

Colonne de gauche = discours fait aux élèves, pas forcément écrit au tableau
Colonne de droite = résumé et illustrations du propos de la colonne de gauche, écrits au tableau ou montrés sur transparents.

Voir l'*Introduction aux cours de thermodynamique* pour situer ce cours dans son contexte. Les exercices signalés sont disponibles en fin du cours.

cours n° 7 : Les machines thermiques dithermes

Pré-requis : cours n° 5 et 6.

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

Plan :

1. Cycles et machines thermiques
2. Les moteurs thermiques dithermes
3. Les machines frigorifiques

Bibliographie :

Introduction à la thermodynamique, C. Lhuillier et J. Rous, Dunod, 1994.
Les machines transformatrices d'énergie, tome I, par G. Lemasson, Delagrave, 1963

1. Cycles et machines thermiques.

Ces machines thermiques permettent de produire du froid (réfrigérateur), du chaud (pompe à chaleur) ou du travail (moteur thermique) à partir de sources de chaleur uniquement (c'est l'application du 1^{er} principe de la thermodynamique).

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 la puissance développée serait infiniment petite : on n'a pas toute notre vie pour refroidir un frigo !.
2. de transformations cycliques où l'état final et initial du système (gaz par exemple) sont identiques : c'est ce qui est réalisé en pratique.

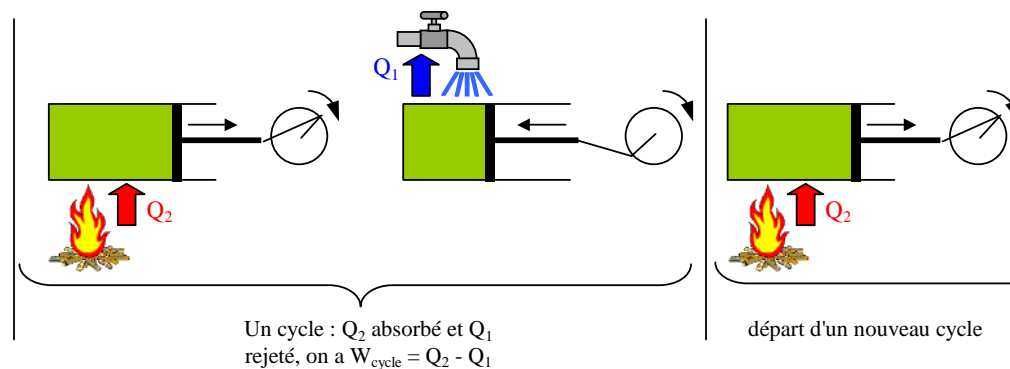
On a vu (voir cours n° 5) qu'il fallait absolument 2 sources de chaleur au minimum pour avoir un moteur thermique. Le moteur ditherme est donc le moteur "minimal" qui échange de la chaleur entre deux sources. Cet échange de chaleur (qui correspond globalement à une absorption de chaleur sur un cycle)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

On a vu au cours n°5 que, d'après le 2nd principe de la thermodynamique, les moteurs dithermes prennent obligatoirement de la chaleur Q_2 d'un corps chaud pour la convertir en énergie motrice W . Ils en perdent cependant une partie de cette chaleur Q_1 qu'ils

rejetent à la source froide. Ils posséderont donc un rendement défini par $\eta \triangleq \frac{|W|}{Q_2}$

1.

Machines thermiques : cycliques pour qu'elles fonctionnent en continu : la rotation continue d'un moteur thermique en est un exemple concret



2. Les moteurs thermiques dithermes.

2.1. Moteur réversible en contact avec 2 sources : cycle de Carnot.

Rappelons qu'un cycle **réversible** est un cycle pour lequel le système d'étude est constamment en équilibre thermodynamique avec son environnement immédiat (appelé "extérieur") : pour les systèmes simples que l'on étudie¹ cela se traduit par un équilibre **thermique** (égalité des températures intérieure et extérieure lors des contacts thermiques) et **mécanique** (égalité des pressions intérieure et extérieure). Le cycle est dit **ditherme** s'il se déroule entre 2 thermostats uniquement (ou *sources de chaleur*²).

Ces définitions rappelées, le seul cycle **ditherme réversible** possible est donc le cycle composé de 2 isothermes et de 2 adiabatiques (qui permettent, sans contact avec les sources, de passer de l'isotherme chaude T_2 à l'isotherme froide T_1) : ce cycle est appelé **cycle de Carnot**. Les chaleurs échangées lors du cycle Q_1 et Q_2 sont alors forcément échangées sur les isothermes puisque les adiabatiques n'échangent pas de chaleur avec les sources (par définition d'une adiabatique). **Le cycle de Carnot est le cycle ditherme réversible : il assure le rendement maximal du moteur en contact avec 2 sources.**

Si l'extérieur évolue à la même température que le système, alors il peut y avoir également réversibilité (ou plutôt *quasi* réversibilité) et donc même rendement, mais dans ce cas, si on veut s'assurer de la réversibilité du cycle (c'est-à-dire obtenir un rendement maximal) **on ne peut plus appeler un tel cycle "ditherme"** car lors de l'évolution de sa température le système est alors forcément en contact furtif avec une infinité de thermostats (ou four) et non plus 2 seulement. On peut cependant assimiler un cycle quelconque à un cycle "ditherme" en considérant comme source chaude un thermostat (fictif) de température égale à la température maximale T_2 de contact du système avec l'extérieur (ce qui exclut la température maximale obtenue par compression adiabatique où il n'y a pas contact avec l'extérieur), et comme source froide un thermostat de température égale à la température minimale T_1 de contact. On aura alors $\eta = \eta_{\max} = 1 - T_1/T_2$ mais dans un tel cas on ne peut plus dire que le cycle est à la fois ditherme et réversible : il est soit réversible (rendement maximum) , soit ditherme (2 thermostats uniquement).

