

THERMODYNAMIQUE 1 – IE n°2 - Durée : 2h

Tout document est interdit. Les calculatrices sont autorisées.

Les réponses doivent être justifiées.

Les résultats seront donnés avec le nombre de chiffres significatifs appropriés.

Les trois exercices sont indépendants.

Exercice 1 : Machine thermique Cycle d'Otto (12,5 pts)

On se propose d'étudier le cycle du moteur à explosion à quatre temps qui a été inventé par Beau Rochas en 1862 et réalisé de manière pratique par l'ingénieur allemand Otto en 1875. Le fonctionnement du moteur est cyclique. Le système est constitué par le mélange air-essence contenu dans un cylindre (**Schéma 1**).

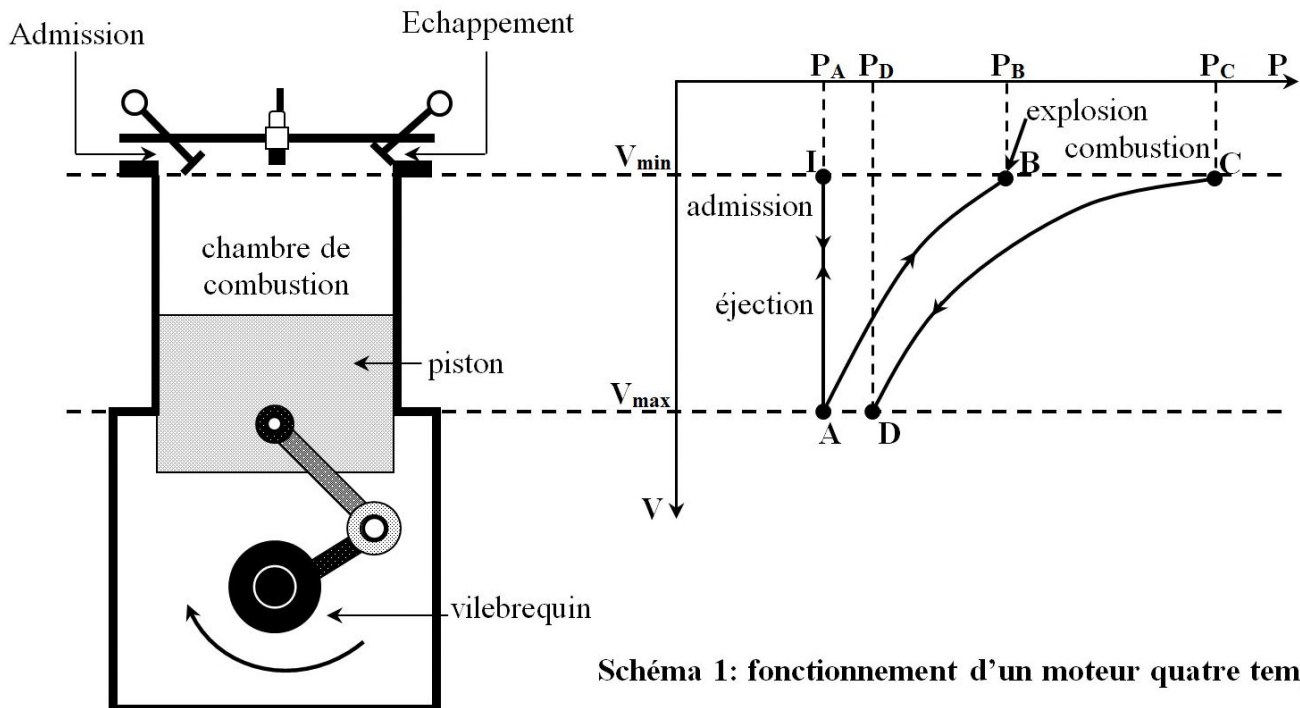


Schéma 1: fonctionnement d'un moteur quatre temps

Il se décompose en 4 temps successifs décrit comme suit :

- **1^{er} temps : l'admission.** La soupape d'admission s'ouvre ; le piston descend et aspire le mélange gazeux air-essence venant du carburateur.
- **2^{ème} temps : la compression.** Les soupapes d'admission et d'échappement sont fermées ; le piston, en remontant, comprime le mélange.
- **3^{ème} temps : la combustion et la détente.** Les soupapes sont encore fermées : une étincelle jaillissant de la bougie provoque la combustion du mélange. La pression augmente brutalement, le piston est repoussé.
- **4^{ème} temps : l'échappement.** Le piston remonte, la soupape d'échappement s'ouvre. Les gaz brûlés sont éjectés. A la fin du quatrième temps, le piston et les soupapes sont revenus dans leur position initiale.

