

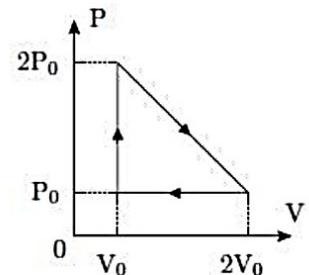
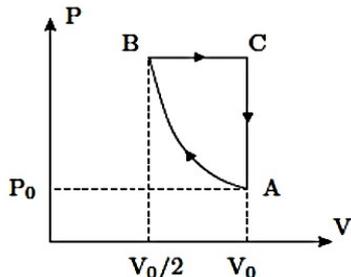
TD24 - MACHINES THERMIQUES

Exercice 1 : Questions de cours (à savoir faire sans le cours sous les yeux)

- 1 Comment se traduit le premier principe pour une machine thermique au cours d'un cycle ?
- 2 Etablir l'inégalité de Clausius. Dans quel cas a-t-on égalité ?
- 3 Enoncer et démontrer l'énoncé de Clausius du 2^{ème} principe.
- 4 Montrer qu'il n'existe pas de moteur thermique monotherme.
- 5 On considère un moteur ditherme.
 - a Donner sans démonstration le signe de W , Q_c et Q_f pour un moteur ditherme. Faire un schéma récapitulatif.
 - b Montrer que choisir $W < 0$ impose le signe de Q_c et Q_f .
 - c Définir le rendement d'un moteur ditherme.
- 6 Qu'est-ce qu'un cycle de Carnot ? Dessiner un cycle de Carnot dans un diagramme (P, V) puis dans un diagramme (T, S) .
- 7 Enoncer puis démontrer le théorème de Carnot.
- 8 On considère une machine frigorifique ditherme.
 - a Donner sans démonstration le signe de W , Q_c et Q_f pour une machine frigorifique ditherme.
 - b Pour un réfrigérateur domestique, qu'est-ce que la source chaude ? Et la source froide ?
 - c Faire un schéma récapitulatif du fonctionnement d'une machine frigorifique ditherme.
 - d Montrer que choisir $Q_f > 0$ impose le signe de Q_c et W .
 - e Définir l'efficacité d'une machine frigorifique.
 - f Montrer que $e_{\text{FRIGO}} \leq e_{\text{REV,FRIGO}}$. On donnera l'expression de l'efficacité de Carnot $e_{\text{REV,FRIGO}}$.
- 9 On considère une pompe à chaleur ditherme.
 - a Donner sans démonstration le signe de W , Q_c et Q_f pour une pompe à chaleur ditherme.
 - b Pour une pompe à chaleur domestique, qu'est-ce que la source chaude ? Et la source froide ?
 - c Faire un schéma récapitulatif du fonctionnement d'une pompe à chaleur ditherme.
 - d Définir l'efficacité d'une pompe à chaleur. Commenter.
 - e Montrer que $e_{\text{PAC}} \leq e_{\text{REV,PAC}}$. On donnera l'expression de l'efficacité de Carnot $e_{\text{REV,PAC}}$.
 - f Quel est l'intérêt d'une pompe à chaleur, si on la compare avec un radiateur électrique ?
- 10 Enoncer le premier principe pour un fluide en écoulement. Bien préciser à quoi correspond chaque terme.
- 11 Ordres de grandeur des efficacité et rendement des machines courantes
- 12 Expliquer le principe de la cogénération

Exercice 2 : Calcul de rendement (1)

Une mole de gaz parfait monoatomique ($\gamma=5/3$) décrit un cycle dont la représentation dans le diagramme de Clapeyron est le triangle dessiné ci-contre. Déterminer puis calculer le rendement du cycle.

**Exercice 3 : Calcul de rendement (2)**

Une mole de gaz parfait diatomique ($\gamma=1,4$) décrit un cycle dont la représentation dans le diagramme de Clapeyron est donnée ci-contre. La transformation AB est adiabatique réversible.

- 1 Exprimer le rendement η de cette machine thermique en fonction de T_A , T_B et T_C .
- 2 Exprimer η en fonction de γ uniquement. Faire l'application numérique.
- 3 Quel serait le rendement η' d'une machine ditherme réversible qui fonctionnerait entre les mêmes sources chaude et froide que la machine

considérée ? Calculer η' .

