

THERMODYNAMIQUE

MACHINES THERMIQUES *(THERMO2)*

2^e année - Semestre 4/4x

EXERCICES

- Rendement
- Cycles Thermodynamiques

Vous devez vous munir de votre calculette à chaque cours

RENDEMENT ET CYCLES THERMODYNAMIQUES

Exercice 1 : Cycle réalisable ?

Un inventeur décrit le fonctionnement cyclique d'une machine au cours duquel le fluide reçoit une quantité de chaleur Q_f de la source froide et fournit une quantité de chaleur Q_c à la source chaude ainsi qu'une quantité de travail W au milieu extérieur. Une telle machine peut-elle fonctionner ?

Exercice 2 : Moteur réversible ou irréversible

Au cours d'un cycle, le fluide thermique d'un moteur ditherme reçoit 420 J d'une source chaude à 200 °C. La source froide est à 17 °C. Le travail fourni par le moteur est de 120 J.

- 1) Calculez le rendement de ce moteur thermique.
- 2) Le fonctionnement est-il réversible ?

Réponses : 1) 0,286 ; 2) Fonctionnement irréversible

Exercice 3 : Moteur thermique

Un moteur thermique supposé réversible, reçoit une quantité de chaleur de 1000 J d'un thermostat à 100 °C et cède une quantité de chaleur Q_f à la source froide (thermostat à $\theta_f = 0$ °C).

- 1) Représentez par un schéma, les échanges réalisés entre la machine et les sources de chaleur d'une part et la machine et le milieu extérieur d'autre part.
- 2) Déterminez la quantité de chaleur cédée à la source froide et le travail fourni au milieu extérieur.
- 3) Calculez le rendement de cette machine motrice.

Réponses : 1) - 732 J ; 2) - 268 J ; 3) 0,27

Exercice 4 : Machine frigorifique

Une machine frigorifique fonctionne avec une source froide de température $\theta_f = -30$ °C et une source chaude de température $\theta_c = 25$ °C. La quantité de chaleur échangée par le fluide moteur avec la source chaude est $Q_c = -1000$ J et celle échangée avec la source froide est $Q_f = +700$ J.

- a) Déterminez si ce cycle est réalisé de façon réversible ou irréversible.

b) Représentez par un schéma, les échanges réalisés entre la machine et les sources de chaleur d'une part et la machine et le milieu extérieur d'autre part. Calculez le travail échangé entre le fluide et le milieu extérieur.

c) Calculez le coefficient de performance β de cette machine et le comparer à celui d'un cycle de Carnot fonctionnant entre les mêmes sources.

Exercice 5 : Pompe à chaleur ou chauffage direct

Une pièce est maintenue à 20 °C par chauffage, l'atmosphère extérieure étant à 4 °C. En régime permanent, les pertes thermiques sont de 4 kJ par seconde.

- 1) Quelle serait la puissance nécessaire à un radiateur électrique pour ce chauffage ?
- 2) Quelle serait la puissance, fournie à une pompe à chaleur réversible, qui amènerait au même résultat ?

Exercice 6 : Chauffage et refroidissement d'une maison

Un récepteur thermique est utilisé pour assurer le chauffage (l'hiver) et le refroidissement (l'été) d'une maison. Donc, ce récepteur thermique joue le rôle d'une pompe à chaleur l'hiver et celui d'un climatiseur l'été. Le fluide moteur est du fréon. Il parcourt un circuit dans lequel, étant sous forme de vapeur, il est comprimé par un compresseur C et se condense dans un liquéfacteur L (aussi appelé condenseur). Puis il subit une détente au niveau d'une valve V et finit de se vaporiser dans l'évaporateur E avant de retourner dans le compresseur.

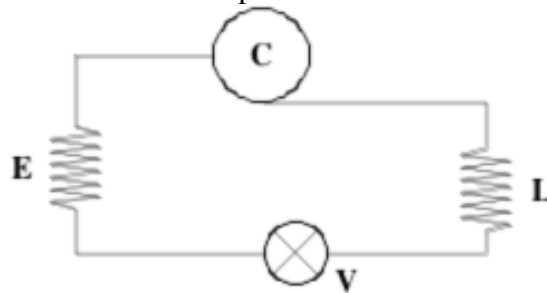


Schéma de principe de l'installation

1) Dans un récepteur thermique, lequel des deux organes L ou E faut-il mettre en contact avec la source chaude et la source froide respectivement ?

