


Thermodynamique des installations industrielles

Composants thermodynamiques

Exercice 1 : Turbine à gaz

oral banque PT | 💡 2 | ✂️ 1

- 
 ▷ Étude d'un composant thermodynamique ;
 ▷ Modèle du gaz parfait ;
 ▷ Bilan d'entropie.

1 Considérons un système ouvert. Notons e les grandeurs en entrée et s celles en sortie. Le premier principe s'écrit

$$D[(h_s + e_{c,s} + e_{p,s}) - (h_e + e_{c,e} + e_{p,e})] = \mathcal{P}_u + \mathcal{P}_{th}$$

avec h l'enthalpie massique, e_c l'énergie cinétique massique et e_p l'énergie potentielle massique du fluide ; \mathcal{P}_u la puissance mécanique utile qu'il reçoit et \mathcal{P}_{th} la puissance thermique reçue. Le second principe s'écrit

$$D(s_s - s_e) = \frac{\mathcal{P}_{th}}{T_0} + \sigma_{créée}$$

avec s l'entropie massique, T_0 la température du thermostat fournissant la puissance thermique \mathcal{P}_{th} , et $\sigma_{créée}$ le taux de création d'entropie, c'est-à-dire l'entropie créée par unité de temps.

2 Le but d'une turbine est de récupérer une puissance mécanique, les pertes thermiques sont donc a priori faibles. La turbine est horizontale, il n'y a donc pas de variation d'énergie potentielle. En négligeant de plus les variations d'énergie cinétique, le premier principe appliqué à la turbine devient

$$D(h_s - h_e) = \mathcal{P}_u + \mathcal{P}_{th}$$

soit d'après la loi de Joule (gaz parfait)

$$D_{CP}(T_2 - T_1) = \mathcal{P}_u + \mathcal{P}_{th}$$

Comme les températures sont connues et fixées, alors la somme $\mathcal{P}_u + \mathcal{P}_{th}$ l'est aussi. Les deux puissances étant négatives (le fluide cède de la puissance mécanique, et le gaz dans la turbine est plus chaud que l'air extérieur), il est clair que la puissance cédée à la turbine $|\mathcal{P}_u|$ est maximale lorsque \mathcal{P}_{th} est nulle, c'est-à-dire **lorsque l'écoulement est adiabatique**.

3 En posant $r = R/M$, la variation d'entropie massique entre l'entrée et la sortie de la turbine vaut

$$s_s - s_e = \frac{\gamma r}{\gamma - 1} \ln \frac{T_2}{T_1} - r \ln \frac{P_2}{P_1} = -3,5 \cdot 10^2 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Ce résultat est **contradictoire avec l'hypothèse d'un écoulement adiabatique** : si tel était le cas, l'écoulement devrait évacuer l'entropie créée dans la turbine, si bien que l'entropie de sortie serait nécessairement supérieure à l'entropie d'entrée (égale à la limite réversible).

4 Pour pouvoir faire le calcul, il faut supposer la transformation réversible dans la turbine. Alors, d'après le second principe,

$$\mathcal{P}_{th} = T_0 D(s_s - s_e) = T_0 D M (S_{m,s} - S_{m,e}) = -107 \text{ kW}$$

Le signe est cohérent : la vapeur d'eau cède du transfert thermique à l'extérieur.

On déduit du premier principe

$$\mathcal{P}_u = D(h_s - h_e) - \mathcal{P}_{th}$$

qui donne d'après la loi de Joule pour un gaz parfait

$$\mathcal{P}_u = Dc_P(T_2 - T_1) - \mathcal{P}_{th} = D \frac{\gamma R}{M(\gamma - 1)} (T_2 - T_1) - \mathcal{P}_{th}.$$

Finalement,

$$\mathcal{P}_u = -493 \text{ kW}.$$

Ainsi, **une puissance de 600 kW est cédée à la turbine.**

▮ *Bien que non nulle, la puissance perdue par transfert thermique demeure très faible.*

5 Le débit massique est relié la vitesse (débitante) v de l'écoulement par

$$D = \rho v \Sigma$$

avec ρ la masse volumique du gaz et Σ la section de la canalisation. Or pour un gaz parfait, d'après l'équation d'état,

$$P \frac{V}{m} = \frac{n}{m} RT \quad \text{soit} \quad \frac{P}{\rho} = \frac{RT}{M} \quad \text{d'où} \quad \rho = \frac{MP}{RT}.$$

On en déduit

$$v = \frac{D}{\rho \Sigma} \quad \text{soit} \quad v = \frac{DRT}{MP\Sigma}.$$

Numériquement, on trouve

$$v_e = 0,52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad \text{et} \quad v_s = 1,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

La variation d'énergie cinétique massique vaut donc

$$e_{c,s} - e_{c,e} = \frac{v_s^2}{2} - \frac{v_e^2}{2} = 1,3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Compte tenu du débit $D = 1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, cela correspond à une puissance de 1,3 W, largement négligeable devant les 600 kW fournis à la turbine. La variation d'enthalpie de la vapeur est donc très supérieure à sa variation d'énergie cinétique.

▮ *C'est d'ailleurs ce qui explique que la variation de vitesse entre l'entrée et la sortie de la turbine, qui n'est pas dans le sens « intuitif » (on s'attendrait à $v_s < v_e$), n'est pas choquante pour autant car elle demeure très faible.*

Exercice 2 : Tuyère calorifugée

oral banque PT | 💡 2 | ✂ 2



- Étude d'un composant thermodynamique ;
- Modèle du gaz parfait.

1 Appliquons le premier principe à un volume de contrôle délimité par les sections d'abscisse $x = 0$ et d'abscisse x . Le fluide ne reçoit dans la tuyère ni travail indiqué (pas de pièces mobiles), ni transfert thermique. Ainsi,

$$h(x) + \frac{1}{2}v(x)^2 = h_0 + \frac{1}{2}v_0^2 = \text{cte}.$$

2 On suppose $v_0 = 0$. Comme le fluide est un gaz parfait alors d'après la loi de Joule

$$h(x) - h_0 = c_P [T(x) - T_0] \quad \text{donc} \quad v(x)^2 = 2c_P [T_0 - T(x)]$$

Or d'une part

$$c_P = \frac{1}{m} \times \frac{\gamma n R}{\gamma - 1} = \frac{\gamma R}{M(\gamma - 1)}$$

et d'autre part l'équation d'état s'écrit

$$\frac{PV}{m} = \frac{nRT}{m} \quad \text{soit} \quad \frac{P}{\rho} = \frac{RT}{M} \quad \text{d'où} \quad T = \frac{MP}{R\rho}$$

d'où finalement

$$v(x)^2 = \frac{2\gamma R}{M(\gamma - 1)} \times \frac{M}{R} \left[\frac{P_0}{\rho_0} - \frac{P(x)}{\rho(x)} \right]$$

et ainsi

$$v(x) = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1} \left(\frac{P_0}{\rho_0} - \frac{P(x)}{\rho(x)} \right)}$$

3 Récrivons

$$v(x) = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1} \frac{P_0}{\rho_0} \left(1 - \frac{P(x)\rho_0}{\rho(x)P_0} \right)}$$

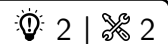
La transformation est adiabatique réversible et concerne un gaz parfait, on applique donc la loi de Laplace : $PV^\gamma = \text{cte}$ donne en fonction de ρ

$$\frac{P}{\rho^\gamma} = \text{cte}' \quad \text{soit} \quad \frac{P^{1/\gamma}}{\rho} = \text{cte}'' \quad \text{d'où} \quad \frac{\rho_0}{\rho(x)} = \left(\frac{P_0}{P(x)} \right)^{1/\gamma}$$

Finalement, on arrive au résultat cherché :

$$v(x) = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1} \frac{P_0}{\rho_0} \left[1 - \left(\frac{P(x)}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}$$

Exercice 3 : Compresseur étagé



- ▷ Étude d'un composant thermodynamique ;
- ▷ Modèle du gaz parfait.