Exercice 4 : Moteur de Stirling

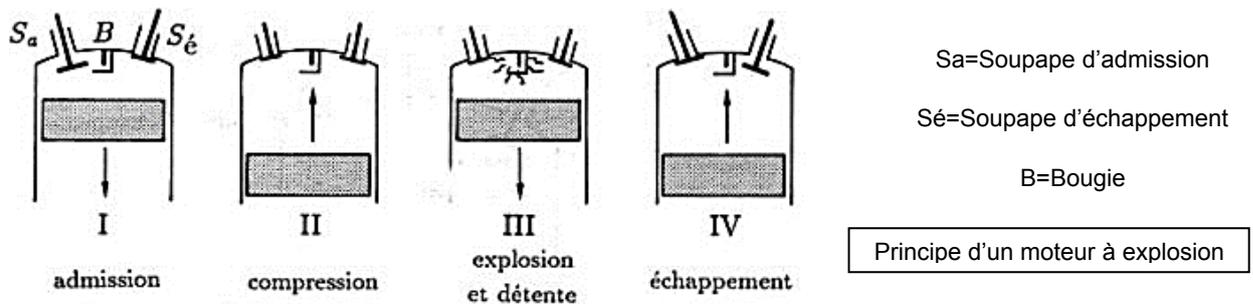
On considère $n = 40.10^{-3}$ moles d'air, considéré comme un gaz parfait diatomique ($\gamma=1,4$), subissant un cycle modélisé par les évolutions suivantes à partir de l'état A : $P_1=1,0\text{bar}$, $T_1=300\text{K}$.

- Compression isotherme réversible au contact d'un thermostat S1 à T_1 , jusqu'à l'état B, de volume $V_2= V_1/10$.
 - Echauffement isochore au contact d'un thermostat S2 à $T_2= 600\text{K}$ jusqu'à l'état C, de température T_2 .
 - Détente isotherme réversible au contact du thermostat S2 de température T_2 jusqu'à l'état D, de volume V_1 .
 - Refroidissement isochore au contact du thermostat S1 jusqu'à l'état A, de température T_1 .
- 1 Calculer les valeurs numériques de P, V et T pour chacun des états A, B, C et D. On mettra les valeurs dans un tableau.
 - 2 Représenter l'allure du cycle en coordonnées de Clapeyron (P,V). Comment peut-on sans calcul savoir si le cycle proposé est celui d'un moteur ou d'un système mécaniquement récepteur ?
 - 3 Exprimer puis calculer pour chaque étape le transfert thermique et le travail reçus par le fluide.
 - 4 Commentez ces résultats. A-t-on bien un cycle moteur ?
 - 5 Quelle est, sur le plan énergétique, la production de ce système sur un cycle ? Quel en est le coût, toujours sur le plan énergétique ? En déduire l'expression et la valeur numérique du rendement.
 - 6 Calculer la valeur de l'entropie créée par irréversibilité au sein du système au cours d'un cycle. Quel type d'irréversibilité entre en jeu ici ?

On donne $R=8,31\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$.

Exercice 5* : Moteur à explosion

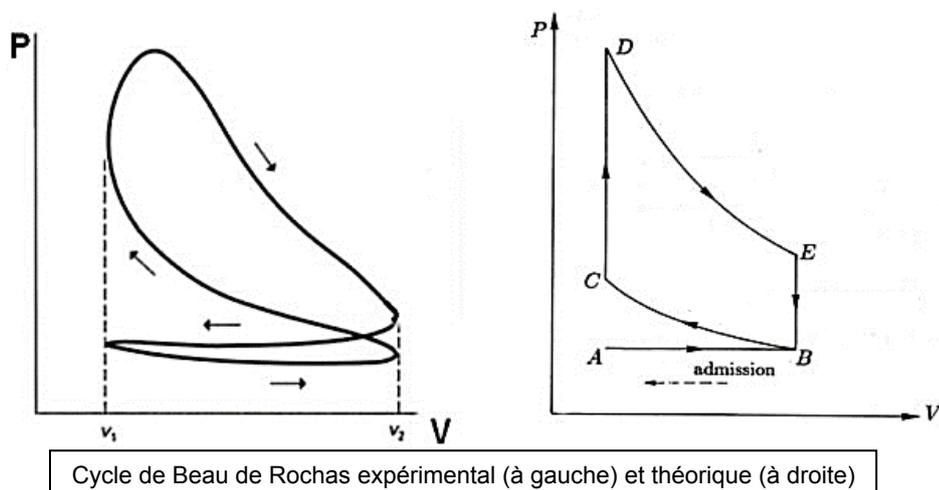
Dans un moteur à explosion, de l'air supposé parfait décrit le cycle de Beau de Rochas, appelé aussi cycle d'Otto, composé de deux adiabatiques et deux isochores en système fermé.



