

Travaux dirigés de Thermodynamique n°5

Application directe

Exercice 1 : Congélateur

On souhaite maintenir la température intérieure d'un congélateur à $-19,0\text{ °C}$. Pour ce faire, il est nécessaire d'extraire, par transfert thermique, $400\text{ kJ}\cdot\text{h}^{-1}$. Cette opération est supposée réversible.

La température de la pièce où se trouve le congélateur est de $20,0\text{ °C}$.

1. Rappeler le schéma de principe du système en faisant apparaître la source froide, la source chaude et la source de travail. Préciser le signe des échanges d'énergie W , Q_f et Q_c .
2. En utilisant l'égalité de Clausius, calculer la puissance thermique fournie à la pièce par le système.
3. Déterminer la puissance mécanique à fournir au congélateur ?
4. Définir et calculer l'efficacité théorique maximale e de ce congélateur.
5. Peut-on refroidir, à long terme, une cuisine en laissant la porte du congélateur ouverte ?

Cycles moteurs et récepteurs

Exercice 2 : Fonctionnement d'une voiture thermique (CCINP 2026)

On s'intéresse au fonctionnement d'une voiture Clio de la marque Renault dont les caractéristiques moteur sont les suivantes :

Carburant	Essence
Cylindrée (cm^3)	898
Rapport de compression	9,5 : 1
Puissance maximale (ch)	90
Couple maximal (N.m)	140

On définit le rapport de compression (ou rapport volumétrique) comme le rapport $\delta = V_h/V_b$ et la cylindrée comme le volume total admis par l'ensemble des cylindres du moteur lors de la phase d'admission.

Le moteur à essence de cette voiture utilise un mélange air-essence modélisé par un cycle thermodynamique de Beau de Rochas, constitué des phases suivantes :

- $0 \rightarrow 1$: admission isobare et isotherme du mélange dans la chambre de combustion jusqu'au point mort haut de volume V_h . La quantité de matière de mélange admise sera notée n_e .
- $1 \rightarrow 2$: compression adiabatique réversible du mélange vers le point mort bas de volume V_b où le mélange est porté à une température de 614 K .
- $2 \rightarrow 3$: combustion isochore du mélange qui atteint une température de 1800 K .
- $3 \rightarrow 4$: détente adiabatique réversible du mélange jusqu'au point mort haut où le mélange descend à une température de 879 K .
- $4 \rightarrow 1$: ouverture de la soupape modélisée par un refroidissement isochore jusqu'à la température ambiante de 300 K .
- $0 \rightarrow 1$: éjection isobare et isotherme du mélange jusqu'au point mort bas.

Pour simplifier l'étude, on assimile le mélange air-essence à un système fermé constitué d'une quantité de matière n_e d'un gaz parfait diatomique de coefficient isentropique $\gamma = 1,4$, hors étapes d'admission et d'éjection. On notera {GP} ce système.

On note respectivement W , Q_c et Q_f , le travail reçu par le système de la part du rotor du moteur, le transfert thermique reçu par le système de la part de la source chaude et le transfert thermique reçu par le système de la part de la source froide sur un cycle. On note également d'un indice i toute variable d'état associée à l'état i .

1. Identifier les sources chaude et froide, et donner leurs températures.
2. Donner, en justifiant, les signes de W , Q_c et Q_f .
3. Représenter le cycle dans le diagramme de Watt (P, V). Commenter le sens de parcours du cycle représenté.

Etude théorique du rendement :

4. Rappeler la relation de Mayer reliant les capacités thermiques à volume constant C_V et à pression constante C_P de {GP}.
5. En déduire les expressions de ces capacités thermiques en fonction de n_e, γ et de R , la constante des gaz parfaits.
6. Exprimer Q_{23} , le transfert thermique reçu par {GP} lors de la phase $2 \rightarrow 3$, en fonction notamment des températures T_2 et T_3 .
7. Exprimer Q_{41} , le transfert thermique reçu par {GP} lors de la phase $4 \rightarrow 1$, en fonction notamment des températures T_1 et T_4 .
8. En déduire une expression du rendement moteur η en fonction des températures T_1, T_2, T_3 et T_4 .
9. Exprimer la température T_4 en fonction de T_3, V_b, V_h et de γ .
10. Exprimer la température T_1 en fonction de T_2, V_b, V_h et de γ .
11. En déduire l'expression de η en fonction de δ et γ . Effectuer l'application numérique.
12. Etablir l'expression du rendement de Carnot η_C associé à ce cycle. Faire l'application numérique et commenter.

