
TRAVAUX DIRIGÉS

DE PHYSIQUE

CHARLES TUCHENDLER



MPSI 4 – LYCÉE SAINT-LOUIS

ANNÉE 2019/2020

Table des matières

TD N° 22	MACHINES THERMIQUES SANS CHANGEMENT D'ÉTAT	1
Exercice n° 1 - Moteur à Essence		2
Exercice n° 2 - Machine monotherme		3
Exercice n° 3 - Cycle		3
Exercice n° 4 - Chauffe-eau d'un bungalow		3
Exercice n° 5 - Cycle de Carnot		3
Exercice n° 6 - Cycle de Stirling		3
Exercice n° 7 - Moteur thermique		4
Exercice n° 8 - Climatisation		4
Exercice n° 9 - Climatiseur		4
Exercice n° 10 - Pompe à chaleur		4

TD N° 22

MACHINES THERMIQUES SANS CHANGEMENT D'ÉTAT

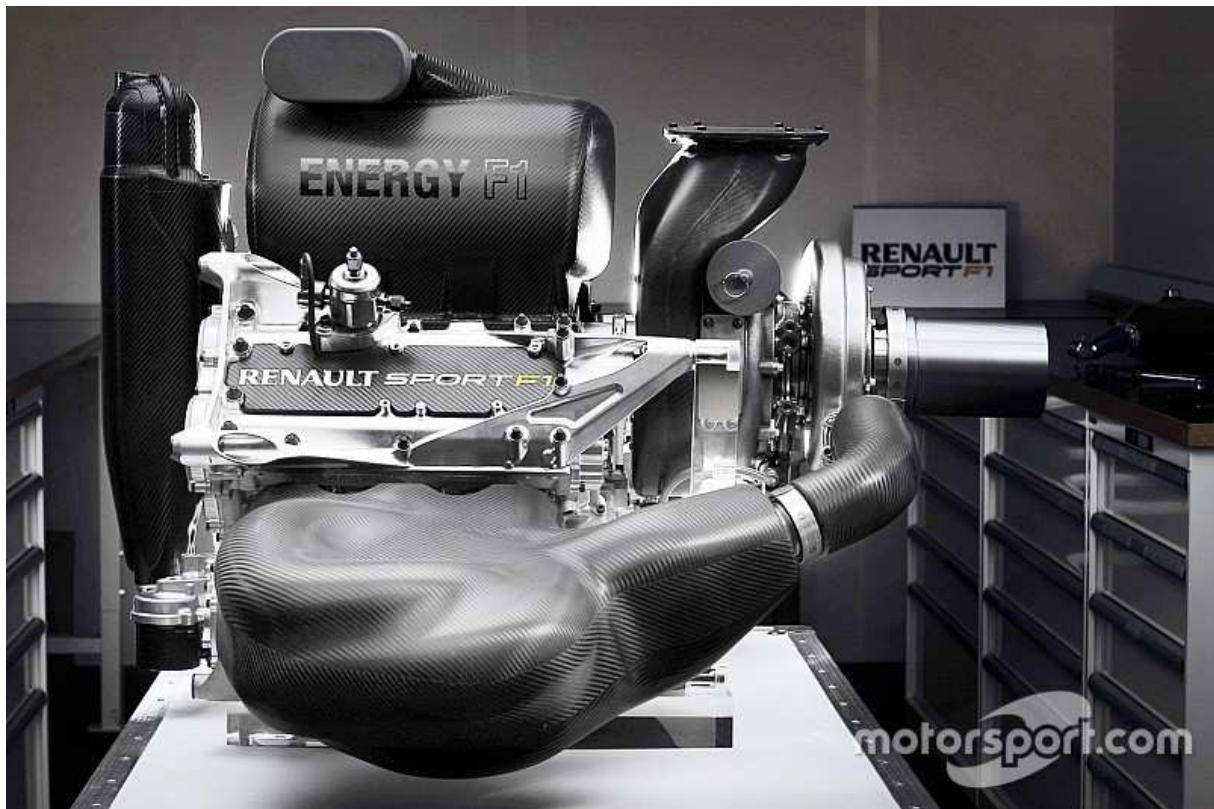


FIGURE 22.1 – 1000 cv sous le capot ! Les moteurs thermiques ne sont pas encore morts.

