

TD TH4 - Machines thermiques

Table des matières

1	Pompe à chaleur	1
2	Climatiseur de voiture	1
3	Cogénération	2
3.1	Principe de l'innovation	2
3.2	Étude du moteur Stirling	2
4	Étude de machines thermiques	3
4.1	Étude préliminaire	3
4.2	Moteur à explosion	4

1 Pompe à chaleur

On utilise une PAC afin de maintenir la température d'un immeuble à $T_1 = 20^\circ\text{C}$ alors que la température extérieure est $T_2 = 0^\circ\text{C}$. Cette PAC doit fournir à l'immeuble un transfert thermique de 10^8J par heure.

1.1. Faire le diagramme de principe de la PAC en identifiant la source froide et la source chaude.

1.2. Quelle est l'efficacité thermique maximale théorique $e_{T_{max}}$ d'une telle pompe à chaleur ?

1.3. À T_2 fixée, pour quelle température T_1 l'efficacité $e_{T_{max}}$ est-elle la plus grande possible ? Commenter. En réalité l'efficacité thermique de cette PAC est $e_T = 5$.

1.4. Quelle est la puissance mécanique P_m reçue par le fluide de la PAC assurant le chauffage de l'immeuble ? Cette puissance correspond à peu près à la puissance électrique consommée par la PAC.

2 Climatiseur de voiture

Un habitacle de voiture est maintenu par la climatisation à la température constante $T_2 = 20^\circ\text{C}$ alors que la température de l'air extérieur est $T_1 = 35^\circ\text{C}$. Le climatiseur a une efficacité frigorifique $e_F = 3$. La puissance thermique transférée entre l'habitacle et l'extérieur s'exprime comme :

$$P_{th} = K(T_1 - T_2) \text{ avec } K = 170 \text{ W.K}^{-1}$$

2.1. Faire le diagramme de principe du climatiseur en identifiant la source froide et la source chaude.

2.2. Quelle puissance thermique P_2 le fluide du climatiseur reçoit-il de l'habitacle (c'est la puissance thermique qu'il prélève à l'habitacle) ?

2.3. Quelle est la puissance mécanique P reçue par le fluide du climatiseur ?

2.4. La voiture consomme 7L aux 100 km à la vitesse de 100 km.h^{-1} . Sachant que la combustion d'un litre d'essence dégage 35 MJ et que le rendement global du moteur est de l'ordre de 10%, évaluer la surconsommation engendrée pour un parcours de 100km à cette vitesse de 100 km.h^{-1} .

3 Cogénération

La cogénération est un principe de production simultanée d'électricité et de chaleur. Elle fait partie des techniques les plus efficaces énergétiquement pour l'utilisation des énergies fossiles et renouvelables. L'idée de la cogénération se base sur le fait que la production d'énergie électrique dégage une grande quantité de chaleur, habituellement dissipée et perdue dans l'environnement. Pour compléter la demande en énergie thermique (chauffage, process industriel, etc.), elle propose d'utiliser les pertes de la production d'énergie électrique également comme source d'énergie thermique. Les grands constructeurs de chaudière domestique ont donc mis au point des prototypes permettant d'une part, de chauffer l'habitat et d'autre part, de produire de l'énergie électrique.

3.1 Principe de l'innovation

Etudions deux configurations d'installation permettant de produire 1 kW d'énergie électrique et 5 kW de chauffage.

Configuration 1 : Supposons dans un premier temps que nous disposons de deux installations distinctes : une pour faire de l'électricité, une autre pour se chauffer.

Configuration 2 : Imaginons que nous voulons avoir le même résultat au niveau des puissances générées, mais avec une installation de cogénération. Celle-ci récupère les pertes thermiques liées à la production d'électricité pour les réutiliser dans la production de chaleur.

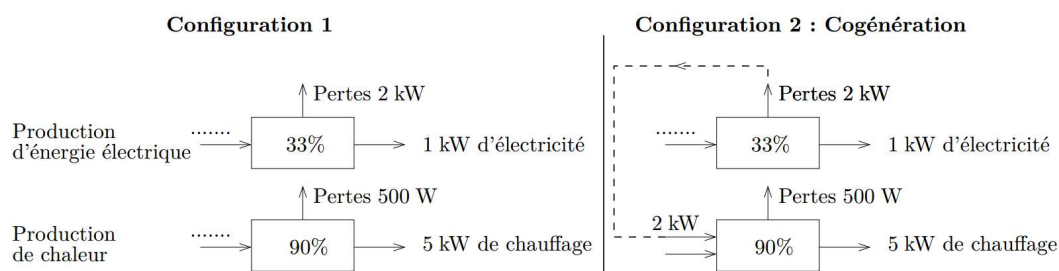


FIGURE 1 – Bilan énergétique - Comparaison des deux configurations

3.1.1. Pour chaque configuration, déterminer les puissances consommées pour produire une puissance électrique de 1 kW et une puissance thermique de 5 kW (chauffage).