1 La compression est adiabatique réversible : on applique donc la loi de Laplace, sous la forme $P^{1-\gamma} T^\gamma = \text{cte}$. Ainsi,

$$T_2 = T_0 \beta^{1-1/\gamma} = 685 \text{ K}.$$

2 La compression est adiabatique, réversible et on néglige les variations d'énergie cinétique et potentielle. D'après le premier principe entre la sortie et l'entrée du compresseur,

$$\Delta h = w + 0$$

Comme le fluide est un gaz parfait, on a d'après la loi de Joule $\Delta h = c_P \Delta T$ d'où

$$w = \frac{\gamma r}{\gamma - 1} (T_2 - T_0),$$

et en reprenant la question précédente on obtient le résultat voulu,

$$w = \frac{\gamma r}{\gamma - 1} T_0 \left(\beta^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right) = 412 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

3 Comme un échangeur ne contient pas de parties mobiles, le travail w' est la somme des travaux reçus dans les étages basse et haute pression.

$$w' = w_{\text{BP}} + 0 + w_{\text{HP}} = \frac{\gamma r}{\gamma - 1} (T_1 - T_0) + \frac{\gamma r}{\gamma - 1} (T'_2 - T_0) \quad \text{d'où} \quad w' = \frac{\gamma r}{\gamma - 1} (T_1 + T'_2 - 2T_0).$$

D'après la loi de Laplace appliqué aux isentropiques qui partent de la même température T_0 ,

$$T_1 = T_0 \beta_1^{(\gamma-1)/\gamma} \quad \text{et} \quad T'_2 = T_0 \beta_2^{(\gamma-1)/\gamma}$$

ce qui donne bien

$$w' = \frac{\gamma r}{\gamma - 1} T_0 \left(\beta_1^{(\gamma-1)/\gamma} + \beta_2^{(\gamma-1)/\gamma} - 2 \right).$$

4 Lorsque $P_1 = \sqrt{P_0 P_2}$,

$$\beta_1 = \frac{\sqrt{P_0 P_2}}{P_0} = \sqrt{\frac{P_2}{P_0}} = 5 \quad \text{et} \quad \beta_2 = \frac{P_2}{\sqrt{P_0 P_2}} = \sqrt{\frac{P_2}{P_0}} = 5.$$

5 En repartant de la loi de Laplace,

$$T'_2 = T_1 = \beta^{(\gamma-1)/\gamma} T_0 = 432 \text{ K}.$$

Cette température est donc nettement moins élevée (250 °C de différence!) que la température T_2 obtenue en sortie du compresseur mono-étagé.

6 On déduit de ce qui précède

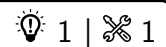
$$w' = \frac{2\gamma r}{\gamma - 1} (T'_2 - T_0) = 319 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1},$$

ce qui représente un gain d'environ 25 % par rapport au compresseur mono-étagé. En plus de permettre des températures moins élevées, l'utilisation de compresseurs étagés est également plus économique.

Culture industrielle : Le choix d'un compresseur simple ou étagé relève bien sûr de la complexité de l'installation ... mais aussi du rôle dévolu au compresseur. Par exemple, dans une pompe à chaleur ou un réfrigérateur, le compresseur a pour rôle d'augmenter la température du fluide bien plus que d'augmenter sa pression. Ainsi, dans ces installations, remplacer un compresseur simple par un compresseur étagé est évidemment une mauvaise idée!

Machines dithermes

Exercice 4 : Climatisation d'une voiture



- ▷ Cycle frigorifique ;
- ▷ Exploitation d'un diagramme des frigoristes.

Le cycle complet est représenté sur le diagramme page 7 (copié d'un document de P. Salles, professeur en ATS).

Premier principe appliqué à un système ouvert en régime permanent, en négligeant les variations d'énergie mécanique :

$$D_m (h_s - h_e) = \mathcal{P}_w + \mathcal{P}_q$$

- ▷ D_m est le débit massique de fluide au travers du système ouvert ;
- ▷ \mathcal{P}_w est la puissance mécanique algébriquement reçue de l'extérieur par le fluide en mouvement au niveau des parties mobiles du système ouvert ;
- ▷ \mathcal{P}_q est la puissance thermique algébriquement reçue de l'extérieur par le fluide en mouvement à travers la paroi entourant le système ouvert ;
- ▷ h_s et h_e sont les enthalpies massiques respectivement en entrée et en sortie du système ouvert.

1 Les fréons ont été abandonnés car ce sont des **gaz à effet de serre** et que sous l'effet du rayonnement UV, ils se décomposent en éléments susceptibles de **détériorer la couche d'ozone**.

2 La zone d'équilibre liquide-vapeur du solide se trouve **sous la courbe de saturation**. Le domaine du liquide seul est **à gauche du diagramme**, le domaine de la vapeur seule **à sa droite**. Pour le retrouver simplement, il suffit de raisonner à pression constante et de voir comment la courbe isobare intercepte les isothermes : plus l'enthalpie massique est élevée (donc plus on se déplace vers la droite du diagramme), plus les isothermes rencontrées sont associées à des températures élevées. Comme la phase vapeur est stable à températures élevées, on en déduit que son domaine se trouve à droite du domaine liquide-vapeur.

3 Du point de vue enthalpique, la caractéristique d'un gaz parfait est que son enthalpie ne dépend que de la température. Ainsi, le fluide est modélisable par un gaz parfait dans le domaine gazeux du diagramme où les isenthalpes se confondent avec les isothermes, c'est-à-dire où les isothermes (en rouge) sont verticales. Il s'agit de la partie **en bas à droite du diagramme**, en ordre de grandeur limitée par $P \lesssim 0,8 \text{ bar}$ et $h \gtrsim 50 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

4 On place le point (1) sur l'isobare 3 bar (horizontale) et entre les isothermes (rouge) 0°C et 10°C , à peu près au milieu. Par lecture graphique de l'abscisse, on trouve

$$h_1 = 405 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Par ailleurs, ce point se trouve entre les isentropes (bleu) à $1,70$ et $1,75 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$, plus près de la deuxième. Compte tenu de la précision demandée par l'énoncé, il est suffisant de conclure

$$s_1 = 1,75 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

5 Par définition du rapport de compression,

$$P_2 = r P_1 = 18 \text{ bar}.$$

La compression étant supposée isentropique, le point (2) se trouve à l'intersection de l'isobare $P = P_2 = 18 \text{ bar}$ (horizontale) et de l'isentrope $s = s_1 = 1,75 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$. On lit alors la valeur de l'isotherme qui passe par (2) et celle de son abscisse pour trouver

$$T_2 \simeq 70^\circ\text{C} \quad \text{et} \quad h_2 \simeq 440 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

6 Comme la compression est adiabatique, $\mathcal{P}_q = 0$, et le premier principe appliqué au compresseur donne

$$\mathcal{P}_m = D_m (h_2 - h_1) = 3,5 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

On trouve $\mathcal{P}_m > 0$, c'est-à-dire sans surprise qu'il faut fournir du travail à un fluide pour le comprimer.

