

## DS 8 : Thermodynamique et cinétique

Les parties de cet examen sont *très largement* indépendantes. On pourra utiliser les résultats intermédiaires donnés dans le texte pour aborder les parties suivantes. Il sera accordé la plus grande importance au soin apporté à la copie ainsi qu'à la clarté des raisonnements. Toute application numérique ou commentaire physique est le bienvenu. Les résultats doivent être *encadrés* et tout résultat numérique doit être accompagné de son *unité*.

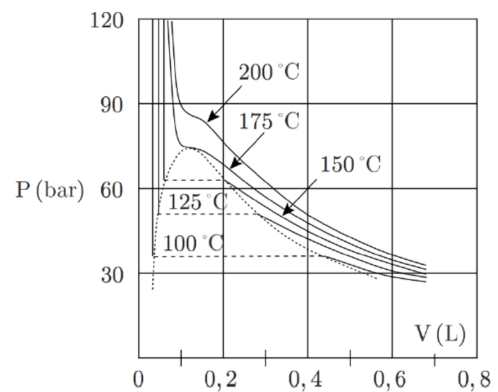
**La calculatrice est autorisée.**

## Problème 1 : Équilibre liquide-vapeur

### Lecture d'un diagramme de Clapeyron

La figure ci-contre représente un ensemble de courbes expérimentales appelées isothermes d'Andrews, représentant la pression  $P$  d'une mole de fluide en fonction du volume, pour différentes températures.

1. Déterminer les coordonnées  $(P_c, V_c)$  du point critique.
2. Que vaut le volume de la vapeur saturante à la pression de 40 bar ?



### Équilibre diphasé de l'eau

3. On considère de l'eau pure dans un récipient de volume  $V = 10$  L maintenu à  $70$  °C. Définir et déterminer le titre massique en vapeur quand la phase liquide occupe la moitié du volume total.

Données : Volume massique de l'eau liquide à  $70$  °C :  $v_L = 1,02 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  ; volume massique de la vapeur d'eau à  $70$  °C :  $v_V = 5,04 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ .

### Détente isotherme

Un cylindre fermé par un piston mobile contient 1,0 g l'eau liquide à  $100$  °C sous 1,0 bar. L'ensemble est en contact avec un thermostat à  $100$  °C. On tire le piston lentement jusqu'à ce que la dernière goutte de liquide soit vaporisée.

4. Quel est l'état du système au cours de la transformation ? Comment peut-on qualifier la transformation d'après les données de l'énoncé ? En déduire l'évolution de la pression au cours

de la transformation.

5. Représenter l'évolution sur un diagramme de Clapeyron ( $P, v$ ), où  $v$  est le volume massique.
6. Calculer le volume final  $V_f$  du cylindre en considérant la vapeur sèche obtenue comme un gaz parfait.
7. Exprimer puis calculer le transfert thermique  $Q$  reçu par l'eau au cours de la transformation.

## Problème 2 : Moteur à quatre temps

On étudie dans cet exercice le moteur PSA EB2 connu sous sa dénomination commerciale 1,2 Puretech qui équipe en particulier les Peugeot 108, 208 et 2008, les Citroën C1, C3, C4 Cactus ainsi que la DS3.

Compte tenu de la faible proportion d'essence dans le mélange air-essence, celui-ci sera assimilé uniquement à l'air qu'il contient, lui-même considéré comme un gaz parfait diatomique.

Un document et des données sont placés à la fin de l'énoncé de cet exercice.

1. Déterminer, à l'aide de la cylindrée et du rapport volumétrique de compression, les valeurs numériques exprimées en  $\text{cm}^3$  des volumes  $V_1$  et  $V_2$  correspondant respectivement au point mort haut et au point mort bas.
2. Tracer dans un diagramme de Watt (pression en ordonnées, volume d'un des trois cylindres en abscisses) l'allure du cycle idéalisé, appelé cycle de Beau de Rochas et décrit dans le document. On veillera à faire figurer les points  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  et  $E$ .
3. Le cycle réel est un peu différent du cycle idéalisé. Expliquer, par une argumentation phrasée de moins de 50 mots (environ), en quoi le cycle réel diffère du cycle idéal.