Exercice 3 : Cycle de Diesel (d'après Capes Externe)

Le moteur Diesel (Rudolf Diesel 1858 – 1913) est un moteur à quatre temps, modélisé comme suit :

Premier temps : Etat (0) \rightarrow Etat (1) : admission isobare de l'air seul.

Deuxième temps : Etat (1) \rightarrow Etat (2) : compression adiabatique réversible de l'air

Troisième temps : Etat (2) \rightarrow Etat (3) : Injection du carburant et dilatation à pression constante
Etat (3) \rightarrow Etat (4) : détente adiabatique réversible du mélange

Quatrième temps : Etat (4) \rightarrow Etat (1) : refroidissement à volume constant.
Etat (1) \rightarrow Etat (0) : Refoulement des gaz vers l'extérieur (échappement)

Chaque état est défini par la pression P_i , la température T_i et le volume V_i (i variant de 0 à 4).

On appelle γ le rapport des capacités calorifiques molaires $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$.

L'air est assimilé à un GP diatomique ($\gamma = 1,4$).

On donne : $P_1 = 10^5$ Pa ; $T_1 = 300$ K ; $T_2 = 1020$ K ; $V_1 = 2,5$ L ; $V_3 = 0,25$ L.

13. Représenter sommairement le cycle 1-2-3-4 sur un diagramme de Watt (l'admission et l'échappement sont supposés se compenser)
14. Identifier les phases de contact avec les sources chaude et froide.
15. Calculer la quantité n d'air dans le cycle ?
16. Calculer P_2 et V_2 puis T_3 .
17. Calculer P_4 et T_4 .
18. Montrer que le transfert thermique avec la source chaude vaut : $Q_C = -\frac{7}{2}nR(T_2 - T_3)$ et le calculer.
19. Calculer numériquement le transfert thermique avec la source froide Q_f et en déduire le travail W sur le cycle.
20. En déduire le rendement η du moteur. Faire l'application numérique.
21. Comparer au rendement η_C d'un cycle de Carnot dont les sources sont aux températures T_1 et T_3 .

Exercice 4 : Moteur Stirling (D'après CCS 2022)

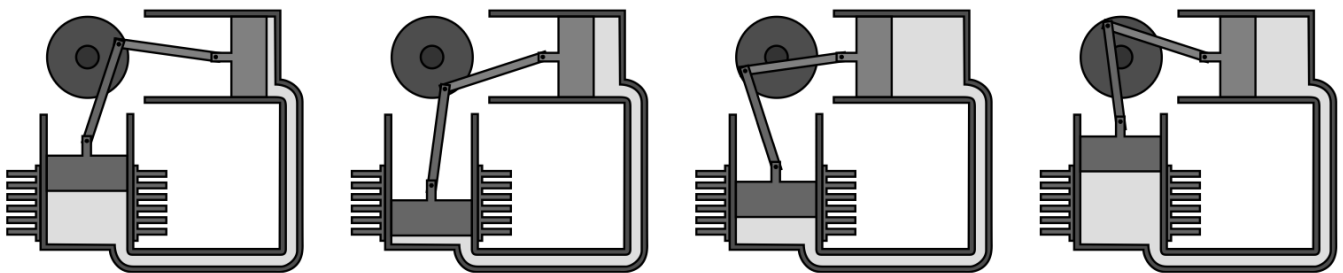
Au début du XIX^e siècle, les chaudières des machines à vapeur, soumises à de trop fortes pressions, explosent assez souvent. Robert Stirling a ainsi imaginé en 1816 un moteur dépourvu de chaudière où la chaleur est apportée de l'extérieur de la machine (moteur à « air chaud »). L'utilisation de ce moteur restera limitée, en particulier en raison de la trop faible puissance des modèles proposés, insuffisante pour concurrencer la machine à vapeur et le moteur à combustion interne.

