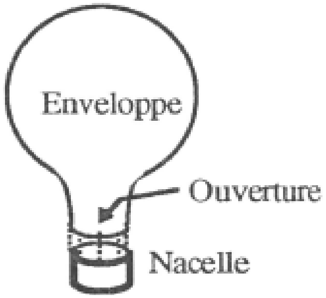
Respiration thermique d'un bâtiment.

Un bâtiment public, d'un volume de 10 000 m³, est chauffé par des radiateurs soufflants commandés par un thermostat. Le chauffage est mis en route lorsque la température atteint 18 °C et coupé dès qu'elle atteint 21 °C. La pression atmosphérique étant de 1 bar,

a) calculer la masse d'air dans le bâtiment à 18°C.
b) calculer la masse d'air dans le bâtiment à 21°C.
c) calculer la masse d'air qui est expulsée en phase de chauffage (et qui doit rentrer dans le bâtiment en phase de refroidissement).

Montgolfière

Une montgolfière est munie d'un brûleur à propane qui permet de choisir, à volonté, la force ascensionnelle. Les déplacements latéraux sont obtenus en recherchant l'altitude offrant un courant d'air atmosphérique dans la direction souhaitée. La montgolfière est constituée d'une enveloppe rigide en matière plastique (non élastique) d'un volume de 2500 m³, ouverte à l'air libre à son extrémité inférieure. On peut chauffer l'air contenu dans l'enveloppe, par combustion de propane. La masse totale de l'enveloppe et de la nacelle est de 600 kg.



En un lieu où la température de l'atmosphère est de 17°C et la pression de 960 mbar,

a) déterminer à l'aide d'un bilan des forces $F_{g\ air\ chaud}$, $F_{g\ enveloppe+nacelle}$ et $F_{poussée\ d'Archimedes}$ appliquées sur la montgolfière la force $F_{g\ air\ chaud}$ dans le cas où la montgolfière est stable dans l'air (La norme de $F_{poussée\ d'Archimedes}$ peut être déterminée par la force de gravité de la masse d'air froid déplacé par l'enveloppe).
b) Quelle doit être la température de l'air dans l'enveloppe pour assurer la stabilité de l'engin ?

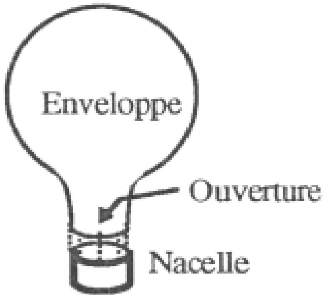
Respiration thermique d'un bâtiment.

Un bâtiment public, d'un volume de 10 000 m^3, est chauffé par des radiateurs soufflants commandés par un thermostat. Le chauffage est mis en route lorsque la température atteint 18 °C et coupé dès qu'elle atteint 21 °C. La pression atmosphérique étant de 1 bar,

a) calculer la masse d'air dans le bâtiment à 18°C. (Réponse : 11 973 kg)
b) calculer la masse d'air dans le bâtiment à 21°C. (Réponse : 11 851 kg)
c) calculer la masse d'air qui est expulsée en phase de chauffage (et qui doit rentrer dans le bâtiment en phase de refroidissement). (Réponse : 122 kg)

Montgolfière

Une montgolfière est munie d'un brûleur à propane qui permet de choisir, à volonté, la force ascensionnelle. Les déplacements latéraux sont obtenus en recherchant l'altitude offrant un courant d'air atmosphérique dans la direction souhaitée. La montgolfière est constituée d'une enveloppe rigide en matière plastique (non élastique) d'un volume de 2500 m^3, ouverte à l'air libre à son extrémité inférieure. On peut chauffer l'air contenu dans l'enveloppe, par combustion de propane. La masse totale de l'enveloppe et de la nacelle est de 600 kg.