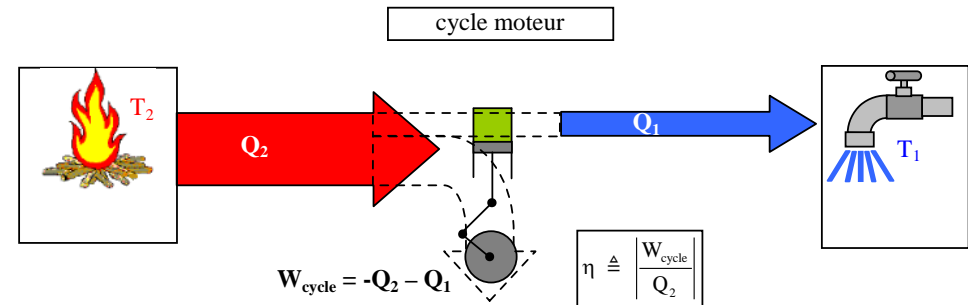
Dans le cas général comme les isothermes sont infiniment lentes à se réaliser³, le cycle de Carnot développe une puissance mécanique nulle. On est alors amené à accélérer le processus en n'attendant pas que la source et le système soient à la même température, aux prix de la perte de réversibilité, donc de rendement.

¹ gaz parfaits purs (c'est-à-dire absence de mélange qui font intervenir la diffusion ou les réactions chimiques).

² Le foyer d'une chaudière, l'eau et l'atmosphère peuvent être considérés comme des sources de chaleur, contrairement à la combustion d'un mélange carburant-comburant. Si l'extérieur est un four où l'on contrôle la montée en température, la transformation peut être réversible, cependant le four n'est alors pas considéré comme une source de chaleur.

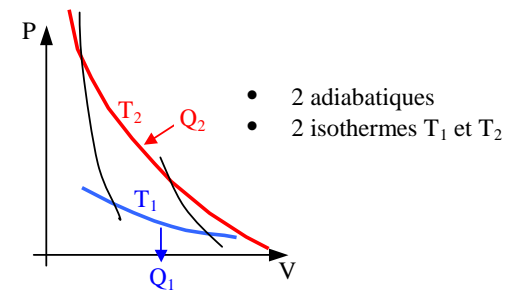
³ Le cycle de Stirling est modélisé par 2 isothermes...en réalité ce n'est qu'une approximation.

2.



2.1.

cycle moteur de Carnot = meilleur cycle moteur **réversible ditherme** possible.



$$\left. \begin{array}{l} 1^{\text{er}} \text{ principe et cycle quelconque} \Rightarrow W = -Q_2 - Q_1 \\ 2^{\text{nd}} \text{ principe et cycle ditherme réversible} \Rightarrow \frac{Q_2}{T_2} = -\frac{Q_1}{T_1} \end{array} \right\} \eta = \eta_{\max} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

on a bien évidemment $0 \leq \eta < 1$

Un rendement de 100% est donc impossible avec un moteur thermique, même avec le moteur idéal de Carnot.

Dans ce dernier cas on aura obligatoirement $\eta < 1 - T_1/T_2$. Il existe d'autres types de cycle qui sont parfois qualifiés de réversibles...mais qui ne sont alors plus dithermes : (liste non exhaustive)

2 adiabatiques et 2 isochores : cycle de Beau de Rochas (essence)

2 isothermes et 2 isochores : cycle de Stirling (souvent avec de l'hydrogène).

2 adiabatiques, 1 isochore, 1 isobare : cycle Diesel.

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 (isothermes difficiles à assurer, pressions élevées). 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).

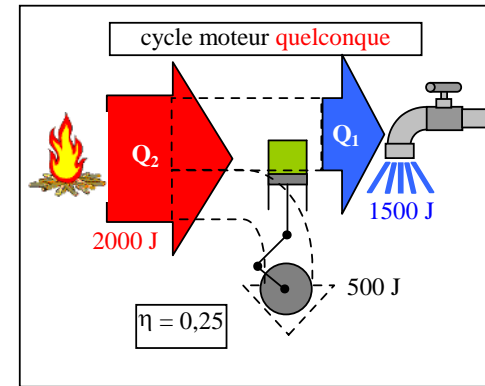
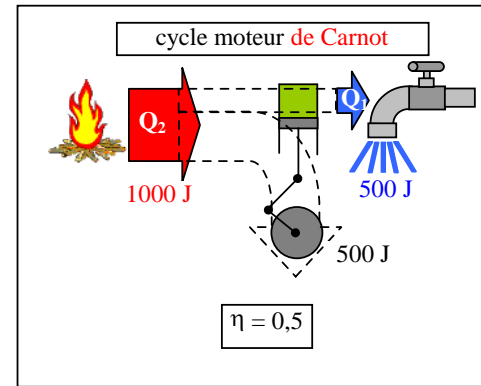
Le cycle de l'air du moteur vu ici est constitué de 4 temps : un "temps" correspondant à une course totale du piston et non à un type de transformation sur le diagramme P(V). Le fluide utilisé est un mélange air - essence (⁴).

- L'**admission** et la **compression** sont possibles car le moteur a été préalablement lancé (au moyen d'un moteur électrique) et un volant d'inertie permet d'emmagasiner l'énergie cinétique du lancement pour permettre l'aspiration de l'air. Par la suite, la présence de 3 autres cylindres, chacun fonctionnant sur un temps différent, permet une rotation plus régulière du moteur ainsi qu'un travail fourni 4 fois plus élevé. La compression est nécessaire pour permettre l'explosion du mélange à l'aide des bougies.
- La **détente** est possible car elle correspond à la surpression due à l'explosion du mélange air-essence qui provoque une chaleur intense et très rapide.
- L'**échappement** est possible car le moteur a été lancé par la phase de détente, et est donc entraîné par l'inertie et la présence des 3 autres cylindres.

