

Colonne de gauche = discours tenu aux élèves, pas forcément écrit au tableau.
Colonne de droite = illustrations du propos de la colonne de gauche, écrites au tableau ou montrées sur transparents.

Voir l'*Introduction aux cours de thermodynamique* pour situer ce cours dans son contexte.

Les machines thermiques dithermes.

Pré-requis : les premier et second principes de la thermodynamique.

A retenir :
* Le calcul d'un rendement ou d'une efficacité.

1. Cycles et machines thermiques.

Ces machines thermiques permettent de produire du froid (réfrigérateur), du chaud (pompe à chaleur) ou du travail (moteur thermique).

Comme les transformations doivent être continues (pour marcher tout le temps, et non pendant quelques secondes uniquement), il ne peut s'agir que :

1. de transformations infiniment lentes : sans intérêt car dans ce cas le travail fourni serait infiniment petit (l'énergie interne U étant de valeur finie).
2. de transformations cycliques où l'état final et initial sont identiques : c'est ce qui est réalisé en pratique.

2. Les moteurs thermiques dithermes.

On a vu (voir cours n° 5) qu'il fallait absolument 2 sources de chaleur au minimum pour avoir un moteur (un moteur monotherme étant impossible à réaliser). Le moteur ditherme est donc le moteur "minimal" qui échange de la chaleur entre deux sources. Cet échange de chaleur (qui correspond globalement à une absorption de chaleur sur un cycle) permet une perte de travail, c'est - à - dire de l'énergie motrice fournie à l'extérieur.

Les moteurs dithermes prennent de la chaleur Q_2 d'un corps chaud pour la convertir en énergie motrice W . Ils perdent cependant une partie de cette chaleur Q_1 qu'ils rejettent à la source froide. Ils possèdent donc un

rendement défini par $\eta \triangleq \left| \frac{W}{Q_2} \right|$

2.1. Le moteur idéal : cycle de Carnot.

C'est le moteur idéal car il possède le meilleur rendement faisable pour un travail donné. Il est réversible, donc il est forcément composé de 2 isothermes et de 2 adiabatiques qui permettent de passer de l'isotherme chaude T_2 à l'isotherme froide T_1 . Q_1 et Q_2 sont forcément échangées sur les isothermes puisque les autres transformations n'échangent pas de chaleur. Les sources chaudes et froides sont des thermostats, donc leur température ne varie pas.

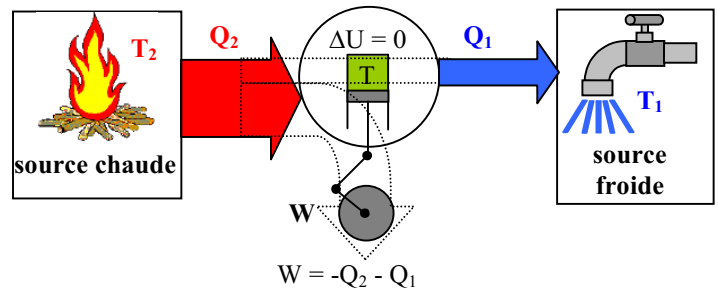
On calcule alors le rendement (voir 1/2 page de droite). Il s'agit du rendement maximal que l'on peut obtenir avec 2 sources de chaleur données.

Ce résultat montre que **le rendement ne dépend pas du fluide** et est d'autant + élevé que T_1 est faible et T_2 élevé.

1. Cycles et machines thermiques.

Machines thermiques : cycliques pour qu'elles fonctionnent longtemps avec le même gaz.

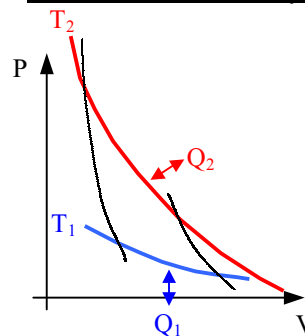
2. Les moteurs thermiques dithermes.



T_1 et T_2 sont constantes.

$$\eta \triangleq \left| \frac{W}{Q_2} \right| \text{ avec } Q_2 \triangleq \text{chaleur prise de la source chaude.}$$

2.1. Le moteur idéal : cycle de Carnot.



- 2 adiabatiques
- 2 isothermes T_1 et T_2
- seul cycle qui peut être effectué dans les 2 sens.
- Sens trigo : réfrigérateur ou pompe à chaleur
- Sens horaire : moteur.

Calcul de η :

1^{er} principe : $W_{\text{cycle}} = -Q_1 - Q_2$ car $\Delta U_{\text{cycle}} = 0$
2nd principe : $\Delta S_{\text{cycle}} - (Q_1/T_1 + Q_2/T_2) = 0$ car transfo réversible or $\Delta S_{\text{cycle}} = 0 \Rightarrow \left[\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0 \right]$ (**résultat fondamental**) $\Leftrightarrow Q_1/Q_2 = -T_1/T_2$

d'où $\eta \triangleq \left| \frac{W}{Q_2} \right| = \left| \frac{-Q_2 - Q_1}{Q_2} \right| = \left| -1 - \frac{Q_1}{Q_2} \right| = \left| -1 + \frac{T_1}{T_2} \right| = 1 - \frac{T_1}{T_2}$

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (+) \text{ on a } 0 \leq \eta \leq 1$$

2.2. Exemple d'un moteur ditherme réel : le cycle de Beau De Rochas (essence).

Un moteur de Carnot est très compliqué (donc très cher) à réaliser, pour des raisons techniques (et non théoriques). On fabrique donc des moteurs plus simples (moins cher) mais non réversibles (donc avec un rendement plus faible ou bien un travail perdu plus faible).

Le moteur vu ici est constitué de 4 temps : un "temps" correspondant à un aller (ou à un retour) du piston et non à un type de transformation sur le diagramme P(V). Les 4 temps réalisent donc 2 tours du vilebrequin.

Le fluide utilisé est un mélange air - essence ⁽¹⁾. Raisonnons sur un cylindre seulement :

- L'admission est préalablement lancée grâce à un moteur électrique qui entraîne le vilebrequin : cela aspire l'air.
- Un volant d'inertie permet d'emmagasiner l'énergie cinétique du lancement précédent et réalise la compression (air sous pression de 20 bar environ).
- Une "bougie" provoque l'explosion de l'air sous pression : on a une surpression qui provoque une répulsion violente du piston : c'est le seul temps réellement moteur du cycle qui nous permet de désaccoupler le moteur électrique de l'arbre moteur (donc du vilebrequin) : le vilebrequin tourne alors seul grâce à l'inertie.
- L'échappement est réalisé car le moteur a été lancé par la phase de détente, et suite à son inertie, le piston remonte naturellement pour évacuer l'air brûlé.

En conclusion : c'est chaque phase de détente qui permet de réaliser les 2 tours du vilebrequin et donc qui permet la réalisation d'un cycle (= 2 tours).

Pour assurer une rotation plus régulière du vilebrequin on construit 3 autres cylindres qui fonctionnent chacun sur un temps différent => en plus d'une rotation plus régulière on a donc 4 x plus de travail, donc de puissance (= travail par seconde).

On peut observer le cycle dans le plan P(V) (trajets 0-1 et 1-0 = admission et évacuation de l'air dans le cylindre).

- Le fait que l'explosion (trajet 2-3) soit isochore s'explique par le fait que l'explosion du mélange air - essence est très rapide (contrairement à l'explosion d'un mélange air - gasoil des diesel).
- La compression (trajet 1-2) et la détente (trajet 3-4) sont adiabatiques du fait de la rapidité de la course du piston ⁽²⁾ : la chaleur n'a pas le temps d'être évacuée.
- Lors de l'ouverture de la soupape d'échappement (trajet 4-1) la pression chute à la pression extérieure (pas de viscosité d'un gaz parfait). Pour finir le cycle est considéré comme quasi - statique ⁽³⁾.