7 Le point (3) se trouve à l'intersection de l'isobare $P = P_2 = 18 \text{ bar}$ (horizontale) et de l'isotherme $T = T_3 = 60^\circ\text{C}$. Le point se trouve donc dans la zone liquide où l'isotherme n'est pas tracée : il faut la compléter par une droite verticale pour placer correctement le point (3). On y lit l'abscisse,

$$h_3 = 285 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

8 Comme le détendeur est adiabatique, $\mathcal{P}_q = 0$, et comme il ne contient pas de parties mobiles alors $\mathcal{P}_w = 0$. Le premier principe appliqué au détendeur donne alors directement

$$h_s - h_e = 0,$$

c'est-à-dire que **la détente est isenthalpique**.

9 Le point (4) se trouve à l'intersection de l'isobare $P = P_1 = 3 \text{ bar}$ et de l'isenthalpe (verticale) passant par le point (3). Il se trouve presque sur l'isotherme 0°C , grâce à quoi on conclut pour avoir la précision souhaitée

$$T_4 \simeq 0^\circ\text{C}.$$

Le point (4) se trouve à peu près au milieu des isotitres $x_V = 0,4$ et $x_V = 0,5$, d'où on conclut

$$x_4 \simeq 0,45.$$

Le cycle complet est représenté sur le diagramme page 7 (copié d'un document de P. Salles, professeur en ATS).

10 Par application du premier principe à l'évaporateur et comme aucune puissance mécanique n'est fournie au fluide,

$$\mathcal{P}_e = D_m (h_1 - h_4) = 12 \text{ kW} \cdot \text{kg}^{-1}$$

L'air est bien refroidi car $\mathcal{P}_e > 0$: la puissance thermique est effectivement reçue par le fluide frigorigène, donc extraite de l'air de la voiture.

11 L'efficacité peut être indifféremment définie à partir d'énergie ou de puissance et à partir de grandeurs massiques ou non. La puissance utile d'un climatiseur est le transfert thermique échangé avec la source froide, soit ici \mathcal{P}_e au

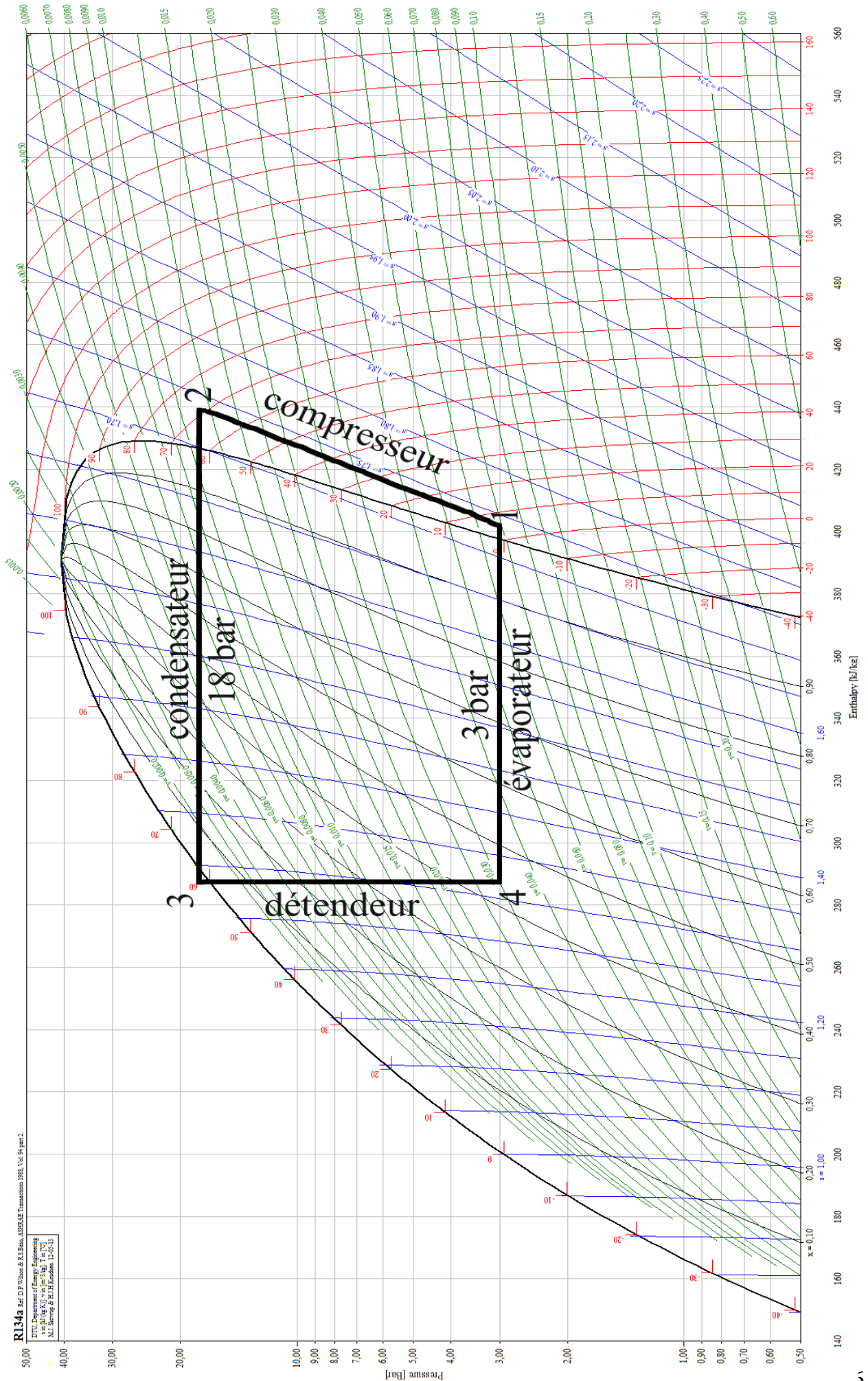
niveau de l'évaporateur. La puissance coûteuse est la puissance motrice \mathcal{P}_m à apporter au niveau du compresseur. L'efficacité vaut donc

$$e = \frac{\mathcal{P}_e}{\mathcal{P}_m} = 3,4$$

12 La température de liquéfaction à $P_2 = 18$ bar est lue sur le diagramme environ égale à $T_3 = 60^\circ\text{C}$: c'est la valeur de l'isotherme (rouge) qui se confond avec l'isobare à P_2 dans la zone de coexistence liquide-vapeur. L'efficacité d'un climatiseur de Carnot fonctionnant entre la température T_4 de l'évaporateur et la température de liquéfaction T_3 serait

$$e_{\text{Carnot}} = \frac{T_4}{T_3 - T_4} = 4,6.$$

L'efficacité de la machine réelle est comme attendu inférieure à l'efficacité de Carnot : la transformation au sein du détendeur est irréversible.