Seule la phase de détente correspond en fait à l'apport de travail à l'extérieur. Les soupapes sont commandées par un arbre à cames⁵ solidaires de la rotation de l'arbre moteur.

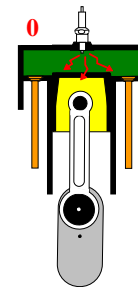
⁴ assimilable à de l'air pur car le volume d'essence est négligeable.

⁵ Il s'agit tout simplement d'un axe métallique sur lequel on a fixé des galets ovales qui viennent frotter périodiquement sur un dispositif d'ouverture-fermeture.

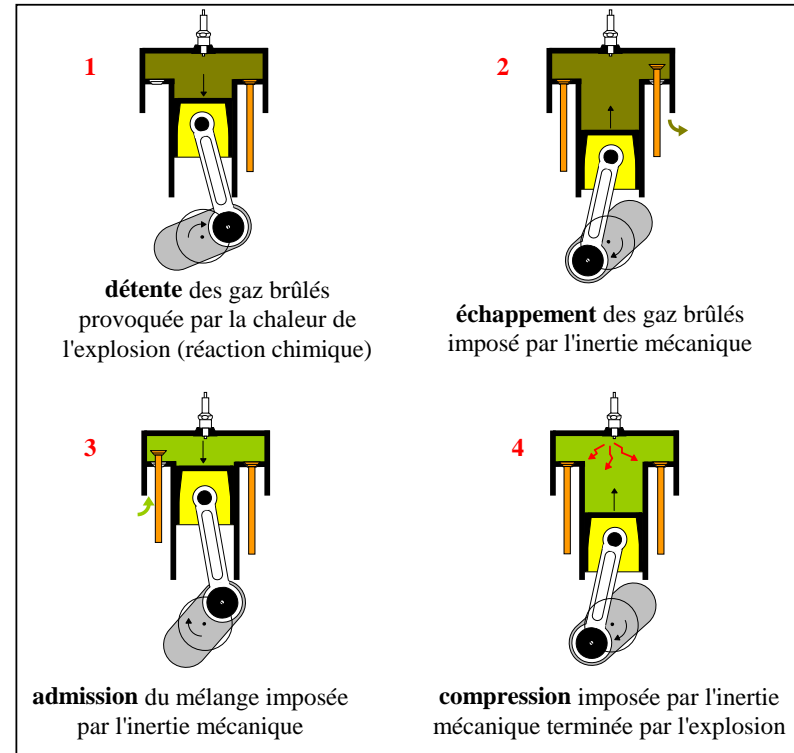


2.2

Moteur essence à 4 trajets verticaux (4 "temps") par cycle.



départ du cycle : explosion lorsque le piston est au point mort haut : mélange explosif comprimé à la main (manivelle) ou à l'aide d'un moteur électrique série (lanceur).



admission du mélange imposée par l'inertie mécanique

compression imposée par l'inertie mécanique terminée par l'explosion

On peut alors observer le cycle dans le plan P(V) : voir ½ page de droite :

- Le fait que l'explosion 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 où l'explosion est provoquée par l'injection progressive et contrôlée du gasoil dans l'air).
- La compression et la détente sont adiabatiques du fait de la rapidité de la course du piston (⁶).
- Lors de l'ouverture de la soupape d'échappement, la pression est égale à la pression extérieure (pas de viscosité d'un gaz parfait).
- Pour finir le cycle est considéré comme quasi - statique (⁷).

Comme deux transformations sur les 4 sont adiabatiques, l'échange de chaleur s'effectuera uniquement sur les trajets 2-3 (Q₂) et 4-1 (Q₁). Les températures extrêmes sont T₃ (≈ 800 °C) et T₁ (≈ 20°C) : on peut donc assimiler ce cycle à un cycle ditherme s'effectuant entre les températures T₁ et T₃. Comme on n'a pas un cycle de Carnot on aura bien évidemment

Q₂/T₃ + Q₁/T₁ ≤ 0 et donc η < 1 - T₁/T₃ ≈ 72% , on trouve (voir exercice 1) $\eta = 1 - \frac{1}{\tau^{\gamma-1}}$ ≈

51 % avec τ le taux de compression volumétrique (600 mL / 100mL = 6 ici)

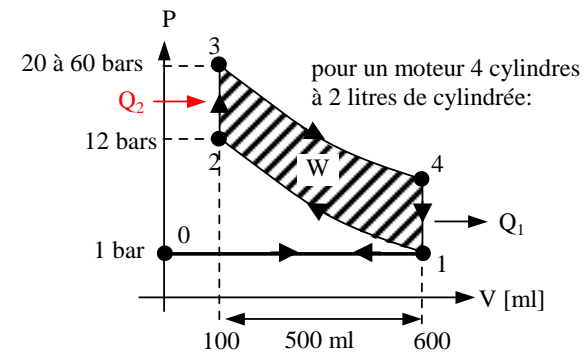
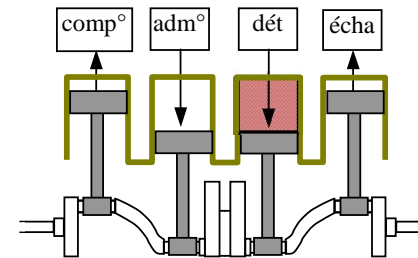
Remarquer que la source chaude extérieure est créée par la réaction chimique de combustion (explosion) et qu'elle se trouve...à l'intérieur du système (la dénomination *intérieur* / *extérieur* n'est pas vraiment adéquate !).