Le moteur Stirling bénéficie actuellement d'un nouvel intérêt car il présente de nombreux avantages. Il peut utiliser n'importe quelle source d'énergie produisant de la chaleur, combustion de tout matériau mais également énergie solaire, nucléaire, géothermique, etc. Il produit peu de vibrations et est silencieux (pas d'explosion interne ni d'échappement gazeux, absence de valves et soupapes). Grâce à l'utilisation de matériaux modernes qui supportent de grands écarts de température et qui améliorent les transferts thermiques, son rendement est comparable voire supérieur à celui des moteurs à combustion interne. Son entretien est facile et il s'use moins que les moteurs à explosion.

La conception d'un moteur Stirling est cependant délicate, en raison des gros écarts de température qu'il doit supporter et de la nécessité d'une excellente étanchéité ; son prix reste donc élevé. Par ailleurs, il est difficile de faire varier son régime. Son emploi reste ainsi cantonné à des utilisations de niches : générateur d'électricité en milieux extrêmes, propulseur pour sous-marins, etc. Sa réversibilité conduit à l'utiliser comme pompe à chaleur capable de refroidir à -200°C ou de chauffer à plus de 700°C .

Description du moteur

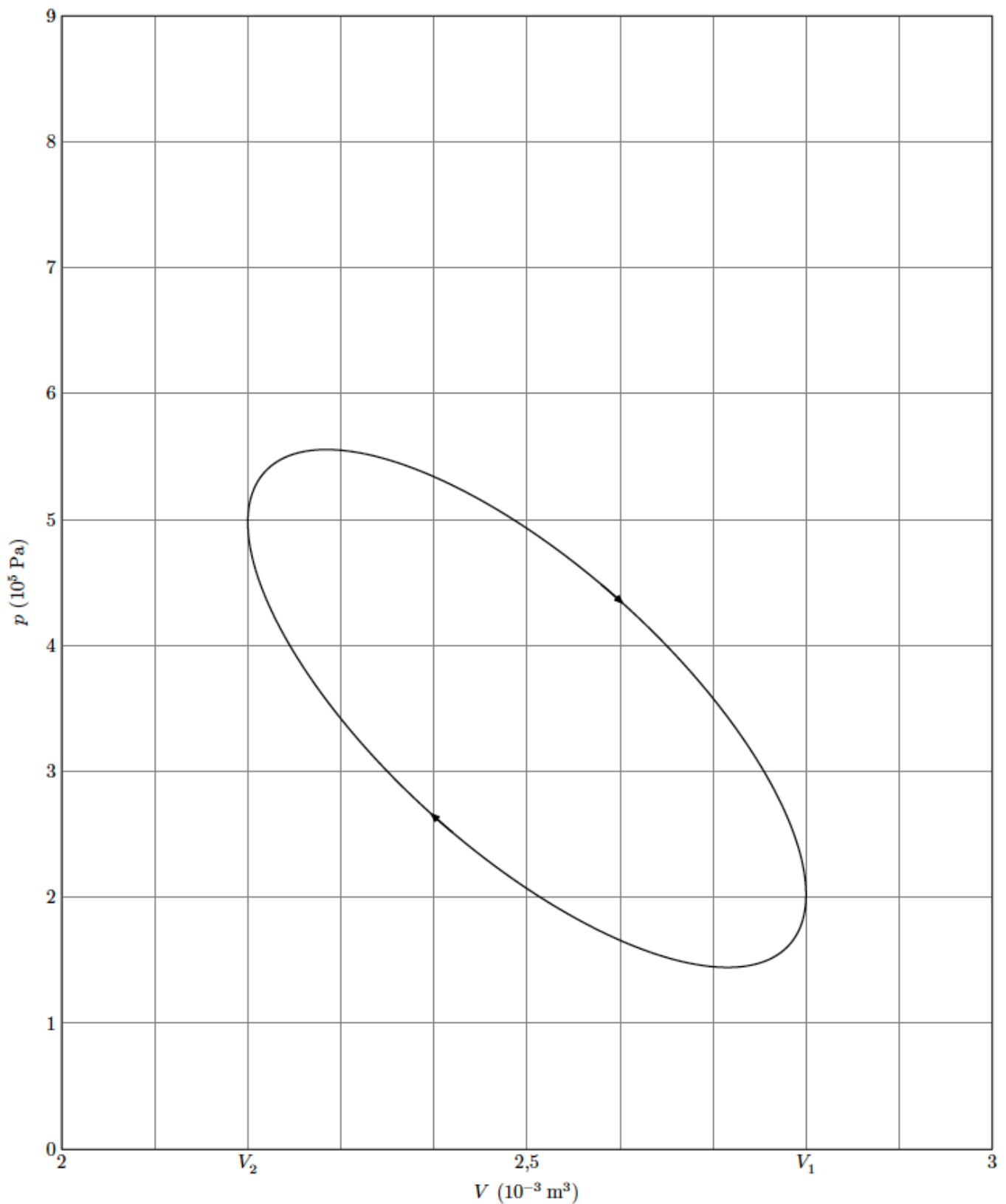
Une enceinte étanche est séparée en deux chambres, une chambre chaude (chauffée par l'extérieur), de volume maximal V_1 , et une chambre froide équipée d'un dissipateur thermique (ailettes), de volume maximal V_2 . Chaque chambre est dotée d'un piston permettant de faire varier son volume et le fluide peut circuler librement d'une chambre à l'autre. Le piston de la chambre froide est le piston de travail, il entraîne le piston de la chambre chaude appelé « déplaceur » car son rôle est de faire circuler le fluide entre les deux chambres. Lors du transvasement, le fluide passe de la chambre chaude à la température T_3 à la chambre froide à la température $T_1 < T_2$ et réciproquement.