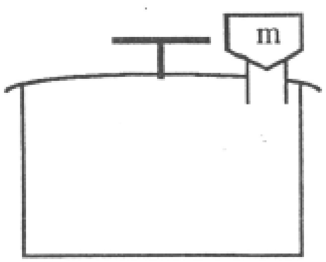


En un lieu où la température de l'atmosphère est de 17°C et la pression de 960 mbar,

a) déterminer à l'aide d'un bilan des forces $F_{g\ air\ chaud}$, $F_{g\ enveloppe+nacelle}$ et $F_{poussée\ d'Archimedes}$ appliquées sur la montgolfière la force $F_{g\ air\ chaud}$ dans le cas où la montgolfière est stable dans l'air (La norme de $F_{poussée\ d'Archimedes}$ peut être déterminée par la force de gravité de la masse d'air froid déplacé par l'enveloppe). (Réponse : 22 401,9 N)
b) Quelle doit être la température de l'air dans l'enveloppe pour assurer la stabilité de l'engin ? (Réponse : 93 °C)

Marmite de cuisson sous pression

Un récipient de cuisson de volume V, fermant hermétiquement, dont le couvercle est muni d'un trou d'échappement (de rayon interne r) sur lequel est simplement posée une masse m (la soupape) de rayon R.



On ferme la marmite à 27°C, sans mettre d'eau. On place la masse m.

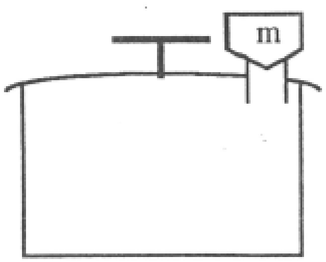
a) A l'aide d'un bilan des forces sur la masse m déterminer la force F_p (appliquée à la surface inférieure de la masse au niveau du trou d'échappement) nécessaire pour lever la masse m.

b) A quelle pression dans la marmite correspond la force F_p calculée en a) ?

c) A quelle température l'air commencera-t-il à s'échapper de la marmite ?

A.N.: r = 1 mm ; m = 30 g ; V = 8,5 litres ; P_{atm} = 1bar.

<u>Marmite de cuisson sous pression</u>



Un récipient de cuisson de volume V, fermant hermétiquement, dont le couvercle est muni d'un trou d'échappement (de rayon interne r) sur lequel est simplement posée une masse m (la soupape) de rayon R.

On ferme la marmite à 27°C, sans mettre d'eau. On place la masse m.

a) A l'aide d'un bilan des forces sur la masse m déterminer la force F_p (appliquée à la surface inférieure de la masse au niveau du trou d'échappement) nécessaire pour lever la masse m. (Réponse : 0,608 N).

b) A quelle pression dans la marmite correspond la force F_p calculée en a) ? (Réponse : 193 679 Pa)

c) A quelle température l'air commencera-t-il à s'échapper de la marmite ? (Réponse : 309 °C)

A.N.: r = 1 mm ; m = 30 g ; V = 8,5 litres ; P_{atm} = 1bar.

Vitesse et débit de gaz dans une tuyauterie

Une soufflante de haut fourneau assure un débit de 92 000 m^3/heure d'air à 40°C, sous la pression de 1,1 bar, dans une tuyauterie de 1,2 m de diamètre. Après passage dans le récupérateur de chaleur, l'air pénètre dans le haut fourneau sous la pression de 1,07 bar et à la température de 800°C par des conduits de 170 cm de diamètre. Calculer la vitesse $\dot{x}_1$ de l'air à la sortie de la soufflante, et la vitesse $\dot{x}_2$ à la sortie du récupérateur de chaleur.

$$\text{Vitesse } \dot{x}\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right] = \frac{\text{Débitvolume } \dot{V}\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]}{\text{Section S }[\text{m}^2]}$$

Circulation de gaz.

Un débit de 12 kg d'air par minute doit être assuré en permanence dans une installation. Il est prélevé sous la pression de 1 bar dans l'atmosphère à 20°C (section A). Un compresseur permet d'atteindre la pression de 4 bar, tandis que la température atteint 100°C (section B). Par passage dans un four, il est porté à 600°C sous pression constante (section C). L'air est enfin détendu à l'aide d'une turbine d'où il sort à la température de 450°C sous la pression atmosphérique (section D). Les sections des conduits sont calculées de façon que la vitesse du gaz soit constante, égale à 25 m/s.

Calculer les sections en A, B, C, D.

