

THERMO2 - Principes de la thermodynamique pour un fluide en écoulement stationnaire

Travaux dirigés

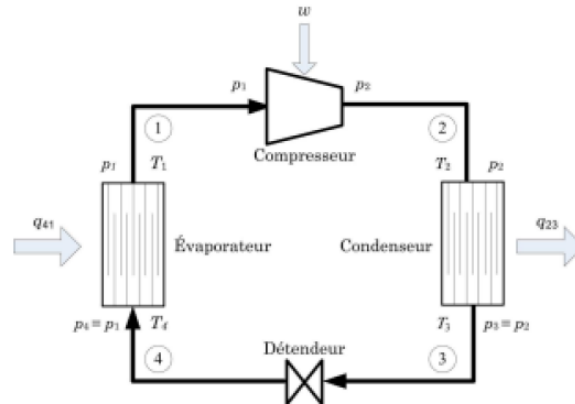
Exercice 1: Deux transformations simples d'un gaz *

On enferme $n = 0,1$ mol de gaz parfait diatomique ($\gamma = 1,4$) dans un cylindre vertical, bon conducteur de chaleur, en contact avec un thermostat à $T_0 = 27^\circ\text{C}$, fermé par un piston mobile de masse $m_P = 200\text{g}$ et de section $S = 100\text{cm}^2$. La pression atmosphérique est $P_e = 1\text{ bar}$ et l'accélération de la pesanteur est de $g = 10\text{ m s}^{-2}$.

- Calculer la pression dans le gaz P_0 à l'état initial ainsi que ainsi que la hauteur h_0 occupée par le gaz dans le cylindre.
- Le piston étant alors bloqué dans cette position, on élève lentement la température du thermostat à $T_1 = 50^\circ\text{C}$ et on attend que l'équilibre thermique se fasse. Calculer W et Q reçus par le gaz entre ces deux états.
- En repartant de l'état initial, on élève à nouveau la température jusqu'à T_1 , mais en laissant le piston libre de se déplacer. On fera l'hypothèse que la transformation est **quasistatique** (c'est à dire que le piston est toujours à l'équilibre mécanique tout au long de la transformation). Calculer le travail W' et le transfert thermique Q' reçus par le gaz.

Exercice 2: Pompe à chaleur **

La pompe à chaleur est un dispositif qui, en mode « chauffage » puise l'énergie thermique dans l'air, dans le sol ou dans l'eau des nappes phréatiques, pour la transférer vers le local à réchauffer. Elle est constituée d'un circuit fermé dans lequel circule un fluide caloporteur à l'état liquide, gazeux ou biphasé selon les éléments qu'il traverse.

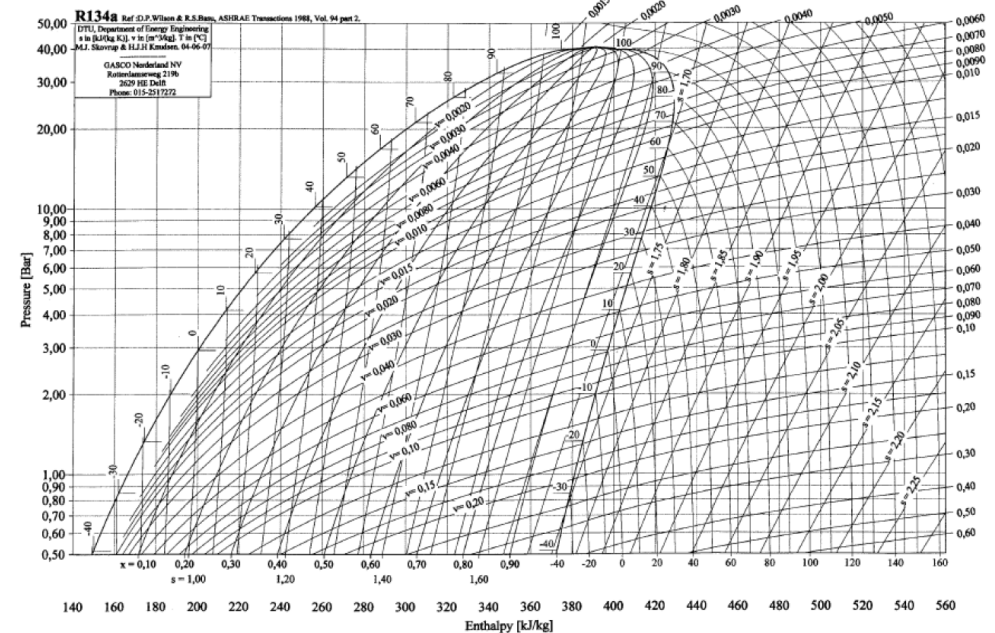


La circulation se fait en régime stationnaire; on néglige les variations d'énergies cinétique et de pesanteur. Le cycle de la pompe à chaleur se compose de quatre étapes

(les flèches épaisses indiquent le sens des transferts énergétiques), en dehors desquelles les échanges thermiques ou mécaniques sont supposés nuls :