¹ assimilable à de l'air pur car le volume d'essence est négligeable par rapport au volume d'air.

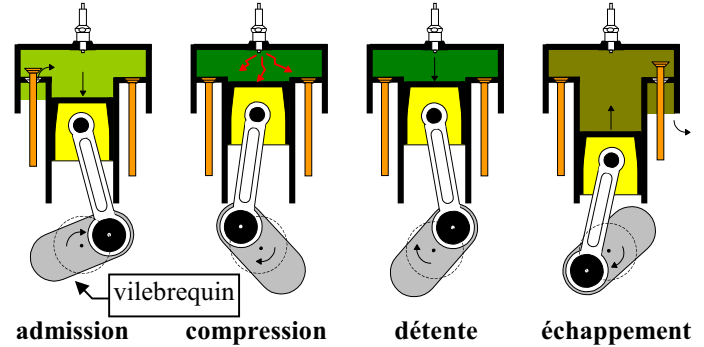
² On a 4 temps (4 déplacements) pour 2 tours, donc à 3000 tr/min le piston effectue 6000 déplacements / min, soit 1 déplacement / 10 ms. Or la chaleur met beaucoup plus de 10 ms à s'évacuer => compression et détente adiabatiques.

³ Cela se justifie par le fait que la vitesse des molécules d'air est de l'ordre de 700 m/s à 600K, or la course du

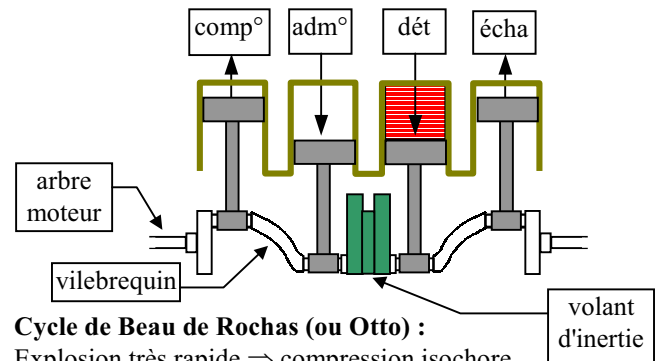
Pour une transfo non réversible on aurait eu $Q_1/T_1 + Q_2/T_2 \geq 0 \Rightarrow \eta \leq 1 - T_1/T_2$: le rendement du cycle de Carnot est bien le plus élevé.

2.2. Exemple d'un moteur ditherme réel : le cycle de Beau De Rochas (essence).

moteur à essence 4 temps (chaque figure = 1 temps) :



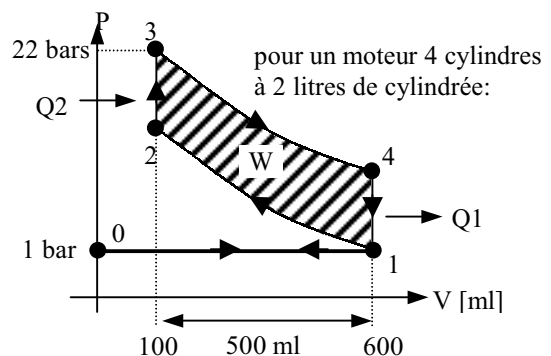
Rotation régulière et augmentation du travail avec 3 autres cylindres qui travaillent chacun sur un temps différent. C'est la détente qui entraîne les 3 autres pistons :



Cycle de Beau de Rochas (ou Otto) :

Explosion très rapide => compression isochore
Course des pistons très rapide (6m/s à 3000 tr/min) => transfo adiabatique. on a alors :

- 2 adiabatiques.
- 2 isochores (=> non réversibilité du cycle).



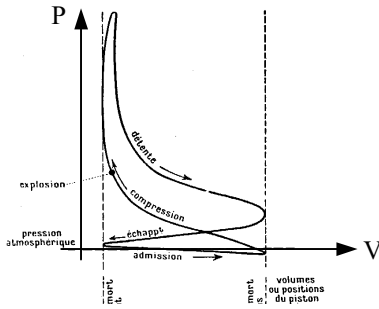
- 0 → 1 : admission.
- 1 → 2 : compression adiabatique.
- 2 → 3 : explosion très rapide (=> isochore)
- 3 → 4 : détente adiabatique avec production de travail.
- 4 → 1 : baisse de pression lors de l'ouverture de la soupape
- 1 → 0 : échappement.

piston (6 cm par exemple) s'effectue en 10 ms, soit une vitesse de déplacement de 6cm/10ms = 6m/s << 700 m/s du gaz : la pression a donc le temps de s'équilibrer.

Comme deux transformations sur les 4 sont adiabatiques, l'échange de chaleur s'effectuera uniquement sur les trajets isochores : lors de l'explosion (absorption de Q_2) et lors de la baisse de pression (rejet de Q_1).

On a le travail obtenu sur un cycle :

$W = W_{01} + W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{41} + W_{10}$, or $W_{01} = -W_{10}$, d'où $W = W_{01} + W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{41} =$ surface hachurée du cycle (= W_{total} du cours n° 3). En pratique, le cycle réel est le suivant :



Ce qui signifie que :

- 1/ l'admission crée une dépression (mélange visqueux)
- 2/ on provoque l'explosion légèrement avant que le piston n'ait atteint le point mort haut de manière à prendre en compte la durée de l'étincelle et la durée de combustion : c'est l'avance à l'allumage.
- 3/ La boucle inférieure est décrite dans le sens trigo : cela signifie que le travail fourni est encore plus faible que prévu.

L'exercice présenté à la 1/2 page de droite donne le calcul théorique du rendement du cycle. En pratique, le rendement effectif est plus faible car le cycle décrit est le cycle réel vu ci-dessus et il y a les frottements des divers organes. On remarque que le rendement est d'autant plus élevé que le taux de compression est élevé. Ce qui limite τ est le phénomène de détonation (combustion spontanée du mélange qui se traduit par des cognements sec et métalliques à l'intérieur du cylindre : pour $\tau \approx 12$ on aurait la pression qui monterait jusqu'à 100 bar : le moteur ne résisterait pas à un tel à-coup). τ est de l'ordre de 6 pour les moteurs à essence. L'indice d'octane permet de limiter le phénomène de détonation, donc augmenter τ et η . Les moteurs diesel ne possèdent plus de détonation car il ne s'agit pas d'un gaz explosif que l'on comprime, mais uniquement de l'air (c'est ensuite l'injection de gasoil qui provoque l'explosion : pas de bougie dans les diesel !) : on peut donc encore augmenter τ . Ce qui limite τ dans ce cas est la pression du gaz qui crée des contraintes mécaniques : τ est de l'ordre de 15 et la pression maximale de l'ordre de 50 bars pour le diesel qui a alors un rendement + élevé.

3. Les machines frigorifiques.

3.1. Réfrigérateurs.

Ils pompent de la chaleur d'un corps froid et la transmettent à un corps chaud grâce à un compresseur et à un détendeur qui permettent cette opération. Ce cycle nécessite de l'énergie motrice et ne peut donc être parcouru que dans le sens trigonométrique (absorption de travail).

$W = W_{01} + W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{41} + W_{10}$, or $W_{01} = -W_{10}$, d'où $W = W_{01} + W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{41} =$ surface du cycle hachuré.

Exercice :

Calculez le rendement $\eta \triangleq |W/Q_2|$ du cycle de Beau de Rochas avec $V_2/V_1 \triangleq \tau$ (taux de compression volumétrique) et $\gamma \triangleq C_p/C_v \approx 1,4$. On considère le mélange air - essence comme un gaz parfait et on rappelle que lors d'une transformation adiabatique on a $T.V^{\gamma-1} = C^{te}$

1^{er} principe : $W = -Q_1 - Q_2$ car $\Delta U = 0$ sur un cycle.

d'où $\eta = |(-Q_1 - Q_2)/Q_2| = |-1 - Q_1/Q_2| = -1 + Q_1/Q_2$ (1).

