

Révisions 13

Thermodynamique

Exercice 1

Lors du fonctionnement d'une machine thermique, le fluide utilisé subit diverses évolutions mais revient périodiquement à son état initial : il décrit un cycle d'évolutions.

On considère ici un cycle d'évolutions particulier, qui joue un rôle très important dans l'analyse des machines thermiques : le cycle de Carnot. Ce cycle consiste en deux évolutions adiabatiques et réversibles et deux évolutions isothermes (réversibles). Le fluide considéré ici est une mole de gaz parfait diatomique.

1. On part de l'état A où la pression vaut 1 bar et la température 300 K. Quel est le volume occupé par le gaz ? Le gaz est comprimé de manière adiabatique et réversible jusqu'à une pression de 5 bar, ce qui le conduit à l'état B. Que valent le volume et la température ? Le gaz subit une détente isotherme jusqu'à une pression de 1 bar (état C). Calculer T et V. Le gaz subit une détente adiabatique et réversible qui le ramène à la température initiale (état D). Calculer P et V. Enfin, le gaz revient à l'état A lors d'une compression isotherme. Récapituler les résultats précédents sous forme de tableau.

2. Représenter ce cycle d'évolutions dans un diagramme (P, V).

3. Calculer la chaleur et le travail reçus lors de chaque étape, puis calculer le travail reçu au cours d'un cycle. A quoi peut servir une machine faisant décrire ce cycle à un fluide ?

4. Calculer le rendement et commenter.

Exercice 2

On décrit le cycle d'une machine à vapeur :

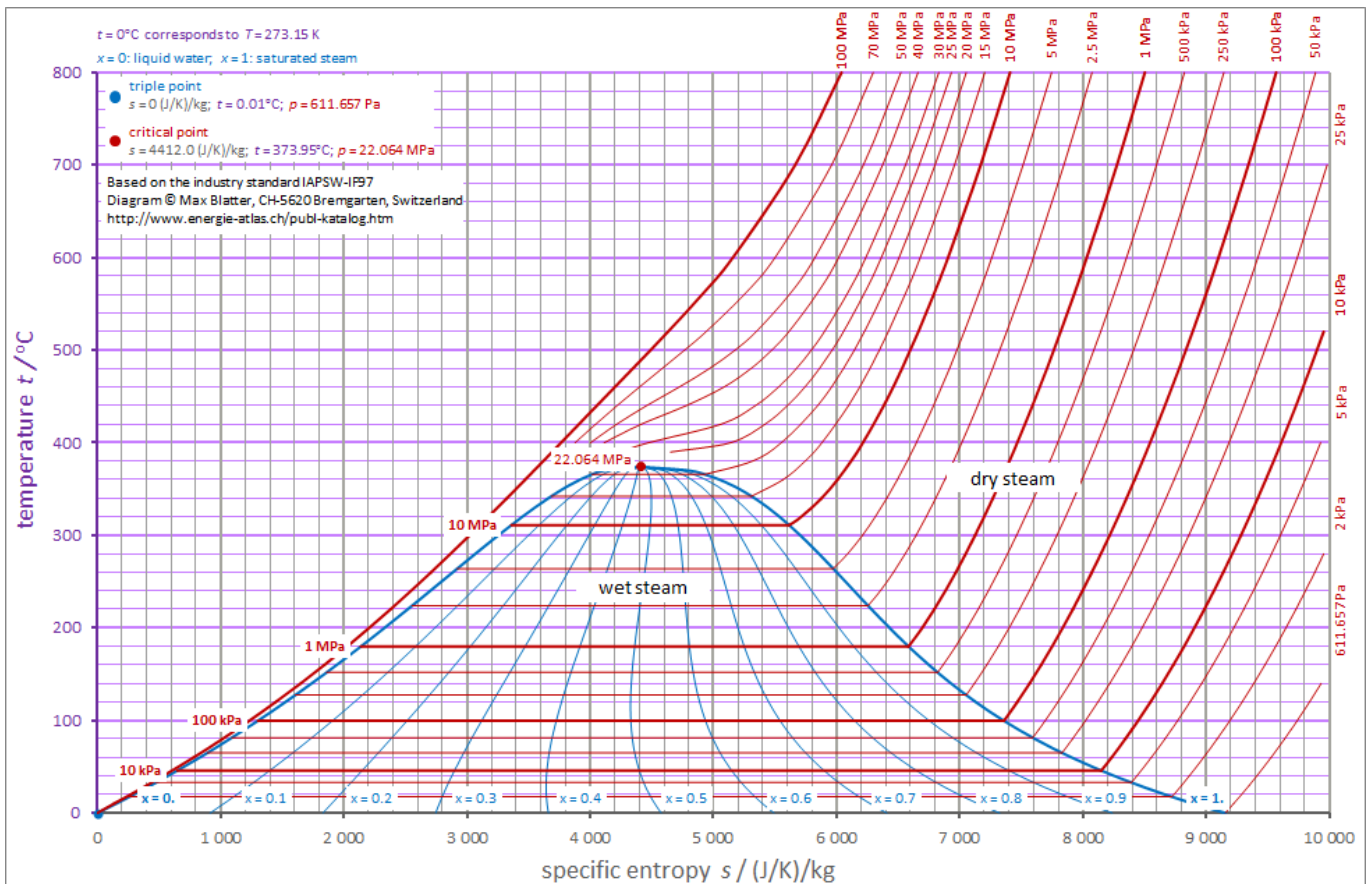
- Détente adiabatique et réversible dans la turbine (qui conduit à la liquéfaction d'une partie de la vapeur saturante qui entre).
- Liquéfaction du reste de la vapeur à pression constante $P_2 = 0,1 \text{ bar}$ dans le condenseur. Le liquide est juste saturant à la sortie.
- Compression adiabatique de l'eau liquide dans la pompe P, qui fait passer la pression de P_1 à P_2 .
- Chauffage et vaporisation totale à la pression constante $P_1 = 10 \text{ bar}$ dans la chaudière. La vapeur est juste saturante à sa sortie.