3.1.2. En déduire le rendement global de chaque configuration ? Quel est l'intérêt d'une installation de cogénération ?

Le sujet propose d'étudier différents aspects d'une chaudière à cogénération fonctionnant grâce à la chaleur dégagée lors la combustion du méthane. Celle-ci permet de faire fonctionner un moteur Stirling (partie suivante) qui entraîne en translation un piston. L'énergie mécanique ainsi produite est convertie en énergie électrique par un dispositif non étudié dans le sujet.

3.2 Étude du moteur Stirling

On considère $n = 40$ mmol d'Hélium, assimilable à un gaz parfait de coefficient isentropique constant $\gamma = C_p/C_v = 1,66$, subissant un cycle modélisé par les évolutions suivantes à partir de l'état A de volume $V_A = 1$ L :

- Compression isotherme réversible au contact de la source $\mathcal{S}_f$, jusqu'à l'état B , de volume $V_B = V_A/4$;

- Échauffement isochore au contact thermique de la source $\mathcal{S}_c$, jusqu'à l'état C ;
- Détente isotherme réversible au contact de la source $\mathcal{S}_c$ jusqu'à l'état D de volume V_A ;
- Refroidissement isochore au contact thermique de la source $\mathcal{S}_f$ jusqu'à l'état A .

La source chaude $\mathcal{S}_c$ est maintenue à température constante $T_c = 930$ K par un brûleur alimenté en méthane et en air.

La source froide $\mathcal{S}_f$ est maintenue à température constante $T_f = 330$ K, en régime permanent de fonctionnement, par le retour d'eau froide des circuits de chauffage.

3.2.1. Calculer les valeurs numériques de pression et de volume dans chacun des états. On présentera les résultats dans un tableau.

3.2.2. Représenter l'allure du cycle en coordonnées de CLAPEYRON (P, V).

3.2.3. Le cycle est-il moteur ou récepteur ? Justifier.

3.2.4. On rappelle la relation de MAYER : $C_p - C_v = nR$. Exprimer C_p et C_v en fonction de n, R et γ .

3.2.5. Déterminer pour la transformation $A \rightarrow B$ l'expression du travail W_{AB} et du transfert thermique Q_{AB} reçus par le fluide en fonction de n, R et T_f . Commenter le signe de W_{AB} .

3.2.6. Déterminer pour la transformation $B \rightarrow C$ l'expression du travail W_{BC} et du transfert thermique Q_{BC} reçus par le fluide en fonction de n, R, T_f et T_c . Commenter le signe de Q_{BC} .

3.2.7. En déduire l'expression de l'entropie échangée S_e par le fluide au cours de la transformation $B \rightarrow C$.

3.2.8. Déterminer l'expression de la variation d'entropie du fluide ΔS_{BC} .

3.2.9. Calculer numériquement S_e et ΔS_{BC} . La transformation $B \rightarrow C$ est-elle réversible ?

3.2.10. Déterminer pour la transformation $C \rightarrow D$ l'expression du travail W_{CD} et du transfert thermique Q_{CD} reçu par le fluide

3.2.11. Déterminer pour la transformation $D \rightarrow A$ l'expression du travail W_{DA} et du transfert thermique Q_{DA} reçus par le fluide.

3.2.12. Exprimer le travail total W_t fourni par le moteur au cours d'un cycle, en fonction de n, R, T_f et T_c

3.2.13. Le moteur produit du travail à partir de l'énergie thermique reçue au cours de la détente isotherme $C \rightarrow D$. Exprimer le rendement du moteur η_m uniquement en fonction de T_f et T_c et calculer sa valeur.

3.2.14. Calculer le travail total W_t fourni par le moteur au cours d'un cycle. Combien de cycles par seconde doit effectuer le moteur pour fournir une puissance $\mathcal{P}$ de 2 kW ?

4 Étude de machines thermiques

4.1 Étude préliminaire

On considère un système décrivant un cycle thermodynamique durant lequel il est susceptible d'échanger de la chaleur avec une ou deux sources thermiques ainsi qu'un travail avec le milieu extérieur.

On note :

- U et S respectivement l'énergie interne et l'entropie du système
- S_e l'entropie créée par le système durant le cycle complet,
- W le travail reçu algébriquement par le système durant le cycle complet

4.1.1. Quelles sont les valeurs particulières des variations d'énergie interne ΔU et d'entropie ΔS du système lorsque celui-ci décrit un cycle complet ?