Le fonctionnement du moteur est schématisé sur un diagramme de Clapeyron (P,V) (schéma 1) où P est la pression du mélange gazeux air-essence (**se comportant comme un gaz parfait diatomique**) contenu dans le volume V de la chambre du cylindre. Les étapes successives du cycle sont décrites comme suit :

- **entre I à A :** admission du mélange gazeux air-essence dans la chambre de combustion ;
- **entre A à B :** compression adiabatique réversible ;
- **entre B à C :** combustion isochore brutale ;
- **entre C à D :** détente adiabatique réversible ;
- **entre D à A :** refroidissement isochore brutal ;
- **entre A à I :** la remontée du piston évacue le gaz brûlé vers l'extérieur.

On donne les valeurs suivantes: $V_A = 800 \text{ mL}$; $V_B = 90,0 \text{ mL}$; $P_A = 1,00 \text{ bar}$; $T_A = 340 \text{ K}$; $T_C = 2430 \text{ K}$.

Durant le cycle **ABCD**A, le nombre de mole total sera considéré comme constant (la quantité d'air étant très supérieure à celle de carburant ou des produits de combustion).

Etude du Cycle

- 1) Indiquer sur le schéma de fonctionnement d'un moteur quatre temps sur la « feuille à rendre » où se situe le système étudié.
- 2) Justifier le caractère **adiabatique** de la compression de A vers B et de la détente de C vers D.
- 3) Déterminer le nombre de moles de gaz total n , ainsi que P , V et T pour chacun des états A, B, C et D. On résumera les valeurs dans un tableau.
- 4) Exprimer \bar{C}_p et \bar{C}_v en fonction de R et γ .
- 5) Exprimer littéralement en fonction de R , n , γ , T_A , T_B , T_C et T_D (au choix) les travaux et les chaleurs échangés au cours des 4 transformations constituant le cycle **ABCD**A. Réaliser les applications numériques et présenter les valeurs dans un tableau. Conclure sur la nature du cycle.
- 6) Que vaut la variation d'entropie totale du système ? Commenter.

Etude du rendement

- 7) Exprimer le Coefficient de Performance (CoP) du cycle en fonction des travaux et des quantités de chaleur mises en jeu. Le travail intervenant dans le calcul du CoP est le travail total W_T sortant de la machine. Montrer que le CoP s'exprime selon : $1 + \frac{(T_A - T_D)}{(T_C - T_B)}$; application numérique.
- 8) On appelle $x = V_A / V_B$ le taux de compression du cycle. Montrer que le $\text{CoP} = 1 - x^{1-\gamma}$. Comment évolue le CoP quand le taux de compression augmente ?
- 9) Calculer, en chevaux (un Cheval Vapeur (CV) est égal à 736 W), la puissance de ce moteur à 4500 tours/minute. Un cycle équivaut à deux tours de vilebrequin (voir schéma 1).

Influence de la combustion (étape BC du cycle ABCDA)

La réaction qui a lieu au sein de la chambre est une réaction de combustion entre le carburant (assimilé dans le problème à de l'octane C_8H_{18}) et le comburant, **l'air**. Ceux-ci sont injectés dans des proportions stœchiométriques.

- 10) Ecrire l'équation équilibrée de la combustion avec formation eau vapeur.
- 11) Sachant que la composition de l'air (en pourcentages molaires) est de 20% en O_2 et 80% en N_2 , montrer qu'au moment de l'injection la fraction molaire d'octane (x_{octane}) est égale à 0,0157. En déduire la masse d'octane injectée pour la combustion.
- 12) BONUS - La quantité de chaleur libérée par l'octane lors de sa combustion dans les conditions de confinement de la chambre est de $447.10^2 \text{ kJ.kg}^{-1}$. Comparer la valeur de Q'_{BC} correspondante avec celle obtenue à la question 5. Comment expliquer cet écart de valeurs ?

Exercice 2 : système adiabatique (3 pts)

100 moles de gaz parfait diatomique initialement à 30°C sous 1,50 bar, sont brutalement détendues de manière adiabatique contre la pression de l'environnement ($P_e = 1,00 \text{ bar} = \text{constante}$).

- 1) En utilisant le premier principe appliqué à un gaz parfait se détendant de manière adiabatique contre une pression constante, montrer que la température finale du gaz sera $T = 274 \text{ K}$.
- 2) Calculer alors la variation d'entropie du gaz et confirmer le caractère irréversible de cette transformation.