Or $Q_1 = m.C_v.(T_1 - T_4)$ et $Q_2 = m.C_v.(T_3 - T_2)$.

d'où $Q_1/Q_2 = (T_1 - T_4)/(T_3 - T_2)$ (2)

de plus $T_1.V_1^{\gamma-1} = T_2.V_2^{\gamma-1}$ et $T_3.V_3^{\gamma-1} = T_4.V_4^{\gamma-1}$

or $V_1 = V_4$ et $V_2 = V_3$ d'où $T_3.V_2 = T_4.V_1^{\gamma-1}$.

On en déduit que :

$$T_2 = T_1.(V_1/V_2)^{\gamma-1} = T_1.\tau^{\gamma-1}$$

$$T_3 = T_4.(V_1/V_2)^{\gamma-1} = T_4.\tau^{\gamma-1}$$

d'où (2) $\rightarrow Q_1/Q_2 = (T_1 - T_4)/(T_4.\tau^{\gamma-1} - T_1.\tau^{\gamma-1}) = (T_1 - T_4)/[\tau^{\gamma-1}(T_4 - T_1)] = -\tau^{1-\gamma}$

ainsi (1) $\rightarrow \eta = 1 - \tau^{1-\gamma}$

$$\eta = 1 - \frac{1}{\tau^{\gamma-1}}$$

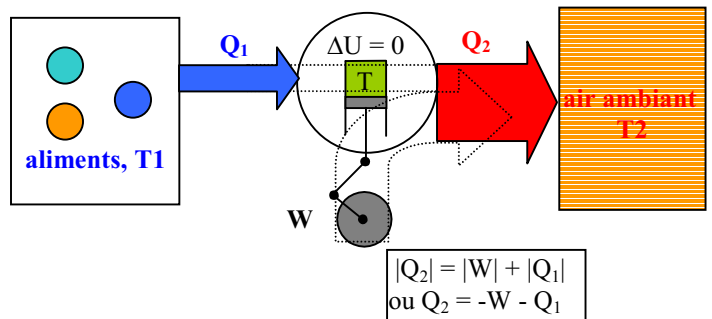
η est d'autant plus grand que le taux de compression volumétrique τ est élevé.

$$\text{Ici } \tau \triangleq V_1/V_2 = 600/100 \approx 6 \Rightarrow \eta = 1 - \frac{1}{6^{1,4-1}} \approx 51 \%$$

En pratique $\eta \approx 35 \%$, voire moins !

Rq : ici le 2nd principe est délicat à écrire car l'explosion n'est pas une source de chaleur (sous - entendu à $T = C^{te}$).

3.1. Réfrigérateurs.



L'efficacité est définie par :

$$e \triangleq \frac{|Q_1|}{|W|}$$

On peut calculer le rendement théorique sur l'exemple d'un cycle de Carnot (voir 1/2 page de droite).

Comme sur une isotherme on a $\Delta U = 0$ on en déduit que $W_2 = -Q_2$ sur l'isotherme T_2 , et puisque $W_2 \geq 0$ (V diminue sur l'isotherme) on a donc $Q_2 \leq 0$: elle est rejetée vers la source chaude ⁽⁴⁾. On démontre de même que sur l'isotherme froide T_1 on a Q_1 absorbée.

on appelle "efficacité e" le rapport $|Q_1/W|$ (= pourcentage d'énergie absorbée par rapport à l'énergie mécanique dépensée) : il ne s'agit pas du rendement qui sera égal à

$$\left| \frac{Q_2}{W + Q_1} \right| \quad (\text{énergie rejetée sur l'énergie absorbée}).$$

Un transparent du cours nous montre, de manière très épurée, le principe de lancement de production du froid (intérieur du réfrigérateur initialement à la température ambiante). Cependant, dans tous les exercices abordés en BTS, le cycle de refroidissement est lancé depuis longtemps de sorte que c'est le régime permanent qui est étudié : T_{froide} et T_{chaude} sont déjà établies depuis longtemps. C'est un thermostat qui lance le compresseur, et donc les cycles de refroidissement.

3.2. Pompes à chaleur.

Il s'agit simplement d'un réfrigérateur dont la porte est ouverte à l'extérieur de la maison (absorption de Q_1) et c'est la grille chaude du réfrigérateur qui chauffe la maison ⁽⁵⁾. Dans ce cas c'est la chaleur Q_2 restituée à notre maison qui nous intéresse, et l'efficacité est donc définie par :

$$e \triangleq \left| \frac{Q_2}{W} \right|$$

(le rendement serait toujours $\left| \frac{Q_2}{W + Q_1} \right|$)

On démontre alors que pour le cycle de Carnot (le seul réversible) on obtient

$$e = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

$e \approx 6,5$ signifie qu'il est 6,5 fois plus avantageux d'utiliser l'électricité pour alimenter le compresseur de la pompe à chaleur que d'utiliser l'électricité directement pour faire chauffer un radiateur électrique (rendement de 1) !!!

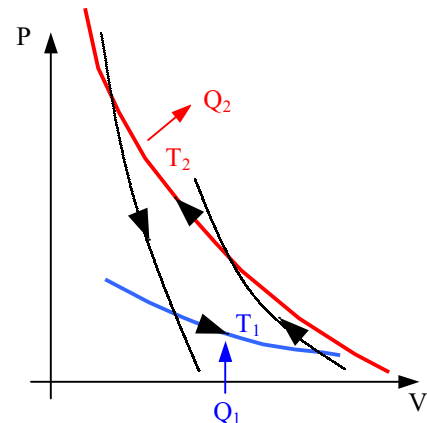
Remarque : on calcule ici des rendements (ou efficacités) énergétiques et non des rendements en puissance comme l'on fait le plus souvent en électricité (les 2 sont identiques si les machines sont utilisées 24H/24).

⁴ Cela n'est pas possible spontanément (voir exercices du cours n° 5 sur le 2nd principe de la thermo) : heureusement qu'un moteur électrique est là pour entraîner le piston !

⁵ Bien évidemment, les pompes à chaleur diffèrent des réfrigérateurs non pas au niveau du principe mais au niveau des puissances mises en jeu, diamètre des tuyaux etc.

Cycle de Carnot du frigo.

Il est forcément décrit dans le sens trigo puisque le cycle nécessite de l'énergie motrice pour se réaliser.



1^{er} principe $\Rightarrow W = -Q_1 - Q_2$.

2nd principe : réversible $\Rightarrow Q_1/T_1 + Q_2/T_2 = 0$.

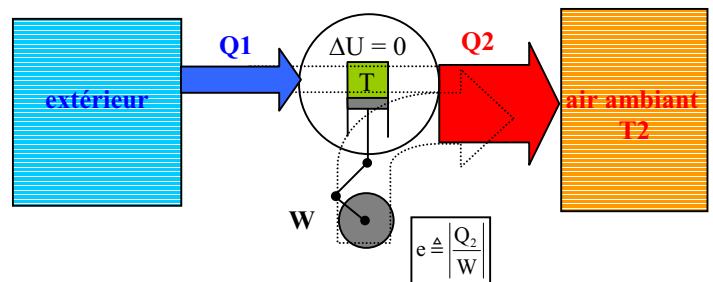
$$\Leftrightarrow Q_2 = -Q_1 \times (T_2/T_1)$$

$$e \triangleq |Q_1/W| = Q_1/(-Q_2 - Q_1) = Q_1/[Q_1 \times (T_2/T_1) - Q_1] = Q_1/[Q_1 \times (T_2/T_1 - 1)] = 1/(T_2/T_1 - 1) \text{ ainsi :}$$

$$e = \frac{T_1}{T_2 - T_1}$$

pour $T_2 \approx 27 \text{ }^\circ\text{C}$ (300K) et $T_1 \approx -13 \text{ }^\circ\text{C}$ (260K) on obtient $e \approx 6,5$. La température froide dépend du procédé utilisé (taux de compression etc.)