Dans la suite du problème, le modèle adopté est celui du cycle idéal décrit à pleine puissance par le moteur EB2 et synthétisé dans le tableau ci-dessous :

Point	$A$	$B$	$C$	$D$	$E$
$P$ (bar)	1,0	1,0	$P_C$	$P_D$	4,0
$V$ ( $\text{cm}^3$ )	40	440	40	40	440
$T$ (K)	300	300	$T_C$	2820	1193

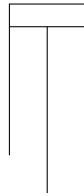
4. Déterminer les valeurs manquantes :  $P_C$ ,  $P_D$ ,  $T_C$ .
5. Déterminer la valeur numérique du travail  $W_{BC}$  reçu par le gaz au cours de la compression  $BC$ .
6. Déterminer le transfert thermique  $Q_{CD}$  reçu par le gaz au cours de l'explosion  $CD$ .
7. On donne  $|W_{DE}| = 596 \text{ J}$ . Déterminer la valeur numérique du rendement  $R_{dt}$  du cycle.

On remarquera qu'il s'agit d'un rendement purement thermodynamique pour un cycle idéal. Il ne tient pas compte des considérations mécaniques. En pratique, le rendement global est moins bon et dépend fortement du point de fonctionnement (couple-vitesse) considéré. Ce résultat permet néanmoins de comparer des cycles et de poser des limites.

8. Reconstruire l'expression du rendement d'un cycle de Carnot dont les températures extrêmes sont :  $T_{\text{fr}}$  pour la source froide et  $T_{\text{ch}}$  pour la source chaude. Comparer le rendement  $R_{dt}$  trouvé précédemment avec celui d'un cycle de Carnot pour lequel  $T_{\text{fr}} = 300 \text{ K}$  et  $T_{\text{ch}} = 2820 \text{ K}$ . Conclure.

### Principe du moteur à quatre temps

Dans un moteur multicylindre à 4 temps, le volant est relié à un vilebrequin qui assure le synchronisme du fonctionnement des pistons des différents cylindres. Les soupapes non représentées sur la figure ci-dessous sont commandées par des came entraînées par le volant moteur.



Point du piston au point mort haut (PMH) :  $V = V_1$ .



Point du piston au point mort bas (PMB) :  $V = V_2$ .

#### 1<sup>er</sup> temps : admission

Il y a ouverture de la soupape d'admission. La rotation du volant entraîne avec la bielle l'abaissement du piston du point mort haut au point mort bas. La dépression produite aspire dans le cylindre le mélange air-essence. Il y a ensuite fermeture de la soupape d'admission.

#### 2<sup>ème</sup> temps : compression

Pendant cette phase, la rotation du volant fait remonter le piston dans le cylindre jusqu'au point mort haut. Cette compression chauffe le mélange.

#### 3<sup>ème</sup> temps : explosion et détente

La bougie d'allumage crée une étincelle qui provoque l'explosion, responsable d'une augmentation de la pression. Ensuite, le gaz se détend. En fin de détente, le piston est au point mort bas.

#### 4<sup>ème</sup> temps : échappement

Il y a ouverture de la soupape d'échappement. La rotation du volant entraîne la remontée du piston jusqu'au point mort haut, ce qui chasse les gaz brûlés vers l'extérieur.

### Cycle de Beau de Rochas

$AB$  : admission isobare et isotherme du mélange air-essence,

$BC$  : compression adiabatique réversible,

$CD$  : compression isochore,

$DE$  : détente adiabatique réversible,  
 $EB$  : refroidissement isochore,  
 $BA$  : échappement isobare et isotherme.

### Données

#### Caractéristiques techniques du moteur PSA EB2

Architecture : 3 cylindres en ligne. Puissance maximale : 82 ch à 5 750 tr/min.

Rapport volumétrique de compression :  $\delta = \frac{V_{PMB}}{V_{PMH}} = \frac{V_2}{V_1} = 11$

Cylindrée : 1199 cm<sup>3</sup>.

On rappelle que la cylindrée d'un moteur à combustion interne correspond au volume d'air aspiré par l'ensemble des cylindres du moteur lors d'un cycle.

#### Données thermodynamiques :

Constante des gaz parfait :  $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

Constante d'Avogadro :  $\mathcal{N}_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ .

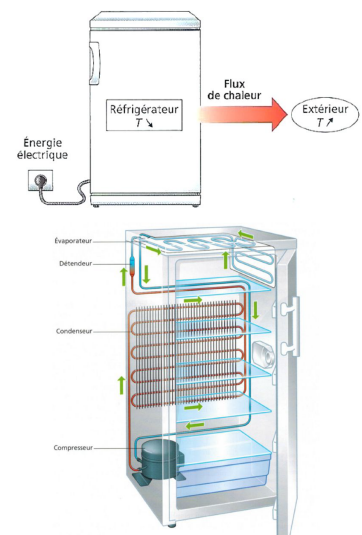
Relation de Mayer :  $C_{pm} - C_{vm} = R$ , où  $C_{pm}$  et  $C_{vm}$  désignent respectivement les capacités thermiques molaires à pression et à volume constants pour un gaz parfait.

Rapport des capacités thermiques pour un mélange air-essence :  $\gamma = \frac{C_{pm}}{C_{vm}} = 1,4$

## Problème 3 : Quelques aspects thermodynamiques du réfrigérateur à compresseur

Dans cet exercice, on souhaite analyser le principe de fonctionnement du réfrigérateur à compresseur en s'appuyant d'extraits du livre « La physique par les objets quotidiens » de C.Ray et J.C.Poizat.

Le principe du réfrigérateur est simple : il assure un transfert de chaleur depuis ses compartiments internes, qui se refroidissent, vers la pièce où il se trouve, qui se réchauffe. Ce transfert consomme de l'énergie électrique. [...] Le compresseur comprime le fluide réfrigérant, alors froid et sous forme gazeuse, ce qui augmente sa température et sa pression. À la sortie du compresseur, le fluide est donc chaud et à haute pression. [...] Ce gaz chaud et à haute pression circule ensuite à travers le condenseur, où il cède de la chaleur par diffusion vers l'extérieur et subit un changement d'état : le gaz se transforme en un liquide chaud sous haute pression. La condensation (plus exactement la liquéfaction) peut se produire à température élevée car la pression est importante. [...] En poursuivant son chemin dans le circuit frigorifique, le liquide passe ensuite à travers un détendeur qui abaisse sa pression et sa température, ([...] la détente adiabatique s'effectue dans un fin capillaire). On obtient un mélange liquide-gaz à l'équilibre. Après cette chute de pression, le mélange liquide-gaz froid traverse



l'évaporateur où il absorbe la chaleur de l'intérieur du réfrigérateur pour subir un second changement d'état : le liquide se met à bouillir, c'est-à-dire qu'il se vaporise. On obtient alors un gaz froid et à basse pression, qui repart dans le compresseur pour un nouveau cycle.

### Principe de fonctionnement du réfrigérateur à compresseur

Le réfrigérateur est supposé être une machine cyclique et ditherme. Pour un cycle complet, on note  $Q_1$  le transfert thermique reçu par le fluide réfrigérant de la part du milieu extérieur,  $Q_2$  le transfert thermique reçu par le fluide réfrigérant de la part de l'intérieur du réfrigérateur et  $W$  le travail de compression permettant de faire fonctionner le réfrigérateur.

1. Identifier le nom des organes (compresseur, détendeur, condenseur ou évaporateur) dans lesquels les transferts d'énergie  $Q_1$ ,  $Q_2$  et  $W$  s'opèrent.
2. Préciser si  $Q_1$ ,  $Q_2$  et  $W$  sont positifs ou négatifs.
3. Le compresseur met en jeu une compression rapide que l'on peut supposer adiabatique. Proposer une explication pour l'augmentation de la température du gaz supposé parfait à l'issue de cette compression.
4. Dessiner l'allure du diagramme  $P(T)$  pour le seul équilibre liquide/gaz et préciser les phases dans chaque partie du diagramme et sur la courbe  $P(T)$ . À quelle condition une liquéfaction peut-elle s'observer à « température élevée » ?
5. Définir le coefficient de performance, noté  $CoP$ , du réfrigérateur puis l'exprimer en fonction de  $Q_1$  et  $Q_2$ .

On suppose le régime stationnaire atteint : la température  $T_{\text{ext}}$  de l'extérieur et la température de consigne  $T_{\text{int}}$  à l'intérieur du réfrigérateur sont constantes.

