TD 26 – Machines thermiques cycliques

1. Un petit moteur

Un étudiant fabrique pour son TIPE un moteur fonctionnant entre de l'eau bouillante à pression atmosphérique, et l'atmosphère à 20°C.

Il ne peut espérer obtenir qu'un rendement $r=10\,\%$, *r* étant défini comme le rapport de l'efficacité de son moteur sur l'efficacité de Carnot.

Combien cela va-t-il lui coûter en chauffage (en joules) pour produire un travail de 100 J ?

2. Augmentation du rendement de Carnot

Pour augmenter au mieux le rendement d'un moteur réversible, est-il préférable d'augmenter de $10\,°\mathrm{C}$ la température de la source chaude ou de diminuer de $10\,°\mathrm{C}$ celle de la source froide ?

3. Puissance fournie à un congélateur

Dans une pièce à $T_0=20\,°\mathrm{C}$, l'intérieur d'un congélateur est à $T=-19\,°\mathrm{C}$. Pour arriver à maintenir cette température, il est nécessaire d'enlever, par transfert thermique, $400\,\mathrm{kJ/h}=|\mathring{Q}|$ à l'intérieur du congélateur. L'opération est supposée réversible.

(a) Calculer le transfert thermique par heure $\mathring{Q}_0$ fourni à la pièce par le congélateur.

(b) Déterminer la puissance mécanique P à fournir au congélateur.

4. Réfrigérateur tritherme

a) Rappeler le schéma de principe d'un réfrigérateur ditherme, alimenté par du travail.
b) En camping, on utilise parfois des réfrigérateurs trithermes, où un bouilleur, assimilable à un thermostat à la température T_B, envoie au fluide du réfrigérateur un transfert thermique Q_B à la place du travail W.
Écrire les deux principes du réfrigérateur tritherme pour un cycle.
c) Définir l'efficacité *e* de ce réfrigérateur.
En éliminant l'un des transferts thermiques, obtenir son expression en fonction de trois températures différentes T_B, T_1, T_2, de Q_B et de l'entropie créée à chaque cycle.
d) En déduire son efficacité maximale en fonction des températures. Que peut-on dire du cycle machine si $e=e_{max}$? A.N. pour $T_B=150\,°\mathrm{C}\,;T_1=8°\mathrm{C}\,;T_2=25\,°\mathrm{C}$
e) Comparer son efficacité maximale avec celle d'un réfrigérateur ditherme fonctionnant entre les mêmes températures.

5. Comparaison

Un moteur fonctionnant entre deux sources de chaleur, l'une à $T_F=400\,\mathrm{K}$, l'autre à $T_C=650\,\mathrm{K}$, produit $500\,\mathrm{J}=|W|$ par cycle, pour $1500\,\mathrm{J}=|Q_C|$ de transfert thermique fourni.

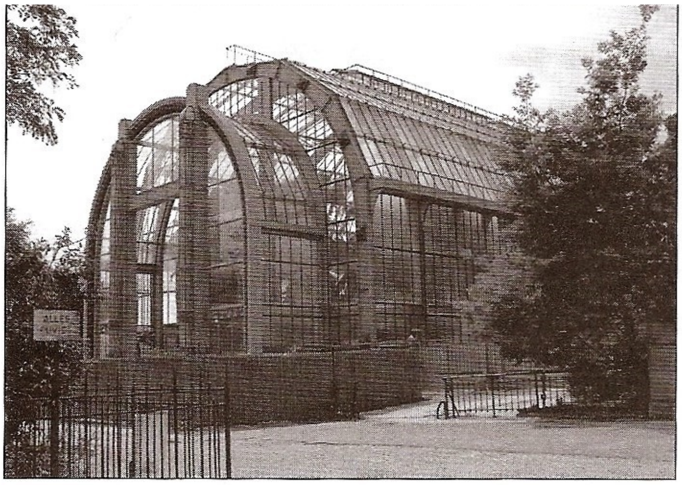
(a) Comparer son efficacité *e* à celle d'une machine de Carnot fonctionnant entre les deux mêmes sources. Conclure.

(b) Calculer le transfert thermique Q_F reçu par le système provenant de la source froide.

(c) Calculer l'entropie créée par cycle, notée S_c.

(d) Montrer, pour une dépense identique, que la différence entre le travail fourni par la machine réelle et la machine de Carnot vérifie $W_{\text{réél}}-W_{\text{rév}}=T_f\,S_c$.