Exercice n° 1 - Moteur à Essence

On s'intéresse au fonctionnement d'un moteur de voiture (moteur à essence) schématisé sur la figure 1 ci-dessous. Le fluide considéré ici est un mélange {air + essence} (15 kg d'air pour 1 kg d'essence). La combustion du fluide se fait grâce aux bougies qui produisent une étincelle.

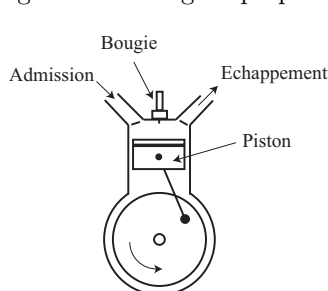


Figure 1

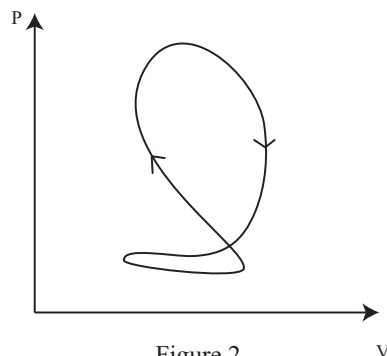


Figure 2

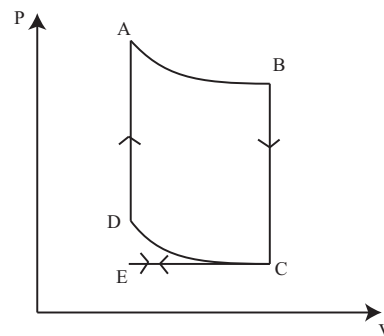


Figure 3

Le cycle peut être décomposé en 6 étapes :

- Etape 1 : ouverture de la soupape d'admission : injection du carburant (le piston descend)
- Etape 2 : Compression rapide (le piston remonte)
- Etape 3 : Explosion grâce à l'allumage de la bougie et augmentation brutale de la pression (le piston n'a pas encore eu le temps de redescendre)
- Etape 4 : Détente rapide (le piston descend)
- Etape 5 : Ouverture de la soupape d'échappement : éjection d'une partie des gaz brûlés (le piston n'a pas encore eu le temps de remonter)
- Etape 6 : Ejection du reste des gaz brûlés (le piston remonte)

Le cycle réel ainsi que le cycle modélisé (cycle de Beau de Rochas) sont représentés sur les figures 2 et 3.

On considérera le mélange {air + essence} comme un gaz parfait de coefficient $\gamma = 1,4$. De plus, on considérera que l'ensemble du cycle fonctionne de manière réversible.

1. Identifier chaque étape de fonctionnement du moteur à essence à celles du cycle de Beau de Rochas. Justifier en particulier le caractère adiabatique, isochore, ou isobare de chaque étape.
2. Exprimer le rendement du cycle modélisé en fonction de γ et du taux de compression $\alpha = 8$ (encore appelé rapport volumétrique et défini par $\alpha = V_{max}/V_{min}$).
3. Comparer la valeur précédente au rendement réel du moteur qui est de l'ordre de 30%. Comment expliquer cette différence ?
4. Expliquer pourquoi un tel moteur nécessite l'emploi d'un démarreur. Quelle est la source d'énergie alimentant le démarreur ?
5. Les voitures classiques possèdent 4 cylindres (moteurs identiques à celui décrit précédemment) dont les cycles de fonctionnement sont décalés les uns par rapport aux autres. Pourquoi ?

Exercice n° 2 - Machine monotherme

1. Donner un exemple concret de machine thermique monotherme.
2. Montrer qu'il ne peut pas exister de moteur fonctionnant comme une machine monotherme.