R134a Ref. D.P. Wilson & K.S. Bala, ASHRAE Transactions 1981, Vol. 94 part 2.

© 1991, Department of Energy Engineering
 MIT, 77 Massachusetts Ave., Cambridge, MA 02139
 MIT Libraries, 77 Massachusetts Ave., Cambridge, MA 02139

Exercice 5 : Cycle de Hirn d'une centrale thermique



- ▷ Cycle moteur ;
- ▷ Exploitation d'un diagramme entropique.

1 Le diagramme entropique est représenté figure 1.

- ▷ La transformation 1 → 2 est une adiabatique réversible, donc isentropique, donc une verticale dans le diagramme entropique ;
- ▷ La transformation 2 → 3 suit l'isobare $P = 10$ bar ;
- ▷ L'énoncé ne précise rien sur l'étape 3 → 4, mais on peut considérer que la seconde turbine vérifie les mêmes hypothèses que la première : il s'agit donc d'une détente adiabatique réversible ;
- ▷ La transformation 4 → 5 est par hypothèse isobare, donc isotherme car elle concerne un fluide diphasé ;
- ▷ La compression 5 → 6 est une adiabatique réversible jusqu'à atteindre 100 bar, mais dans le diagramme entropique les isobares du domaine liquide sont toutes regroupées sur la courbe d'ébullition, si bien que le passage par la pompe n'est pas visible sur le diagramme ;
- ▷ La transformation 6 → 1 suit l'isobare $P = 100$ bar en subissant successivement un échauffement de l'eau liquide le long de la courbe d'ébullition (en diagramme entropique, toutes les isobares du liquide pur collent à la courbe de saturation), puis un changement d'état, et enfin un échauffement de la vapeur sèche.

Le cycle est parcouru en sens horaire, ce qui est normal car on étudie une installation motrice.

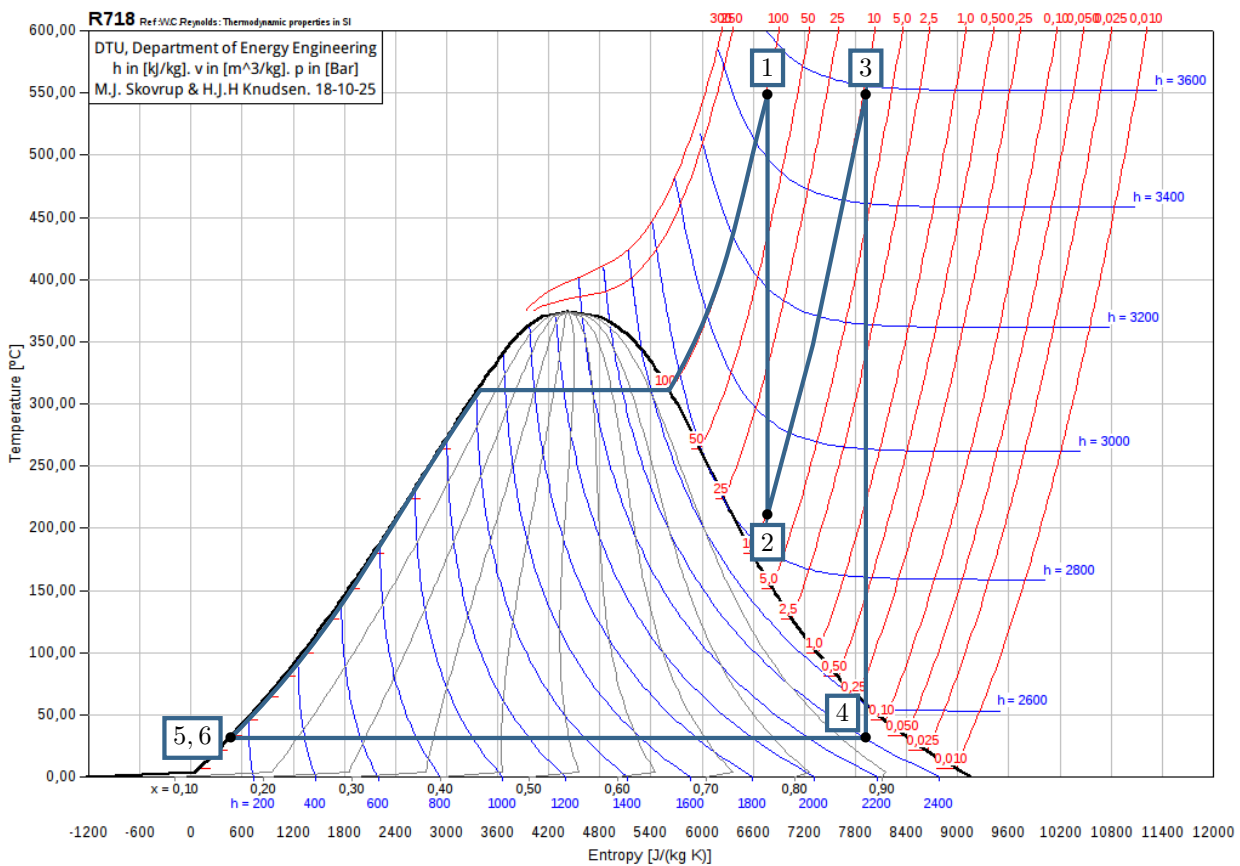


Figure 1 – Diagramme entropique complété.

2 On lit graphiquement $T_2 = 210$ °C. Dans l'état 4 l'eau est diphasée, et le titre en vapeur vaut $x_4 = 0,93$.

3 Le diagramme manque d'enthalpes pour permettre une lecture précise ... On peut approximativement considérer

$$h_1 = 3500 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad h_2 = 2850 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad h_3 = 3580 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$h_4 = 2400 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad h_5 = h_6 = 100 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

D'après le premier principe, avoir $h_5 = h_6$ signifie que le travail fourni par la pompe au liquide est négligeable devant les autres échanges énergétiques, ce qui s'interprète par le fait que comprimer un liquide incompressible est une opération relativement facile et donc peu coûteuse en énergie.