2) En hiver la température extérieure moyenne est de 0 °C et la température intérieure est maintenue à 20 °C.

a) Calculez la quantité de chaleur maximale qui peut être fournie à la maison au bout d'une heure si la puissance du compresseur électrique est de 4000 watts.

b) En déduire le coefficient de performance maximal du récepteur thermique.

3) En été, la température extérieure moyenne est de 35 °C et la température intérieure est maintenue à 20 °C.

Quel est le coefficient de performance maximal du récepteur thermique ?

NB : On rappelle qu'un watt est égal à un joule par seconde.

Réponses : 2.a) 210960 kJ ; 2.b) 14,65 ; 3) 19,5

Exercice 7 : Moteur thermique avec une source de température variable

On fait fonctionner un moteur thermique entre l'atmosphère, source froide à la température $T_f = 288 \text{ K}$, et une masse d'eau de capacité thermique $C = 10 \text{ kJ.K}^{-1}$ et de température variable T_c . La température initiale de l'eau est $T_{c,0} = 350 \text{ K}$.

- 1) Calculez le travail maximal que ce moteur est capable de fournir.
- 2) Déterminez le rendement d'un tel moteur.

Exercice 8 : Fonctionnement d'un moteur entre deux masses d'eau

Un moteur thermique réversible fonctionne entre deux masses d'eau (capacité thermique massique, $c = 4185 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) :

- une masse d'eau $m_c = 500 \text{ kg}$, source chaude à la température initiale $T_{c,0} = 360 \text{ K}$;
- une masse d'eau $m_f = 800 \text{ kg}$, source froide à la température initiale $T_{f,0} = 288 \text{ K}$.

- 1) Calculez la température finale, T , atteinte lorsque le moteur cesse de fonctionner.
- 2) Déterminez les énergies échangées pendant la durée du fonctionnement du moteur, c'est-à-dire :
 - a) le transfert thermique Q_c reçu de la part de la source chaude ;
 - b) le transfert thermique Q_f fourni à la source froide ;
 - c) le travail fourni par ce moteur.

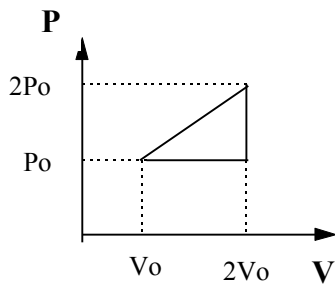
Exercice 9 : Pompe à chaleur et source de température variable

Une pompe à chaleur fonctionne de manière réversible entre les deux sources suivantes :

- un réservoir d'eau, source chaude de capacité thermique $C = 20 \text{ kJ.K}^{-1}$; l'eau est initialement à la température $T_{c,0} = 288 \text{ K}$;
- l'atmosphère, source froide à la température $T_{f,0} = 288 \text{ K}$, supposée constante.

- 1) À l'aide de la pompe à chaleur, on porte l'eau à la température $T = 320 \text{ K}$. Exprimez le travail fourni à la pompe à chaleur en fonction de C , T , $T_{c,0}$ et $T_{f,0}$, puis calculez sa valeur.
- 2) Exprimez l'efficacité de cette pompe à chaleur en fonction de T , $T_{c,0}$ et $T_{f,0}$, puis calculez cette efficacité :

Exercice 10 : Cycle triangulaire



On considère le cycle réversible suivant décrit par un gaz parfait.

a) Dans quel sens ce cycle doit-il être parcouru pour que le fonctionnement soit de type moteur ?

b) Calculer le rendement.

Application numérique $\gamma = 1.4$.

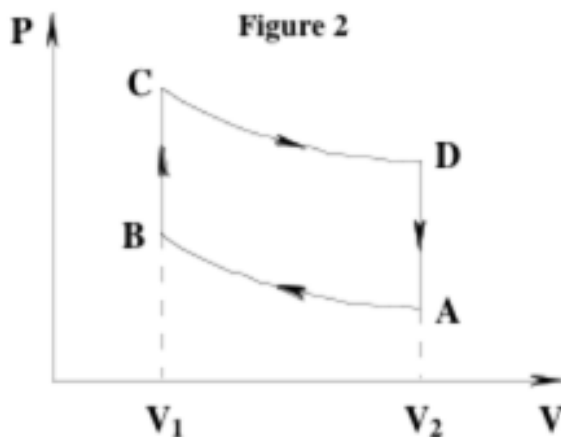
Réponse : b) 0,055

Exercice 11 : Cycle d'Otto

On considère un cycle d'Otto décrit par un gaz parfait représenté figure ci-dessous. Le cycle est réversible et décrit dans le sens moteur.