- Compression : le gaz subit une compression adiabatique et réversible qui l'amène de l'état (1) ($p_1; T_1$) à l'état (2) ($p_2; T_2$). On note w le travail massique utile reçu par le fluide.
- Condensation : le gaz se liquéfie totalement à pression constante p_2 jusqu'à la température T_3 . Il cède de l'énergie à la source chaude, et l'on note $q_{23} < 0$ l'énergie massique échangée. L'état (3) ($p_3; T_3$) est à l'état de liquide saturant.
- Détente : le fluide traverse un tuyau indéformable et ne permettant pas les échanges thermiques. La pression du fluide redescend jusqu'à p_1 et sa température vaut alors T_4 .
- Évaporation : le liquide s'évapore totalement à pression constante p_1 jusqu'à la température T_1 . Il reçoit l'énergie massique $q_{41} > 0$ de la source froide.

- Montrer que la phase de détente est isenthalpique.
- Quelle est la relation liant les quantités q_{23} , q_{41} et w ?
- On donne $p_1 = 0,3\text{MPa}$, $p_2 = 1\text{MPa}$, $T_1 = 5^\circ\text{C}$ et $T_4 = 0^\circ\text{C}$. Représenter le cycle correspondant dans le diagramme des frigoristes ($h, \log(P)$) (une version agrandie est en annexe de ce TD pour faciliter le tracé!)



Pour chacun des points (1) à (4) du cycle, indiquer dans un tableau les valeurs numériques respectives de l'enthalpie massique, la pression et la température. Indiquer aussi l'état du fluide en chacun de ces points.

- Définir l'efficacité e de ce cycle, et l'estimer numériquement à partir du diagramme des frigoristes, estimer numériquement l'efficacité de la pompe à chaleur.
- Comparer la valeur trouvée à celle qui correspondrait à un cycle de Carnot fonctionnant entre les mêmes températures.
- Calculer le débit massique du fluide permettant d'assurer une puissance de chauffage de 4 kW.

Exercice 3: Centrale nucléaire ★★



Exercice de type résolution de problème

Une centrale nucléaire fournissant une puissance électrique de 1,0GW est installée au bord d'un fleuve, dont la température est de 20 °C et le débit volumique de 400 m³ s⁻¹. La température de la source chaude est de 300 °C. On suppose que le rendement de la centrale est 60% du rendement de Carnot. Déterminer l'élévation de la température du fleuve qui résulte du fonctionnement.

Exercice 4: Rendement isentropique d'un compresseur ★★

Un écoulement d'air (considéré comme un gaz parfait) de débit massique $D_m = 16 \text{ kg s}^{-1}$ est comprimé de façon adiabatique dans un compresseur non idéal dont on cherche à établir le rendement isentropique. La pression d'entrée est $P_1 = 100 \text{ kPa}$ pour une température $T_1 = 298 \text{ K}$, la pression de sortie est $P_2 = 700 \text{ kPa}$ pour une température $T_{2,\text{irr}} = 523 \text{ K}$. On note avec « irr » les grandeurs relatives à la transformation réelle irréversible, et avec « rév » celles relatives à une hypothétique transformation réversible menant du même état initial à la même pression finale, mais avec $T_{2,\text{rév}} \neq T_{2,\text{irr}}$. Le régime est permanent et on néglige les variations d'énergie cinétique et potentielle de l'air entre l'entrée et la sortie du compresseur. Le coefficient isentropique γ de l'air est considéré comme constant et égal à 1,4.

- Exprimer les puissances utiles reçues par l'air dans le compresseur $P_{u,\text{rév}}$ et $P_{u,\text{irr}}$ (aussi appelées puissances indiquées) en fonction de D_m , de c_p et des températures d'entrée et de sortie.
- Exprimer et évaluer la puissance supplémentaire à fournir au compresseur réel par rapport à un comportement idéal. Quelle en est l'origine physique ?
- On définit le rendement isentropique η_S du compresseur par $\eta_S = \frac{P_{u,\text{rév}}}{P_{u,\text{irr}}}$. Exprimer η_S en fonction de T_1 , P_1 , $T_{2,\text{irr}}$, P_2 et γ . Déterminer sa valeur numérique.
- Discuter de l'intérêt économique de maîtriser l'entropie créée par irréversibilité pour un industriel.

