

Sujet d'entraînement

Thermodynamique

Moteur endoréversible

On étudie un moteur ditherme cyclique.

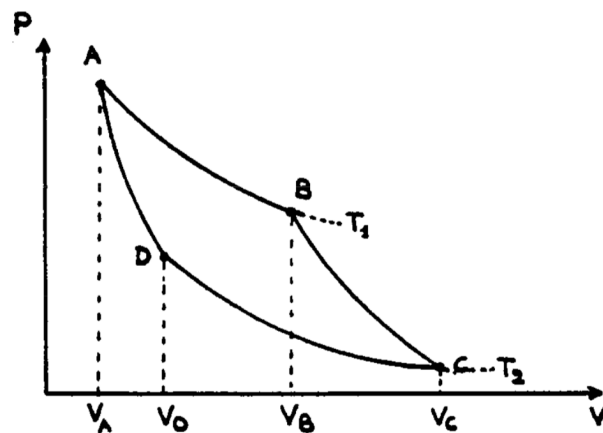
La première partie permet de rappeler les résultats fondamentaux du cycle de Carnot.

La seconde partie s'intéresse à la détermination des conditions de fonctionnement permettant d'obtenir une puissance délivrée maximale.

I Moteur thermique : cycle de Carnot

On considère un cycle réversible constitué de deux transformations isothermes AB et CD , avec de températures respectives T_1 et T_2 ($T_1 > T_2$), et de deux transformations adiabatiques BC et DA .

On représente le cycle dans le diagramme de Watt (P, V) :



1. Dans quel sens le cycle réversible doit-il être parcouru pour être moteur ?
2. Représenter le même cycle dans le diagramme (T, S), où S est l'entropie du système décrivant le cycle, en précisant le sens de parcours.
3. Pour chacune des étapes AB , BC , CD et DA , déterminer :
 - le transfert thermique Q reçu par le système ;
 - le travail W reçu par le système ;
 - la variation d'énergie interne ΔU du système ;
 - la variation d'entropie ΔS du système.

On supposera que le système qui accomplit le cycle est constitué d'une mole de gaz parfait dont la capacité thermique molaire à volume constant C_v est indépendante de la température.

Les résultats seront exprimés en fonction des volumes et des températures.

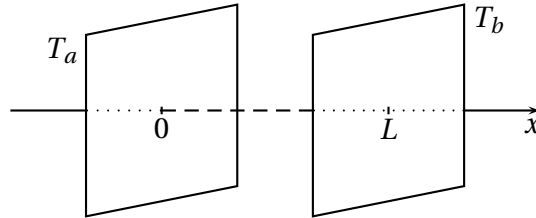
On considère maintenant qu'un cycle réversible ditherme analogue entre les températures T_1 et T_2 est parcouru par un corps quelconque. On désigne par ΔS_{AB} la variation d'entropie lors de la transformation AB .

4. Exprimer les variations d'entropie et les transferts thermiques reçus lors des trois autres étapes en fonction de ΔS_{AB} , T_1 et T_2 .
5. Quelle est la définition du rendement ¹ η d'un moteur ditherme ?
Exprimer η en fonction des transferts thermiques Q_1 et Q_2 échangés avec les thermostats aux températures T_1 et T_2 .
6. En déduire η en fonction de T_1 et T_2 .

1. Il s'agit ici en toute rigueur de son efficacité.

II Étude des transferts thermiques avec les thermostats en fonction du temps en régime stationnaire

On considère deux corps aux températures T_a et T_b (avec $T_a > T_b$) mis en contact thermique par l'intermédiaire d'une paroi d'épaisseur L et de surface Σ perpendiculaire à l'axe Ox (problème unidimensionnel). On note λ la conductivité thermique de la paroi.



On admet que le régime est stationnaire et que les températures T_a et T_b ne varient pas.

1. Montrer que le vecteur densité volumique de courant $\vec{J}_Q = J_Q \vec{u}_x$ est uniforme, et déterminer son expression en fonction de T_a , T_b , λ et L .

Déterminer le profil de température $T(x)$ dans la paroi.

2. On note R_{th} la résistance thermique de la paroi et $\sigma = \frac{1}{R_{th}}$ sa conductance thermique.

Exprimer σ en fonction de Σ , λ et L .