4 Le travail total disponible sur les turbines est l'opposé du travail indiqué reçu par le fluide. D'après le premier principe, appliqué à la turbine haute pression,

$$\Delta h + \underbrace{\Delta e_c + \Delta e_{pp}}_{\ll \Delta h} = w_{12} + \underbrace{q_{12}}_{=0 \text{ adiab}}$$

soit

$$w_{12} = h_2 - h_1.$$

De même pour la turbine basse pression,

$$w_{34} = h_4 - h_3$$

et finalement

$$w_{\text{tot}} = -w_{12} - w_{34} \quad \text{donc} \quad \boxed{w_{\text{tot}} = (h_1 - h_2) + (h_3 - h_4) = 1830 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} .}$$

5 La puissance mécanique disponible sur la turbine s'écrit $\mathcal{P}_{\text{méca}} = D_m w_{\text{tot}}$, et comme $\mathcal{P}_{\text{élec}} = 0,9 \mathcal{P}_{\text{méca}}$ on en déduit

$$\boxed{D_m = \frac{\mathcal{P}_{\text{élec}}}{0,9 w} = 240 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} .}$$

6 Par application du premier principe au surchauffeur, qui ne contient aucune pièce mobile (c'est un échangeur),

$$\Delta h = \underbrace{w_{23}}_{=0} + q_{23} \quad \text{d'où} \quad \boxed{q_{23} = h_3 - h_2 = 730 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} .}$$

7 D'après le premier principe appliqué au générateur de vapeur, qui ne contient aucune pièce mobile (c'est également un échangeur),

$$\Delta h = \underbrace{w_{61}}_{=0} + q_{61} \quad \text{d'où} \quad \boxed{q_{61} = h_1 - h_6 = 3400 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} .}$$


En supposant que le transfert thermique dans le condenseur se fait avec le milieu extérieur et est donc gratuit, on en déduit le rendement de l'installation sous la forme

$$\boxed{\eta = \frac{w_{\text{tot}}}{q_{23} + q_{61}} = 0,44 .}$$

Attention à ne pas oublier dans le rendement le transfert thermique fourni par le surchauffeur ! En pratique, ou bien le fluide repasse dans les fumées d'échappement de la chaudière, ou bien de la vapeur est déviée avant ou pendant son passage dans la turbine haute pression (on parle de soutirage de vapeur) et elle joue le rôle de fluide chaud dans le surchauffeur, le fluide froid étant la vapeur détendue dans la turbine. On parle alors de soutirage.

Exercice 6 : Cycle de Rankine d'une centrale nucléaire



-  ▷ Cycle moteur ;
 ▷ Exploitation d'une table thermodynamique ;
 ▷ Tracé qualitatif d'un diagramme des frigoristes.

1 Voir figure 2.

L'étape 1-2 du cycle est assez peu crédible : normalement, les changements d'état doivent absolument être évités dans une turbine pour éviter une dégradation rapide des ailettes de la turbine sous l'impact des gouttelettes d'eau formées (érosion).

2 Par additivité de l'entropie, dans un système diphasé,

$$S = S_V + S_L \quad \text{soit} \quad ms = m_V s_V + m_L s_L .$$

En introduisant le titre massique en vapeur $x = m_V/m$ et la conservation de la masse $m = m_V + m_L$, il vient

$$ms = xm s_V + (1 - x)m s_L \quad \text{d'où} \quad \boxed{s = x s_V + (1 - x)s_L .}$$

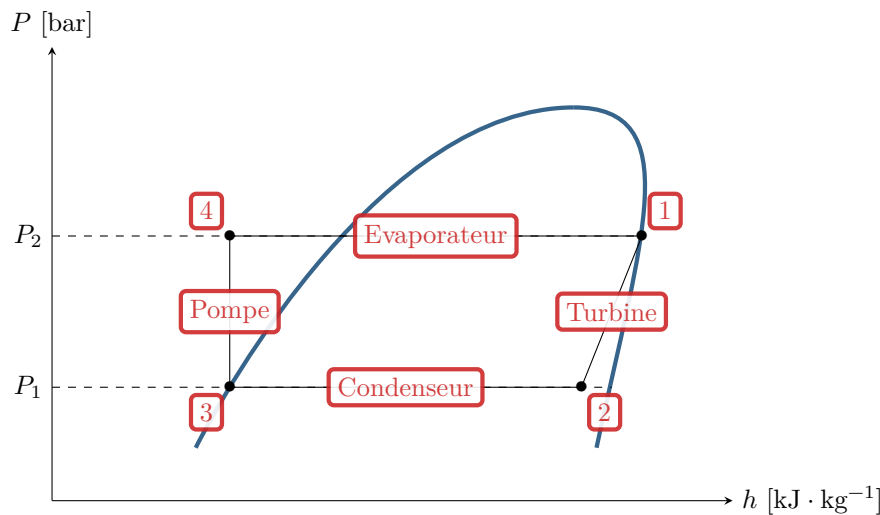


Figure 2 – Allure du cycle dans le diagramme des frigoristes.

3 La transformation $1 \rightarrow 2$ est adiabatique réversible, donc isentropique. Ainsi, $s_2 = s_1$ et on déduit du théorème des moments

$$x_2 = \frac{s_2 - s_{L,2}}{s_{V,2} - s_{L,2}} = \frac{5,8162 - 0,4763}{8,3960 - 0,4763} \simeq 0,674.$$

Le théorème des moments appliqué à l'enthalpie massique donne de façon analogue

$$h_2 = x_2 h_{V,2} + (1 - x_2) h_{L,2} = x_2 \times 2561,6 + (1 - x_2) \times 137,8 \simeq 1772,2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

La turbine étant calorifugée, le premier principe appliqué à la transformation $1 \rightarrow 2$ donne

$$w_{iT} = h_2 - h_1 = -1001,3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

4 D'après l'identité thermodynamique en enthalpie,

$$dh = Tds + v dP.$$

Or la transformation $3 \rightarrow 4$ est adiabatique réversible, donc $ds = 0$ tout au long de cette transformation. De plus, elle concerne un liquide incompressible, donc $v = \text{cte}$. Par intégration entre les états 3 et 4, on obtient

$$h_4 - h_3 = v(P_4 - P_3).$$

D'après le premier principe en supposant la pompe calorifugée, on en déduit

$$w_{iP} = v(P_4 - P_3) = 7 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Cette valeur est négligeable devant le travail prélevé par la turbine.

5 Partant du mélange diphasique 2, l'état 3 est le liquide juste saturant correspondant. Ainsi,

$$T_3 = T_2 = 306 \text{ K} \quad \text{et} \quad x_3 = 0$$

Un condenseur ne comporte pas de pièces mobiles, donc

$$q_{eC} = h_3 - h_2 = 137,8 - 1772,2 = -1634,4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

6 Un GV est un échangeur, sans pièce mobile, d'où

$$q_{eGV} = h_1 - h_4 = 2773,5 - 137,8 = 2635,7 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

7 En négligeant le travail fourni par la pompe, il vient

$$\eta = \frac{w_{iT}}{w_{iP} + q_{eGV}} \simeq \frac{w_{iT}}{q_{eGV}} = 0,38$$

Le rendement de Carnot associé à un cycle ayant les mêmes températures « chaude et froide » donnerait

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 0,453.$$

Exercice 7 : Cycle de Rankine d'une centrale à vapeur

oral banque PT | 💡 2 | ✂️ 2



- ▷ Cycle moteur ;
- ▷ Exploitation d'une table thermodynamique ;
- ▷ Tracé qualitatif d'un diagramme de Mollier.