- La transformation AB est une compression isentropique du gaz parfait.
- La transformation BC est une transformation isochore du gaz parfait.
- La transformation CD est une détente isentropique du gaz parfait.
- La transformation DA est une transformation isochore du gaz parfait.

La pression, le volume et la température pour les points A, B, C, D, sont respectivement (P_A, V_A, T_A) , (P_B, V_B, T_B) , (P_C, V_C, T_C) , (P_D, V_D, T_D) .



Pour le gaz, γ est constant ainsi que $c_{M,V}$ qui est la capacité thermique molaire du gaz parfait à volume constant.

De plus, on pose $a = \frac{V_2}{V_1}$ où a représente le taux de compression.

- Donner les expressions littérales des quantités de chaleur $Q_A^B, Q_B^C, Q_C^D, Q_D^A$, pour une mole de gaz parfait, des transformations respectives AB, BC, CD et DA.
 - Préciser le signe de ces quantités de chaleur.
 - En déduire que le cycle d'Otto est un cycle moteur ditherme.
- Calculer le rendement du cycle moteur d'Otto en fonction de T_A, T_B, T_C, T_D .
 - Calculer le rendement du cycle moteur d'Otto en fonction de a et de γ .
 - Application numérique : Combien vaut le rendement pour $a = 8$ et $\gamma = 1,4$?

NB : On rappelle qu'entre deux états d'équilibre 1 et 2, le premier principe s'écrit :

$$\Delta U_{1 \rightarrow 2} = W + \sum_{i=1}^m Q_i$$

avec

- m , le nombre de transformations qui permettent de passer de l'état 1 à l'état 2 ;
- Q_i , la chaleur échangée entre le système et le milieu extérieur durant la transformation i ;
- W , le travail échangé entre le système et le milieu extérieur pendant la transformation totale qui fait passer le système de l'état 1 à l'état 2.

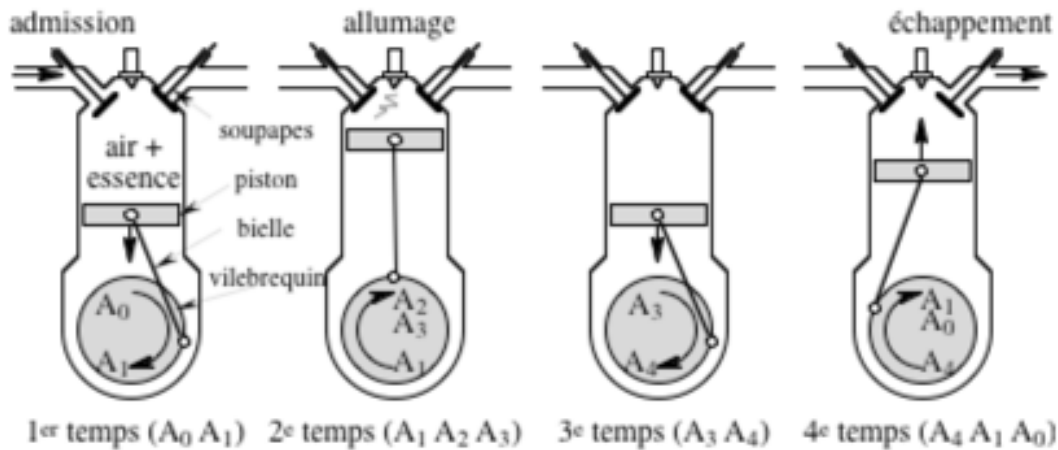
On rappelle que, pour une transformation adiabatique, la température T et le volume V sont reliés par la relation : $TV^{\gamma-1} = \text{constante}$.

Réponses : 2.b) $(1-a^{1-\gamma})$; 2.c) 0,565

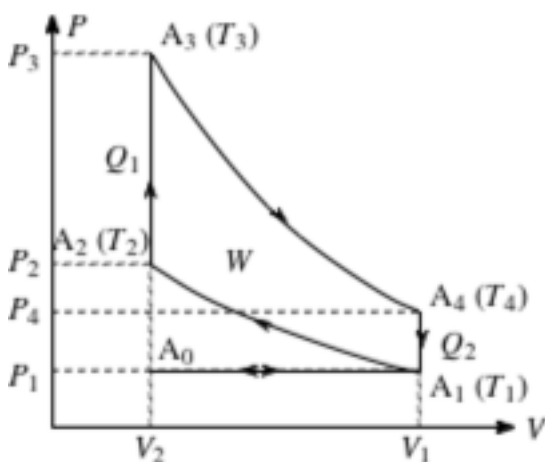
Exercice 12 : Cycle Beau de Rochas

Le moteur d'un véhicule automobile à essence est un moteur atmosphérique à explosion commandée fonctionnant en quatre temps. Il est représenté par le cycle théorique suivant :