1. Représenter les différents éléments sur un schéma, avec le sens de circulation de l'eau.

2. Représenter le cycle d'évolutions sur le diagramme. Quelles sont les températures à la sortie de la chaudière et à la sortie du condenseur ? Quelle est la proportion (en masse) de liquide à la sortie de la turbine ?

3. Calculer les chaleurs latentes (enthalpies) de changement d'état aux pressions P_1 et P_2 .

4. On souhaite éviter la liquéfaction dans le condenseur, pour cela on augmente la température (sans changer la pression) de la vapeur à la sortie de la chaudière dans un second étage de chauffage. Quelle doit être, au minimum, cette température de surchauffe ? Tracer le nouveau cycle.



Exercice 3

Une machine frigorifique utilise le fluide R22 dont le diagramme pression enthalpie est donné ci dessous. Le cycle décrit présente les caractéristiques suivantes :

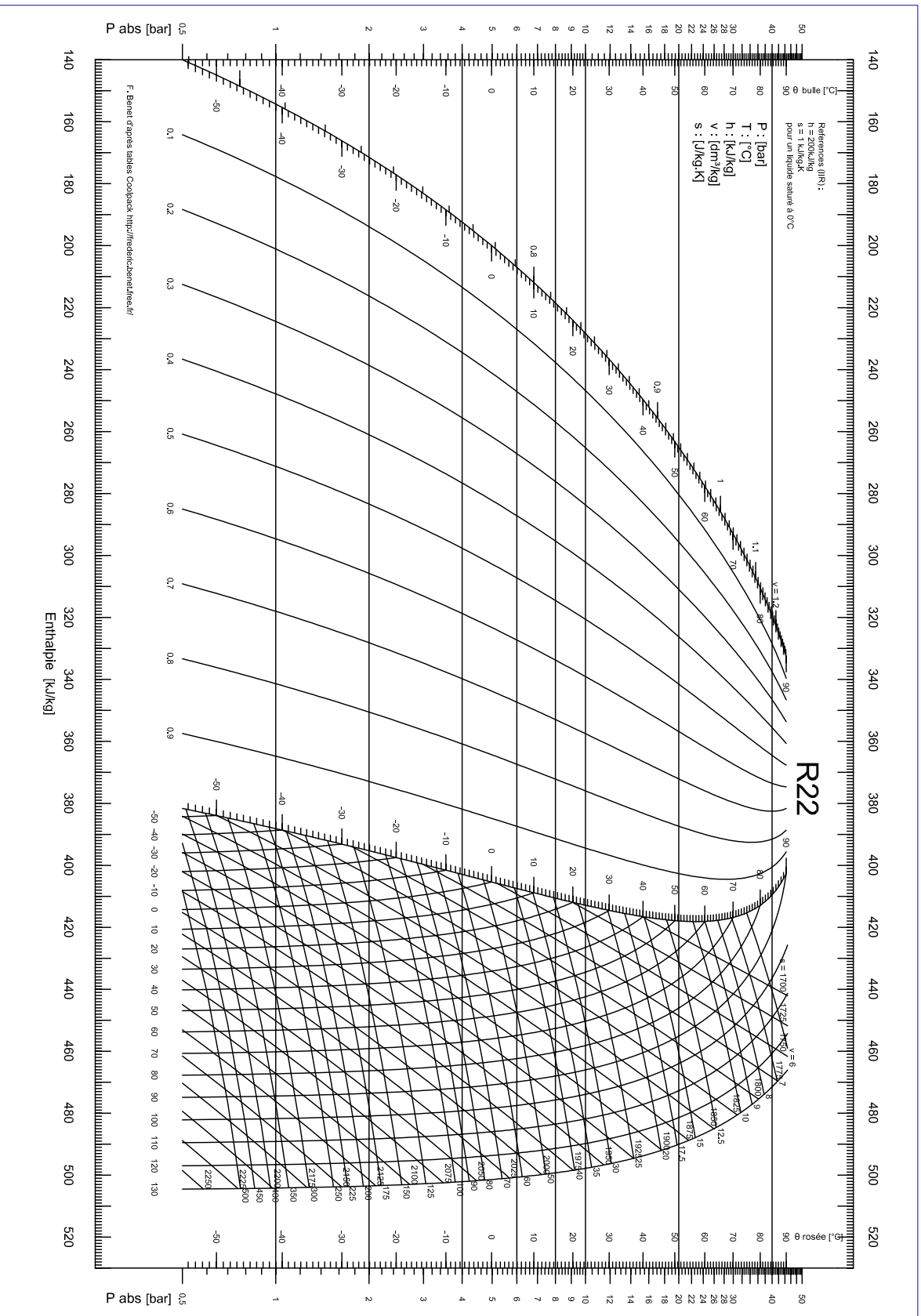
- la compression (de vapeur seule) est adiabatique et réversible
- les passages dans les échangeurs (condenseur et évaporateur) sont isobares
- le détendeur est considéré comme un tuyau indéformable et ne permettant pas les échanges de chaleur
- à la sortie du condenseur le liquide est saturant, et à la sortie de l'évaporateur la vapeur est saturante
- la pression à la sortie du compresseur est de 20 bar et à la sortie du détendeur de 2 bar

1. Dans quel élément le fluide est-il en contact avec la source chaude ? Avec la source froide ? Proposer des valeurs raisonnables de températures T_C et T_F entre lesquelles peut fonctionner cette machine. Avec ces températures, quelle est la meilleure efficacité possible ?

2. Tracer le cycle sur le diagramme et calculer son efficacité.

3. Quelle doit être la puissance fournie par le compresseur si le débit de masse du fréon est de 80 kg/h ? Avec quelle puissance refroidit-on alors la source froide ?

4. Pour être certain de ne pas faire entrer de liquide dans le compresseur, faut-il (sans changer la pression) augmenter ou diminuer la température à la sortie de l'évaporateur ? En prenant un écart de 5°C par rapport à la température de vaporisation, tracer le nouveau cycle obtenu.



Exercice 4

Un tube cylindrique fermé à son extrémité supérieure, de section 1cm^2 et de longueur 110cm est retourné sur une cuve à mercure. La pression atmosphérique est de 76cm de mercure. Initialement, la longueur de tube «utile» (au dessus de la surface du mercure) est de 100cm .

