

## Machines thermiques



Compétences et capacités scientifiques mises en œuvre dans ce TD

- ☑ **THERM4-1** Analyser et modéliser une machine cyclique ditherme
- ☑ **THERM4-2** Donner le sens des échanges énergétiques pour un moteur ou un récepteur thermique ditherme
- ☑ **THERM4-3** Définir un rendement ou une efficacité et la relier aux énergies échangées au cours du cycle
- ☑ **THERM4-4** Justifier et utiliser le théorème de Carnot

Donnée :  $R = 8,314 \text{ J.mol}^{-1}.K^{-1}$

### Exercice n° 1 : Etude d'un chauffe-eau (★)

THERM4-1 / THERM4-2 / THERM4-3 / THERM4-4

On veut maintenir la température du chauffe-eau d'un bungalow à la température  $T_2 = 333 \text{ K}$  en utilisant le site où il se trouve : l'air extérieur chaud à la température  $T_1 = 310 \text{ K}$  et l'eau froide d'un lac à la température  $T_3 = 285 \text{ K}$ . On utilise pour cela un moteur ditherme réversible fonctionnant selon un cycle de Carnot entre l'air extérieur et le lac, fournissant l'énergie nécessaire à une pompe à chaleur réversible fonctionnant selon un cycle de Carnot inversé, entre le chauffe-eau du bungalow et le lac.

- 1) Faire un schéma faisant apparaître les différents échanges énergétiques mis en jeu ainsi que leur sens.
- 2) Etablir l'expression de l'efficacité de Carnot de la PAC et du rendement de Carnot du moteur en fonction des températures.
- 3) En appelant  $Q_1$  le transfert thermique reçu par le moteur de l'air extérieur et  $Q_2$  le transfert thermique réellement reçu par le chauffe-eau du bungalow, déterminer l'efficacité thermique d'un tel dispositif :  $e = Q_2/Q_1$ .

### Exercice n° 2 : Climatiseur de voiture (★)

THERM4-2 / THERM4-3

On veut maintenir une température  $T_1 = 20^\circ\text{C}$  dans un habitacle de voiture alors que la température de l'air extérieur est  $T_2 = 35^\circ\text{C}$ . On utilise pour cela un climatiseur ayant une efficacité  $e = 3$ . La puissance thermique transférée entre l'habitacle et l'air extérieur vaut  $P = K(T_2 - T_1)$  avec  $K = 170 \text{ W.K}^{-1}$ .

- 1) Faire un schéma faisant apparaître les différents échanges énergétiques ainsi que leur sens.
- 2) Quelle est la puissance thermique que doit prélever par le climatiseur à l'habitacle pour que sa température soit maintenue à  $20^\circ\text{C}$  ?
- 3) Quelle est la puissance consommée par le climatiseur ?
- 4) La combustion d'1 L d'essence dégage 35 MJ. Le rendement global du moteur est de l'ordre de 10 %. Sachant que la voiture consomme 7 L aux 100 km en roulant à  $100 \text{ km.h}^{-1}$ , évaluer la surconsommation engendrée par la climatisation.

### Exercice n° 3 : Moteur Diesel (★★)

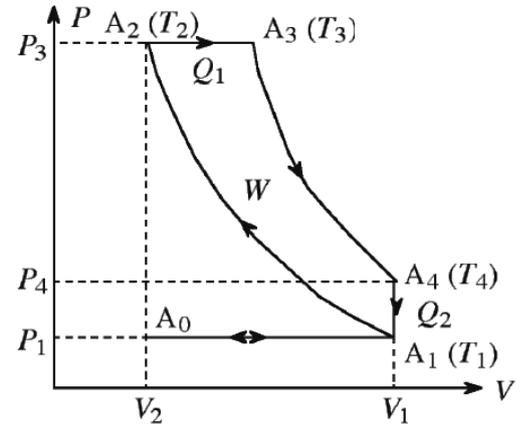
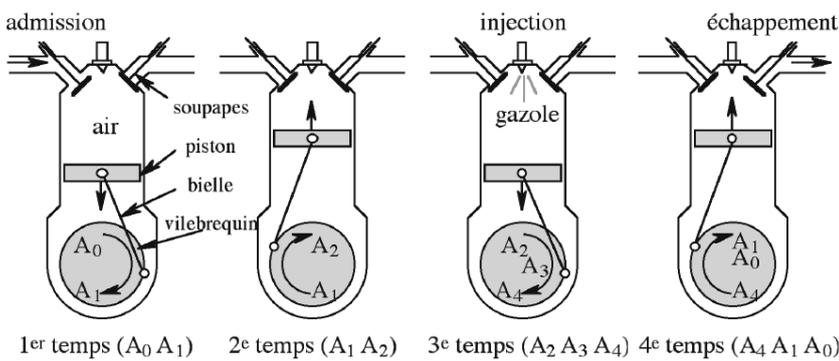
THERM4-1 / THERM4-2 / THERM4-3

Le moteur d'un véhicule automobile au gazole fonctionne par inflammation spontanée du gazole finement pulvérisé injecté dans de l'air fortement comprimé et chaud. Son fonctionnement est modélisé par le cycle théorique idéal de Diesel qui suit les quatre temps suivants :

- 1<sup>er</sup> temps ( $A_0A_1$ ) : ouverture de la soupape d'admission et aspiration d'air dans le cylindre à pression constante (pression atmosphérique) par la descente du piston entraîné par le vilebrequin.
- 2<sup>ème</sup> temps ( $A_1A_2$ ) : compression adiabatique réversible de l'air par remontée du piston.