En A, le piston est en bout de course et le cylindre offre le volume minimal V_1 . L'évolution est la suivante :

- AB : La soupape est ouverte, le piston descend en aspirant le mélange air-carburant jusqu'au volume V_2 .
- BCD : Le piston remonte et comprime le gaz de façon adiabatique réversible de l'état B (P_B, V_2, T_B) à l'état C (P_C, V_1, T_C) puis l'étincelle est produite par la bougie provoquant la combustion. La pression augmente très rapidement mais le piston n'a pas le temps de bouger (évolution isochore de l'état C à l'état D (P_D, V_1, T_D)).
- DE : Les gaz brûlés sous forte pression repoussent le piston. C'est une détente adiabatique réversible de l'état D (P_D, V_1, T_D) à l'état E (P_E, V_2, T_E).
- EBA : La soupape d'échappement s'ouvre, provoquant une rapide baisse de pression isochore (EB), puis le piston remonte pour refouler les gaz brûlés (BA).

Les échanges avec la source chaude se font pendant la transformation isochore CD, et avec la source froide lors de la transformation isochore EB.



Cycle de Beau de Rochas expérimental (à gauche) et théorique (à droite)

Exprimer le rendement théorique η de ce cycle :

- 1 en fonction des températures T_B , T_C , T_D et T_E ;
- 2 en fonction du taux de compression $\alpha = \frac{V_2}{V_1}$ et du rapport $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ des capacités thermiques massiques de l'air.

Exercice 6 : Diagramme (P,h) de l'air

On donne en annexe 1 une partie du diagramme (P,h) de l'air (entre 0,1 et 100 bar). La masse molaire de l'air est environ $M=29\text{g.mol}^{-1}$.

- 1 A quelle température et à quelle pression le point A correspond-il ?
- 2 Si l'air était un gaz parfait, que pourrait-on dire des isenthalpes et des isothermes sur son diagramme (P,h) ? Est-ce le cas sur le diagramme ? Commenter.
- 3 Mesurer la capacité thermique massique à pression constante c_p au voisinage de A. En déduire la valeur de γ en adoptant le modèle du gaz parfait diatomique. Commenter. On donne $R=8,31\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$.
- 4 Vérifier que, le long de l'isentrope $s=4\text{kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$, $Pv^\gamma = \text{constante}$. Conclure sur l'intérêt du modèle du gaz parfait diatomique pour l'air dans les conditions ambiantes.

Exercice 7* : Machine à vapeur (type concours)

On donne en annexe 3 le diagramme (P,h) de l'eau. Dans une machine à vapeur, l'eau, en régime permanent, décrit un cycle de Rankine :

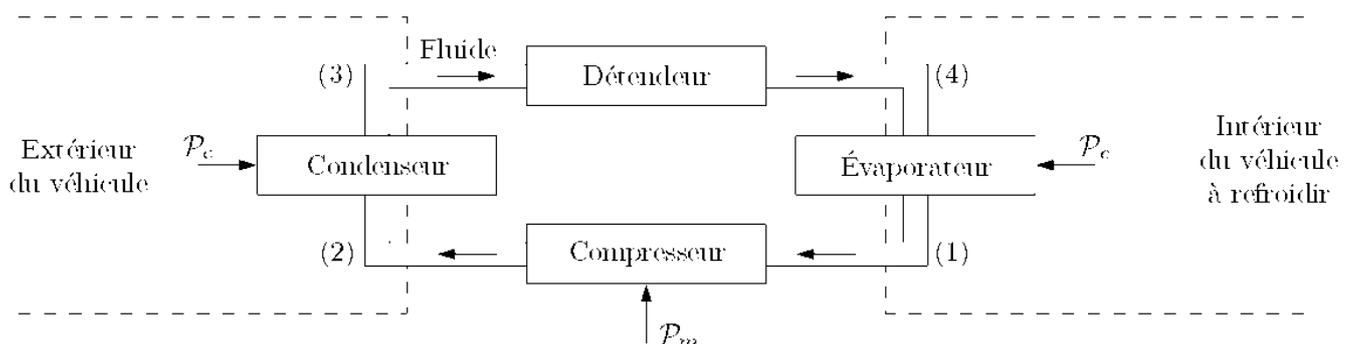
- Transformation AB : Dans l'état A l'eau est à l'état liquide saturant seul, dans les conditions de pression et température $P_1=0,2 \text{ bar}$ et $T_1=60^\circ\text{C}$. Lors de la transformation AB, l'eau est comprimée de façon adiabatique réversible dans une pompe jusqu'à la pression $P_2=15\text{bar}$.
- Transformation BC : l'eau est injectée dans la chaudière et s'y réchauffe de manière isobare jusqu'à la température $T_2=200^\circ\text{C}$, telle que $P_{\text{SAT}}(T_2)=P_2$.
- Transformation CD : l'eau se vaporise entièrement à la température T_2 .
- Transformation DE : la vapeur est admise dans le cylindre à T_2 et P_2 , et effectue une détente adiabatique réversible jusqu'à la température T_1 , on obtient alors un mélange liquide-vapeur.
- Transformation EA : le piston chasse le mélange liquide-vapeur dans le condenseur où il se liquéfie totalement.