1 La sortie du bouilleur correspond à un état de vapeur saturante : l'état 1 correspond donc au point D. La détente dans la turbine est adiabatique réversible, donc isentropique, donc verticale dans le diagramme de Mollier : l'état 2 correspond donc au point F. L'état 3 est un état de liquide saturant à même pression que 2, il s'agit donc du point A. Enfin, la compression est adiabatique réversible dans la pompe, donc verticale dans le diagramme de Mollier : l'état 4 correspond donc forcément au point B.

Le point C représente un état interne au bouilleur, le début de l'ébullition, alors que le point E correspondrait à l'état 2 si la détente était irréversible.

Dans la limite du gaz parfait et du liquide incompressible, la loi de Joule indique que $dh = c_p dT$: les isothermes sont donc confondues avec les isenthalpes, c'est-à-dire des horizontales sur le diagramme de Mollier. Par élimination, on en déduit que les isobares sont donc les courbes en pointillés les plus fins.

Comme dans tous les diagrammes, les isothermes et les isobares sont confondues dans le domaine diphasé, sous la courbe de saturation.

2 La détente dans la turbine étant isentropique,

$$s_2 = s_1 = s_L(p_1) \quad \text{donc} \quad s_2 = 5849 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Avec le théorème des moments, on en déduit

$$x_2 = \frac{s_2 - s_L(p_2)}{s_V(p_2) - s_L(p_2)} = 0,68.$$

Enfin, on a

$$h_2 = x_2 h_V(p_2) + (1 - x_2) h_L(p_2) = 1782 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

3 Au cours de l'étape 3-4, l'eau est à l'état liquide et vérifie la loi de Joule

$$\Delta h = c \Delta T = 0$$

si l'on suppose que $\Delta T = 0$. Appliquons le premier principe industriel à la pompe, en supposant qu'il n'y a pas de variation d'énergie mécanique,

$$\underbrace{\Delta h}_{\text{isotherme}} = w_{34} + \underbrace{q_{34}}_{\text{adiab}} \quad \text{soit} \quad w_{34} = 0.$$

4 Calculons le travail cédé à la turbine, calorifugée, encore avec le premier principe en négligeant les variations d'énergie mécanique :

$$\Delta h = w_{12} + q_{12} \quad \text{d'où} \quad w_{12} = h_2 - h_1 = h_2 - h_V(p_1) = -995 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Calculons maintenant le transfert thermique reçu au bouilleur, sans travail :

$$\Delta h = w_{41} + q_{41} \quad \text{d'où} \quad q_{41} = h_1 - h_4 = h_V(p_1) - h_L(p_2) = 2640 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

On en déduit enfin le rendement,

$$\eta = -\frac{w_{12}}{q_{41}} = 0,38$$

Exercice 8 : Turboréacteur simple flux

inspiré écrit CCINP PC 2020 | 💡 2 | ✂ 2 | Ⓜ



- ▷ Étude d'un moteur ;
- ▷ Modèle du gaz parfait ;
- ▷ Tracé qualitatif d'un diagramme (T, s) .

1 Voir figure 3. Les transformations adiabatiques et réversibles sont isentropiques, donc verticales dans le diagramme (T, s) : c'est le cas des étapes AB , DE et EF . La transformation BC est adiabatique mais *irréversible* donc $s_C > s_B$, mais il est difficile de connaître précisément l'allure de la transformation. Enfin, la transformation CD est une isobare, qui se représente par une branche d'exponentielle croissante.

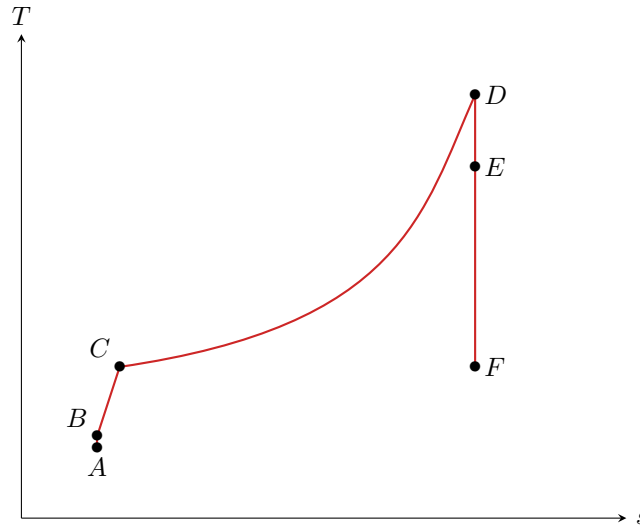


Figure 3 – Cycle thermodynamique suivi dans le turboréacteur.

2 Dans le référentiel lié au turboréacteur, le fluide entre dans le diffuseur avec une vitesse V . D'après le premier principe appliqué au diffuseur, supposé adiabatique et qui ne contient pas de pièce mobile, et en utilisant la loi de Joule,

$$\Delta h + \cancel{\Delta e_{pp}} + \frac{\Delta(v^2)}{2} = \cancel{w_{AB}} + q_{AB} \quad \text{soit} \quad c_p(T_B - T_A) + \frac{0 - V^2}{2} = 0$$

ce qui donne

$$T_B = T_A + \frac{V^2}{2c_p} = 264 \text{ K} = -9 \text{ °C}.$$

La transformation étant adiabatique réversible, on a d'après la loi de Laplace

$$P_A^{1-\gamma} T_A^\gamma = P_B^{1-\gamma} T_B^\gamma \quad \text{soit} \quad P_B = P_A \left(\frac{T_A}{T_B} \right)^{\gamma/(1-\gamma)} = 55,6 \text{ kPa}.$$

3 D'après le premier principe appliqué au compresseur supposé calorifugé,

$$\Delta h + \underbrace{\Delta e_{pp} + \Delta e_c}_{\ll \Delta h} = w_{\text{comp}} + q_{BC} \quad \text{soit} \quad w_{\text{comp}} = c_p(T_C - T_B) = 263 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

4 Si la compression était isentropique, on aurait d'après la loi de Laplace

$$P_B^{1-\gamma} T_B^\gamma = P_C^{1-\gamma} T_C'^\gamma \quad \text{soit} \quad T_C' = T_B \left(\frac{P_B}{P_C} \right)^{(1-\gamma)/\gamma} = T_B \left(\frac{1}{10} \right)^{(1-\gamma)/\gamma}$$

d'où on conclut

$$T_C' = 10^{(\gamma-1)/\gamma} T_B = 479 \text{ K} = 206 \text{ °C}.$$

Le travail massique serait alors

$$w'_{\text{comp}} = c_p(T'_C - T_B) = 237 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

On en déduit le rendement isentropique de compression,

$$\eta_S = \frac{w'_{\text{comp}}}{w_{\text{comp}}} = 90 \%.$$

Vous devez savoir que le rendement isentropique d'un compresseur compare le travail à fournir en réalité et dans la limite isentropique. Pour retrouver les positions au numérateur et dénominateur, c'est simple : le rendement isentropique est nécessairement inférieur à 1. Le même raisonnement vaut pour le rendement d'une turbine.

