

Travaux dirigés de Thermodynamique n°5

Application directe

Exercice 1 : Rendement d'un moteur automobile.

Une voiture de puissance thermique 100 ch consomme 7 L aux 100 km en roulant environ à 100 km/h.

On donne 1 cheval vapeur vaut 1 ch = 736 W, la combustion d'un litre d'essence libère une énergie d'environ 10 kWh.

1. Vérifier que l'ordre de grandeur de la puissance thermique consommée est correct.
2. Sachant que pour se maintenir à une vitesse de 100 km/h, la voiture doit fournir une puissance mécanique d'environ 20 kW, quel est le rendement total du moteur lors de ce fonctionnement ?
3. Pourquoi le rendement n'est-il que de l'ordre de 10% en pratique ?

Exercice 2 : Congélateur

On souhaite maintenir la température intérieure d'un congélateur à $-19,0^\circ\text{C}$. Pour ce faire, il est nécessaire d'extraire, par transfert thermique, 400 kJ/h. Cette opération est supposée réversible. La température de la pièce où se trouve le congélateur est de $20,0^\circ\text{C}$.

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 3 : Cycle de Diesel.

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 et $V_3 = 0,25$ L.

1. Représenter sommairement le cycle 1-2-3-4 sur un diagramme de Watt (l'admission et l'échappement sont supposés se compenser)
2. Identifier les phases de contact avec les sources chaude et froide.
3. Calculer la quantité n d'air dans le cycle ?
4. Calculer P_2 et V_2 puis T_3 .
5. Calculer P_4 et T_4 .
6. Montrer que le transfert thermique avec la source chaude vaut : $Q_C = -\frac{7}{2}nR(T_2 - T_1)$ et le calculer.
7. Calculer numériquement le transfert thermique avec la source froide Q_f et en déduire le travail W sur le cycle.
8. En déduire le rendement η du moteur. Faire l'application numérique.
9. 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)

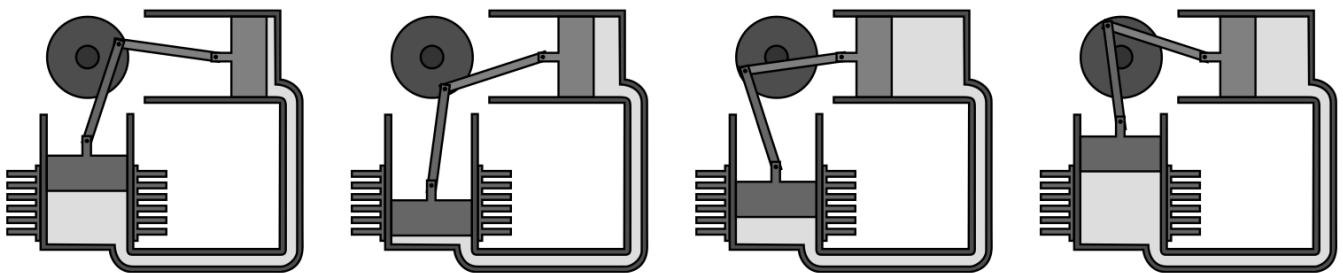
Au début du XIX^e siècle, les chaudières des machines à vapeur, soumises à de trop fortes pressions, explosent assez souvent. Robert Stirling a ainsi imaginé en 1816 un moteur dépourvu de chaudière où la chaleur est apportée de l'extérieur de la machine (moteur à « air chaud »). L'utilisation de ce moteur 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