- 3<sup>ème</sup> temps (A<sub>2</sub>A<sub>3</sub>A<sub>4</sub>) : injection progressive du gazole pulvérisé en fines gouttelettes provoquant l'inflammation spontanée du mélange air/gazole. Cette combustion se produit à pression constante (A<sub>2</sub>A<sub>3</sub>). Les gaz se détendent de façon adiabatique ensuite en poussant le piston vers le bas et entraîne le vilebrequin. La détente est supposée réversible.
- 4<sup>ème</sup> temps (A<sub>4</sub>A<sub>1</sub>A<sub>0</sub>) : ouverture de la soupape d'échappement ramenant les gaz brûlés instantanément à la pression initiale (isochore A<sub>4</sub>A<sub>1</sub>). Les gaz sont alors refoulés par la remontée du piston (isobare A<sub>1</sub>A<sub>0</sub>).

Le cycle correspondant est représenté ci-dessous.



L'air est assimilé à un gaz parfait de masse molaire  $M = 29 \text{ g.mol}^{-1}$ , de capacité thermique massique à pression constante  $c_p = 1 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$  avec  $\gamma = 1,4$  et  $R = 8,31 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . La quantité de carburant injectée est faible devant la quantité d'air et on suppose que la combustion du carburant ne modifie pas cette quantité d'air, autrement dit le gaz circulant dans ce moteur sera considéré comme une même quantité d'air tout au long du cycle.

### 1) Étude générale du cycle

En début de compression (A<sub>1</sub>), l'air admis dans le moteur est à la pression  $P_1 = 1 \text{ bar}$  et à la température  $T_1 = 293 \text{ K}$ . Le taux de compression est  $\alpha = V_1/V_2 = 15$  et le taux de détente est  $\beta = V_1/V_3 = 5$ .

- Calculer la pression  $P_2$  et la température  $T_2$  en fin de compression (A<sub>2</sub>).
- Calculer les températures  $T_3$  et  $T_4$  en début et en fin de la détente A<sub>3</sub>A<sub>4</sub> et la pression  $P_4$ .
- Définir puis calculer le rendement de ce moteur.

### 2) Étude de la combustion

- La cylindrée du moteur (volume total maximum des cylindres) est  $V_1 = 2 \text{ litres}$ . Déterminer la masse d'air admise dans chaque cycle et déduire des calculs précédents le transfert thermique  $Q_1$  mis en jeu pendant la combustion.
- L'énergie thermique dégagée par la combustion par unité de masse de carburant est  $q_c = 46,8.10^3 \text{ kJ.kg}^{-1}$ . En déduire la masse de carburant injectée à chaque cycle.
- A une vitesse de  $130 \text{ km.h}^{-1}$ , le vilebrequin tourne à  $3000 \text{ tr.min}^{-1}$ . Déterminer la durée d'un cycle et la distance parcourue par le véhicule pendant ce cycle.
- La masse volumique du gazole est  $\rho = 0,8 \text{ kg.L}^{-1}$ . Quelle est la consommation (en L aux 100 km) de ce véhicule à  $130 \text{ km.h}^{-1}$ .
- Déterminer le travail  $W$  fourni par ce moteur lors d'un cycle et en déduire la puissance du véhicule. (1 ch = 736 W)

THERM4-1 / THERM4-2 /  
THERM4-3 / THERM4-4

### Exercice n° 4 : Etude d'un congélateur (★★★)

On considère un cycle de transformations réversibles DABCD réalisé à partir du point D situé sur la courbe de rosée de l'isotherme  $T_2 = 60^\circ\text{C}$  d'une masse unité de fréon :

- DA : liquéfaction totale sous la pression  $P_2 = 15 \text{ bar}$  et à la température  $T_2 = 60^\circ\text{C}$
- AB : détente isentropique qui amène le fluide dans l'état B défini par la température  $T_1 = -10^\circ\text{C}$  et une fraction massique en vapeur  $x_v$  (B) ;
- BC : vaporisation partielle sous la pression  $P_1 = 2.2 \text{ bar}$  et à la température  $T_1 = -10^\circ\text{C}$

- CD : compression isentropique passant par D ; l'état C est caractérisé par une fraction massique en vapeur  $x_v(C)$ .

On lit dans les tables pour le fréon :

	Pression de vapeur saturante (bar)	Enthalpie massique du liquide saturant $h_l(\text{kJ.kg}^{-1})$	Enthalpie massique de la vapeur saturante $h_v(\text{kJ.kg}^{-1})$	Entropie massique du liquide saturant $s_l(\text{kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1})$	Entropie massique de la vapeur saturante $s_v(\text{kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1})$
$T_1=263 \text{ K}$	2.2	28.8	184	0.11	0.70
$T_2=343 \text{ K}$	15	96.8	210	0.34	0.68

- 1) Représenter le cycle DABCD sur un diagramme de Clapeyron P(v).
- 2) Calculer les enthalpies massiques de vaporisation aux températures  $T_1$  et  $T_2$ .
- 3) En utilisant le théorème des moments avec les entropies massiques, calculer les titres massiques en vapeur  $x_v(B)$  et  $x_v(C)$ .
- 4) Calculer les transferts thermiques massiques  $q_{BC}$  et  $q_{DA}$  avec le milieu extérieur au cours des transformations BC et DA.
- 5) En déduire le travail  $w$  reçu par l'unité de masse du fluide au cours du cycle.
- 6) Le cycle précédent est utilisé pour faire fonctionner un congélateur. Exprimer l'efficacité  $e_R$  de cette machine frigorifique. Comparer à l'efficacité de Carnot en analysant le cycle étudié.