L'isochore 2-3 peut être considérée comme (quasi) réversible car la source chaude est à la même température que le mélange air-essence (par construction de la combustion *interne*), en revanche l'isochore 4-1 ne peut pas être considérée comme réversible car la température du mélange évolue alors que celle de l'atmosphère reste constante : il n'y a plus d'équilibre thermique. Le cycle ne peut donc pas être considéré comme réversible en toute rigueur. Cependant, parfois, on fait comme si l'atmosphère évoluait à la même température que l'isochore (hic...) et on qualifie alors le cycle de *réversible*...cela permet en fait seulement d'évaluer rapidement le rendement max théorique que l'on peut en tirer.

⁶ 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.

⁷ Cela se justifie par le fait que la vitesse des molécules d'air est de l'ordre de 700 m/s à 600K (≈T₂), or la course du 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.

Rotation régulière et multiplication du travail avec 3 autres cylindres qui travaillent chacun sur un trajet (temps) différent. C'est la détente d'un piston qui entraîne les 3 autres pistons :



- 0 → 1 : admission du mélange air-essence sous 20°C
- 1 → 2 : compression adiabatique (course des pistons très rapide : 6m/s à 3000 tr/min) à 330 °C – 12 bars
- 2 → 3 : explosion très rapide (⇒ compression isochore) de 800 °C à 4000 °C
- 3 → 4 : détente adiabatique avec production de travail.
- 4 → 1 : baisse de pression lors de l'ouverture de la soupape d'échappement.
- 1 → 0 : échappement.

⇒ moteur 4 temps essence réalisé avec :

- 2 adiabatiques.
- 2 isochores

Exercice 1

En pratique, le cycle réel du moteur à explosion à essence est donné 1/2 page de droite
Ce qui signifie que :

1/ l'admission crée une dépression (mélange visqueux)

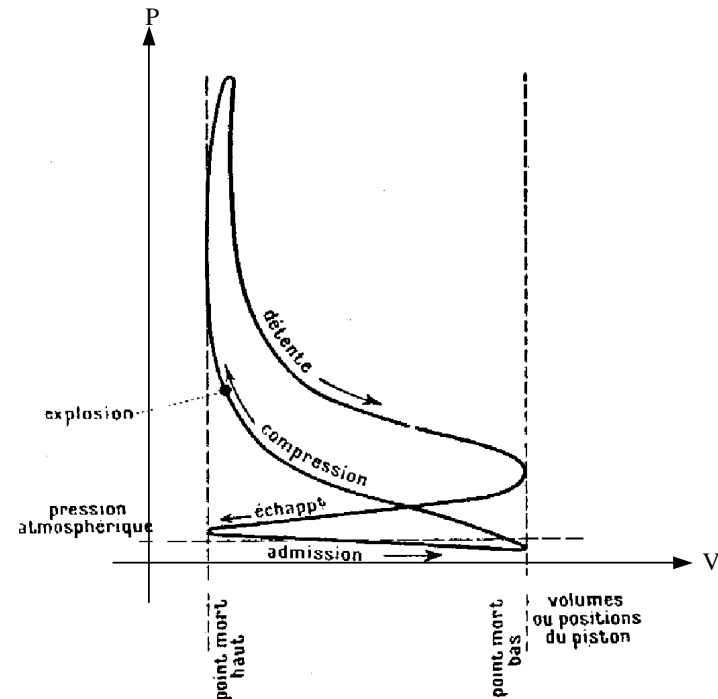
2/ on provoque l'explosion légèrement avant que le piston n'ait atteint le point mort haut de manière à prendre en compte la durée de l'étincelle et la durée de combustion : c'est l'avance à l'allumage.

3/ La boucle inférieure est décrite dans le sens trigo : cela signifie que le travail fourni est encore plus faible que prévu : le rendement réel sera encore affaibli (25% à 40% en réalité)

L'exercice 1 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 secs et métalliques à l'intérieur du cylindre : pour $\tau \approx 12$ on aurait la pression qui monterait jusqu'à 100 bars : le moteur ne résisterait pas à un tel à-coup). Il est de l'ordre de 6 à 9 pour les moteurs à essence. L'indice d'octane permet de limiter le phénomène de détonation, donc permet d'augmenter τ , c'est-à-dire le rendement 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. On peut donc encore augmenter τ , c'est-à-dire le rendement. 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

On notera que lors de l'utilisation du frein moteur (vitesse enclenchée en descente) la puissance de freinage est directement liée à l'aire de la partie inférieure de la boucle balayée pendant 1 cycle moteur ⁽⁸⁾. Comme cette aire nuit au rendement énergétique du moteur, les constructeurs font en sorte de la réduire au minimum : le frein moteur des voitures modernes est donc moins puissant que le frein moteur des anciennes voitures.

Cycle réel :



⇒ rendement de 35% au maximum.

⁸ Outre ce qui est dissipé en frottements et résistance au roulement.

3. Les machines frigorifiques.

3.1. Réfrigérateurs (ou climatiseurs).

Ils pompent de la chaleur d'un corps (qui se refroidit) et la transmettent à un autre corps (qui s'échauffe) grâce à un compresseur et à un détendeur qui permettent cette opération.

1^{er} principe sur un cycle quelconque $\Rightarrow W = -Q_1 - Q_2$

2nd principe sur un cycle réversible ditherme : $Q_1/T_1 + Q_2/T_2 = 0 \Rightarrow Q_1$ et Q_2 sont de signe opposé et $|Q_2| = T_2/T_1 \cdot Q_1 > Q_1$ car $T_2 > T_1$ par définition.

Or on veut Q_1 absorbé, c'est-à-dire $Q_1 > 0 \Rightarrow$ on aura forcément $Q_2 < 0$ (2nd principe), c'est-à-dire Q_2 rejeté plus important que Q_1 absorbé et donc $W = -Q_1 - Q_2 > 0$: ce cycle nécessite de l'énergie motrice et ne peut donc être parcouru que dans le sens trigonométrique (absorption de travail).