- 1^{er} temps (admission A_0A_1) : ouverture de la soupape d'admission est aspiration dans le cylindre à pression constante (pression atmosphérique), d'un mélange d'air et d'essence venant du carburateur, par la descente du piston entraîné par le vilebrequin (isobare A_0A_1).
- 2^e temps (compression $A_1A_2A_3$) : le mélange est comprimé par la remontée du piston (compression adiabatique A_1A_2) puis explose à l'allumage de la bougie (compression isochore A_2A_3).
- 3^e temps (détente A_3A_4) : le piston est repoussé vers le bas (temps moteur) et entraîne le vilebrequin (détente adiabatique A_3A_4).
- 4^e temps (échappement $A_4A_1A_0$) : les gaz brûlés se détendent à l'ouverture de la soupape d'échappement (détente isochore A_4A_1) puis sont chassés du cylindre à pression constante (pression atmosphérique) par la remontée du piston (isobare A_1A_0).



On admettra que le gaz qui subit le cycle peut être supposé comme de l'air seul¹ (considéré comme un gaz parfait de capacité thermique massique $c_v = 0,717 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ avec $\gamma = 1,4$) tout au long du cycle. De même on considérera toutes les transformations comme réversibles. Le taux de compression du moteur correspond à $a = V_1/V_2 = 8$.



a) Au début de la compression (point A_1), le mélange air + essence est à la pression $P_1 = 1 \text{ bar}$ et la température $T_1 = 290 \text{ K}$ (17°C). Déterminer la pression P_2 et la température T_2 au point A_2 .

b) Sachant que la quantité de chaleur massique reçue par l'air lors de la combustion de l'essence pendant l'étape A_2A_3 est $q_1 = 800 \text{ kJ.kg}^{-1}$, déterminer la température T_3 au point A_3 . En déduire la pression P_3 au point A_3 .

c) Déterminer la pression P_4 et la température T_4 au point A_4 . En déduire la quantité de chaleur q_2 échangée par kilogramme de gaz pendant l'étape A_4A_1 . Cette quantité de chaleur est-elle perdue ou gagnée par le gaz ?

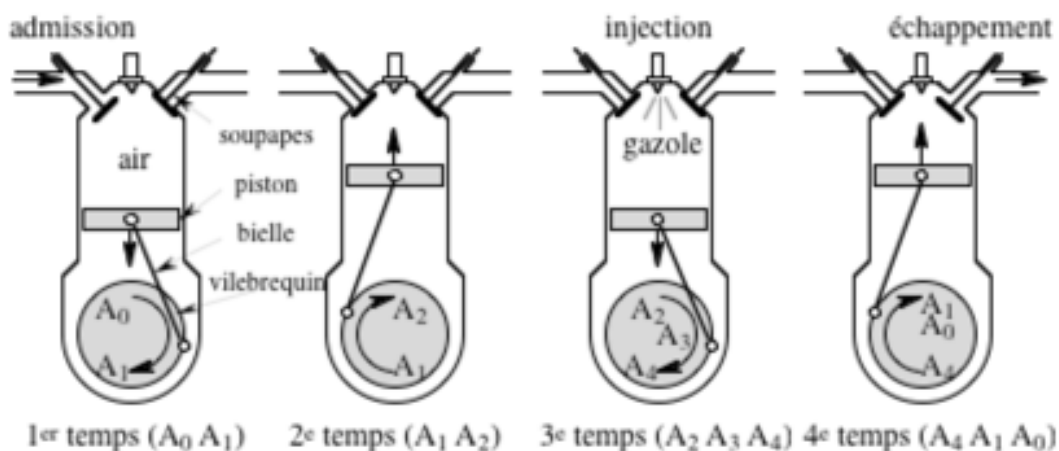
¹ La quantité d'essence dans le mélange air / essence est faible et la combustion de l'essence ne modifie pas fondamentalement la quantité de matière dans le cylindre.

- d) Calculer le travail w par kilogramme de gaz fourni par ce moteur. En déduire le rendement de ce moteur.
- e) Montrer que le rendement peut se mettre sous la forme $\eta = 1 - a^{1-\gamma}$ et qu'il ne dépend donc que du taux de compression a .