L'air peut-être considéré comme un gaz parfait, avec

$$\text{Débit massique } \dot{m}\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right] = \rho\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right] \times \dot{V}\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]$$

Vitesse et débit de gaz dans une tuyauterie

Une soufflante de haut fourneau assure un débit de 92 000 m^3/heure d'air à 40°C, sous la pression de 1,1 bar, dans une tuyauterie de 1,2 m de diamètre. Après passage dans le récupérateur de chaleur, l'air pénètre dans le haut fourneau sous la pression de 1,07 bar et à la température de 800°C par des conduits de 170 cm de diamètre. Calculer la vitesse $\dot{x}_1$ de l'air à la sortie de la soufflante, et la vitesse $\dot{x}_2$ à la sortie du récupérateur de chaleur.
(Réponses : 22,6 m/s ; 39,7 m/s)

$$\text{Vitesse } \dot{x}\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right] = \frac{\text{Débitvolume } \dot{V}\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]}{\text{Section S }[\text{m}^2]}$$

Circulation de gaz.

Un débit de 12 kg d'air par minute doit être assuré en permanence dans une installation. Il est prélevé sous la pression de 1 bar dans l'atmosphère à 20°C (section A). Un compresseur permet d'atteindre la pression de 4 bar, tandis que la température atteint 100°C (section B). Par passage dans un four, il est porté à 600°C sous pression constante (section C). L'air est enfin détendu à l'aide d'une turbine d'où il sort à la température de 450°C sous la pression atmosphérique (section D). Les sections des conduits sont calculées de façon que la vitesse du gaz soit constante, égale à 25 m/s.
Calculer les sections en A, B, C, D. (Réponse : 67 cm^2, 21 cm^2, 50 cm^2 et 166 cm^2)
L'air peut-être considéré comme un gaz parfait, avec r_i = 287 J·K^{-1}·(kg d'air)$^{-1}$.

$$\text{Débit massique } \dot{m}\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right] = \rho\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right] \times \dot{V}\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]$$

Thermomètre à mercure (DS novembre 2018)

Un thermomètre est constitué d'une capsule de verre relié à un capillaire (un tube très fin). Le volume intérieur de la capsule est de 70 mm^3.

La section intérieure du tube est de 0.01 mm^2. La capsule est remplie de mercure qui, à -30°C, arrive au bas du tube.

Déterminer la hauteur à laquelle le mercure s'élève dans le tube lorsque la température monte jusqu'à 60°C.

1. En supposant que la capsule en verre et le capillaire se dilatent de manière négligeable et en ne prenant en compte que la dilatation du mercure ($\alpha = 1{,}7 \times 10^{-4}$ K^{-1}).

$\mathrm{V_f} = \mathrm{V_i} \times \mathrm{e}^{\alpha(\mathrm{T_f}-\mathrm{T_i})} = 70 \times \mathrm{e}^{1{,}7\times10^{-4}\times90}$ = 71,079 mm^3

Le volume de mercure dans le capillaire est de 1,079 mm^3, ce qui, divisé par la section du tube, représente une élévation d'environ 108 mm (107,9 mm).

2. En prenant en compte la dilatation du mercure *et* de la capsule en verre ($\alpha = 4 \times 10^{-6}$ K^{-1}). On continuera de négliger la dilatation du capillaire.

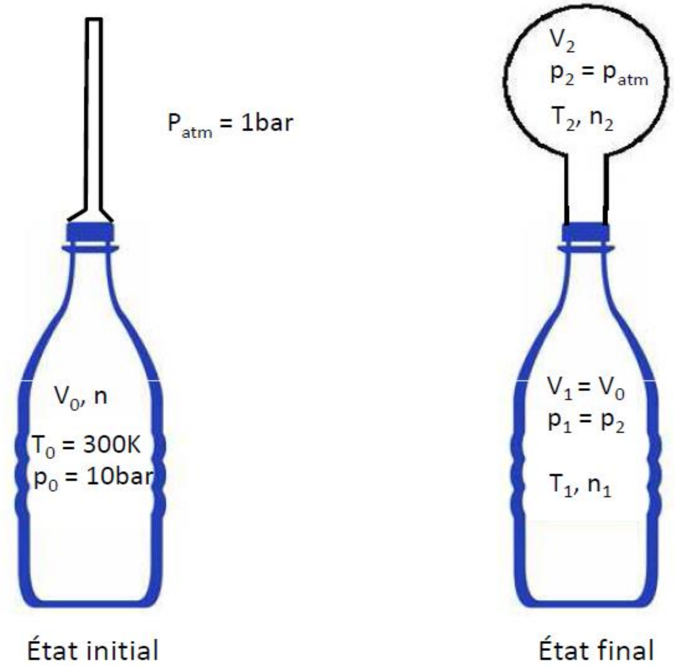
Le mercure se dilate toujours de 1,079 mm^3. Mais dans le même temps, le volume de la capsule passe à :

$V_f = V_i \times e^{\alpha(T_f-T_i)} = 70 \times e^{4\times10^{-6}\times90}$ = 70,025 mm^3.