1. Le tube est initialement vide. Quelle est la hauteur de mercure dans le tube ?
2. Il y a cette fois 74mg d'éther ($M = 74\text{g.mol}^{-1}$) dans le tube. La température, imposée par l'extérieur, est de 20C et la pression de vapeur saturante de l'éther à cette température est de 44cm de mercure. La vapeur d'éther sera-t-elle sèche ou saturante ? Quelle sera la hauteur de mercure ?
3. A partir de la situation précédente, on descend le tube. Pour quelle longueur « utile » du tube la première goutte d'éther liquide va-t-elle apparaître ?
4. On diminue encore cette longueur « utile », jusqu'à 50cm . Quelle est alors la masse d'éther liquide ?

Exercice 5

1. On donne l'identité thermodynamique $dS = \frac{dU}{T} + \frac{PdV}{T}$. Etablir l'expression de la variation d'entropie d'un gaz parfait.

2. On réalise une détente de Joules Gay Lussac : une enceinte adiabatique et indéformable est initialement divisée en deux compartiments de volumes égaux par une paroi escamotable. Dans l'un on place n moles de gaz et on fait le vide dans l'autre. On note P_1 , V_1 et T_1 les grandeurs dans le compartiment où il y a du gaz. Puis on supprime la paroi. En considérant que le gaz se comporte comme un gaz parfait, décrire l'état final du gaz P_2 , V_2 et T_2 . En quoi cette expérience permet-elle de tester l'adéquation du comportement d'un gaz au modèle du gaz parfait ?

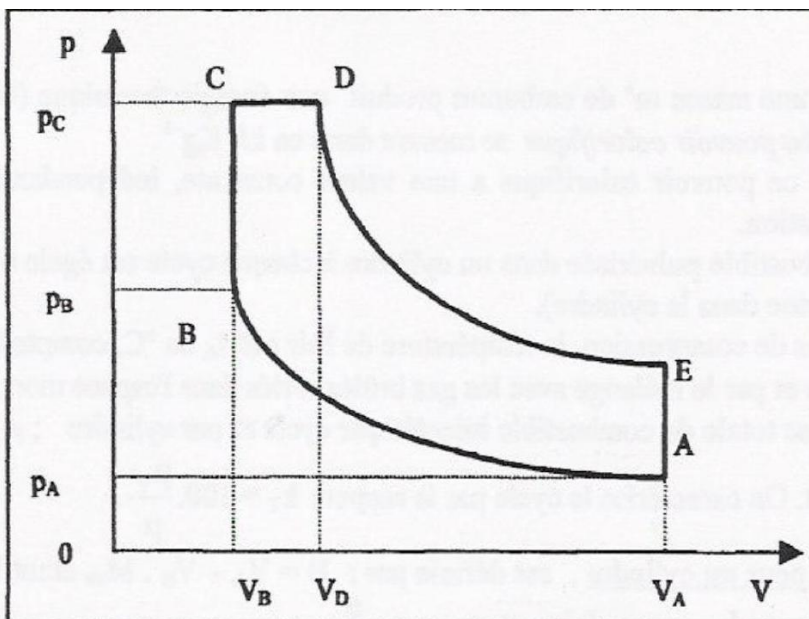
3. Calculer la variation d'entropie du gaz lors de cette détente.

4. On modifie la situation initiale : on met n moles de gaz dans chaque compartiment puis on supprime la paroi. Quelle est la variation d'entropie si les deux gaz sont de nature différente ? Si ils sont de même nature ?

5. On mélange à température et pression constantes 1 mole de dioxygène et 3 moles de diazote. Quelle est la variation d'entropie de l'ensemble ? On mélange cette fois deux moles de diazote avec 1mole diazote + 1mole dioxygène déjà mélangés. Peut-on prévoir que la variation d'entropie sera plus faible que dans le premier cas ? La calculer.

Exercice 6

On s'intéresse à un moteur Diesel fonctionnant selon le cycle représenté ci-dessous.



Le moteur à 4 temps accomplit un cycle tous les deux tours. Il présente un rapport de compression volumétrique $a = V_A/V_B$ et une cylindrée $B = V_A - V_B$; V_A est le volume d'air maximal aspiré; V_B désigne le volume disponible dans le cylindre au moment où commence l'injection du combustible; V_D est le volume lorsque la combustion se termine; le rapport $c = V_D/V_B$ est le rapport d'injection. Entre A et B , l'air subit une compression adiabatique et entre D et E une détente adiabatique. Le cycle est décrit de façon réversible.