Exercice 3 : machine frigorifique (4,5 pts)

Un kilogramme d'ammoniac pur utilisé comme fluide frigorigène (NH_3) parcourt réversiblement le cycle **ABCDEFA** décrit dans le schéma de fonctionnement d'une machine frigorifique suivant:

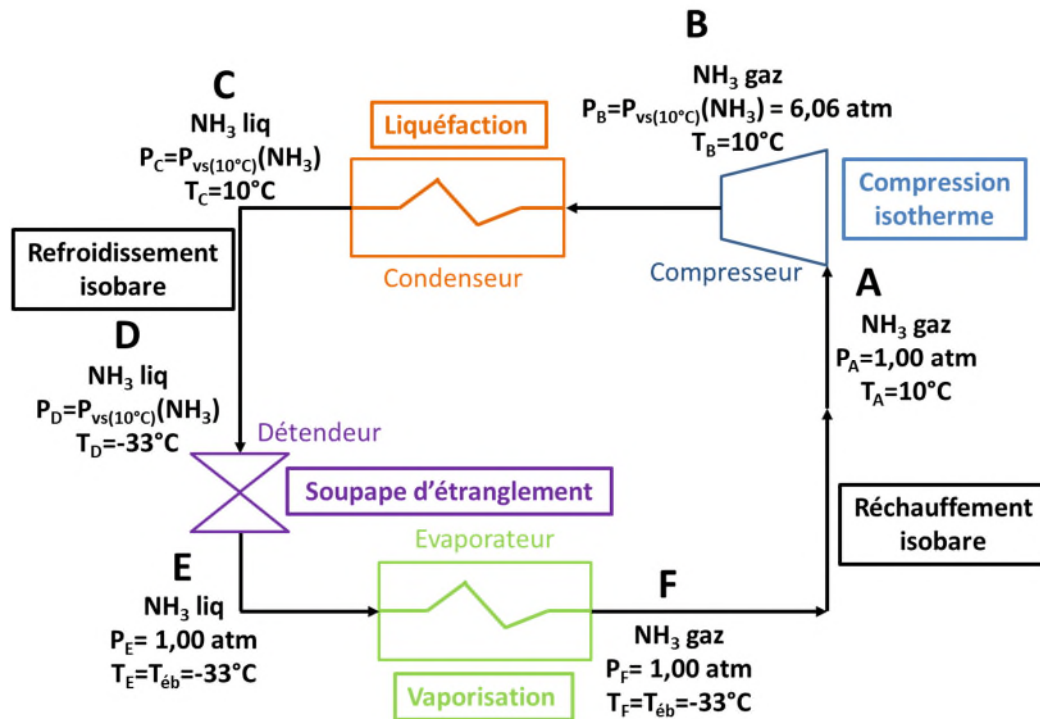


Schéma 2 : Fonctionnement d'une machine frigorifique parcouru par le fluide frigorigène ammoniac

Dans les diagrammes (P,T) et (P,V) fourni sur « la feuille à rendre », représenter le cycle **ABCDEF** du schéma 2 parcouru par le fluide frigorigène NH₃ en précisant les états physiques de NH₃. A l'état gazeux, NH₃ sera considéré comme un gaz parfait.

Données

$$\delta W = -P_{\text{ext}} dV \quad dS = \delta Q_{\text{rev}}/T \quad dU = \delta W + \delta Q \quad H = U + PV$$

Transformation adiabatique réversible d'un gaz parfait : $PV^\gamma = \text{cte}$

En l'absence de réaction chimique ou de changement d'état :

$$\text{Pour tout système, si } V = \text{cte} : dU = \delta Q_V$$

$$\text{Pour tout système, si } P = \text{cte} : dH = \delta Q_P$$

$$\text{Pour un gaz parfait : } dU = n \bar{C}_V dT \quad \text{et} \quad dH = n \bar{C}_P dT$$

Tous les gaz seront assimilés à des gaz parfaits, avec : $\bar{C}_P - \bar{C}_V = R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

$$\gamma = \frac{\bar{C}_P}{\bar{C}_V} = \frac{7}{5} = 1,40 \text{ pour un GP diatomique}$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 750 \text{ torr}$$

$$1 \text{ atm} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 760 \text{ torr}$$

$$0^\circ \text{C} = 273 \text{ K}$$

L'air est composé, en mole, de 20 % de dioxygène et de 80 % de diazote.

| Elément ou composé | H | C | N | O | air |
|--------------------------------------|---|----|----|----|-----|
| Masse molaire (g.mol ⁻¹) | 1 | 12 | 14 | 16 | 29 |

Pressions de vapeur saturante de NH₃ : $P_{vs(10^\circ \text{C})} = 6,06 \text{ atm}$; $P_{vs(-33^\circ \text{C})} = 1,00 \text{ atm}$

Volume spécifique de NH₃ liquide : 1,61 L · kg⁻¹ (considéré constant).

