et les variations d'énergie potentielle de pesanteur.

1) Dédire du premier principe de la thermodynamique appliqué au fluide en écoulement la relation entre  $h_s - h_e$  à  $P_{th}$ ,  $P_{méca}$  et  $D_m$ .

### **Utilisation des diagrammes thermodynamiques**

On se propose d'effectuer une étude détaillée des échanges thermiques effectués lors des transitions de phase du fluide réfrigérant. Les diagrammes thermodynamiques enthalpique ( $p,h$ ) et entropique ( $T,s$ ) du dichlorodifluorométhane sont fournis ci-après.

On utilise dans un premier temps le diagramme enthalpique.

2) Reporter la position des points  $A$ ,  $B$ ,  $C$  et  $D$  sur le diagramme enthalpique ( $p,h$ ). En déduire l'état physique du fluide dans chaque cas.

3) Mesurer la variation d'enthalpie massique  $h_B - h_A$ . En déduire la puissance  $P_c$  reçue par le fluide de la part de la source chaude.

4) Déterminer de même la puissance  $P_f$  reçue par le fluide de la part de la source froide.

5) Mesurer la variation d'enthalpie massique  $h_A - h_D$ . En déduire la puissance mécanique  $P_u$  fournie au fluide par le compresseur et évaluer son rendement réel.

6) Comparer  $P_u$  et  $P_c + P_f$ . Commenter cette relation.

On souhaite confirmer ces résultats à l'aide du diagramme entropique.

7) Reporter la position des points  $A$ ,  $B$ ,  $C$  et  $D$  sur le diagramme entropique ( $T,s$ ).

8) Sachant que l'énergie thermique massique reçue par le système au cours d'une évolution isobare correspond à l'aire située sous la courbe dans le diagramme entropique, effectuer une nouvelle mesure des puissances thermiques  $P_c$  et  $P_f$  reçues par le fluide lors de son passage dans le condenseur et dans l'évaporateur. On pourra déterminer l'énergie reçue par une masse  $dm$  de fluide pendant  $dt$ . Commenter.

9) La compression du fluide est-elle isentropique ? Evaluer l'entropie produite par unité de temps dans le compresseur. Quelle est l'origine de l'irréversibilité ?

10) Mesurer l'enthalpie massique et l'entropie massique de liquéfaction à la pression de 10 bars. Quelle relation y a-t-il entre ces deux grandeurs ?

11) Préciser la composition du mélange liquide-vapeur au point  $C$ . On effectuera la mesure à la fois sur le diagramme enthalpique et sur le diagramme entropique.

## Efficacités thermodynamiques

Les mesures précédentes de puissances thermiques et de puissance mécanique reçues par le fluide vont permettre d'estimer l'efficacité thermodynamique de la machine thermique, en tant que pompe à chaleur ou machine frigorifique.

12) Définir l'efficacité  $e_{PAC}$  de la machine en tant que pompe à chaleur et l'efficacité  $e_{MF}$  de la machine en tant que machine frigorifique.

13) Calculer numériquement  $e_{PAC}$  et  $e_{MF}$ .

On souhaite à présent comparer ces efficacités à l'efficacité maximale obtenue en suivant un cycle de Carnot, constitué de deux isothermes et de deux isentropiques.

14) Représenter le cycle de Carnot le plus proche du fonctionnement de la machine thermique dans le diagramme entropique.

15) En déduire numériquement les efficacités de Carnot  $e_{C,PAC}$  pour un fonctionnement en pompe à chaleur et  $e_{C,MF}$  pour un fonctionnement en machine frigorifique.

16) Comparer ces valeurs à l'efficacité théorique de Carnot.

On peut définir le rendement thermodynamique théorique de la machine thermique par le rapport de son efficacité expérimentale sur l'efficacité de Carnot.

17) Calculer le rendement thermodynamique théorique de la machine thermique proposée, en tant que pompe à chaleur et en tant que machine frigorifique. Conclure.

## Rendement global

En pratique, la machine thermique reçoit directement la puissance électrique  $P_{elec}$  qui alimente le compresseur, tandis qu'elle fournit sa puissance thermique à la circulation d'eau. On souhaite donc estimer le rendement global de la machine, en ne tenant compte que des transferts énergétiques réellement effectués.

18) Déterminer les puissances thermiques reçues par l'eau à la « source chaude » et à la « source froide ». Commenter.

19) En déduire l'efficacité globale de la machine thermique en tant que pompe à chaleur ou en tant que machine frigorifique.

20) Evaluer le rendement global théorique de la machine thermique. Conclure.

Diagramme enthalpique (p-h) du dichlorodifluorométhane