3. Calculer la durée Δt nécessaire pour qu'un transfert thermique Q traverse Σ . On donnera son expression en fonction, entre autres, de la conductivité thermique σ de la paroi.

Que se passe-t-il quand $T_a - T_b$ tend vers zéro ?

Un fluide effectue un cycle réversible² composé de deux isothermes de température T_1 et T_2 (avec $T_1 > T_2$) et de deux adiabatiques. Pendant les transformations isothermes, la source chaude est à une température T_c et la source froide à une température T_f .

Les sources chaude et froide sont en contact avec le fluide par des interfaces de conductances thermiques respectives σ_1 et σ_2 .

4. Comparer T_c à T_1 , et T_f à T_2 pour que les transferts thermiques s'effectuent dans le sens souhaité.

5. Calculer les durées t_1 et t_2 nécessaires pour effectuer les transferts thermiques Q_1 avec la source chaude et Q_2 avec la source froide.

6. Montrer que le rendement η de ce cycle est égal au rendement d'un cycle idéal (de Carnot) fonctionnant entre les températures T_1 et T_2 .

7. En déduire les expressions de Q_1 et Q_2 , puis de t_1 et t_2 en fonction de W , T_1 et T_2 .

III Conditions pour obtenir une puissance maximum

Les températures des sources T_c et T_f sont fixées. On cherche à déterminer les températures T_1 et T_2 qui rendent maximale la puissance délivrée par ce cycle. On suppose que la durée associée aux transformations adiabatiques du cycle est négligeable devant celle nécessaire aux transferts de chaleur.

8. Déterminer l'expression de l'inverse Z de la puissance moyenne délivrée par le système en fonction de σ_1 , σ_2 , T_1 , T_2 , T_c et T_f .

9. On pose $x = \frac{T_1}{T_2}$ et $y = T_1 - T_2$.

Déterminer $Z(x, y)$; on fera intervenir les paramètres σ_1 , σ_2 , T_c et T_f .

2. La réversibilité concerne la transformation du système constitué du fluide seul.

10. La différentielle de Z s'écrivant

$$dZ = \frac{\partial Z}{\partial x} dx + \frac{\partial Z}{\partial y} dy,$$

la fonction Z présente un extremum si $\frac{\partial Z}{\partial x} = 0$ et $\frac{\partial Z}{\partial y} = 0$.

Déterminer la relation entre T_1 , T_2 , T_c et T_f pour que la puissance délivrée soit maximum.

11. En déduire l'expression du rendement η en fonction des températures T_c et T_f des sources, et comparer avec le rendement η_{id} du cycle idéal de Carnot fonctionnant entre les mêmes sources.

12. On donne ci-dessous les caractéristiques de trois centrales électriques de types différents. Calcule pour chacune d'elles le rendement du cycle idéal η_{id} et le rendement η associé à la puissance maximum. Comparer au rendement mesuré η_{exp} ? Quelle conclusion tirez-vous de cette comparaison?

Centrale charbon de West (Angleterre)	$T_f = 300 \text{ K}$	$T_c = 840 \text{ K}$	$\eta_{exp} = 0,36$
Centrale nucléaire de Candu (Canada)	$T_f = 300 \text{ K}$	$T_c = 570 \text{ K}$	$\eta_{exp} = 0,30$
Centrale géothermique de Lardello (Italie)	$T_f = 350 \text{ K}$	$T_c = 520 \text{ K}$	$\eta_{exp} = 0,16$

IV Moteur réversible, moteur endoréversible

Le cycle de Carnot correspond à une révolution réversible du système et des sources de chaleur.

Le moteur étudié dans la partie 2 ne suppose que la réversibilité de l'évolution du système constitué par le fluide seul du moteur; on parle alors de moteur endoréversible.

13. Selon vous, où se situent les causes d'irréversibilité dans le fonctionnement d'un tel moteur?

14. On considère la paroi décrite dans la partie 2.

En faisant un bilan d'entropie pendant une durée Δt , établir l'expression de l'entropie créée pendant cette durée dans la paroi.

En déduire l'expression du taux d'entropie $\dot{S}_{créé} = \frac{S_{créé}}{\Delta t}$ créée par unité de temps dans la paroi. On donnera son expression en fonction des températures T_a et T_b , et de la conductivité thermique σ de la paroi.

15. Discuter du rôle des irréversibilités dans le moteur endoréversible, et de l'inconvénient pratique du cas limite du moteur de Carnot.