3.2. Pompes à chaleur.



Cycle de Carnot identique à celui du réfrigérateur.

1^{er} principe $\Rightarrow W = -Q_1 - Q_2$.

2nd principe : réversible $\Rightarrow Q_1/T_1 + Q_2/T_2 = 0$.

$$\Leftrightarrow Q_1 = -Q_2 \times (T_1/T_2)$$

$$e \triangleq |Q_2/W| = Q_2/(-Q_2 - Q_1) = Q_2/[-Q_2 + Q_2 \cdot (T_1/T_2)] = Q_2/[Q_2 \times (T_1/T_2 - 1)] = 1/(T_1/T_2 - 1) \text{ ainsi :}$$

$$e = \left| \frac{T_2}{T_1 - T_2} \right| = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

pour $T_2 \approx 27 \text{ }^\circ\text{C}$ (300K) et $T_1 \approx -13 \text{ }^\circ\text{C}$ (260K) on obtient $e \approx 7,5$. La température chaude dépend du procédé utilisé (taux de compression, méthode de détente etc.). Une pompe à chaleur est d'autant plus efficace que T_1 (température extérieure) est faible.

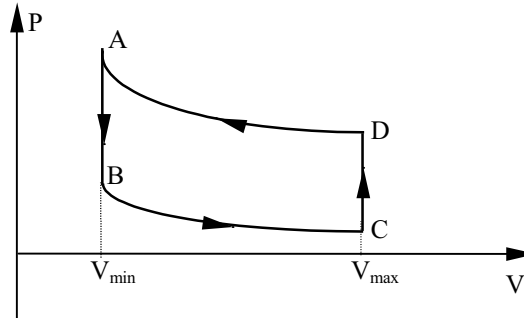
Exercices sur les machines thermiques. Sujets de thermodynamique.

Exercice n°1 : Cycle de Stirling. BTS Maintenance 1992, Nouméa.

On étudie une machine ditherme fonctionnant suivant le cycle de Stirling représenté sur la figure 1.

On distingue dans ce cycle :

- deux transformations réversibles isochores
- deux transformations réversibles isothermes aux températures T_1 et T_2 ($T_1 < T_2$)



Le fluide décrivant ce cycle dans le sens ABCDA est assimilé à un **gaz parfait**. On rappelle que pour une évolution élémentaire d'une mole de gaz parfait, la variation d'énergie interne dU est liée à la variation de température dT par la relation $dU = C_v dT$ où C_v est la capacité calorifique molaire à volume constant du fluide.

On donne :

- température de la source froide $T_1 = 276K$
- température de la source chaude $T_2 = 293K$
- rapport volumétrique $\frac{V_{max}}{V_{min}} \cong 3,0$
- constante du gaz parfait $R = 8,32 \text{ J.mol}^{-1} . \text{K}^{-1}$
- $C_v = 21 \text{ J.mol}^{-1} . \text{K}^{-1}$

1°) - Quelle est la nature de chacune des transformations A-B, B-C, C-D et D-A ?

2°) - Pour **une mole** de fluide :

2-1 *Exprimer pour chacune des transformations le travail et la quantité de chaleur échangés par le fluide avec le milieu extérieur.*

2-2 Calculer les valeurs numériques des grandeurs exprimées ci-dessus pour les transformations A-B et B-C.

2-3 Exprimer le travail total W échangé par cycle entre le fluide et le milieu extérieur. Le fonctionnement du cycle est-il moteur ou récepteur ? Justifier la réponse.

3°) - On appelle Q_1 la quantité de chaleur prise à la source froide par une mole de fluide au cours d'un cycle. En utilisant les résultats de la question 2°), donner la valeur numérique de Q_1 . Citer une application possible de cette machine.

Exercices n°2 : cycle Diesel, BTS Maintenance 1994, Métropole.

On considère un moteur à combustion interne fonctionnant suivant le cycle Diesel représenté en annexe.

A_1A_2 : compression adiabatique réversible de l'air caractérisée par le rapport volumétrique : $x = \frac{V_1}{V_2}$

A_2A_3 : injection du carburant finement pulvérisé dans l'air comprimé et chaud provoquant son inflammation. La combustion se produit à pression constante.

A_3A_4 : détente adiabatique réversible des gaz.

A_4A_1 : ouverture de la soupape d'échappement, ramenant instantanément la pression à P_1 , les gaz subissant un refroidissement isochore.

La quantité de carburant injecté étant faible devant la quantité d'air aspiré, on considérera que le nombre total de moles n'est pas modifié par la combustion.

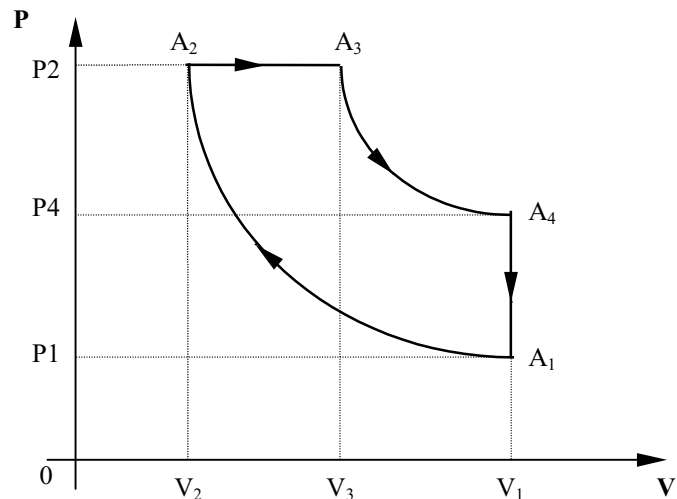
On assimile les gaz à un gaz parfait de constante $R = 8,32 \text{ J.K}^{-1} . \text{mol}^{-1}$, de capacité thermique molaire à pression constante $C_p = 29 \text{ J.K}^{-1} . \text{mol}^{-1}$

On donne : $\gamma = 1,40$.

On étudie les transformations subies par une mole de gaz parfait.

- 1 - Ce gaz est admis dans les cylindres à la pression $P_1 = 1 \text{ bar} = 1,0 \times 10^5 \text{ Pa}$ et à la température $T_1 = 330 \text{ K}$.
 - a - Calculer le volume V_1
 - b - Calculer la pression P_2 et la température T_2 en fin de compression sachant que $x = 14$.
- 2 - En fin de combustion, la température du gaz est $T_3 = 2\,260 \text{ K}$. Calculer le volume V_3 et la chaleur Q_{23} reçue par ce gaz au cours de la transformation A_2A_3 .
- 3 - Calculer la pression P_4 et la température T_4 en fin de détente.
- 4 - a - Calculer la quantité de chaleur Q_{41} reçue par le gaz au cours de la transformation isochore.
 b - En appliquant le premier principe, calculer le travail fourni par le moteur au cours d'un cycle.
 c - Calculer le rendement η de ce moteur thermique.

ANNEXE



RAPPELS :

Le rendement d'un moteur thermique est le rapport entre le travail fourni par les gaz au cours d'un cycle et la quantité de chaleur reçue par les gaz au cours de la phase de combustion.