6. Déterminer l'expression du coefficient de performance maximal du réfrigérateur, noté  $CoP_c$ , en fonction de  $T_{\text{int}}$  et  $T_{\text{ext}}$ .
7. Calculer ce  $CoP_c$  si  $T_{\text{ext}} = 25^\circ\text{C}$  et  $T_{\text{int}} = 5^\circ\text{C}$ .

### Étude du cycle du fluide réfrigérant dans un diagramme enthalpique $P(h)$

Nous allons étudier plus précisément les différentes transformations que le fluide réfrigérant subit. L'écoulement du fluide réfrigérant est stationnaire, de débit massique  $D_m$ . Les variations d'énergies cinétique et potentielle du fluide seront négligées. Nous supposons également que le fluide réfrigérant décrit le cycle suivant (on note  $\{P_i, T_i\}$  le couple température-pression relatif à l'état  $i$  du fluide) :

- Avant d'entrer dans le compresseur, le fluide est un gaz surchauffé (état  $A\{P_A, T_A\}$ ). Le compresseur impose une compression adiabatique et irréversible. Le fluide reste à l'état gazeux (état  $B\{P_B, T_B\}$ ).

- Le fluide circule ensuite dans le condenseur où il opère un refroidissement isobare puis une liquéfaction complète isobare (et donc isotherme) à la pression  $P_B$ . On obtient un liquide saturant (état  $C\{P_C, T_C\}$ ).
- Le liquide subit une détente isenthalpique (détente de type Joule-Thomson sans travail indiqué et sans transfert thermique) faisant apparaître un mélange diphasé après avoir traversé le détendeur (état  $D\{P_D, T_D\}$ ).
- Le fluide pénètre dans l'évaporateur et évolue de manière isobare jusqu'à l'état  $A$ .

avec  $P_A = 2,0 \text{ bar}$  ;  $P_B = 7,0 \text{ bar}$  ;  $T_A = 5,0 \text{ °C}$  ;  $T_B = 55 \text{ °C}$ .

- 8.** Repérer sur le diagramme enthalpique fourni en document-réponse les domaines liquide, diphasique et gazeux.
- 9.** Reporter la position des points  $A$ ,  $B$ ,  $C$  et  $D$  sur le document-réponse fourni en annexe et à rendre avec la copie.
- 10.** Donner, par lecture sur le diagramme enthalpique, la température  $T_\ell$  de liquéfaction du fluide réfrigérant observée pour le cycle étudié.
- 11.** Donner, par lecture sur le diagramme enthalpique, la température  $T_v$  de vaporisation du fluide réfrigérant observée pour le cycle étudié.
- 12.** Énoncer le premier principe appliqué à un fluide en écoulement stationnaire dans une conduite, recevant un travail mécanique massique  $w_u$  (mise en jeu par les éventuelles parties mobiles d'une machine présente dans la conduite) et un transfert thermique massique  $q$ .
- 13.** Exprimer puis calculer le transfert thermique massique  $q_2$  reçu par le fluide pendant la transformation menant de l'état  $D$  à l'état  $A$ .
- 14.** Exprimer puis calculer le travail utile  $w_u$  reçue par le fluide pendant la transformation menant de l'état  $A$  à l'état  $B$ .
- 15.** Exprimer puis calculer le transfert thermique massique  $q_1$  reçu par le fluide pendant la transformation menant de l'état  $B$  à l'état  $C$ .
- 16.** Vérifier que les résultats précédents, aux incertitudes de lecture près, permettent d'écrire  $w_u \approx -(q_1 + q_2)$ . Commenter cette relation.
- 17.** En déduire l'expression puis une estimation de la valeur du coefficient de performance  $CoP_{\text{vrai}}$ .
- 18.** Comparer  $CoP_{\text{vrai}}$  et  $CoP_c$ . Interpréter ce résultat.

# R134a

Ref: D.P. Wilson & R.S. Basu, ASHRAE Transactions 1988, Vol. 94 part 2.

DTU, Department of Energy Engineering  
s in [kJ/(kg K)], v in [m³/kg], T in [°C]  
M.J. Skovrup & H.J.H. Knudsen, 06-03-27