Du coup, le volume de mercure dans le capillaire c'est plus que de 1,079 – 0,025 = 1,054 mm^3, ce qui représente donc une hauteur de 105,4 mm.

Pour que les résultats soient précis, il faut garder 5 chiffres significatifs dans les calculs de variation de volume.

<u>Détente d'un gaz dans l'atmosphère</u> (DS novembre 2017)



Une bouteille de 3 litres, bien calorifugée (**adiabatique**) contient un gaz parfait (c_V = 21 J/(mol K)), γ = 1,396, sous la pression initiale de 10 bar et à la température de 300 K.
On la relie avec un robinet, à un sac étanche en matière plastique **qui n'échange pas non plus de chaleur avec l'extérieur**. Ce sac initialement vide, flasque, non élastique, déformable sans effort est suffisamment grand pour conserver ses caractéristiques. Ses parois extérieures sont en contact avec l'atmosphère à la pression de 1 bar.
On ouvre un peu le robinet de telle sorte que **la détente subie par le gaz dans la bouteille puisse être considérée comme quasistatique** ; on le referme lorsque l'équilibre des pressions entre la bouteille et le sac est atteint.
On note $n = n_1 + n_2$ le nombre de moles de gaz qui se trouve initialement dans la bouteille. n_1 représente le nombre de moles dans la bouteille à l'état final et n_2 le nombre de moles dans le sac.

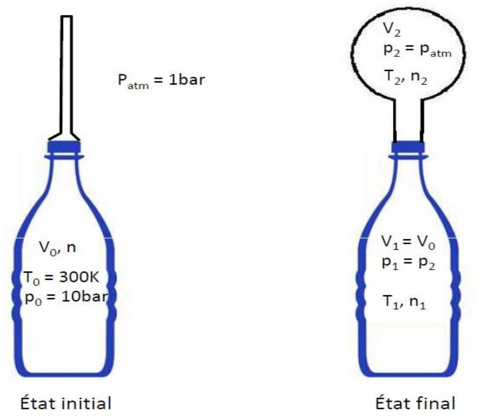
a. Quelle est la température T_1 (en Kelvin) du gaz dans la bouteille à l'état final ?

Détente quasistatique adiabatique → $T_1 = T_0\left(\frac{P_0}{P_1}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = 300\left(\frac{10}{1}\right)^{\frac{1-1{,}396}{1{,}396}} = 156{,}12\ \mathrm{K}$

b. Déterminer l'expression littérale du travail subi par le gaz en fonction (entre-autres) de n_2 et T_2, où T_2 est la température du gaz dans le sac à l'état final.

$$W_{P_{atm}} = \int_{V_{initial}}^{V_{final}} -P_{atm}\,dV = W_{P_{atm}} = \int_{V_0}^{V_0+V_2} -P_{atm}\,dV = -P_{atm}V_2 = -P_2V_2 = -n_2RT_2$$

Détente d'un gaz dans l'atmosphère (DS novembre 2017)



Une bouteille de 3 litres, bien calorifugée (**adiabatique**) contient un gaz parfait (c_V = 21 J/(mol K)), γ = 1,396, sous la pression initiale de 10 bar et à la température de 300 K.
On la relie avec un robinet, à un sac étanche en matière **plastique qui n'échange pas non plus de chaleur avec l'extérieur**. Ce sac initialement vide, flasque, non élastique, déformable sans effort est suffisamment grand pour conserver ses caractéristiques. Ses parois extérieures sont en contact avec l'atmosphère à la pression de 1 bar.
On ouvre un peu le robinet de telle sorte que **la détente subie par le gaz dans la bouteille puisse être considérée comme quasistatique** ; on le referme lorsque l'équilibre des pressions entre la bouteille et le sac est atteint.
On note $n = n_1 + n_2$ le nombre de moles de gaz qui se trouve initialement dans la bouteille. n_1 représente le nombre de moles dans la bouteille à l'état final et n_2 le nombre de moles dans le sac.

a. Quelle est la température T_1 (en Kelvin) du gaz dans la bouteille à l'état final ?