6. Chauffage d'une serre



On souhaite maintenir la température d'une serre à $T_1 = 293$ K. L'air extérieur est à la température $T_2 = 283$ K. Dans ce but, on utilise une chaudière à la température $T_3 = 600$ K.

On décide de ne pas utiliser directement la chaudière pour chauffer la serre mais le dispositif suivant : la chaudière fournit un transfert thermique $Q_3 > 0$ à l'agent thermique d'un moteur réversible fonctionnant entre la chaudière à T_3 et l'air extérieur à T_2. Le travail récupéré est utilisé pour actionner une pompe à chaleur réversible fonctionnant entre l'air extérieur à T_2 et l'intérieur de la serre à T_1. On note Q_2 le transfert thermique algébrique de l'air extérieur vers l'agent thermique de la pompe.

1. Reporter sur un schéma de principe les différents échanges énergétiques algébriques en jeu lors du chauffage.
2. Exprimer le travail algébrique W reçu par le moteur en fonction de Q_3, T_2 et T_3.
3. Exprimer le transfert thermique algébrique Q_1 entre l'intérieur de la serre et l'agent thermique de la pompe en fonction de W, T_1 et T_2.
4. Définir puis exprimer l'efficacité e de l'ensemble du dispositif de chauffage en fonction de T_1, T_2 et T_3.

7. Moteur ditherme entre deux pseudo-sources

On dispose de deux récipients contenant chacun une masse $m = 10^3$ kg d'eau liquide. L'un est à la température $T_{1,0} = 87\,°C$, l'autre à la température $T_{2,0} = 7\,°C$.

Chacun de ces récipients voit sa température varier et sert donc de « pseudo-source » à un moteur thermique <u>réversible</u>. Soient T_1 et T_2 les températures, variables, de chaque récipient.

Au cours d'un cycle de la machine, la variation de température de l'eau des récipients est supposée infinitésimale : on les note respectivement dT_1 et dT_2.

On donne la capacité thermique massique de l'eau liquide : $c = 4{,}18\ \text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

(a) Relier les transferts thermiques infinitésimaux reçus par le fluide du moteur à chaque cycle, δQ_1 et δQ_2, avec les variations de température des pseudo-sources et avec *c*.

(b) Démontrer qu'on obtient $\dfrac{dT_1}{T_1} + \dfrac{dT_2}{T_2} = 0$.

(c) En intégrant l'équation différentielle précédente entre l'état initial et l'état final à la température T_F, déterminer l'expression de T_F en fonction des données. AN.

(d) Pourquoi le moteur cesse-t-il alors de fonctionner ?

(e) Effectuer un bilan énergétique sur l'ensemble du fonctionnement du moteur, obtenir notamment le travail qu'il fournit à l'environnement. Pourquoi est-ce un travail maximal ?

8. Congélateur en détresse

Un congélateur neuf a un coefficient d'efficacité $e = 2,0$. Un appareil dans lequel on a laissé s'accumuler une couche de glace a une efficacité réduite. On suppose que l'effet de la couche de glace est de multiplier par 2 l'entropie créée pour un même transfert thermique pris à la source froide. L'intérieur du congélateur est à -20°C et la pièce dans laquelle il se trouve à 19°C.

1. Calculer numériquement α, rapport entre l'efficacité du congélateur neuf et l'efficacité d'une machine réversible fonctionnant avec les mêmes sources.
2. Montrer que ce rapport devient, pour le réfrigérateur usagé : $\alpha' = \dfrac{\alpha}{2-\alpha}$. Calculer α' et l'efficacité réduite e'.

9. Étude entropique d'une machine frigorifique

1. On considère un point A_0 de la courbe d'ébullition à la température T_0. On note l'entropie massique du fluide en ce point s_0.
   a) Quel est l'état du fluide en A_0 ?
   b) Représenter en coordonnées P, v la courbe de saturation ainsi que les isothermes d'Andrews T_C, T_0 et T_1 telles que $T_0 < T_1 < T_C$.
   c) Évaluer, en fonction de s_0 et des températures, l'entropie massique du fluide au point A_1 de la courbe d'ébullition à T_1 en supposant la capacité thermique massique c_L du liquide constante le long de la courbe d'ébullition.
   d) À partir de A_0, on effectue une vaporisation isotherme jusqu'au point $M_{(x)}$ où x est le titre massique en vapeur. On note l_0 l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau à T_0. Déterminer l'entropie massique $s_{0,x}$ du fluide en $M_{(x)}$.