Quel est le rendement de l'installation ? Il s'agit de $\eta = \frac{\text{ce qu'on veut}}{\text{ce qu'on dépense pour l'obtenir}}$

$= \frac{Q_1}{W_{\text{cycle}}}$. Comme ce n'est pas vraiment un calcul de rendement dont il s'agit (car on ne

prend en compte que l'énergie W que l'on doit fournir mécaniquement à la pompe et non celle qui est évacuée) on appelle plutôt "efficacité e " le rapport $|Q_1/W_{\text{cycle}}|$.

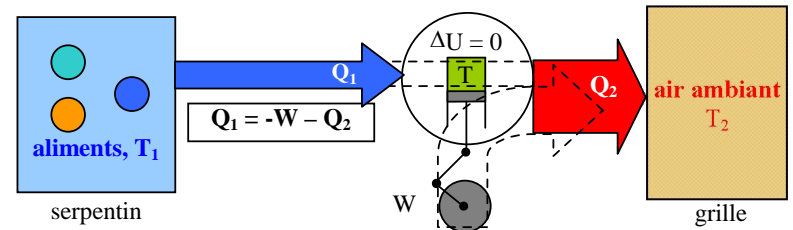
L'absorption du froid est plus importante si on y a ajouté une absorption de chaleur latente de changement de phase. En pratique on va provoquer dans un serpentin la vaporisation (= ébullition) d'un liquide (transition liquide \rightarrow vapeur) à température ambiante⁹ (température initiale de l'intérieur du frigo) en créant une dépression du fluide (détente forcée à l'aide du compresseur par l'aspiration du fluide à travers un tube poreux). Cette chaleur latente de vaporisation doit être aussi élevée que possible (pour une masse donnée de fluide frigorigène) afin d'accélérer le processus (différents fluides sont utilisés : CFC, fréon...). Afin d'assurer, pour chaque cycle, un phénomène de vaporisation, il faut bien passer par une liquéfaction à un moment donné du cycle : cela est réalisé en comprimant suffisamment le fluide sous température ambiante (extérieur du frigo). Lorsque la température froide est suffisante, un bilame arrête le moteur du compresseur.

Dans tous les exercices abordés en BTS, le cycle de refroidissement sera lancé depuis longtemps de sorte que c'est le régime permanent qui sera étudié : T_{froide} et T_{chaude} seront déjà établies depuis longtemps.

⁹ Le fluide utilisé doit donc pouvoir se liquéfier ou se vaporiser de la température ambiante à la température froide minimale sous pression réduite...ce qui limite l'emploi des frigo à CO₂ pour laquelle la transition de phase ne s'opère plus au delà de 31 °C.

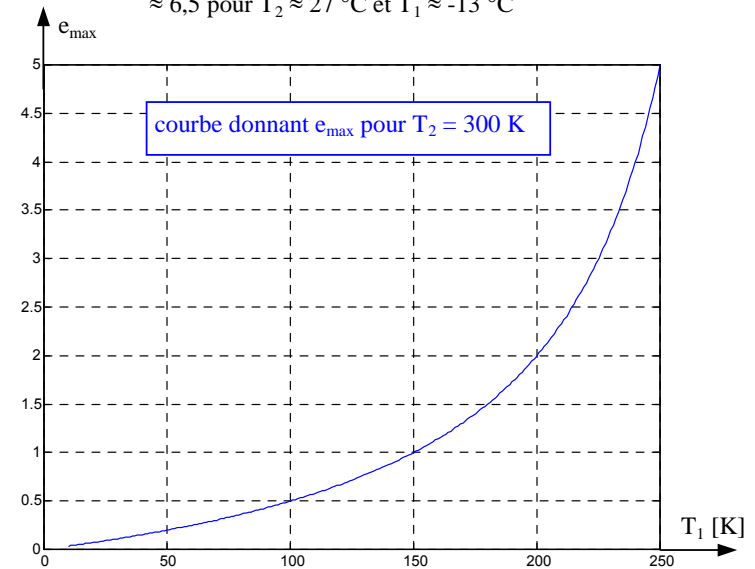
3.1.

cycle (résistant) de réfrigération :



L'efficacité est définie par : $e \triangleq \frac{|Q_1|}{|W|}$

Cycle ditherme réversible (Carnot) : $e = e_{\text{max}} = \frac{T_1}{T_2 - T_1}$ peut varier de 0 à l'infini.
 $\approx 6,5$ pour $T_2 \approx 27$ °C et $T_1 \approx -13$ °C



Le réfrigérateur est d'autant plus efficace que T_1 est proche de T_2 ...ce qui n'est pas l'objectif d'un frigo !

3.2. Pompes à chaleur.

Le principe est simple : absorber de l'énergie thermique (chaleur) de l'extérieur de la maison pour la rejeter à l'intérieur de la maison (d'où son nom). Il s'agit donc simplement d'un réfrigérateur ouvert sur l'extérieur et dont la grille arrière est placée dans notre appartement. La pompe à chaleur absorbe donc la chaleur Q_1 de l'extérieur et c'est la grille chaude du réfrigérateur qui chauffe la pièce ⁽¹⁰⁾. Dans ce cas c'est la chaleur Q_2 restituée à l'air ambiant qui nous intéresse, et l'efficacité est donc définie par :

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

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

$$e_{\max} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

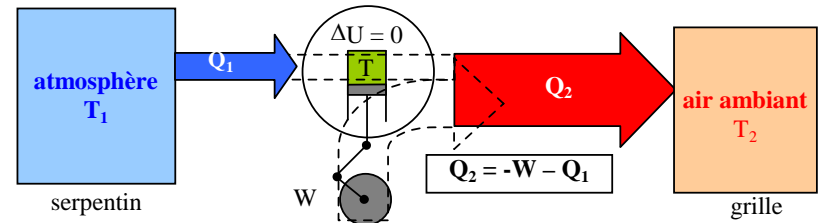
$e \approx 6,5$ signifie qu'il est 6,5 fois plus avantageux d'utiliser l'électricité pour alimenter le compresseur de la pompe à chaleur que d'utiliser l'électricité directement pour faire chauffer un radiateur électrique (rendement de 1) !!!