On commence par traiter le cas particulier d'une machine monotherme échangeant de la chaleur avec une source à la température T_1 . On note Q_1 la chaleur reçue algébriquement par le système en provenance de la source.

4.1.2. En utilisant les deux premiers principes de la thermodynamique, montrer que dans ce cas le système peut uniquement recevoir du travail et fournir de la chaleur. Quel est l'intérêt d'une telle machine ?

4.1.3. Quelles sont les valeurs de S_c , W et Q_1 lorsque l'évolution thermodynamique du système est réversible ?

On s'intéresse maintenant au cas d'une machine ditherme. On note Q_1 et Q_2 les chaleurs reçues algébriquement par le système durant le cycle complet en provenance respectivement des sources thermiques de température T_1 et T_2 . On supposera $T_1 < T_2$.

4.1.4. Montrer que Q_2 peut s'exprimer de deux façons différentes en fonction de Q_1 :

$$\begin{aligned}Q_2 &= \alpha_1 Q_1 - W \\Q_2 &= \alpha_2 Q_1 + \alpha_3 S_c\end{aligned}$$

où α_1 est une constante, α_2 et α_3 deux expressions faisant intervenir T_1 et T_2 .

On se place par la suite dans le cas particulier où $\alpha_2 = -2$, $\alpha_3 \cdot S_c = -1$ J et $W = -0,5$ J.

4.1.5. Quel est le type de machine thermique considérée ?

4.1.6. Déterminer les valeurs numériques respectives de Q_1 et Q_2 . Interpréter les signes de Q_1 et Q_2 .

4.1.7. Définir et calculer numériquement le rendement η de ce type de machine.

4.1.8. Déterminer l'expression de η en fonction de T_1 , T_2 , Q_2 et S_c . Interpréter l'expression de η lorsque l'évolution du système est réversible.

4.2 Moteur à explosion

Le moteur à explosion fonctionne sur le principe du cycle illustré par le diagramme de Clapeyron (P, V) de la figure 1. Ce cycle peut se décomposer en quatre transformations thermodynamiques consécutives subies par un mélange air-carburant initialement admis dans une chambre de combustion via une soupape d'admission :

- une compression isentropique (adiabatique réversible) du mélange (portion 1→2),
- une explosion du mélange à volume constant (portion 2→3),
- une détente isentropique du mélange (portion 3→4),
- une chute de pression du mélange à volume constant due à l'ouverture d'une soupape d'échappement (portion 4→1)

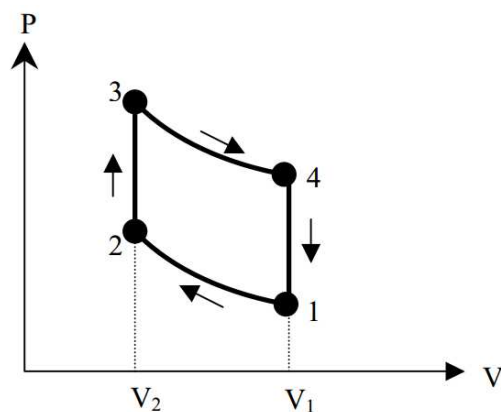


Figure 1

On note :

- P_i, V_i et T_i respectivement la pression, le volume et la température du mélange aux points i variant de 1 à 4 de la figure 1 (en remarque que $V_3 = V_2$ et $V_4 = V_1$),
- Q_{23} , la chaleur algébrique reçue par le mélange lors de l'explosion ($2 \rightarrow 3$),
- Q_{41} , la chaleur algébrique reçue par le mélange lors de la chute de pression ($4 \rightarrow 1$)
- W , le travail algébrique reçu par le mélange lors du cycle complet,
- C_v et C_p , respectivement les capacités calorifiques molaires isochore et isobare du mélange,
- η_m , le rendement du moteur,
- $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$

On considérera le mélange air-carburant comme un système thermodynamique fermé assimilable à un gaz parfait.

4.2.1. Déterminer les expressions de ΔU_{23} et ΔU_{41} , variations de l'énergie interne du mélange sur les portions respectives $2 \rightarrow 3$ et $4 \rightarrow 1$ du cycle.

4.2.2. En déduire les expressions de Q_{23} et Q_{41} . Déterminer et interpréter les signes de Q_{23} et Q_{41} .

4.2.3. Exprimer η_m en fonction de T_1 , T_2 , T_3 et T_4 .

4.2.4. Déterminer les expressions des rapports T_2/T_1 et T_3/T_4 en fonction de $K = V_1/V_2$ et γ .

4.2.5. En déduire l'expression de η_m en fonction de K et γ .

4.2.6. Application numérique : $\gamma = 1,5$ et $K = 9$. Calculer la valeur numérique de η_m .