Détente quasistatique adiabatique → $T_1 = T_0\left(\frac{P_0}{P_1}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = 300\left(\frac{10}{1}\right)^{\frac{1-1{,}396}{1{,}396}} = 156{,}12\text{ K}.$

b. Déterminer l'expression littérale du travail subi par le gaz en fonction (entre-autres) de n_2 et T_2, où T_2 est la température du gaz dans le sac à l'état final.

$W_{P_{atm}} = \int_{V_{initial}}^{V_{final}} -P_{atm}dV = W_{P_{atm}} = \int_{V_0}^{V_0+V_2} -P_{atm}dV = -P_{atm}V_2 = -P_2V_2 = -n_2RT_2.$

c. Donner une expression analytique du bilan d'énergie interne du gaz, en fonction (entre-autres) de n_1, n_2, T_1, T_2 et T_0.

$n_1c_v(T_1 - T_0) + n_2c_v(T_2 - T_0) = -n_2RT_2.$

d. Déterminer n à l'état initial, puis n_1 et n_2.

$n = 1{,}203$; $n_1 = 0{,}2311$; $n_2 = 0{,}9717$.

e. En déduire la température T_2 (en Kelvin) à l'aide d'un bilan d'énergie interne.

$T_2 = 239{,}4$ K.

Fusion de la glace (DS novembre 2018)

Quelle est la quantité de chaleur Q à fournir pour transformer 2 kg de glace à -25°C en eau à 50°C ?

Chaleur latente massique de la fusion de la glace : $L_f = 333\ J.g^{-1}$

Capacité thermique massique de la glace : $c_{glace} = 2{,}01\ J.K^{-1}.g^{-1}$

Capacité thermique massique de l'eau liquide : $c_{eau} = 4{,}18\ J.K^{-1}.g^{-1}$

La transformation complète doit être décomposée en 3 sous-transformations.

1. La glace se réchauffe de -25°C à 0°C, ce qui correspond à la quantité de chaleur échangée Q_1 :
   $Q_1 = m \times c_{glace} \times (T_{f,1}-T_{i,1})$.
2. La glace fond, ce qui correspond à la quantité de chaleur échangée Q_2 :
   $Q_2 = m \times L_f$.
3. L'eau (la glace fondue) se réchauffe de 0°C à 50°C, ce qui correspond à la quantité de chaleur échangée Q_3 :
   $Q_3 = m \times c_{eau} \times (T_{f,3}-T_{i,3})$.

On trouve donc une quantité de chaleur totale égale à :

$2000 \times 2{,}01 \times (0-(-25)) + 2000 \times 333 + 2000 \times 4{,}18 \times (50-0) = 1{,}18\ 10^6\ J$

Cet exercice est traité chaque année en CM.

Remplissage isotherme d'un récipient (DS novembre 2018)

Un récipient de 100 litres contient initialement 25 g d'air à $T_b = 300$ K.
$c_V = 713$ J/K/kg ; $r = 287$ J/K/kg ; $\gamma = 1,4$.

On laisse entrer progressivement 50 g d'air supplémentaire en mettant le récipient en contact avec l'atmosphère ($P_a = 1$ bar ; $T_a = 300$ K).
On suppose que la transformation est suffisamment lente pour que l'air dans la bouteille reste à 300 K (la paroi de la bouteille n'est pas adiabatique).

Donner la pression dans la bouteille à la fin de la transformation.
$P_b = mrT_b/V_b = 0,075 \times 287 \times 300/0,1 = 64575$ Pa ou 0,646 bar.

Déterminer la quantité de chaleur (algébrique) échangée avec l'atmosphère.

Système : air dans la bouteille initialement + air qui va entrer dans la bouteille.

Même si la transformation est lente, elle n'est **pas quasistatique** car le système n'est pas homogène → la pression P_b dans la bouteille est différente de la pression atmosphérique.

Il faut écrire l'**équation bilan** de l'**énergie interne** :
$mc_V\Delta T = Q + W = 0$ (la température est la même à l'état initial et à l'état final).