Cependant, comme $T_2 = T_1 + \Delta T$, on en déduit qu'une pompe à chaleur est d'autant plus efficace que T_1 (température extérieure) est élevée et T_2 proche de T_1 , c'est-à-dire quand elle ne sert à rien...

BON A SAVOIR : (bibliographie : article "Pompes à chaleur" de la revue "Que choisir" n° 436 - avril 2006)
Dans le bâtiment on appelle **COP** l'efficacité définie plus haut : c'est le **CO**efficient de **P**erformance. Lors d'une installation de pompe à chaleur pour le chauffage domestique le COP doit être ≥ 3 pour avoir droit à une aide des pouvoirs publics ("crédit d'impôts" de 50 % en 2006). Les fabricants de pompe à chaleur annoncent donc des COP souvent ≥ 3 . Mais le COP dépend de la température extérieure et de la température intérieure... donc **pour quelles températures est-il calculé ?** Je n'ai pas d'info^o sur la température intérieure de la maison mais en revanche la température extérieure utilisée pour le calcul est de...7° C : pas franchement hivernal comme température !!! En effet, plus la température extérieure est élevée (donc proche de la température intérieure) et plus le COP est élevé...les fabricants ont donc tout intérêt à prendre comme température extérieure de référence une température élevée ! Finalement la pompe doit prendre la chaleur à un endroit qui refroidit peu en hiver (prise dans le sol : pompe géothermique mais non les pompes à air), en outre il faut se souvenir que le COP annoncé par les fabricants est un COP théorique de laboratoire : le COP réel d'une pompe à chaleur à air sera donc largement plus petit que celui annoncé (conditions différentes, équipements électriques auxiliaires indispensables non pris en compte...ce qui peut rendre absurde un tel investissement. l'*UFC Que choisir* recommande de prendre un COP ≥ 4 pour obtenir un COP réel de 3 en pratique, ainsi que faire appel à un installateur qualifié (ils ne sont pas nombreux) pour que le COP réel soit aussi élevé que possible (qui dépend également de la mise en place de l'installation).

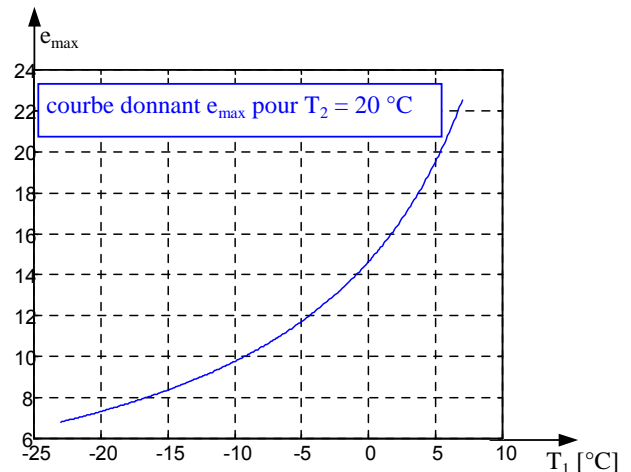
¹⁰ Bien évidemment, les pompes à chaleur diffèrent des réfrigérateurs non pas au niveau du principe mais au niveau des puissances mises en jeu, diamètre des tuyaux etc.

3.2.



C'est Q_2 qui nous intéresse \Rightarrow on définit l'efficacité par $e \triangleq \left| \frac{Q_2}{W} \right|$

Pour un cycle réversible ditherme on a $e = e_{\max} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$
 ≈ 23 pour pour $T_2 \approx 20^\circ\text{C}$ (293 K) et $T_1 \approx 7^\circ\text{C}$ (280K)



efficacité théorique max très élevée (≈ 23 pour $T_1 = 7^\circ\text{C}$), à comparer avec une efficacité réelle de 3 environ pour une température extérieure T_1 de 7°C (280 K) !!!

Exercices récapitulatifs du cours de thermodynamique .

Exercice 1.

Calculez le rendement $\eta \triangleq |W/Q_2|$ du cycle de Beau de Rochas composé de 2 isochores et de 2 isothermes, 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 $T.V^{\gamma-1} = C^{te}$.

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

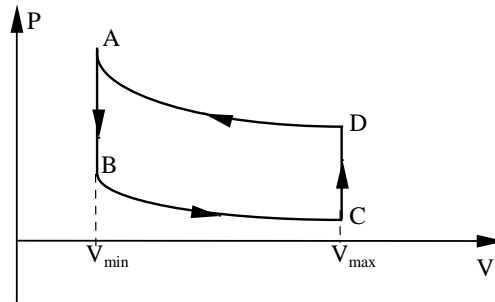
à partir d'ici il s'agit d'annales, voir les corrigés dans le fichier "correction des exercices du cours n°7"

Exercice 2 : 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 $\frac{V_{max}}{V_{min}} \equiv 3,0$
- constante du gaz parfait $R = 8,32 J.mol^{-1} . K^{-1}$
- $C_v = 21 J.mol^{-1} . K^{-1}$

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.

Exercice 3 : 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 .

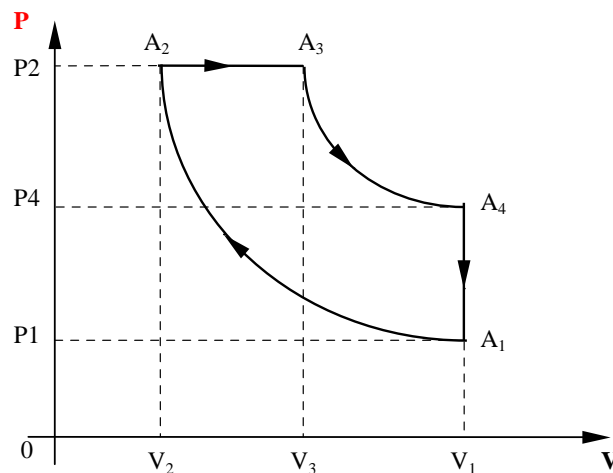
3 - Calculer la pression P_4 et la température T_4 en fin de détente.