Exercice 13 : Cycle Diesel

Le moteur d'un véhicule automobile au gazole est un moteur atmosphérique qui fonctionne par autoallumage (sans bougie) du carburant (inflammation spontanée du gazole finement pulvérisé injecté dans de l'air fortement comprimé et chaud). Le fonctionnement de ce moteur est représenté par le cycle théorique idéal de Diesel qui suit les quatre temps suivants :

- 1^{er} temps (admission A_0A_1) : ouverture de la soupape d'admission et aspiration d'air (seul) dans le cylindre à pression constante (pression atmosphérique) par la descente du piston entraîné par le vilebrequin.
- 2^e temps (compression A_1A_2) : compression adiabatique de l'air par la remontée du piston (A_1A_2).
- 3^e temps (détente $A_2A_3A_4$, temps moteur) : injection progressive du gazole pulvérisé en fines gouttelettes provoquant l'inflammation spontanée du mélange air / gazole. Cette combustion se produit à pression relativement constante (isobare A_2A_3). Les gaz se détendent ensuite en poussant le piston vers le bas et entraînent le vilebrequin (détente adiabatique A_3A_4).
- 4^e temps (échappement $A_4A_1A_0$) : ouverture de la soupape d'échappement ramenant les gaz brûlés instantanément à la pression initiale (isochore A_4A_1). Les gaz sont alors refoulés par la remontée du piston (isobare A_1A_0).

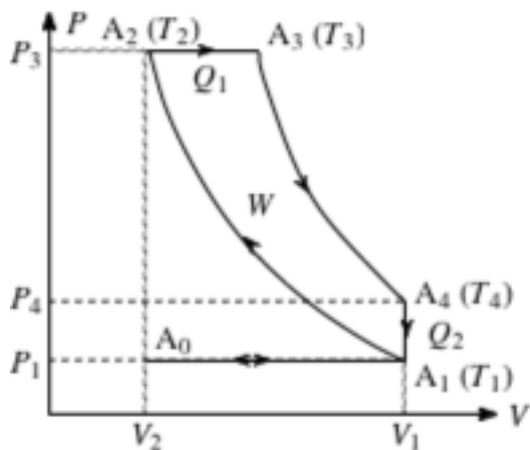


On considèrera que :

- Toutes les transformations sont supposées quasi statiques.
- 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 $\gamma = c_p/c_v = 1,4$ et $R = 8,31 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$.
- La quantité de carburant injectée est faible devant la quantité d'air et 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 seul tout au long du cycle.

1. Étude générale du cycle

En début de compression (point A_1), l'air admis dans le moteur est à la pression $P_1 = 1 \text{ bar}$ et à la température $T_1 = 293 \text{ K}$ (20°C). Le taux de compression (rapport volumétrique V_1/V_2) est $a = 15$ et le taux de détente (rapport volumétrique V_1/V_3) est $b = 5$.



a) Déterminer la pression P_2 et la température T_2 en fin de compression (point A_2).

b) Calculer les températures T_3 et T_4 en début et en fin de détente (points A_3 et A_4) et la pression P_4 .

c) Déterminer les quantités de chaleur massiques q_1 et q_2 (kJ.kg^{-1}) échangées entre l'air et le milieu extérieur lors des transformations A_2A_3 et A_4A_1 .

d) Calculer le travail massique w (kJ.kg^{-1}) fourni par ce moteur lors d'un cycle. En déduire le rendement de ce moteur.

2. Étude de la combustion

a) La cylindrée du moteur (volume total maximum des cylindres du moteur) est $V_1 = 2$ litres. Déterminer la masse d'air impliquée dans chaque cycle et en déduire la quantité de chaleur Q_1 (J) échangée pendant cette phase de combustion (A_2A_3).

b) La quantité de chaleur apportée par le carburant lors de sa combustion (A_2A_3) est de $q = 46,8 \cdot 10^3 \text{ kJ.kg}^{-1}$. En déduire la masse de carburant injectée à chaque cycle.

c) A une vitesse de 130 km.h^{-1} , le vilebrequin tourne à 3000 tr.min^{-1} . Sachant qu'un cycle correspond à deux aller-retour du piston, c'est-à-dire deux tours de vilebrequin, déterminer la durée d'un cycle et la distance parcourue par le véhicule pendant ce cycle.

d) En déduire la consommation c (en litres aux 100 km) de ce véhicule à 130 km.h^{-1} (la masse volumique du gazole est $\rho = 0,8 \text{ kg.L}^{-1}$).

e) Connaissant le rendement du cycle, déterminer le travail W fourni par ce moteur lors d'un cycle et en déduire la puissance du véhicule.