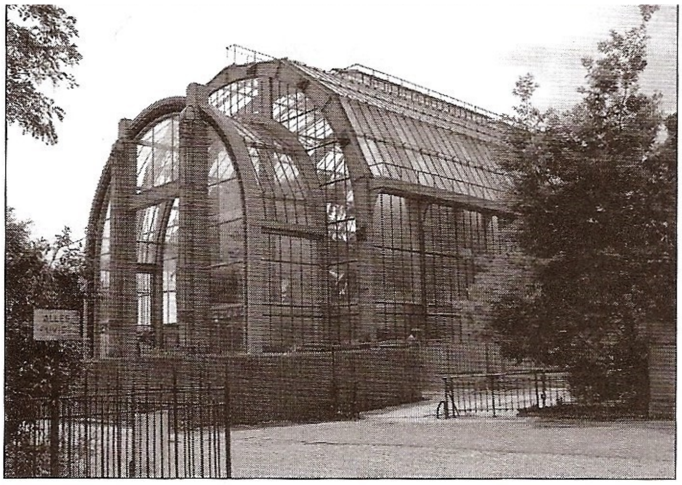
2. On considère le cycle de transformations réversibles $DABCD$ réalisé à partir du point D sur la courbe de rosée.
   - DA : liquéfaction isotherme complète à la température T_1
   - AB : détente adiabatique jusqu'à la température T_0 et un titre en vapeur x_B
   - BC : vaporisation isotherme jusqu'au titre en vapeur x_C défini par :
   - CD : compression adiabatique - C est sur l'adiabatique passant par D

   a) Représenter le cycle sur le diagramme P, v
   b) Calculer les titres x_B et x_C en fonction de c_L, T_0, T_1 et des enthalpies massiques de vaporisation l_0 et l_1.
   c) Calculer les échanges thermiques Q_0 et Q_1 lors des transformations BC et DA.
   d) Calculer le travail total W, grâce au premier principe.
   e) Définir, exprimer en fonction des données, puis calculer numériquement l'efficacité de la machine frigorifique : $T_0 = -5\,^\circ\mathrm{C}$ et $T_1 = 11\,^\circ\mathrm{C}$.

10. Chauffage d'une serre

Un dispositif plus performant ?

Reprendre ce problème (exo 6) et conclure, avec comme seule différence le moteur fonctionnant entre la chaudière et la serre, dans le but de récupérer son transfert thermique vers la source froide pour chauffer la serre.



On souhaite maintenir la température d'une serre à $T_1 = 293$ K. L'air extérieur est à la température $T_2 = 283$ K. Dans ce but, on utilise une chaudière à la température $T_3 = 600$ K.

On décide de ne pas utiliser directement la chaudière pour chauffer la serre mais le dispositif suivant : la chaudière fournit un transfert thermique $Q_3 > 0$ à l'agent thermique d'un moteur réversible fonctionnant entre la chaudière à T_3 et l'air extérieur à T_2. Le travail récupéré est utilisé pour actionner une pompe à chaleur réversible fonctionnant entre l'air extérieur à T_2 et l'intérieur de la serre à T_1. On note Q_2 le transfert thermique algébrique de l'air extérieur vers l'agent thermique de la pompe.

1. Reporter sur un schéma de principe les différents échanges énergétiques algébriques en jeu lors du chauffage.
2. Exprimer le travail algébrique W reçu par le moteur en fonction de Q_3, T_2 et T_3.
3. Exprimer le transfert thermique algébrique Q_1 entre l'intérieur de la serre et l'agent thermique de la pompe en fonction de W, T_1 et T_2.
4. Définir puis exprimer l'efficacité e de l'ensemble du dispositif de chauffage en fonction de T_1, T_2 et T_3.

11. Cycle machine

On considère le cycle suivant, suivi par une quantité n d'air : $F \to B \to C \to F$, où

- $F \to B$ est une compression adiabatique réversible ;
- $B \to C$ est une isobare monotherme à la température T_C, température finale de cette transformation ;
- $C \to F$ est une isochore monotherme à T_F, température finale.

On note $a = \frac{P_{max}}{P_{min}}$ le rapport de compression du cycle.

1. Tracer l'allure du cycle dans un diagramme de Clapeyron, en déduire la nature de la machine et donner son schéma de principe.
2. Calculer T_C et T_B en fonction de a, γ et T_F. Identifier les étapes du cycle où ont lieu les transferts Q_C et Q_F.
3. Obtenir l'efficacité e de la machine en fonction de a et de γ.
4. Comparer avec un petit calcul (pour différentes valeurs de a) avec l'efficacité de Carnot.
5. Expliquer l'origine de la différence ; affiner en déterminant l'entropie créée par cycle.