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.

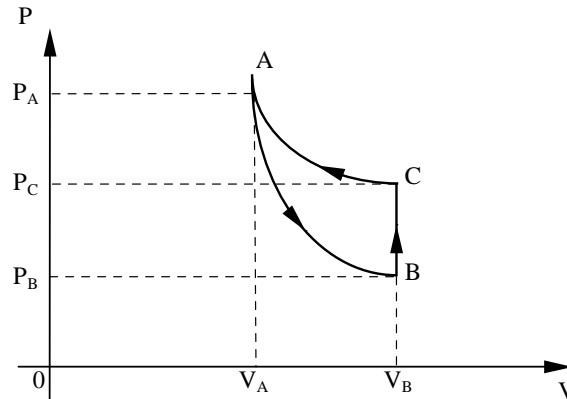
Pour un gaz parfait subissant une transformation adiabatique réversible d'un état $A (P_A, V_A, T_A)$ à un état $B (P_B, V_B, T_B)$, on peut écrire :

$$\begin{aligned} P_A V_A^\gamma &= P_B V_B^\gamma \\ T_A V_A^{\gamma-1} &= T_B V_B^{\gamma-1} \end{aligned}$$

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

Exercice 4. 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 :

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

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

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

Exercice 5 : 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 : $R = 8,32 \text{ J.mol}^{-1} . \text{K}^{-1}$

* 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 6 : 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 $R = 8,32 \text{ J.K}^{-1} . \text{mol}^{-1}$, de capacité thermique molaire à pression constante $C_p = 29,1 \text{ J.K}^{-1} . \text{mol}^{-1}$. 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 :

$$\begin{aligned} P_A V_A^\gamma &= P_B V_B^\gamma \\ T_A V_A^{\gamma-1} &= T_B V_B^{\gamma-1} \end{aligned}$$

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

DOCUMENT - REPONSE

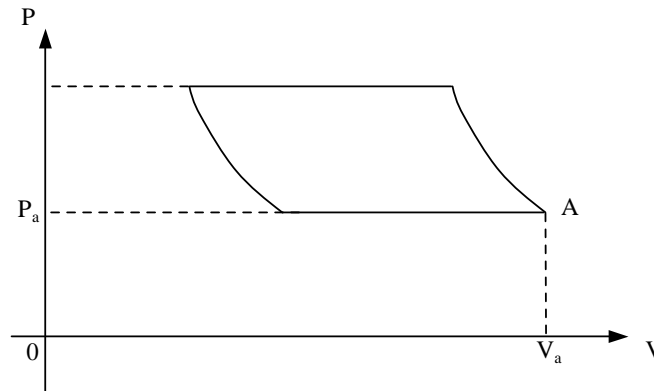
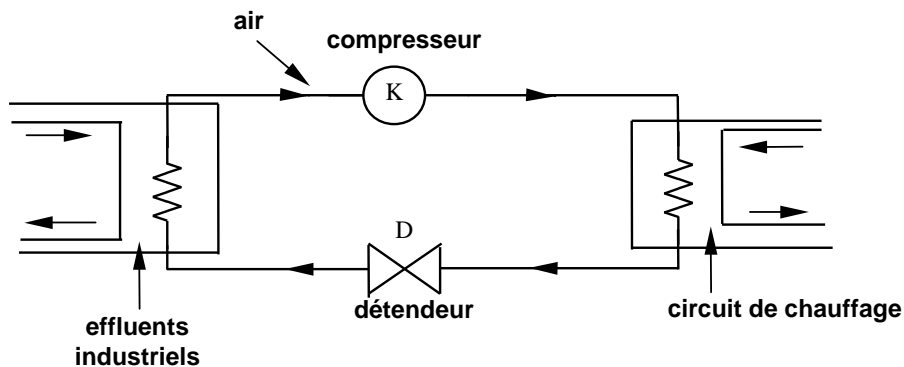


figure a

Exercice 7 : 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 serpents 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 : $R = 8,32 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

capacité thermique massique de l'air à pression constante : $c_p = 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

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 8 : 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.

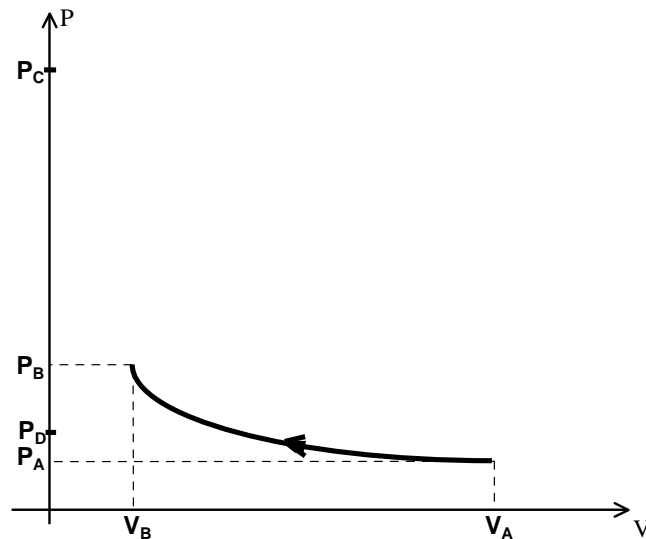
DONNEES : Voir document-réponse.