5 Appliquons le premier principe à la chambre de combustion, qui ne compte aucune pièce mobile,

$$D_m(\Delta h + \underbrace{\Delta e_e + \Delta e_{pp}}_{\ll \Delta h}) = \cancel{\mathcal{P}_{i,CD}} + \mathcal{P}_{\text{ch}} \quad \text{soit} \quad D_m c_p(T_D - T_C) = \mathcal{P}_{\text{ch}}$$

d'où on déduit avec la loi de Joule

$$\mathcal{P}_{\text{ch}} = D_m c_p(T_D - T_C) = 48 \text{ MW}.$$

Cette puissance est très élevée ! À titre de comparaison, un réacteur nucléaire REP moyen ne délivre « que » 1300 MW ... ou autrement dit 25 avions de chasse peuvent remplacer un réacteur nucléaire ☺

6 Par application du premier principe à la turbine, en supposant la détente adiabatique,

$$\Delta h + \underbrace{\Delta e_{pp} + \Delta e_c}_{\ll \Delta h} = w_{\text{turb}} + q_{BC} = -w_{\text{comp}}$$

d'où on déduit avec la loi de Joule

$$c_p(T_E - T_D) = -c_p(T_C - T_B) \quad \text{soit} \quad T_E = T_D + T_B - T_C = 1233 \text{ K} = 960 \text{ }^\circ\text{C}.$$

La détente dans la turbine étant adiabatique réversible, la loi de Laplace indique

$$P_D^{1-\gamma} T_D^\gamma = P_E^{1-\gamma} T_E^\gamma \quad \text{d'où} \quad P_E = P_C \left(\frac{T_D}{T_E} \right)^{\gamma/(1-\gamma)} = 280 \text{ kPa}.$$

car $P_D = P_C$ puisque la chambre de combustion est isobare.

7 La détente dans la tuyère est adiabatique réversible, d'après la loi de Laplace,

$$P_E^{1-\gamma} T_E^\gamma = P_F^{1-\gamma} T_F^\gamma \quad \text{soit} \quad T_F = T_E \left(\frac{P_E}{P_F} \right)^{(1-\gamma)/\gamma} = 716 \text{ K} = 443 \text{ }^\circ\text{C}$$

car en sortie de tuyère $P_F = P_A = 34,5 \text{ kPa}$.

Attention pour l'application numérique : la pression atmosphérique n'est pas égale à 1 bar à l'altitude de vol de l'avion !

Appliquons le premier principe à la tuyère, en supposant négligeable la vitesse des gaz en entrée mais pas en sortie de tuyère. La détente y est supposée adiabatique et sans travail.

$$\Delta h + \Delta e_c + \cancel{\Delta e_{pp}} = \cancel{w_{EF}} + q_{EF} \quad \text{soit} \quad c_p(T_F - T_E) + \frac{v_e^2 - 0}{2} = 0$$

ce qui conduit à

$$v_e = \sqrt{2c_p(T_E - T_F)} = 1,1 \cdot 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

On constate que la vitesse d'éjection est largement supérieure à la vitesse du son, ce qui peut paraître un peu étonnant : usuellement, pour un avion volant à vitesse subsonique, la vitesse d'éjection des

gaz est égale à la vitesse du son. Sans doute certaines approximations sont elles trop simplistes et conduisent à un résultat final douteux ?

8 La vitesse relative de l'avion par rapport à l'air environnant est V , d'où on déduit la puissance mécanique fournie

$$\mathcal{P} = F \times V \quad \text{soit} \quad \boxed{\mathcal{P} = D_m(v_e - V) = 943 \text{ MW} .}$$

On en déduit le rendement thermodynamique du réacteur,


$$\eta = \frac{\mathcal{P}}{\mathcal{P}_{\text{ch}}} = 20 \% .$$

Cette valeur du rendement est assez faible : pour un moteur à essence ou une centrale électrique, il est plutôt de l'ordre de 30%.

Autres installations

Exercice 9 : Puits canadien

inspiré exemple officiel oral CCINP PSI | 💡 2 | ✂ 2 | Ⓜ

-  ▷ Système ouvert mésoscopique ;
▷ Modèle du gaz parfait ;
▷ Analyse de résultats expérimentaux.

1 La constante α s'exprime en $\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. En dimensions fondamentales,

$$[\alpha] = M L^2 T^{-3} \times \Theta^{-1} \times L^{-1} \quad \text{soit} \quad [\alpha] = M L \Theta^{-1} T^{-3} .$$

2 Appliquons le premier principe à un tronçon de tuyau de longueur dx . On néglige les variations d'énergie cinétique et potentielle, et ce tuyau ne contient pas de pièce mobile, donc

$$D_m [h(x+dx) - h(x)] = d\Phi \quad \text{soit} \quad D_m \frac{dh}{dx} dx = \alpha dx [T_{\text{sol}} - T(x)]$$

En utilisant la loi de Joule et en simplifiant par dx , il vient

$$D_m c_P \frac{dT}{dx} + \alpha [T(x) - T_{\text{sol}}] = 0$$

et ainsi

$$\boxed{\frac{dT}{dx} + \frac{\alpha}{D_m c_P} T(x) = \frac{\alpha}{D_m c_P} T_{\text{sol}} = 0}$$

ce qui est bien la forme demandée avec $\ell_0 = D_m c_P / \alpha$.

3 Les solutions de cette équation s'écrivent

$$T(x) = T_{\text{sol}} + A e^{-x/\ell_0} .$$

À l'entrée du tuyau,

$$T(x=0) \underset{\substack{\uparrow \\ \text{CL}}}{=} T_{\text{ext}} \underset{\substack{\uparrow \\ \text{sol}}}{=} T_{\text{sol}} + A$$

d'où on conclut

$$\boxed{T(x) = T_{\text{sol}} + (T_{\text{ext}} - T_{\text{sol}}) e^{-x/\ell_0} .}$$

Au maximum, l'air au sein du tuyau atteint la température T_{sol} . On comprend ainsi qu'un puits canadien est **intéressant en hiver** (l'air qui entre est plus chaud que l'air extérieur, ce qui permet de gagner en chauffage) **et en été** (l'air qui entre permet de rafraîchir l'intérieur, ce qui permet par exemple de se passer de climatisation). En revanche, il est **inutile voire gênant au printemps et en automne** (mieux vaut faire rentrer de l'air extérieur à 14 °C plutôt de l'air à 11 °C pour un gain en confort, voire en chauffage).