Du coup : $Q = -W = -(-P_a \times (V_2 - V_1))$ avec $V_2 = V_b$ et $V_1 = V_b + m_a r T_a / P_a$. Où m_a représente la masse de l'air dans l'atmosphère à l'état initial, c'est-à-dire 50 g.

On trouve donc : $Q = -W = P_a \times (-m_a r T_a / P_a) = -m_a r T_a = -0,05 \times 287 \times 300 = -4305$ J.

Moteur diesel (DS novembre 2017)

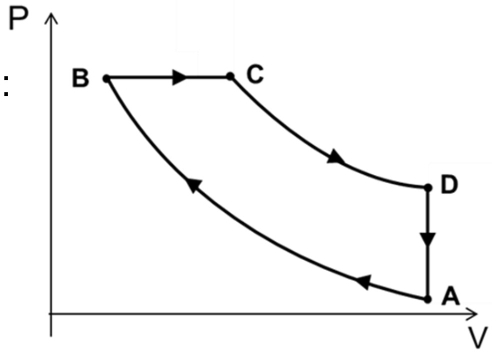
Soit un cycle Diesel idéal dont le rapport volumétrique **a** = $V_{maximal}/V_{minimal}$ est de 15 :

A→B : Compression adiabatique quasistatique

B→C : Echauffement à pression constante pendant lequel on fournit une quantité de chaleur Q_{BC}.

C→D : Détente adiabatique quasistatique jusqu'au volume initial.

D→A : Refroidissement à volume constant jusqu'à la pression initiale.



Au début de la compression, la pression de l'air est de 10^5 Pa, la température de 15°C et le volume massique de 0,826 m^3/kg. On assimilera le fluide cyclé à de l'air dans tout le cycle, avec une capacité thermique massique c_p de 1005 J/(kg K) et une masse molaire M de 29 g/mol.
On donnera les résultats avec une précision d'au moins 3 chiffres.

1. Déterminer le rapport des capacités thermiques γ.

r = 8,314/0,029 = 286,7 J/kg/K → γ = 1005/(1005-286,7) = 1,4.

2. Déterminer la température (en °C), la pression (en bar) et le volume massique au point B.

T_B = 576,1°C et v_B = 0,0551 m^3/kg - P_B = 44,21 bar.

3. Déterminer la température (en °C) au point C : la chaleur massique introduite dans le fluide moteur par cycle est de 1200 kJ/kg.

T_C = 1770°C.

4. Déterminer la pression (en bar) et le volume massique au point C.

v_C = 0,132 m^3/kg - P_C = 44,21 bar.

5. Déterminer la température (en °C), la pression (en bar) et le volume massique au point D.

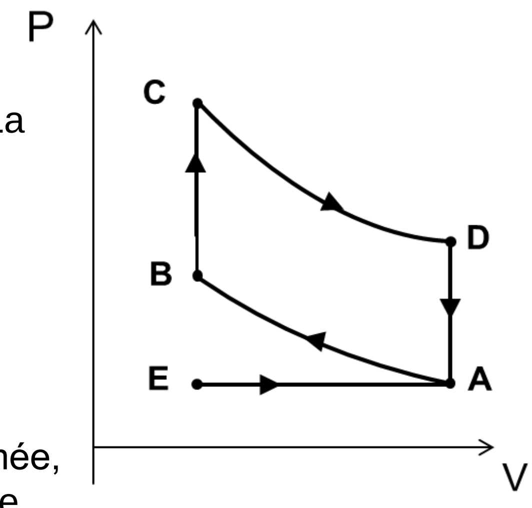
v_D = v_A = 0,826 m^3/kg, P_D = 3,42 bar, T_D = 711,1°C.

6. Déterminer le rendement du cycle.

Q_{DA} = -500 kJ/kg, W_{net} = $-Q_{DA}$ $-Q_{BC}$ = -700 kJ/kg, η = $-W_{net}/Q_{BC}$ = 700/1200 = 0,58.