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 :	
$P_A = 10^5 \text{ Pa}$	$P_C = 62. 10^5 \text{ Pa}$
$T_A = 300 \text{ K}$	$T_C = 2,65. 10^3 \text{ K}$
	$P_D = 4,08. 10^5 \text{ Pa}$
	$T_D = 1,21. 10^3 \text{ K}$

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

Exercice 9 : BTS Maintenance 1997, Nouméa.

Une entreprise doit installer un dispositif de chauffage de l'eau de distribution de la ville. Captée à la température $\theta_1 = 15^\circ\text{C}$, 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 : $c = 4\ 190 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

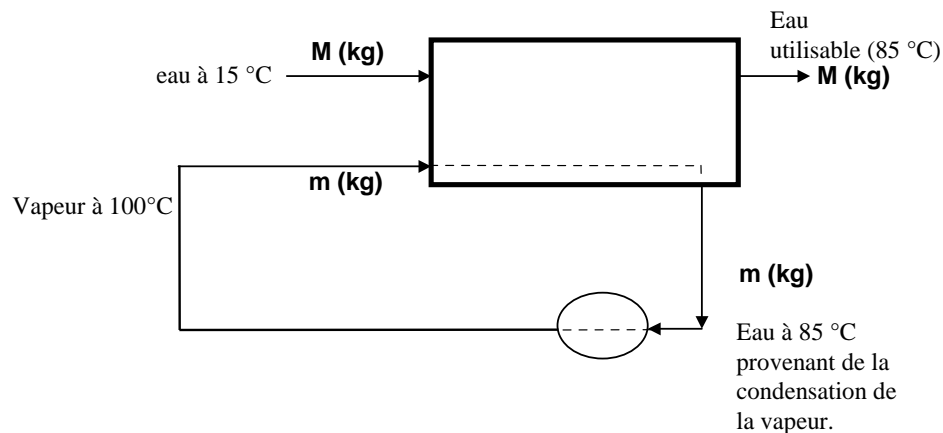
Le dispositif de chauffage (voir figure 1 de l'annexe) comporte une chaudière qui produit par heure une masse m de vapeur d'eau à 100°C . Cette vapeur pénètre avec l'eau à réchauffer dans un échangeur supposé parfaitement calorifugé.

- 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 :
- $$1 \text{ mole d'ions } M^{2+} \text{ par litre} = 2 \text{ équivalents par litre}$$
- $$10^{-3} \text{ équivalents par litre} = 5^\circ\text{F}$$
- b) Quel est l'inconvénient que crée une eau trop dure qui circule dans une conduite ?

ANNEXE

Figure 1



Exercice 10 : 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, $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1,4$. On donne en outre : $C_v = 20,8 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

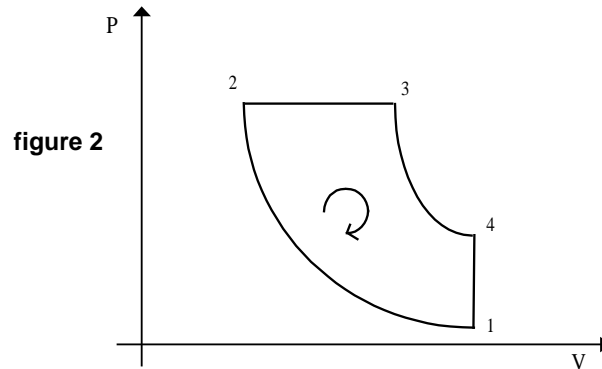
1) Montrer que $T_2 = 862 \text{ K}$. On rappelle que pour une transformation adiabatique :

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

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

- 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 :
- sur le trajet 1-2.
 - sur le trajet 2-3.
 - sur le trajet 3-4.
 - sur le trajet 4-1.

- 4) Quelle est la variation de l'énergie interne de l'air qui décrit un cycle ?
Énoncer 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.



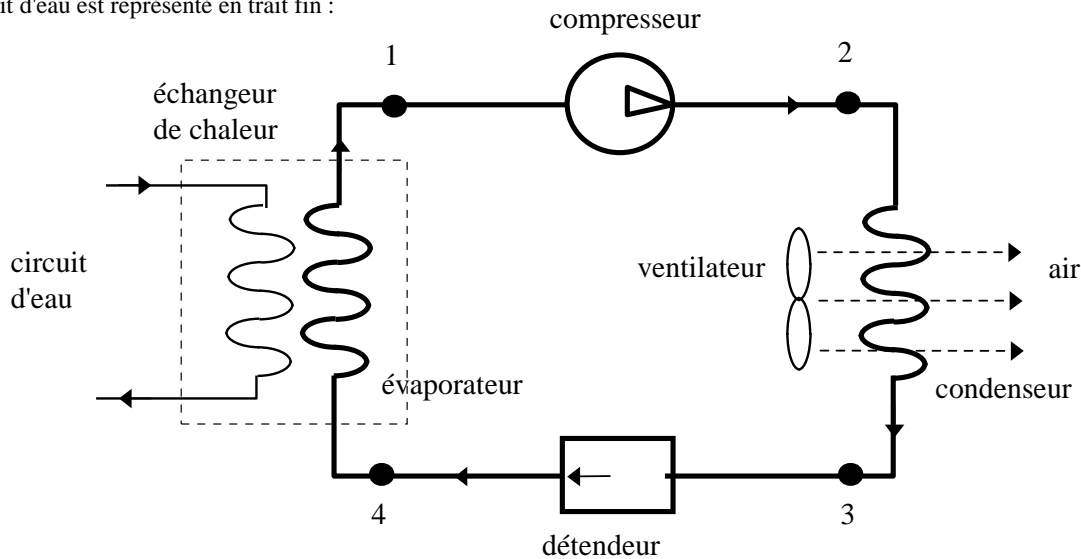
Exercice 11 : BTS Maintenance 1998, Métropole.

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 :

$$P_1 \cdot V_1^\gamma = P_2 \cdot V_2^\gamma$$

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 12 : 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 $\Delta t = 9,0 \text{ min}$.

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