Le mouvement du gaz peut être décrit par 4 phases plus ou moins distinctes :

- une phase de compression, pendant laquelle le volume de la chambre chaude est minimal, le fluide, entièrement situé dans la zone froide, est comprimé par le piston de travail dans sa course vers le bas ;
- une fois le piston de travail au point mort bas, le déplaceur est ramené à gauche, ce qui a pour effet de transvaser le fluide comprimé, qui passe de la zone froide vers la zone chaude et reçoit un transfert thermique de la source externe ;
- une phase de détente, pendant laquelle le fluide se détend dans le volume d'expansion où il continue d'être chauffé. Cette détente a pour effet de repousser le déplaceur et le piston de travail ;
- une fois que le piston de travail a atteint le point mort haut, le déplaceur est ramené à droite, ce qui a pour effet de transvaser le fluide de la zone chaude (volume d'expansion) vers la zone froide (volume de compression). Au cours de ce transfert, le fluide cède de la chaleur au refroidisseur.

Un cycle réel d'un moteur de Stirling est représenté le diagramme (P, V) ci-dessous :



Allure du cycle réel d'un moteur Stirling dans le diagramme (p, V)

1. Justifier que ce cycle est celui d'un moteur.
2. Estimer la valeur du travail fourni par le moteur pendant un cycle.

Modélisation du cycle

On étudie le cycle de Stirling idéal. Au cours de celui-ci, n moles de gaz parfait de coefficient adiabatique γ subissent les transformations suivantes :

- une compression (1 \rightarrow 2) isotherme réversible à la température T_1 ,
- un échauffement (2 \rightarrow 3) isochore jusqu'à l'état 3 de température T_3 ,
- une détente (3 \rightarrow 4) isotherme réversible à la température T_3 ,
- un refroidissement (4 \rightarrow 1) isochore jusqu'à l'état 1.

Il n'y a pas d'autre travail que celui des forces de pression.

3. Représenter sur le diagramme (P, V) , l'allure du diagramme correspondant au cycle idéal.

On note $r = \frac{V_1}{V_2}$ le rapport de compression entre les volumes fixés par construction.

On rappelle que la capacité thermique à volume constant d'un gaz de n moles de gaz parfait vaut $C_V = \frac{nR}{\gamma-1}$ où R est la constante des gaz parfaits.

4. Exprimer W_{12} , le travail reçu par le fluide au cours de la compression, en fonction de n, R, T_1 et r . En déduire le transfert thermique Q_{12} reçu par le fluide au cours de cette compression en fonction de n, R, T_1 et r . Préciser les signes de W_{12} et de Q_{12} .
5. Exprimer Q_{23} , le transfert thermique reçu par le fluide au cours de l'échauffement isochore, en fonction de n, R, T_1, T_3 et γ . Préciser son signe.
6. Exprimer W_{34} , le travail reçu par le fluide au cours de la détente, en fonction de n, R, T_3 et r . En déduire le transfert thermique Q_{34} reçu par le fluide au cours de cette détente en fonction de n, R, T_3 et r . Préciser les signes de W_{34} et Q_{34} .
7. Exprimer le transfert thermique Q_{41} reçu par le fluide au cours du refroidissement en fonction de n, R, T_1, T_3 et γ . Préciser son signe.