On admettra que le gaz est constitué essentiellement d'air et on pourra négliger la masse de carburant devant celle de l'air pour un cycle. L'air sera assimilé à un gaz parfait. Les étapes consistant à évacuer les gaz issus de la combustion (échappement) pour les remplacer par de l'air frais (admission) sont modélisées par l'évolution isochore $E \rightarrow A$ d'un système supposé fermé.

On note p_A est la pression de l'air à l'aspiration; p_B est la pression au moment où commence l'injection du combustible, p_C la pression maximale atteinte dans le cylindre; c_v et c_p sont les capacités thermiques massiques à volume et à pression constante de l'air; m est la masse d'air aspirée par cycle et par cylindre.

1. Dans quel sens est décrit le cycle?

2. Donner le signe des échanges thermiques (ou quantités de chaleur) Q_{BC} , Q_{CD} et Q_{EA} puis exprimer ces quantités de chaleur en fonction de T_A, T_B, T_C, T_D, T_E , de la masse m et des caractéristiques thermodynamiques du gaz.

3. Exprimer le rendement thermique en fonction des températures du cycle et de la constante $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$, puis exprimer le rendement thermique en fonction des rapports $a, c, d = p_D/p_B$ et la constante γ . Pour cela on exprimera toutes les températures en fonction de ces constantes et de la température T_A .

Exercice 4

L'air qui nous entoure est humide : c'est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau. Les caractéristiques de l'air humide sont liées aux proportions de chacun des deux constituants. Sauf indication particulière, on considère, dans tout le problème, de l'air humide à la pression atmosphérique c'est à dire $P_0 = 1,013.10^5$ Pa.

Pour les applications numériques, on se référera, si nécessaire, aux données et au tableau figurant à la fin de l'énoncé. On supposera dans tout le problème que l'air sec et la vapeur d'eau se comportent comme des gaz parfaits.

Soient M_a la masse molaire de l'air sec et M_v la masse molaire de l'eau pure. Soient P_a la pression partielle de l'air sec contenu dans un volume V d'air humide à la température T et P_v la pression partielle de la vapeur d'eau du même volume à la même température.

1. Comment exprime-t-on la pression totale P à partir des pressions partielles ?

2. Soit m_a la masse d'air sec contenue dans le volume V d'air humide à la température T . Montrer que l'on peut écrire $P_a V = m_a R_a T$, avec $R_a = R/M_a$. Application numérique pour R_a (unité *SI!*)

Soit m_v la masse de vapeur d'eau contenue dans le volume V d'air humide à la température T . Même question.

3. L'humidité spécifique de l'air humide, à la température T , est le rapport de la masse de vapeur d'eau contenue dans un volume V d'air humide à la masse d'air sec contenue dans ce même volume. Elle est donnée en kilogramme d'eau par kilogramme d'air sec.

Montrer que l'humidité spécifique s'exprime sous la forme : $\omega = AP_v / (P - P_v)$

Déterminer l'expression de la constante A et la calculer numériquement.

4. La sensation d'un individu de se trouver dans un air plus ou moins humide est directement liée à l'humidité relative ou degré hygrométrique défini par : $\varepsilon = P_v / P_{vsat}$, où P_{vsat} est la pression de vapeur saturante de l'eau à la température T de l'air humide. Soit 1 m^3 d'air humide à une température $\theta = 15^\circ\text{C}$, dont le degré hygrométrique est égal à 0,85 .

Calculer numériquement les masses m_a d'air sec et m_v de vapeur d'eau du mélange. 5. Un air humide tel que $\varepsilon = 1$ ne peut plus accepter d'eau sous forme vapeur. L'eau supplémentaire renfermée dans l'air humide se présente alors sous forme de gouttelettes d'eau suffisamment fines pour rester en suspension et formant ainsi un brouillard. Tracer, de façon précise, la courbe représentative de l'air humide saturé dans le graphe $\omega = f(\theta)$, appelé diagramme de Carrier. Sur ce graphe indiquer, en le justifiant, où se trouve la zone de brouillard.