Moteur à essence (DS novembre 2018)

Un moteur à essence à 6 cylindres et 4 temps avec un rapport volumétrique **a** = $V_{maximal}/V_{minimal}$ de 8 et une cylindrée de 3,6 litres aspire l'air à 20°C et 1 bar. La température maximale atteinte au cours du cycle est de 1500°C. Le rapport des capacités thermiques du gaz dans le moteur est γ = 1,4, sa capacité thermique massique à volume constant c_V = 717 J/(kg K) et sa constante spécifique vaut r_{gaz} = 287 J/(kg K).
1 cycle du moteur à essence 4 temps comporte les étapes suivantes :



E → A : La soupape d'admission étant ouverte et la soupape d'échappement fermée, le piston se déplace du volume minimal au volume maximal en laissant pénétrer le mélange air atmosphérique/carburant.

A→B : Compression adiabatique quasistatique : le piston remonte en comprimant le mélange air atmosphérique/carburant contenu dans le cylindre jusqu'au volume minimal.

B→C : Echauffement à volume constant : par apport instantanée de chaleur la pression augmente brusquement, à volume constant.

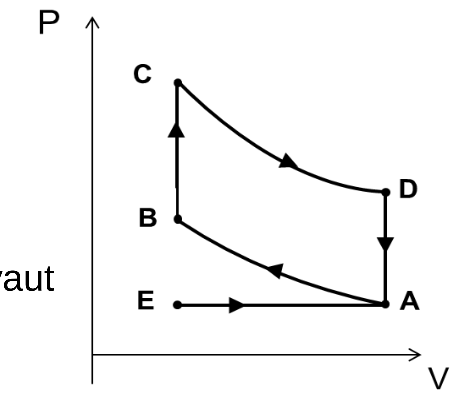
C→D : Détente adiabatique quasistatique: Le piston redescend. Les gaz d'échappement subissent une détente adiabatique quasistatique jusqu'au volume maximal.

D→A : Refroidissement à volume constant jusqu'à la pression initiale : les gaz d'échappement sont refroidis instantanément jusqu'à la température atmosphérique.

A→E : La soupape d'échappement étant ouverte, le piston remonte vers le volume minimal, en chassant les gaz d'échappement résiduels.

<u>Moteur à essence</u> (DS novembre 2018)

Un moteur à essence à 6 cylindres et 4 temps avec un rapport volumétrique **a** = $V_{maximal}/V_{minimal}$ de 8 et une cylindrée de 3,6 litres aspire l'air à 20°C et 1 bar.
La température maximale atteinte au cours du cycle est de 1500°C.
Le rapport des capacités thermiques du gaz dans le moteur est γ = 1,4, sa capacité thermique massique à volume constant c_V = 717 J/(kg K) et sa constante spécifique vaut r_{gaz} = 287 J/(kg K).



Déterminer la température (en Kelvin) pour les points A, B, C et D du cycle théorique.
T_A = 293,15 K et T_C = 1773,15 K (données de l'énoncé).
$T_B = T_A \times a^{\gamma-1}$ = 673,48 K et $T_D = T_C \times a^{1-\gamma}$ = 771,81 K.
Déterminer la quantité de chaleur fournie pendant un cycle en kJ/kg (on raisonne pour une quantité d'air admise dans le moteur égale à 1 kg).
$Q_{BC} = c_V \times (T_C - T_B)$ = 788,46 kJ/kg.
Déterminer le travail disponible (net) fourni pendant un cycle en kJ/kg.
$W_{net} = W_{AB} + W_{CD} = c_V \times (T_B - T_A) + c_V \times (T_A - T_D)$ = 272,70 + (-717,96) = -445,26 kJ/kg.
Déterminer le rendement thermodynamique η du moteur.
$\eta = -W_{net}/Q_{BC}$ = 0,564.

Déterminer la masse de gaz enfermée dans un seul cylindre (volume maximal : 0,6 litres) au cours du cycle.
$m = PV/rT = 10^5 \times 0{,}6 \times 10^{-3}/287/293{,}15 = 7{,}131 \times 10^{-4}$ kg.

Déterminer la puissance (théorique) fournie au vilebrequin (l'arbre mis en rotation par les bielles des 6 pistons) par tout le moteur. On supposera que le vilebrequin tourne à 60 tours/s (3600 tr/minute). On rappelle que le cycle thermodynamique complet correspond à deux tours de vilebrequin.
Par cycle : $7{,}13\ 10^{-4}$ kg $\times$ 6 $\times$ -445,26 kJ/kg = -1,905 kJ.
Ce qui correspond à une puissance de -1,905 kJ $\times$ 60/2 = -57,16 kW.