Exercice 5: Turboréacteur ★★★

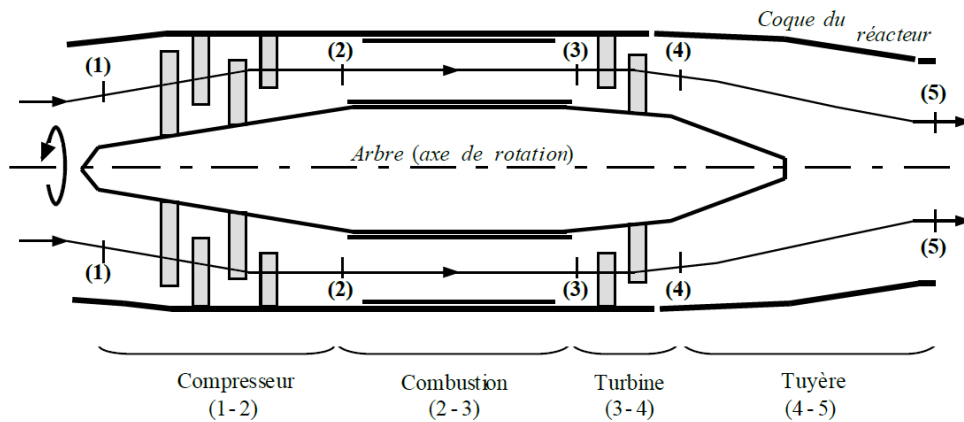
Extrait de l'épreuve de thermodynamique Banque PT

Le turboréacteur est un système de propulsion essentiellement utilisé pour les avions. La poussée résulte de l'accélération de l'air entre l'entrée (manche à air) et la sortie (tuyère), par la combustion d'un carburant, généralement du kérosène, dans l'oxygène de l'air. Une partie de l'énergie produite est récupérée par une turbine qui sert à faire tourner le compresseur au niveau de l'entrée d'air.

Les hypothèses de travail sont les suivantes :

- L'air est considéré comme un gaz parfait de constante énergétique $\gamma = c_p/c_v = 1,4$, sa capacité thermique massique à pression constante est $c_p = 1,00 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.
- L'écoulement est supposé unidimensionnel et le régime est permanent.
- Les variations d'énergie potentielle sont négligées.
- Les variations d'énergie cinétique sont, de la même façon, négligées, sauf, bien entendu, lors de la traversée des tuyères.
- Les seules parties mécaniques mobiles sont les compresseurs et les turbines (turbomachines). La présence d'un alternateur (générateur électrique) n'est pas prise en compte dans ce problème.
- Compresseur(s) et turbine sont liés par un arbre commun. Les pertes mécaniques par frottements, dans la turbine, dans le(s) compresseur(s) et au niveau des paliers de l'arbre qui les relie, sont négligées : la puissance mécanique cédée à la turbine est intégralement transmise au(x) compresseur(s).
- Les évolutions dans le(s) compresseur(s), la turbine et la tuyère sont supposées adiabatiques et réversibles.
- Les chambres de combustion sont le siège de transformations isobares.
- Les particularités de l'air, notamment sa composition, son débit massique D_m et ses caractéristiques énergétiques c_p et γ , ne sont pas perturbées par la combustion : le mélange gazeux, au cours de l'écoulement (avant et après combustion), est assimilé à l'air.
- Le pouvoir thermique (calorifique) massique du carburant utilisé (kérosène) dans la (les) chambre(s) de combustion est $p_k = 50,0 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$.

Il s'agit d'étudier le modèle d'un réacteur, noté (figure ci-dessous), qui équipe les avions de chasse. Les caractéristiques de l'écoulement sont précisées ci-dessous.



5. Déterminer la valeur de la puissance thermique P_{th} reçue par l'air dans la chambre de combustion (2-3)
6. Définir et calculer le rendement thermique η de ce turboréacteur.

- Etape 1-2 : l'air ambiant ($T_1 = 300\text{ K}$, $P_1 = 1,00\text{ bar}$) est aspiré et comprimé par le compresseur, de taux de compression $\tau_{1-2} = P_2/P_1 = 10,0$; puis cet air pénètre à la température T_2 et sous la pression P_2 , dans la chambre de combustion où le carburant est injecté.
- Etape 2-3 : grâce à la combustion du kérosène, l'air subit un réchauffement isobare ($P_3 = P_2$) jusqu'à la température $T_3 = 1200\text{ K}$.
- Etape 3-4 : le mélange gazeux se détend partiellement dans la turbine.
- les gaz sont admis dans la tuyère, conduite calorifugée de section variable qui ne contient pas de paroi mobile, où leur détente se poursuit jusqu'à la pression ambiante $P_5 = P_1 = 1,00\text{ bar}$.

Le débit massique de l'air aspiré (et aussi de l'air refoulé) par le turboréacteur vaut $D_m = 50,0\text{ kg s}^{-1}$.

1. Rappeler sans démonstration l'expression générale du premier principe pour un fluide en écoulement. *Dans la suite, on justifiera bien chaque simplification apportée le cas échéant.*
2. Déterminer l'expression littérale et la valeur numérique du travail indiqué $w_{i,1-2}$ fourni par le compresseur lors de la compression (1-2).
3. En déduire les expressions littérales et les valeurs de T_4 et P_4 à la sortie de la turbine, et de la température T_5 du gaz à la sortie de la tuyère.
4. On admet que le lien entre la puissance cinétique massique P_{cin} d'un fluide (en watt), son débit massique D_m (en kg/s) et son énergie cinétique massique e_c (J/kg) est donné par :

$$P_{cin} = D_m e_c$$

En déduire littéralement puis numériquement la puissance cinétique P_{cin} de l'écoulement à la sortie de la tuyère.