4 La question consiste à calculer la puissance reçue par l'air de la part du sol, qui est autant de puissance que le système de chauffage de la maison n'a pas à fournir. Cette puissance s'écrit

$$\Phi = \int_0^L d\Phi = \int_0^L \alpha(T_{\text{sol}} - T(x))dx$$

D'après la question précédente,

$$\Phi = \alpha(T_{\text{ext}} - T_{\text{sol}}) \int_0^L e^{-x/\ell_0} dx = \alpha(T_{\text{ext}} - T_{\text{sol}}) \left[-\ell_0 e^{-x/\ell_0} \right]_0^L$$

ce qui donne finalement

$$\Phi = \alpha(T_{\text{ext}} - T_{\text{sol}}) \ell_0 \left(1 - e^{-L/\ell_0} \right) = D_m c_P (T_{\text{ext}} - T_{\text{sol}}) \left(1 - e^{-L/\ell_0} \right).$$

Le résultat peut également s'obtenir en appliquant le premier principe industriel directement entre l'entrée ($x = 0$) et la sortie ($x = L$) de la conduite :

$$D_m(h_s - h_e) = D_m c_P [T(x=L) - T(x=0)] = \Phi + \cancel{\mathcal{P}_m}$$

ce qui donne

$$\Phi = D_m c_P \left[T_{\text{sol}} + (T_{\text{ext}} - T_{\text{sol}}) e^{-L/\ell_0} - T_{\text{ext}} \right]$$

et on retrouve exactement la même expression après factorisation.

5 Au bout d'une longueur L suffisamment élevée,

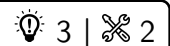
$$\Phi \simeq D_m c_P (T_{\text{ext}} - T_{\text{sol}}).$$

La température extérieure étant uniforme, Φ ne dépend plus que de D_m , qui est directement proportionnel au débit volumique Q car l'écoulement d'air est incompressible.

La longueur caractéristique ℓ_0 peut par exemple se déterminer graphiquement en raisonnant sur l'intersection de la tangente à l'origine et de l'asymptote. En ordre de grandeur, on trouve $\ell_0 \simeq 20$ m.

Le réseau de courbe diffère par la longueur caractéristique d'augmentation de Φ , c'est-à-dire ℓ_0 . Le diamètre intervient dans le coefficient α : l'échange est de type conducto-convectif, directement proportionnel à la surface d'échange, elle-même proportionnelle au carré du diamètre.

Exercice 10 : Chauffe-eau solaire



- ▷ Autre cycle thermodynamique ;
- ▷ Transitoire thermique ;
- ▷ Modèle du liquide indilatable et incompressible.

Dans tout l'exercice, on néglige les variations d'énergie cinétique et potentielle de l'eau devant ses variations d'enthalpie.

1 Appliquons le premier principe entre l'entrée et la sortie du panneau solaire. Celui-ci ne contient pas de pièce mobile, donc

$$D(h_1 - h_4) = \mathcal{P}_{\text{th}} \quad \text{d'où} \quad \mathcal{P}_{\text{th}} = Dc(T_1 - T_4) = 2,3 \text{ kW},$$

d'après la loi de Joule. La puissance totale reçue par les panneaux solaires est de $6 \times 600 = 3,6$ kW, ce qui donne un rendement de 64 %.

2 La chute de température observée entre les points 1 et 2 puis entre les points 3 et 4 est directement imputable à ces pertes. Par application du premier principe entre ces points (pompe exclue), où le fluide ne reçoit aucun travail, on en déduit

$$\mathcal{P}_{\text{fuite}} = |Dc(T_2 - T_1) + Dc(T_4 - T_3)| = 780 \text{ W},$$

ce qui représente presque un tiers de la puissance thermique captée par le fluide ! Pour les limiter, il faut entourer les conduites par un isolant thermique.

3 Appliquons le premier principe au fluide caloporteur entre l'entrée et la sortie du ballon (système ouvert), en notant \mathcal{P}_0 la puissance thermique cédée par le fluide au ballon :

$$D(h_3 - h_2) = -\mathcal{P}_0 \quad \text{d'où} \quad \mathcal{P}_0 = Dc(T_2 - T(t))$$

car lors de la phase de chauffe $T_3 = T(t)$.

Procédons maintenant à un bilan d'enthalpie pour l'eau contenue dans le ballon (système **fermé**) au cours d'une transformation infinitésimale de durée dt . Les pertes thermiques étant négligées, elle ne reçoit que la puissance thermique \mathcal{P}_0 . Ainsi,

$$dH = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{1er P}}}{\mathcal{P}_0} dt = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{Joule}}}{\rho' V c'} dT$$

On en déduit

$$\rho' V c' dT = Dc(T_2 - T(t)) dt \quad \text{soit} \quad \rho' V c' \frac{dT}{dt} + DcT = DcT_2$$

ce qui s'écrit sous la forme

$$\frac{dT}{dt} + \frac{1}{\tau} T = \frac{1}{\tau} T_2 \quad \text{avec} \quad \tau = \frac{\rho' V c'}{Dc} = 4,3 \cdot 10^3 \text{ s} \simeq 1\text{h}12.$$

4 La température dans le ballon évolue donc au cours du temps selon

$$T(t) = T_2 + A e^{-t/\tau} \quad \text{avec} \quad A = \text{cte.}$$

À l'instant initial,

$$T(t=0) = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{CI}}}{T_i} = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{expr}}}{T_2} + A \quad \text{donc} \quad A = T_i - T_2$$

et ainsi

$$T(t) = T_2 + (T_i - T_2) e^{-t/\tau}.$$

Cherchons maintenant l'instant t_0 auquel la température du ballon atteint sa valeur de consigne,

$$T(t=t_0) = T_b \quad \text{soit} \quad T_2 + (T_i - T_2) e^{-t_0/\tau} = T_b \quad \text{donc} \quad e^{-t_0/\tau} = \frac{T_b - T_2}{T_i - T_2}$$

d'où on déduit

$$t_0 = \tau \ln \frac{T_i - T_2}{T_b - T_2} = 4,6 \cdot 10^3 \text{ s} \simeq 1\text{h}18.$$

5 La question est plus subtile! Désormais, il faut considérer le ballon comme un système ouvert. Pour la valeur maximale du débit d'eau chaude D'_{\max} , la pompe fonctionne en continu avec le débit D . On applique donc le premier principe entre l'entrée et la sortie du ballon, sachant que l'eau y reçoit en continu la puissance $\mathcal{P}_0 = Dc(T_2 - T_3)$ en régime permanent. Ainsi,

$$D'_{\max} c' (T_{\text{ch}} - T_{\text{fr}}) = Dc(T_2 - T_3) \quad \text{d'où} \quad D'_{\max} = \frac{Dc(T_2 - T_3)}{c'(T_{\text{ch}} - T_{\text{fr}})} = 26 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1},$$

ce qui correspond à un débit de 440 litres par minute, largement suffisant pour prendre sa douche tranquillement.

Le système constitué du ballon et de la conduite de fluide caloporteur se comporte en fait en fait en échangeur double flux. L'application du premier principe à ce système donne directement le résultat ci-dessus.

6 Un chauffe-eau solaire est évidemment très dépendant de la météo! Il est inefficace les jours gris et pluvieux, d'où la nécessité d'une résistance chauffante, utile également en cas de grosse consommation. Il peut également conduire à une surchauffe les jours trop ensoleillés lorsque l'eau chaude n'est pas suffisamment utilisée, d'où le circuit de refroidissement. Les soupapes de sécurité permettent d'éviter les surpressions dues à la dilatation thermique de l'eau glycolée, voire à sa vaporisation en cas de surchauffe excessive.