Pour un gaz parfait subissant une transformation adiabatique réversible d'un état A (P_A, V_A, T_A) à un état B (P_B, V_B, T_B), on peut écrire :

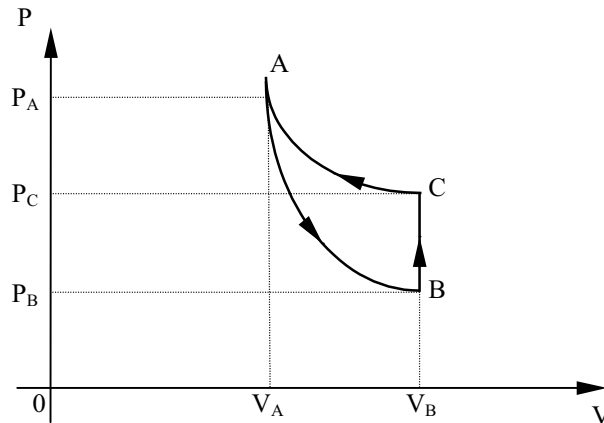
$$P_A V_A^\gamma = P_B V_B^\gamma$$

$$T_A V_A^{\gamma-1} = T_B V_B^{\gamma-1}$$

avec $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$

Exercice 3. BTS Maintenance 1994, Nouméa.

Un gaz parfait subit les transformations réversibles représentées sur le diagramme ci-dessous :



*AB : détente adiabatique telle que $V_B = 2 V_A$
CA : compression isotherme*

On donne :

$$P_A = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$V_A = 10^{-2} \text{ m}^3$$

Température du gaz au point A

$$T_A = 300 \text{ K}$$

Constante des gaz parfaits :

$$R = 8,31 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

Capacité thermique molaire à pression constante :

$$C_p = 29 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

Rapport des capacités calorifiques de ce gaz :

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1,40$$

- 1 - Comment appelle-t-on la transformation **BC** ?
- 2 - Calculer le nombre de moles **n** de ce gaz.
- 3 - Calculer :
 - a) la pression **P_B** et la température **T_B** du gaz au point **B**.
 - b) la pression **P_C** du gaz au point **C**.
- 4 - Calculer la quantité de chaleur **Q_{BC}** et le travail **W_{BC}** reçus par le système pour la transformation qui fait passer le système de l'état **B** à l'état **C**.
- 5 - a - Pourquoi la variation d'énergie interne **ΔU_{CA}** du gaz est-elle nulle lors de la transformation **CA** ?
 - b - Appliquer le premier principe au cycle **ABCA** et en déduire le travail **W_{AB}** reçu par le gaz lors de la détente adiabatique **AB**.
 - c - Interpréter le signe de **W_{AB}**.

RAPPELS :

Pour un gaz parfait subissant une transformation adiabatique réversible d'un état **A** (P_A, V_A, T_A) à un état **B** (P_B, V_B, T_B), on peut écrire :

$$P_A V_A^\gamma = P_B V_B^\gamma$$

$$T_A V_A^{\gamma-1} = T_B V_B^{\gamma-1}$$

avec $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$

Exercice 4 : BTS Maintenance 1995, Métropole.

Une pompe prélève de l'air dans l'atmosphère à une température de 27°C à la pression de $1,0 \times 10^5 \text{ Pa}$. Elle remplit en une minute une bouteille de 20 L de telle façon que la pression finale soit de $10 \times 10^5 \text{ Pa}$, l'air étant alors à une température de 57°C .

On admet :

- . que la transformation subie par l'air équivaut à deux transformations quasi-statiques théoriques successives :
 - une transformation 1-2 à température constante
 - une transformation 2-3 à volume constant.
- . que l'air peut être assimilé à un gaz parfait
- . que la bouteille était préalablement vide d'air.

Travail demandé :

- 1 - Calculer le nombre de moles d'air subissant ces transformations.
- 2 - Calculer le volume initial V_1 occupé par cet air.
- 3 - Déterminer l'état théorique du gaz (P_2, V_2, T_2) à la fin de la transformation 1-2.
- 4 - Calculer la puissance minimale de la pompe.

On donne :

- * Constante des gaz parfaits : $R = 8,32 \text{ J.mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- * Expression du travail reçu par un gaz lors d'une transformation isotherme à la température T :

$$W_{AB} = n R T \ln (P_B / P_A)$$

Exercice 5 : BTS Maintenance 1995, Nouméa.

Une pompe à chaleur fonctionne entre deux sources : une nappe souterraine qui constitue la source froide et l'eau du circuit de chauffage qui constitue la source chaude.

Le fluide utilisé dans cette pompe à chaleur est de l'air assimilable à un gaz parfait de constante $R = 8,32 \text{ J.K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$, de capacité thermique molaire à pression constante $C_p = 29,1 \text{ J.K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$. Le rapport des capacités thermiques molaires à pression constante C_p et à volume constant C_v vaut $\gamma = 1,4$.

L'air de la pompe à chaleur décrit le cycle de transformations réversibles suivant :

- **Passage de l'état initial A, à l'état B par une compression adiabatique dans un compresseur.**

état A : pression : $P_A = 1,0 \times 10^5 \text{ Pa}$, volume V_A , température $T_A = 298 \text{ K}$;

état B : pression : $P_B = 2,2 \times 10^5 \text{ Pa}$, volume V_B , température T_B .

- **Passage de l'état B à l'état C par une transformation isobare pendant laquelle l'air reçoit de la source chaude une quantité de chaleur Q_1 .**

état C : pression $P_C = P_B$, température $T_C = 340 \text{ K}$

- **Passage de l'état C à l'état D par une détente adiabatique.**

état D : pression $P_D = P_A$, température T_D

- **Passage de l'état D à l'état A par une transformation isobare pendant laquelle l'air reçoit de la source froide une quantité de chaleur Q_2 .**

On effectuera les calculs relatifs à une mole d'air.

- 1 - Placer les points B, C, D sur la **figure a** du document-réponse.
- 2 - Calculer les volumes V_A et V_B .

3 - Calculer les températures T_B et T_D .

4 - Pour chaque cycle décrit par une mole d'air, calculer :

4.1 - les quantités de chaleur Q_1 et Q_2 ,

4.2 - le travail W reçu au cours de la totalité du cycle.

5 - L'efficacité ε de la pompe à chaleur est le rapport de la quantité de chaleur reçue par la source chaude au cours d'un cycle décrit par l'air, et du travail reçu par l'air au cours de ce même cycle.

5.1 - Exprimer ε en fonction de Q_1 et W . Calculer sa valeur.

5.2 - Justifier le choix de cette définition.

RAPPELS :

Pour un gaz parfait subissant une transformation adiabatique réversible d'un état $A (P_A, V_A, T_A)$ à un état $B (P_B, V_B, T_B)$, on peut écrire :

$$P_A V_A^\gamma = P_B V_B^\gamma$$

$$T_A V_A^{\gamma-1} = T_B V_B^{\gamma-1}$$

avec $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$

DOCUMENT - REPONSE

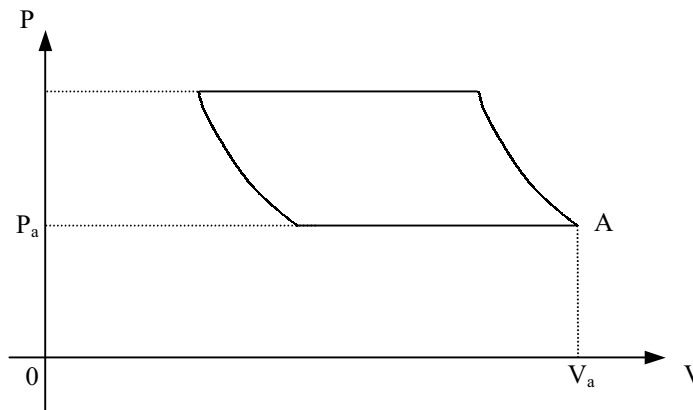
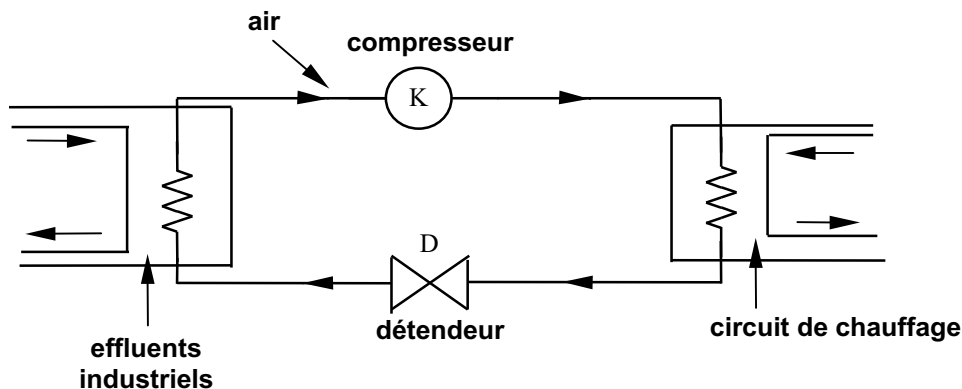


figure a

Exercice 6 : BTS Maintenance 1996, Métropole.