Rendement du moteur

8. Définir puis exprimer le rendement idéal du moteur en fonction de T_1, T_3, r et γ .
9. Définir et exprimer le rendement de Carnot en fonction de T_1 et T_3 .

En réalité, les moteurs de Stirling usuels contiennent un régénérateur. Dans ce cas, la chaleur perdue par le gaz lors du refroidissement isochore (4 \rightarrow 1) est récupérée par le gaz lors du chauffage isochore (2 \rightarrow 3). Si le régénérateur est idéal, cette récupération est totale.

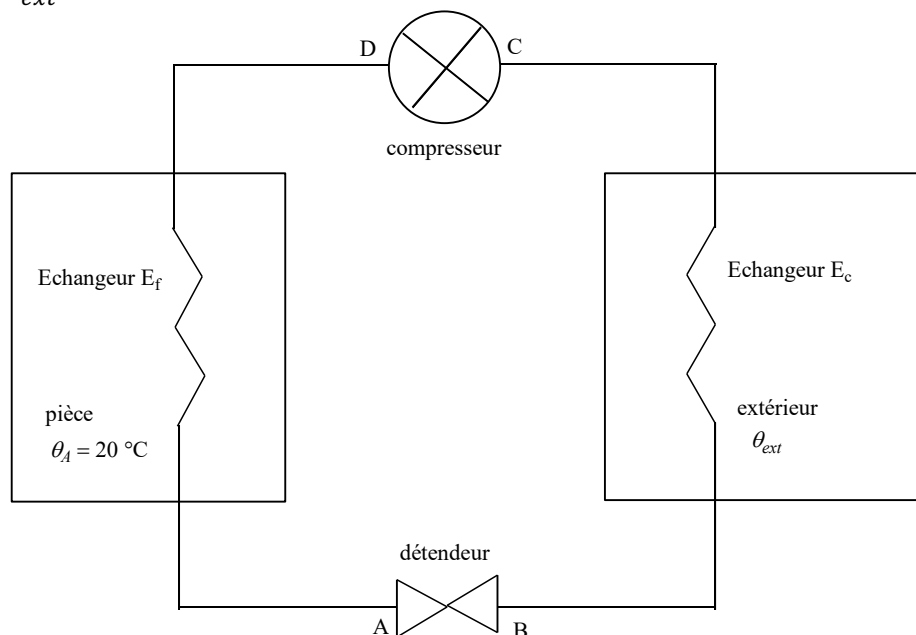
10. Que devient le rendement du cycle idéal dans ce cas ?

Lors d'une expérience de la NASA réalisée en 2018, les ingénieurs indiquent que l'efficacité du moteur a évolué pendant l'expérience entre 30 % et 50 % de l'efficacité de Carnot. De plus, la puissance mécanique obtenue est d'environ 180 W.

11. En prenant une température chaude de 640 °C et une température froide de 60 °C, estimer numériquement la puissance thermique fournie par la source chaude au moteur de Stirling.

Exercice 5 : Étude d'une pompe à chaleur (d'après CCINP)

Dans une pièce fermée, on souhaite maintenir une température $\theta_{amb} = 20\text{ °C}$ tandis que l'air extérieur est à la température $\theta_{ext} = 0\text{ °C}$.



Pour cela, on considère une pompe à chaleur fonctionnant ainsi :

Le fluide considéré est de l'hélium gazeux assimilé à un gaz parfait de masse molaire $M = 4,0\text{ g.mol}^{-1}$ coefficient isentropique constant $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1,67$

Le fluide décrit des cycles au cours desquels il subit :

- une détente adiabatique réversible dans le détendeur qui l'amène de l'état A ($\theta_A = \theta_{amb} = 20\text{ °C}$; $P_A = 3,0\text{ bar}$) à l'état B (T_B ; $P_B = 2,0\text{ bar}$)
- un réchauffement isobare dans l'échangeur E_c qui amène le fluide dans un état C ($\theta_C = \theta_{ext} = 0\text{ °C}$; P_C)
- une compression adiabatique réversible dans le compresseur qui amène le fluide dans un état D (T_D ; P_D)
- un refroidissement isobare dans l'échangeur E_f qui ramène le fluide dans l'état A.