Au cours des transformations BC, CD et EA, il n'y a aucun travail autre que celui des forces de pression.

- 1 Tracer le cycle sur le diagramme (P,h) donné en annexe 3. A-t-on bien un cycle moteur ? Justifier.
- 2 Rappeler l'expression du premier principe pour un fluide en régime permanent.
- 3 Déterminer par lecture graphique les transferts thermiques massiques q_{AB} , q_{BC} , q_{CD} , q_{DE} , q_{EA} .
- 4 Exprimer Q_C et Q_F en fonction de la masse totale d'eau et de q_{AB} , q_{BC} , q_{CD} , q_{DE} et/ou q_{EA} .
- 5 En déduire la valeur du rendement de la machine à vapeur correspondant au cycle tracé.
- 6 Comparer le rendement trouvé au rendement de Carnot.
- 7 Quelles sont les causes d'irréversibilité ?

Exercice 8* : Climatisation d'une voiture (type concours : CCP MP 2004)

On donne en annexe 4 le diagramme (P,h) du fluide R134A (Hydrofluorocarbone HFC), utilisé pour réaliser la climatisation d'une voiture. Pour refroidir l'air à l'intérieur de la voiture, le fluide frigorigène HFC effectue en continu des transferts énergétiques entre l'intérieur, l'extérieur du véhicule et le compresseur.



- 1 Pour la climatisation d'une voiture, quelle est la source chaude ? Quelle est la source froide ?

On donne le schéma de principe d'un climatiseur de voiture :

Lors de l'exploitation du diagramme (P,h) de HFC, de masse molaire $M=32\text{g.mol}^{-1}$, les mesures seront faites en prenant les incertitudes suivantes :

$$\Delta h = \pm 5 \text{kJ.kg}^{-1}, \quad \Delta s = \pm 50 \text{J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}, \quad \Delta x = \pm 0,05, \quad \Delta T = \pm 5^\circ\text{C}, \quad \frac{\Delta P}{P} = 5\%$$

- 1 Où sont sur le diagramme les domaines liquide, vapeur, équilibre liquide vapeur du fluide ?
 2 Dans quel domaine du diagramme le fluide à l'état gazeux peut-il être considéré comme un gaz parfait ? Justifier.

On étudie dans la suite l'évolution du fluide au cours d'un cycle en régime permanent. Le transfert thermique reçu par le fluide dans l'évaporateur permet la vaporisation isobare complète du fluide venant de (4) et conduit à de la vapeur à température $T_1=5^\circ\text{C}$ et pression $P_1=3\text{bar}$: point (1).

- 3 Placer le point (1) sur le diagramme. Relever la valeur de l'enthalpie massique h_1 et de l'entropie massique s_1 du fluide au point (1).

Le compresseur aspire la vapeur (1) et la comprime de façon adiabatique réversible avec un taux de compression $r = \frac{P_2}{P_1} = 6$.

- 4 Déterminer P_2 . Placer le point (2) sur le diagramme. Relever la valeur de la température T_2 et celle de l'enthalpie massique h_2 en sortie de compresseur.
 5 Déterminer la valeur du travail mécanique massique $w_{u,m}$ reçu par le fluide lors de son passage dans le compresseur. Commenter le signe de $w_{u,m}$.

Le fluide sortant du compresseur entre dans le condenseur dans lequel il est refroidi de manière isobare jusqu'à la température $T_3=60^\circ\text{C}$, puis dans lequel il se liquéfie complètement : point (3).

- 6 Placer le point (3) sur le diagramme. Relever la valeur de l'enthalpie massique h_3 en sortie du condenseur.

Le fluide sortant du condenseur est détendu sans travail autre que les forces de pression, dans le détendeur supposé calorifugé jusqu'à la pression de l'évaporateur P_1 : point (4).

- 7 Montrer que la transformation dans le détendeur est isenthalpique.
 8 Placer le point (4) sur le diagramme et tracer le cycle complet. Relever la valeur de la température T_4 et le titre massique en vapeur x_4 en sortie du détendeur.
 9 En déduire le transfert thermique massique q_e reçu par le fluide lors de son passage à travers l'évaporateur. L'air intérieur du véhicule est-il refroidi ? Justifier.

On s'intéresse maintenant à l'efficacité du climatiseur, aussi appelée coefficient de performance.

- 10 Définir l'efficacité e du climatiseur. Calculer sa valeur.
 11 Comparer la valeur de e à celle d'un climatiseur de Carnot fonctionnant entre la température de l'évaporateur et la température de liquéfaction du fluide sous la pression P_2 . Commenter.
 12 Le débit massique du fluide est $D_m=0,1\text{kg.s}^{-1}$. Exprimer puis calculer la puissance thermique évacuée de l'intérieur du véhicule.