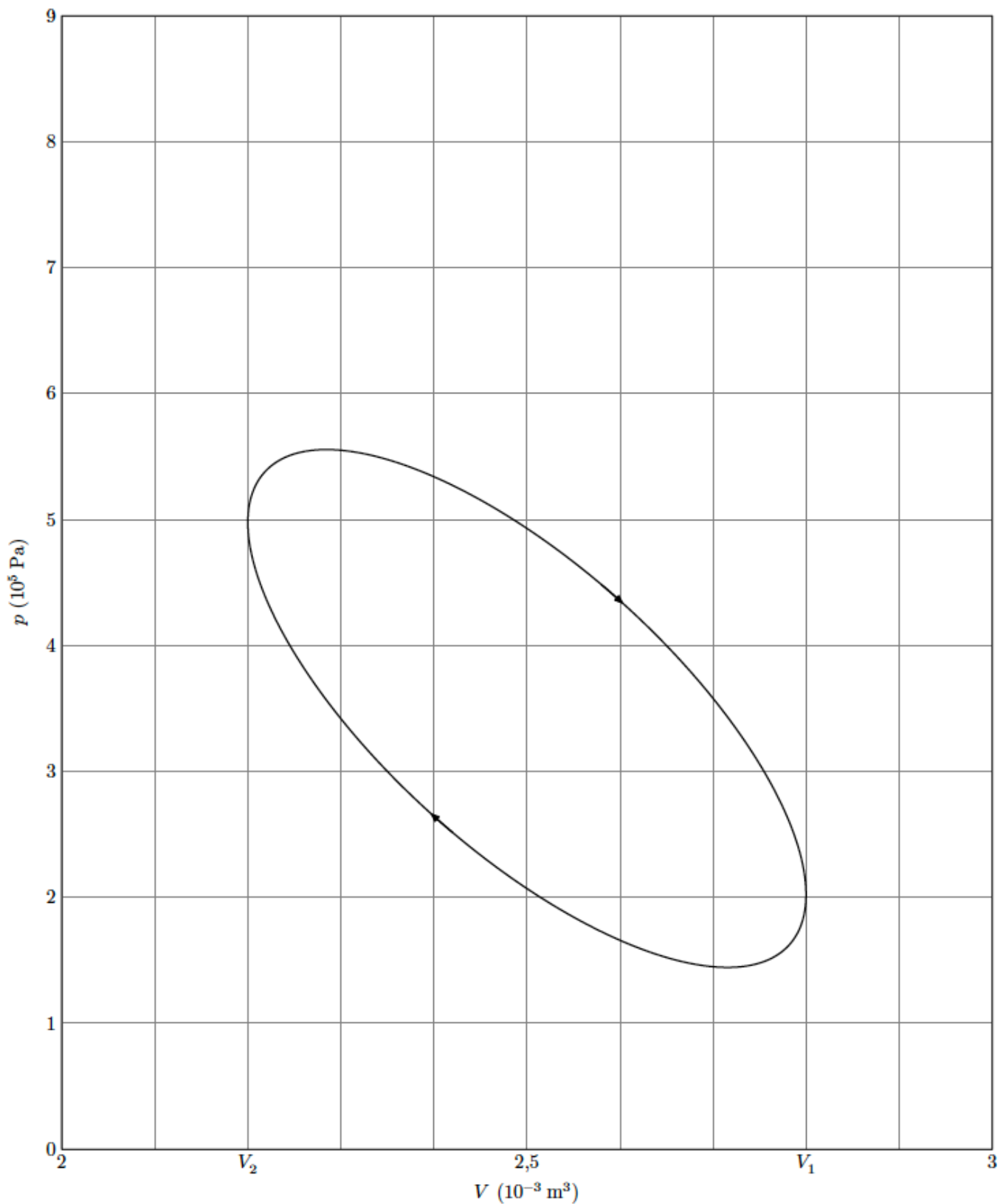
Une enceinte étanche est séparée en deux chambres, une chambre chaude (chauffée par l'extérieur), de volume maximal V_1 , et une chambre froide équipée d'un dissipateur thermique (ailettes), de volume maximal V_2 . Chaque chambre est dotée d'un piston permettant de faire varier son volume et le fluide 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.

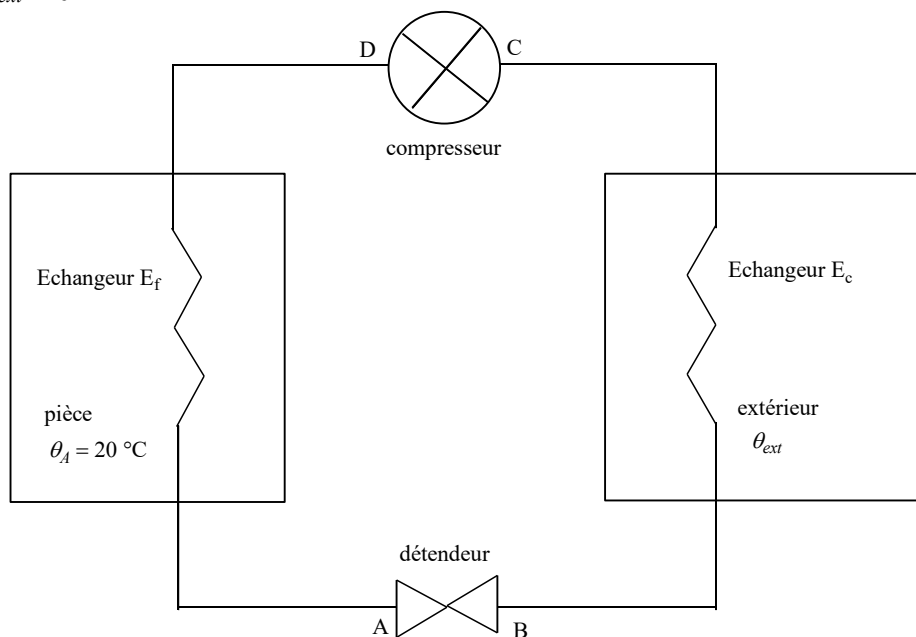
10. Que devient le rendement du cycle idéal dans ce cas ?

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 CCP)

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 $M = 4,0\text{ g/mol}$ coefficient isentropique constant $\gamma = C_p / C_v = 1,67$

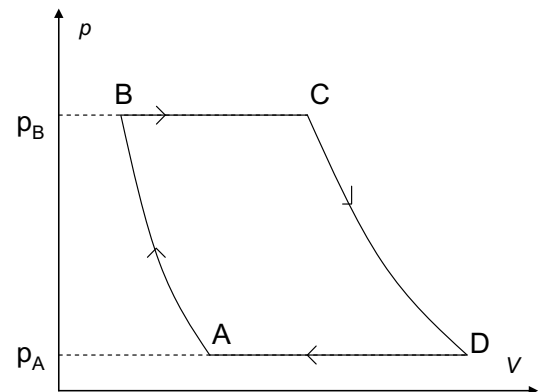
Le fluide décrit des cycles au cours desquels il subit :

- 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 $\frac{p_B}{p_A}$, noté 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 $T_2=268\text{K}$, et un transfert thermique $Q_1 (<0)$ d'une source chaude de température $T_1=293\text{K}$. Le compresseur délivre dans le même temps un travail W

Le cycle comprend les transformations suivantes :

- une compression adiabatique réversible de T_2 à $T'_2=330\text{K}$;
- 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 $C_{pm}=29\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$