On s'intéresse à une pompe à chaleur qui participe au chauffage de locaux, en prélevant de la chaleur aux effluents liquides à température élevée d'une installation industrielle, avant leur rejet dans une rivière qui recevra des effluents à température plus faible.

L'installation représentée ci-dessous comporte : un compresseur, un détendeur et deux serpentins qui sont le siège des échanges thermiques, avec les effluents d'une part, et avec l'eau d'un circuit de chauffage d'autre part.



Le fluide frigorigène est de l'air, assimilé à un gaz parfait.

On étudie les transformations réversibles de 1 kg d'air qui décrit le cycle suivant :

1-2 : dans le compresseur : **compression adiabatique**, la pression passant de $p_1 = 10^5 \text{ Pa}$ à $p_2 = 2 \times 10^5 \text{ Pa}$ et la température passant de $T_1 = 310 \text{ K}$ à T_2 .

2-3 : dans le serpentin au contact du circuit de chauffage ($V_3 < V_2$) : **refroidissement isobare**, la température passant de T_2 à $T_3 = 330 \text{ K}$.

3-4 : dans le détendeur : **détente adiabatique**, la pression passant de $p_3 = p_2$ à $p_4 = p_1$, la température passant de T_3 à $T_4 = 271 \text{ K}$.

4-1 : dans un serpentin plongé dans les effluents industriels : **échauffement isobare** jusqu'à la température T_1 .

On donne :

constante du gaz parfait : $R = 8,32 \text{ J.mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

capacité thermique massique de l'air à pression constante : $c_p = 1\,000 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

rapport des capacités thermiques massiques de l'air, à pression constante et à volume constant : $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$.

On rappelle que lors de la transformation adiabatique réversible d'un gaz parfait : $pV^\gamma = \text{constante}$.

- 1) Représenter l'allure du cycle décrit par l'air sur un diagramme de Clapeyron (p, V). Indiquer par des flèches le sens des transformations.
- 2) Montrer que $T_2 \simeq 378 \text{ K}$.
- 3) Calculer les quantités de chaleur échangées par une masse de 1 kg d'air au cours de chacune des 4 transformations.
- 4) Quelle est la variation de l'énergie interne de l'air qui décrit le cycle ? Énoncer le premier principe de la thermodynamique pour un cycle.
- 5) En déduire le travail W reçu par la masse de 1 kilogramme d'air, au cours du cycle.
- 6) On désigne par e l'efficacité de la pompe à chaleur, c'est-à-dire le rapport de la quantité de chaleur reçue par la source chaude et du travail reçu par l'air, au cours d'un cycle. Calculer e .

Exercice 7 : BTS maintenance 1996, Nouméa.

Le fonctionnement du moteur à explosion peut-être modélisé par le cycle théorique de Beau de Rochas. Ce cycle représenté dans un diagramme de Clapeyron, peut se décomposer en quatre temps :

- * premier temps, est une **compression adiabatique réversible** AB du mélange combustible avec un rapport volumique $a = \frac{V_A}{V_B}$.
- * le deuxième temps est une **compression isochore** BC, résultant de la combustion du mélange.
- * le troisième temps est une **détente adiabatique réversible** selon CD. En D, le piston est au point mort bas : $V_D = V_A$.
- * le quatrième temps est un **refroidissement isochore** DA.

La quantité de carburant injecté étant peu importante par rapport à celle de l'air aspiré, on la négligera devant cette dernière. Le cycle est étudié pour **une mole** d'air assimilé à un gaz parfait.

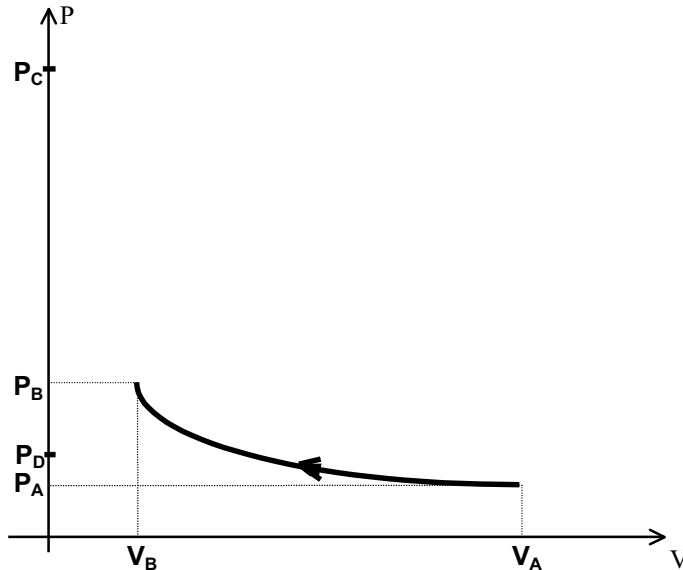
DONNEES : Voir document-réponse.

QUESTIONS :

- 1- Compléter l'allure du cycle sur le document-réponse.
- 2- Déterminer la valeur des volumes V_A et V_B aux points A et B.
- 3- Calculer la pression P_B et la température T_B au point B
- 4- Exprimer, en fonction des températures aux extrémités du cycle, les quantités de chaleur algébriques Q_{AB} , Q_{BC} , Q_{CD} , Q_{DA} , échangées avec le milieu extérieur au cours de chacune des quatre phases. Calculer leurs valeurs numériques. En déduire par application du Premier Principe, la valeur algébrique W du travail fourni à l'air au cours du cycle.
- 5- Le rendement du cycle s'exprime par :

$$\eta = -\frac{W}{Q_{BC}} . \text{ Calculer sa valeur numérique.}$$

DOCUMENT-REPONSE, à rendre avec la copie.



Données :

Constante des gaz parfaits :	$R = 8,32 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Capacité Thermique molaire de l'air à pression constante :	$C_p = 29 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Capacité thermique molaire de l'air à volume constant :	C_v
Valeur du rapport $\gamma = C_p/C_v$	$\gamma = 1,40$
Valeur du rapport volumique $a = V_A/V_B$	$a = 7$
Valeurs de la pression , et de la température aux extrémités du cycle :	
$P_A = 10^5 \text{ Pa}$	$P_C = 62. 10^5 \text{ Pa}$
$T_A = 300 \text{ K}$	$T_D = 1,21. 10^3 \text{ K}$
	$P_D = 4,08. 10^5 \text{ Pa}$
	$T_C = 2,65. 10^3 \text{ K}$

On rappelle que lors de la transformation adiabatique réversible d'un gaz parfait $P.V^\gamma = \text{Constante}$

Exercice 8 : BTS Maintenance 1997, Nouméa.

Une entreprise doit installer un dispositif de chauffage de l'eau de distribution de la ville. Captée à la température $\theta_1 \equiv 15^\circ\text{C}$, l'eau doit être livrée à la température finale $\theta = 85^\circ\text{C}$. Le dispositif est prévu pour réchauffer une masse $M = 100\theta$ kg d'eau par heure.

On donne la capacité thermique massique de l'eau liquide : $c = 4\ 190 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Le dispositif de chauffage (voir figure 1 de l'annexe) comporte une chaudière qui produit par heure une masse m de vapeur d'eau à 100°C . Cette vapeur pénètre avec l'eau à réchauffer dans un échangeur supposé parfaitement calorifugé.