1. Exprimer littéralement les températures T_B et T_D en fonction de T_{amb} , T_{ext} , P_A et P_B .
2. Faire les applications numériques.
3. Donner l'allure du cycle en coordonnées (P, V) en précisant le sens de parcours du cycle.
4. Est-ce un cycle moteur ou récepteur ? Que cela signifie-t-il ?
5. Calculer le transfert thermique Q_{BC} reçu par une masse $m = 1,0\text{ kg}$ du fluide lors de la traversée de l'échangeur E_c . Commenter le signe.
6. Calculer le transfert thermique Q_{DA} reçu par une masse $m = 1,0\text{ kg}$ du fluide lors de la traversée de l'échangeur E_f . Commenter le signe.
7. Calculer le travail W reçu par une masse $m = 1,0\text{ kg}$ du fluide lors d'un cycle.
8. Définir l'efficacité e de la pompe à chaleur. La calculer.
9. Quelle est l'efficacité maximale e_{max} que l'on peut obtenir pour une pompe à chaleur fonctionnant avec ces deux mêmes sources de chaleur ?
Pourquoi n'est-elle pas atteinte avec la pompe à chaleur étudiée ?
10. Quel est l'intérêt d'une pompe à chaleur par rapport à un chauffage électrique ?
11. L'intérêt de ce type de dispositif est qu'il peut fonctionner comme climatiseur en été. Expliquer succinctement comment (en 15 lignes maximum).

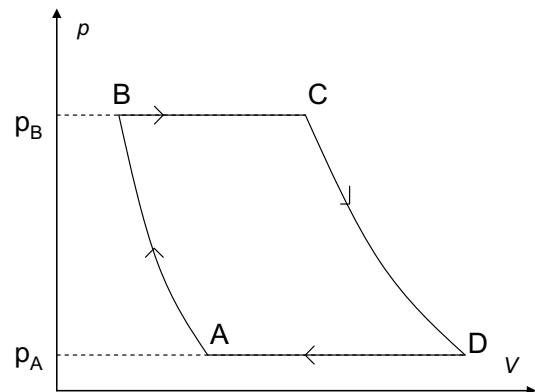
Exercice 6 : Rendement et taux de compression

On considère le cycle quasistatique ci-contre décrit par un gaz parfait diatomique ($\gamma = 1,4$).

Les évolutions AB et CD sont adiabatiques, les évolutions BC et DA sont isobares.

Le rapport $a = \frac{p_B}{p_A}$, est appelé taux de compression.

1. Le cycle correspond-il à un moteur thermique ou à une machine frigorifique ?
2. Exprimer le rendement de cette machine en fonction des températures.
3. Exprimer le rendement de cette machine en fonction de γ et du taux de compression.



Exercice 7 : Machine frigorifique.

Dans une machine frigorifique dont le fluide est assimilable à un gaz parfait, une mole de fluide parcourant le cycle reçoit un transfert thermique $Q_2 (> 0)$ d'une source froide de température $T_2 = 268$ K, et une transfert thermique $Q_1 (< 0)$ d'une source chaude de température $T_1 = 293$ K.

Le compresseur délivre dans le même temps un travail W

Le cycle comprend les transformations suivantes :

- une compression adiabatique réversible de T_2 à $T'_2 = 330$ K ;
- un refroidissement isobare de T'_2 à T_1 ;
- une détente adiabatique réversible de T_1 à T'_1 ;
- un échauffement isobare jusqu'à T_2 .

1. Représenter ce cycle dans le diagramme de Watt
2. Exprimer l'efficacité e en fonction des transferts thermiques puis en fonction de T_2 et T'_2 .
3. Comparer sa valeur à celle du cycle réversible.

Donnée : capacité molaire à pression constante du fluide $C_{pm} = 29$ J. K⁻¹. mol⁻¹

Capacités exigibles :

Application du premier et du deuxième principe aux machines thermiques dithermes.

- Donner le sens des échanges énergétiques pour un moteur ou un récepteur thermique ditherme
- Définir un rendement ou une efficacité et la relier aux énergies échangées au cours d'un cycle.
- Identifier un cycle moteur ou récepteur d'après son sens
- Démontrer et utiliser le théorème de Carnot (rendement et efficacité de Carnot)
- Analyser un dispositif concret et le modéliser par une machine cyclique ditherme
- Citer quelques ordres de grandeur des rendements des machines thermiques réelles actuelles.

QCM d'entraînement :