Remarque : pour ce diagramme, ω représente la masse totale d'eau par kg d'air sec, sous forme de vapeur ou de gouttelettes de brouillard.

6. La température de rosée T_r est la température à laquelle de l'air humide est saturé en humidité. Elle peut être mesurée par un hygromètre à condensation : on place dans l'air humide une petite surface dont on fait varier la température jusqu'à apparition sur celle-ci, de condensat (rosée ou buée) : la température de la surface est alors celle du point de rosée. Calculer la pression partielle en vapeur d'eau d'un air humide dont la température de rosée est égale à 10°C . En déduire le degré hygrométrique de cet air humide à une température égale à 30°C .

Données :

Constante des gaz parfaits : $R = 8,32 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Masse molaire de l'air sec : $M_a = 29 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Masse molaire de l'eau pure $M_v = 18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Pression de vapeur saturante de l'eau en fonction de la température :

θ ($^\circ\text{C}$)	0	5	10	15	20	25	30	40	45
P_{vsat} (Pa)	610	880	1227	1706	2337	3173	4247	7377	9715

suite exo 4

1 Combustion

La combustion d'une masse m' de carburant produit une énergie thermique (ou chaleur) égale à $\eta m'$. La quantité η , appelée pouvoir calorifique se mesure donc en $\text{kJ} \cdot \text{Kg}^{-1}$.

On admettra que ce pouvoir calorifique a une valeur constante, indépendante des conditions qui règnent pendant la combustion.

La masse de combustible pulvérisée dans un cylindre à chaque cycle est égale à m (on rappelle que m est la masse d'air contenue dans le cylindre).

Au début du temps de compression, la température de l'air est t_A en $^\circ\text{C}$, compte tenu de léchauffement par les parois du cylindre et par le mélange avec les gaz bralés restés dans l'espace mort ; sa pression est p_A .

μ désigne la masse totale de combustible injectée par cycle et par cylindre ; μ_v désigne la masse qui brûle à volume constant. On caractérise le cycle par le rapport $k_V = 100 \cdot \frac{\mu_v}{\mu}$.

La cylindrée B , pour un cylindre, est définie par : $B = V_A - V_B \cdot M_{mair}$ étant la masse molaire moyenne de l'air, et R la constante des gaz parfaits on pose $r = \frac{R}{M_{mair}}$.

On se propose de déterminer la pression p_c ainsi que les températures T_C et T_D .

3.1 Exprimer la masse m d'air contenu dans un cylindre en fonction de p_A, a, B, r et T_A .

3.2 Exprimer la chaleur Q_{BC} dégagée entre les points B et C par la combustion de la masse μ_v de fuel en fonction de α, m, k_v et η .

3.3 Déterminer en fonction de $T_A, a, \eta, c_V, k_V, p_A, \alpha$ et γ : la température T_C et la pression p_C en fin de combustion.

3.4 Déterminer la quantité de chaleur dégagée Q_{co} par le reste du fuel en fonction de m, η, α et k_v .

3.5 Déterminer T_D en fonction de $T_A, a, \alpha, \eta, \gamma$ et k_v .

4. Appliquons numériquement

On donne $\alpha = 40 \cdot 10^{-3}$ kg/kg d'air, $\eta = 42200$ kJ/kg; $t_A = 65^\circ\text{C}$, $a = 15$; $B = 3$ L.

4.1 Quelle valeur doit avoir k_v pour que la pression maximale dans le cylindre ne dépasse pas 65 bars, p_A étant pris égal à 1 bar ?

4.2 Déterminer dans cette hypothèse :

- V_A, V_B, T_B, T_C, T_D et T_E

- le rapport d'injection $c = V_D/V_B$

- le rapport de détente $b = V_A/V_D$

- le rapport de compression isochore $d = p_d/p_B$

4.3 Calculer

- le rendement thermique théorique du cycle r_{th}

- la puissance du moteur tournant à 2300tr/min.

La puissance réelle est-elle supérieure ou inférieure à cette valeur théorique ? Justifier votre réponse .

Le moteur à quatre temps accomplit un cycle tous les deux tours .