- 1) Calculer la quantité de chaleur Q_{eau} absorbée par 1000 kg d'eau dont la température passe de 15°C à 85°C . Calculer la puissance calorifique reçue par l'eau à réchauffer.
- 2) La chaleur est fournie par la combustion de fuel dans la chaudière. Chaque kilogramme de fuel brûlé donne une quantité de chaleur de $4,2 \times 10^7 \text{ J}$. En supposant le rendement de la chaudière égal à 0,80 ; calculer la consommation horaire de fuel.
- 3) Donner l'expression de la quantité de chaleur Q_1 absorbée par une masse m de vapeur d'eau qui passe de l'état gazeux à l'état liquide. (La chaleur de condensation de la vapeur d'eau est $L_c = -2257,2 \text{ kJ/kg}$).
- 4) Donner l'expression de la quantité de chaleur Q_2 absorbée par la masse m d'eau provenant de la condensation de la vapeur en passant de la température $\theta'_1 = 100^\circ\text{C}$ à la température $\theta'_2 = 85^\circ\text{C}$.

5) On considère le système formé par la masse M d'eau à réchauffer et la masse m de vapeur d'eau. On admet que ce système n'échange pas de chaleur avec l'extérieur (transformation adiabatique).

a) Ecrire l'équation calorimétrique reliant Q_{eau} , Q_1 et Q_2 .

b) En déduire la masse m de vapeur d'eau nécessaire pour faire passer de 15°C à 85°C la température de 1000 kg d'eau.

6) On connaît les concentrations en ions Ca^{2+} et en ions Mg^{2+} de l'eau de distribution de la ville :

$$[\text{Ca}^{2+}] = 1,5 \times 10^{-3} \text{ moles d'ions.L}^{-1}.$$

$$[\text{Mg}^{2+}] = 0,5 \times 10^{-3} \text{ moles d'ions.L}^{-1}.$$

a) Quel est le titre hydrotimétrique total (T.M.T) de cette eau, en moles d'ions par litre, puis en équivalents par litre, puis en degrés Français ($^\circ\text{F}$) sachant que :

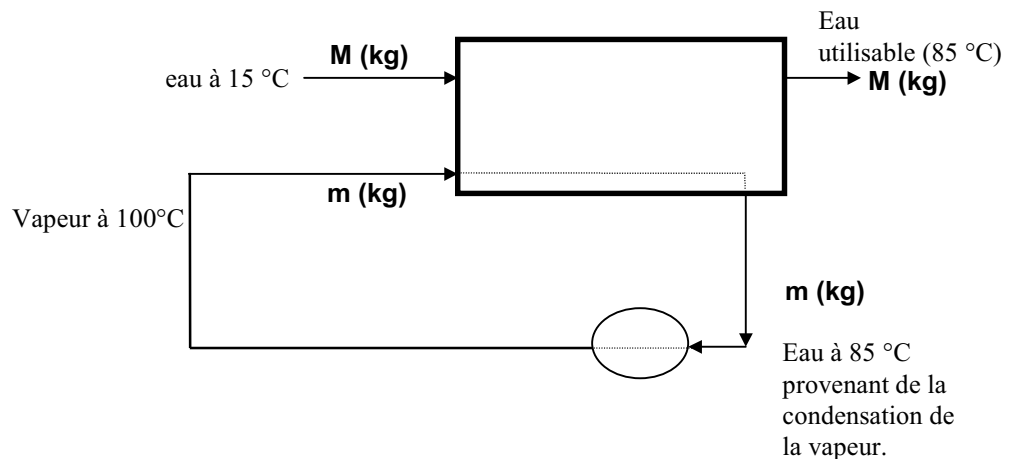
$$1 \text{ mole d'ions } \text{M}^{2+} \text{ par litre} \equiv 2 \text{ équivalents par litre}$$

$$10^{-3} \text{ équivalents par litre} \equiv 5^\circ\text{F}$$

b) Quel est l'inconvénient que crée une eau trop dure qui circule dans une conduite ?

ANNEXE

Figure 1



Exercice 9 : BTS Maintenance 1997, Métropole.

L'étude porte sur un moteur thermique (type Diesel). La conversion d'énergie est assurée par de l'air qui décrit le cycle représenté en figure 2 sur l'annexe, en coordonnées de Clapeyron $P(V)$. Chaque transformation est considérée comme réversible. Les trajets 1-2 et 3-4, sont adiabatiques.

État 1 : $P_1 = 1 \text{ Bar} = 10^5 \text{ Pa}$

$$T_1 = 300 \text{ K}$$

État 2 : $\frac{V_1}{V_2} = 14$

État 3 : $T_3 = 1340 \text{ K}$

État 4 : $T_4 = 556 \text{ K}$

Les calculs porteront sur une mole d'air.

Il est rappelé que $R = 8,31 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$, et que, pour l'air, $\gamma = C_p/C_v = 1,4$. On donne en outre : $C_v = 20,8 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

1) Montrer que $T_2 = 862 \text{ K}$. On rappelle que pour une transformation adiabatique :

$$P.V^\gamma = \text{Cte}$$

$$T.V^{\gamma-1} = \text{Cte.}$$

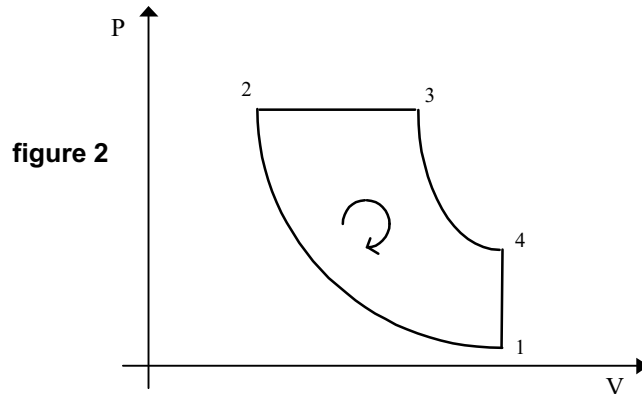
2) Pourquoi T_3 est-elle la température la plus élevée sur le cycle ?

3) Déterminer la quantité de chaleur échangée par une mole d'air au cours de chaque transformation :

a) sur le trajet 1-2.

- b) sur le trajet 2-3.
- c) sur le trajet 3-4.
- d) sur le trajet 4-1.

- 4) Quelle est la variation de l'énergie interne de l'air qui décrit un cycle ?
Enoncer le premier principe de la thermodynamique pour un cycle et en déduire la valeur algébrique W du travail reçu par une mole d'air au cours d'un cycle.
- 5) Déterminer le rendement théorique du moteur.
- 6) Le rendement réel n'est que de 0,45. Le fuel utilisé dégage 45×10^3 kJ par litre lors de la combustion. Sachant que ce moteur consomme 1 litre de fuel par heure, calculer le travail mécanique qu'il fournit en une heure et sa puissance mécanique.