Exercice n° 3 - Cycle

Un gaz parfait monoatomique occupe initialement un volume $V_1 = 0,5 \text{ m}^3$ à la pression de $P_1 = 200 \text{ kPa}$ à la température $T_1 = 300 \text{ K}$. Le gaz est soumis à une détente adiabatique jusqu'au volume $V_2 = 1,2 \text{ m}^3$. On réalise ensuite une compression isobare du gaz jusqu'au volume initial. Enfin, on fait une transformation isochore pour revenir à l'état de départ. Toutes les transformations sont quasistatiques.

1. Tracer le cycle dans un diagramme de Clapeyron (P,V).
2. Déterminer la température à la fin de chaque transformation.
3. Calculer le travail reçu par le gaz dans le cycle. Est-ce un cycle moteur ou résistant ?

Exercice n° 4 - Chauffe-eau d'un bungalow

On veut réguler la température du chauffe-eau d'un bungalow à $T_1 = 333 \text{ K}$, en utilisant uniquement les propriétés du site où il se trouve. Aucune source d'électricité n'est disponible. Le bungalow est situé en bordure d'un lac dont l'eau est à $T_2 = 285 \text{ K}$ et la température de l'air en cette période est $T_3 = 310 \text{ K}$.

1. Montrer que l'on peut chauffer l'eau du bungalow en utilisant un moteur ditherme alimentant une pompe à chaleur. Préciser pour chacune des deux machines thermiques quelles sont les sources chaudes et froides considérées. Faire un schéma de l'ensemble du dispositif.
2. Exprimer le rendement η_m du moteur ditherme en fonction du travail fourni W_m et des transferts thermiques Q_{m_C} et Q_{m_F} avec les sources chaudes et froides du moteur respectivement.
3. Exprimer également l'efficacité e_p de la pompe à chaleur en fonction du même travail W_m et des transferts thermiques Q_{p_C} et Q_{p_F} avec les sources chaudes et froides de la pompe respectivement.
4. En considérant que les deux machines ont un fonctionnement réversible, déterminer l'efficacité thermique globale η_{tot} du dispositif complet en fonction des différentes températures. Faire l'application numérique.

Exercice n° 5 - Cycle de Carnot

Soit un kilogramme d'air considéré comme un gaz parfait, subissant un cycle de Carnot ABCDA. AB et CD sont deux isothermes réversibles, et BC et DA deux adiabatiques réversibles. La température au point A est $T_1 = 300 \text{ K}$. Les pressions aux points A, B et C sont respectivement : $P_A = 1 \text{ bar}$, $P_B = 3 \text{ bar}$ et $P_C = 9 \text{ bar}$. La masse molaire de l'air est voisine de 29 g.mol^{-1} , et le rapport des chaleurs spécifiques $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$ est égal à 1,4.

1. Représenter le cycle dans un diagramme de Clapeyron.
2. Déterminer la température T_2 de l'isotherme CD.
3. Déterminer la pression au point D.
4. Calculer les quantités de chaleur reçues par l'air au cours des 4 transformations du cycle.
5. Calculer le rendement thermodynamique du cycle.
6. Calculer les variations d'entropie de l'air au cours des 4 transformations du cycle.

Exercice n° 6 - Cycle de Stirling

Un cycle de Stirling est formé de deux isothermes ($T_1 < T_2$) et de deux isochores ($V_1 < V_2$) alternées. Le cycle est supposé réversible ; il est décrit dans le sens moteur par n moles de gaz parfait caractérisé par le coefficient γ supposé constant.

1. Représenter ce cycle dans le diagramme de Clapeyron.
2. En fonction des températures T_1 et T_2 , du taux de compression $a = \frac{V_2}{V_1}$ et de n , R et γ , établir les expressions :
(a) de la quantité de chaleur reçue par le système au cours d'un cycle moteur réversible (notée Q_2) ;

- (b) de la quantité de chaleur cédée par le système au cours d'un cycle moteur réversible (notée Q_1);
 - (c) du rendement thermodynamique de ce cycle.
3. Comparer ce rendement à celui de Carnot.
 4. Réaliser un bilan d'entropie sur ce cycle.