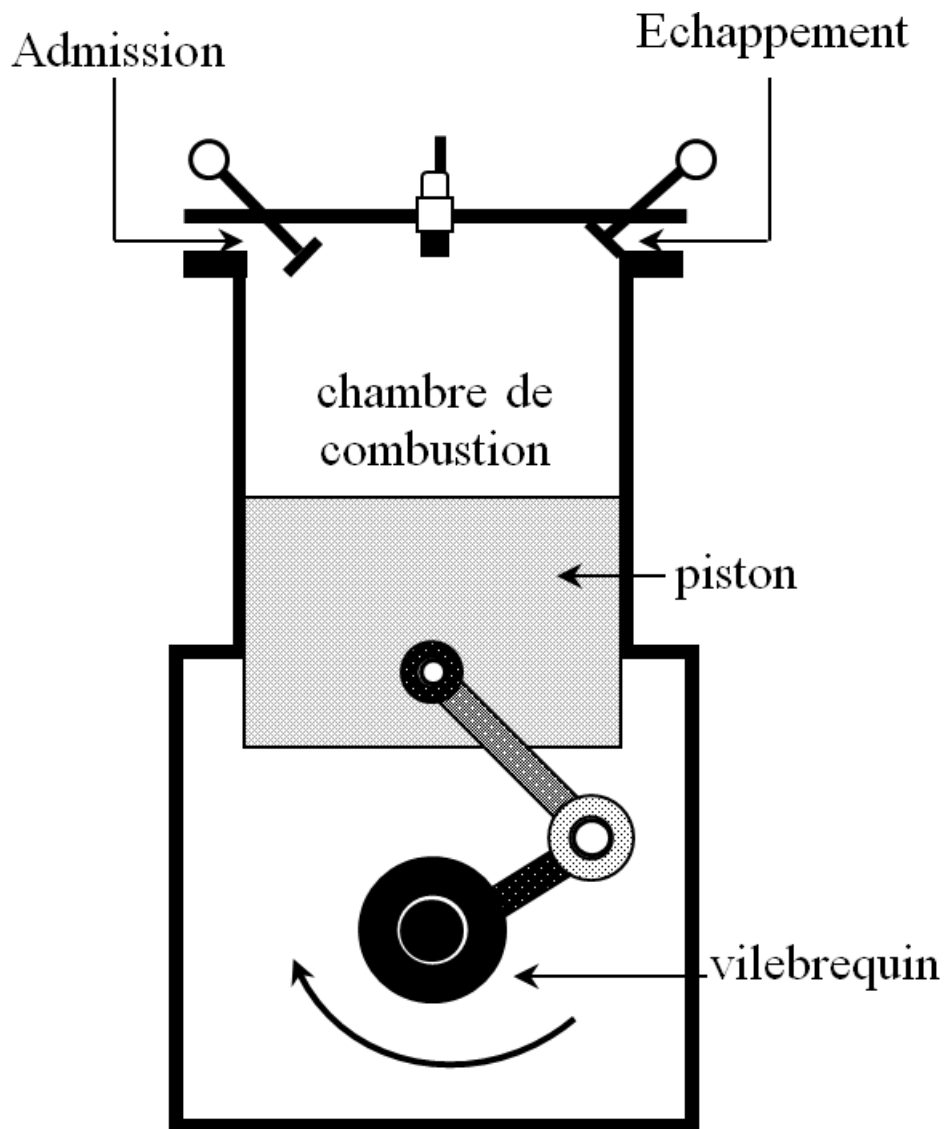
Feuille à rendre avec votre copie

NOM :

PRENOM :

GROUPE :

Exercice 1 : Machine thermique Cycle d'Otto



- 1) Indiquer sur le schéma de fonctionnement d'un moteur quatre temps sur la « feuille à rendre » où se situe le système étudié.

NOM :

PRENOM :

GROUPE :

Feuille à rendre avec votre copie

Exercice 3 : machine frigorifique

Cycle ABCDEFA dans les diagrammes (P,T) et (P,V)