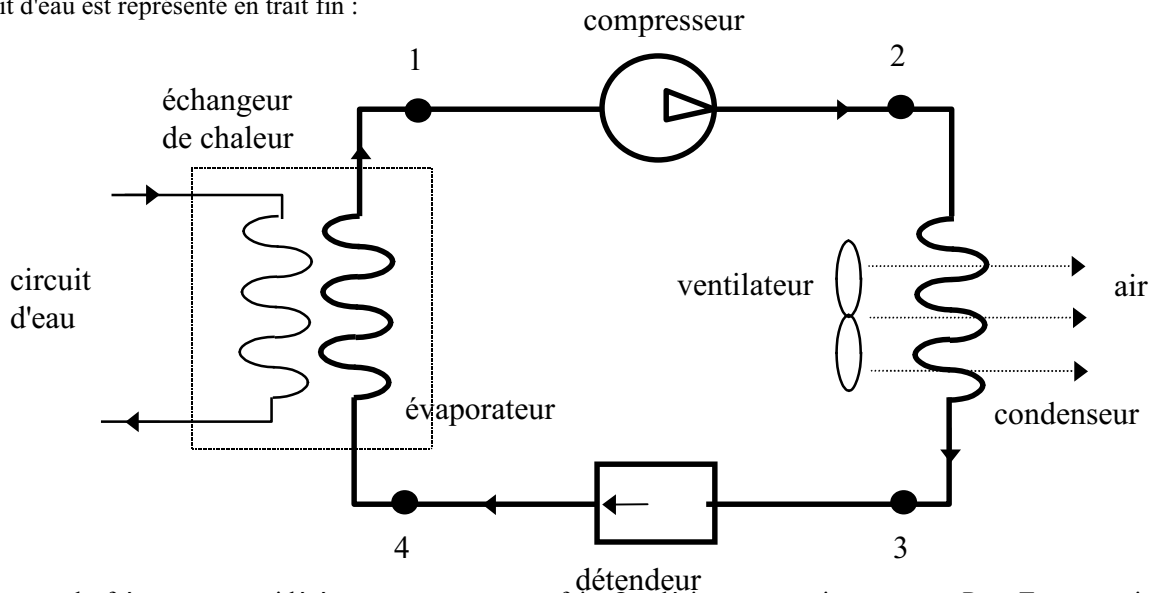
Exercice 10 : BTS Maintenance 1998, Métropole.

On effectue l'étude d'un système destiné à réfrigérer de l'eau. Le schéma de principe est donné à la figure ci-dessous. Le fluide subissant le cycle thermodynamique est du fréon. Le circuit est représenté en trait épais.

1, 2, 3, 4 sont les points du circuit correspondants aux entrées et sorties de chaque élément.

Un ventilateur soufflant de l'air sur le condenseur assure le refroidissement du dispositif.

L'évaporateur et le circuit d'eau sont mis en contact thermique par un échangeur de chaleur, représenté en pointillé. Le circuit d'eau est représenté en trait fin :



La vapeur de fréon sera considérée comme un gaz parfait. On désigne respectivement par P et T sa pression et sa température.

Les caractéristiques thermodynamiques du fréon sont les suivantes :

- ⇒ Masse molaire du fréon : $M = 121$ g.
- ⇒ Chaleur latente massique de vaporisation du fréon : $L = 30$ kJ.kg⁻¹ à 310 K.
- ⇒ Capacité thermique molaire à pression constante du fréon gazeux : $C_p = 49,9$ J.K⁻¹.mol⁻¹.
- ⇒ Rapport des capacités thermiques molaires à pression constante et à volume constant du fréon gazeux :

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1,2.$$

- ⇒ Constante d'état des gaz parfaits : $R = 8,32 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$.
⇒ Au point 1 le fréon est totalement gazeux : $P_1 = 1,9 \times 10^5 \text{ Pa}$; $T_1 = 272 \text{ K}$.
⇒ Au point 2 le fréon est totalement gazeux : $P_2 = 8,5 \times 10^5 \text{ Pa}$; T_2 .
⇒ Au point 3 le fréon est totalement liquide : $P_3 = P_2$; $T_3 = 310 \text{ K}$.
⇒ Au point 4 le fréon est partiellement gazeux : $P_4 = P_1$; T_4 .

- 1) La masse de fréon circulant en un point du circuit en une minute est $m = 2,25 \text{ kg}$.
a) En déduire que le nombre de moles de fréon passant en un point du circuit en une minute est $n = 18,6$.
b) Quel volume V_1 ces n moles de fréon occupent-elles à l'état gazeux sous la pression $P_1 = 1,9 \times 10^5 \text{ Pa}$ et à la température de $T_1 = 272 \text{ K}$? On exprimera le résultat en litres.
- 2) On suppose que la transformation réalisée dans le compresseur est adiabatique et réversible. Calculer, en litres, le volume V_2 occupé par ces n moles de fréon à la pression P_2 . En déduire que T_2 est égale à 349 K . On rappelle que pour une transformation adiabatique réversible d'un gaz parfait :
- $$P_1.V_1^\gamma = P_2.V_2^\gamma$$
- 3) Dans le condenseur, le fréon subit un refroidissement à l'état gazeux de T_2 à T_3 , puis une liquéfaction à la température T_3 .
a) Calculer la quantité de chaleur Q_a échangée par le fréon gazeux, en une minute, lors de son refroidissement de T_2 à T_3 . (Préciser le signe de Q_a)
b) Calculer la quantité de chaleur Q_b échangée par le fréon, en une minute, lors de sa liquéfaction totale. (Préciser le signe de Q_b).
- On rappelle que la chaleur latente massique de vaporisation du fréon est $L = 130 \text{ kJ.kg}^{-1}$ à 310 K .
c) En déduire la quantité de chaleur Q_{23} échangée par le fréon, en une minute, dans le condenseur pour son refroidissement et sa liquéfaction.
d) Quel est le signe de Q_{23} ? Que représente ce signe ?
- 4) Dans l'évaporateur, la valeur algébrique de quantité de chaleur Q_{41} reçue par le fréon, en une minute, est $Q_{41} = 240 \text{ kJ}$. En déduire le débit maximal de l'eau, si l'on veut abaisser la température de celle-ci de $5,0^\circ \text{ C}$. On exprimera ce débit en litres par minute.

On donne : capacité thermique massique de l'eau : $c_{\text{eau}} = 4180 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$

Exercice 11 : BTS Maintenance 1998, Nouméa.

On considère une enceinte calorifugée dans laquelle l'une des parois est un piston. L'ensemble permet d'isoler n moles d'un gaz assimilé à un gaz parfait. Un thermomètre et un capteur de pression (de capacités thermiques négligeables) sont montés sur l'enceinte. Le piston est mobile. Un asservissement de pression (non représenté) assure une pression P constante dans l'enceinte.

Une résistance chauffante $R_0 = 100\Omega$ de capacité thermique également négligeable est disposée à l'intérieur de l'enceinte. Elle est alimentée par un générateur maintenant une tension fixe $U = 20\text{V}$ entre ses bornes. Dans tout le problème, R_0 est supposée constante.

Le schéma du dispositif est représenté figure 1 (voir annexe).

On donne :

- $T_1 = 298 \text{ K}$ (température initiale du gaz de l'enceinte)
 $P = 6,2 \times 10^5 \text{ Pa}$ (pression initiale du gaz de l'enceinte)
 $R = 8,31 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (constante du gaz parfait)

$n = 1,0 \text{ mole}$

- 1) Calculer le volume V_1 occupé initialement par le gaz.

- 2) On ferme l'interrupteur K pendant une durée $\Delta t = 9,0$ min.
 - 2.1. Calculer l'intensité du courant dans le circuit électrique
 - 2.2. Calculer l'énergie calorifique Q obtenue par effet Joule.
 - 2.3. On admet que cette énergie Q est intégralement reçue par le gaz dont la température devient alors $T_2 = 373\text{K}$.
 - 2.3.1. Déterminer C_p , capacité thermique molaire du gaz, à pression constante.
 - 2.3.2. Calculer le volume V_2 du gaz.
- 3) Etude du travail reçu par le gaz.
 - 3.1. Donner l'expression du travail W reçu par le gaz quand il passe de l'état 1 caractérisé par (P, V_1, T_1) à l'état 2 caractérisé par (P, V_2, T_2) .
 - 3.2. Calculer la valeur numérique de W.
 - 3.3. Préciser si le travail est moteur ou résistant.
- 4) Calculer la variation d'énergie interne ΔU_{12} du gaz quand il passe de l'état 1 à l'état 2. En déduire la capacité thermique molaire du gaz à volume constant C_v

ANNEXE

Figure 1