Exercice n° 7 - Moteur thermique

Un moteur thermique réversible fonctionne entre deux sources de même capacité thermique $C = 400 \text{ kJ.K}^{-1}$, dont les températures T_c et T_f ($T_c > T_f$) ne sont pas maintenues constantes. Les températures initiales des sources sont respectivement $T_1 = 373 \text{ K}$ et $T_2 = 285 \text{ K}$.

1. Quelle est la relation entre T_1 , T_2 , T_c et T_f ?
2. Calculer la température commune T_0 des deux sources quand le moteur s'arrête de fonctionner.
3. Calculer le travail total W_F fourni par la machine jusqu'à son arrêt.
4. Calculer le rendement η du moteur.
5. Calculer le rendement η_0 que l'on aurait obtenu si l'on avait maintenu constantes les températures initiales des deux sources.

Exercice n° 8 - Climatisation

On considère une installation permettant d'assurer la climatisation d'un wagon. Un moteur entraîne un compresseur puisant l'air dans le wagon à la température $\theta_A = 20^\circ \text{C}$ et à la pression $P_A = 1 \text{ bar}$ et le comprimant de façon adiabatique réversible jusqu'à la pression P_B (température θ_B). L'air échange ensuite de la chaleur de façon isobare avec l'air extérieur à la température $\theta_2 = 37^\circ \text{C}$ jusqu'à atteindre la température θ_C . Il effectue ensuite une détente adiabatique réversible dans une turbine pour être rejeté dans le wagon dans les conditions $\theta_D = -5^\circ \text{C}$ et à la pression $P_D = 1 \text{ bar}$. Mécaniquement, la turbine entraîne le compresseur.

1. Tracer l'allure dans le diagramme de Clapeyron des transformations subies par une mole de gaz.
2. Quelle est la valeur minimale que l'on peut espérer atteindre pour θ_C ? En déduire la valeur minimale de la pression P_C que le compresseur doit imposer.
3. On donne $P_C = 1,7 \text{ bar}$. Calculer θ_B et θ_C .
4. Quel est le débit molaire de ce climatiseur permettant d'assurer une puissance de climatisation P de 5 kW ?
5. Calculer la puissance mécanique fournie par le compresseur P_C , celle récupérée dans la turbine P_T et celle fournie par le moteur P_M . Quelle est l'efficacité de l'installation?

Exercice n° 9 - Climatiseur

Un climatiseur est une machine thermique ditherme. Elle décrit des cycles réversibles à partir de deux sources thermiques constituées d'une part par l'air extérieur de température invariable $T_{\text{ext}} = 298 \text{ K}$, et d'autre part par une pièce de température initiale T_i égale à la température extérieure, mais que l'on désire porter à la température finale T_f égale à 293 K .

1. Préciser quelles sont les sources chaude et froide et donner le signe des trois grandeurs W , Q_C et Q_F . Donner le schéma de principe en indiquant par des flèches le sens des échanges de chaleur et de travail.
2. Déterminer le travail électrique nécessaire au bon fonctionnement de la machine sachant que la capacité thermique de la pièce est évaluée à $C = 5000 \text{ kJ.K}^{-1}$.
3. Quel est le temps nécessaire à la mise en température de la pièce pour une puissance électrique de 250 W ?

Exercice n° 10 - Pompe à chaleur

Un particulier utilise une pompe à chaleur réversible pour maintenir une température constante $t_1 = 18^\circ \text{C}$ à l'intérieur de sa maison. La source froide est l'air extérieur.

1. Quelle est l'efficacité de la pompe à chaleur si l'air extérieur est à $t_a = 15^\circ \text{C}$?

2. Le particulier coupe l'alimentation de la pompe pendant 2 jours et la température intérieure descend à $t_0 = 16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Il rallume alors la pompe pour ramener rapidement la température à $t_1 = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (on négligera les pertes thermiques pendant ce chauffage). Calculer l'efficacité du chauffage $e = \frac{W_e}{W_p}$ où W_e représente l'énergie électrique que l'on aurait dépensée par un chauffage direct avec des radiateurs électriques, et W_p l'énergie électrique consommée par la pompe pour le chauffage.