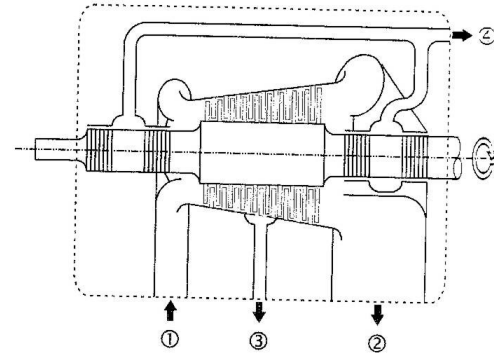


Thermodynamique feuille 4 - premier principe en système ouvert

Premier principe en système ouvert : exemple

La turbine à vapeur d'eau haute pression de la centrale nucléaire PWR Cruas 3 comporte : Une entrée haute pression 1, Une sortie basse pression 2, Un soutirage à pression intermédiaire 3, Un système de collecte des fuites des paliers 4.



Lors des essais de la centrale, on a mesuré en chaque point le débit, la vitesse d'écoulement, la température, et la pression de vapeur d'eau afin d'en déterminer l'enthalpie spécifique.

Calculer la puissance mécanique *fournie* à l'arbre de la turbine, sachant que la turbine cède à l'atmosphère une puissance-chaleur de 350kW.

Les données sont rassemblées dans le tableau ci-contre :

Point	Vitesse (m.s ⁻¹)	Débit (kg.s ⁻¹)	Enthalpie (kJ.kg ⁻¹)
1	150	1419	2773
2	270	1299	2519
3	100	107	2610
4	2	13	168

Tuyère simple

On considère comme système ouvert la partie finale de la tuyère d'un avion à réaction, horizontale, qui ne comporte aucune pièce mécanique, et dans laquelle de l'air entre à la vitesse $v_e = 300 \text{ m.s}^{-1}$ et en ressort à la vitesse $v_s = 500 \text{ m.s}^{-1}$ (régime permanent). On suppose que l'air se comporte comme un gaz parfait de masse molaire $M = 29 \text{ g.mol}^{-1}$ et de facteur $\gamma \triangleq \frac{c_p}{c_v} = 1,4$. On donne $R = 8,31 \text{ J.K}^{-1}$.

1. Pourquoi peut-on raisonnablement considérer le passage dans la tuyère comme une transformation adiabatique ?
2. Appliquer le premier principe en système ouvert et en déduire une expression de $v_s^2 - v_e^2$ en fonction des enthalpies massiques d'entrée et de sortie.
3. Exprimer ΔH en fonction de c_p et de la variation de température ΔT . En déduire

$$\text{que } h_s - h_e = \frac{R\gamma}{M(\gamma - 1)} (T_{\text{sortie}} - T_{\text{entrée}}).$$

4. Application numérique : de combien baisse la température des gaz entre l'entrée et la sortie ?

Compresseur

Un compresseur aspire, avec un débit massique D_m , de l'air considéré comme un gaz parfait (D_m représente le nombre de kilogrammes d'air aspirés chaque seconde par le compresseur). Dans cet exercice l'indice i se rapporte à l'état initial (air atmosphérique), et l'indice f à l'état final (air comprimé). On néglige les variations d'énergie cinétique et potentielle de cet air, et la compression est considérée comme adiabatique et réversible.

1. Rappeler la définition de l'enthalpie et en déduire que la variation d'enthalpie massique h de l'air peut s'écrire ici : $dh = v dp$, où v est le volume massique (volume d'un kilogramme d'air) et p la pression.
2. Rappeler la loi de Laplace reliant p, v et la constante $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ (rapport des capacités thermiques molaires à pression, ou à volume, constant). En déduire (par intégration) la différence $\Delta h = h_f - h_i$ entre les enthalpies massiques dans l'état final et dans l'état initial, en fonction de v_i, p_i, p_f et γ .

On note r le rapport de compression : $r = \frac{p_f}{p_i}$.

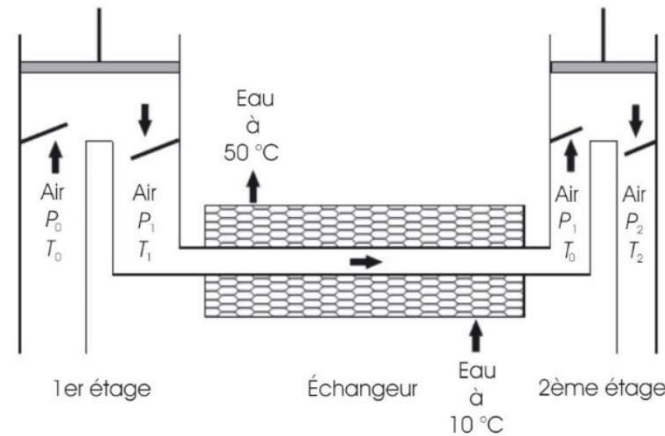
3. Appliquer le premier principe en système ouvert et déduire de la question précédente que $P_m = D_m p_i v_i \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left[r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$.

On donne $D_m = 2 \text{ kg.s}^{-1}$, constante des gaz parfaits $R = 8,31 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$, $c_v = \frac{5}{2} R$, $p_i = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$, $p_f = 20 \text{ bar}$, $T_i = 20^\circ \text{C}$, la masse molaire (moyenne) de l'air $M = 29 \text{ g.mol}^{-1}$, et on rappelle que $0^\circ \text{C} = 273 \text{ K}$.

4. Montrer que le volume massique v_i de l'air atmosphérique vaut $0,84 \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$. Déterminer la valeur de c_p puis de la constante γ . En déduire la valeur numérique de la puissance P_m du compresseur.

Compresseur à deux étages

Un compresseur à deux étages aspire de l'air (considéré comme un gaz parfait) à la température T_0 et à la pression P_0 , avec un débit $\dot{n} = 900 \text{ mol.h}^{-1}$ (mol par heure). Chaque étage de compression fonctionne de manière adiabatique et réversible. L'air comprimé sort du premier étage à la pression P_1 , et il est refroidi de façon isobare dans un échangeur de chaleur jusqu'à la température T_0 . Il est ensuite admis dans le deuxième étage d'où il sort à T_2, P_2 .



Capacité thermique molaire du gaz : $c_p = 29,1 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$. $T_0 = 300 \text{ K}$. $T_1 = 400 \text{ K}$.
 $R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$. Les variations d'énergie cinétique ou potentielle sont négligeables.

1. A l'aide du premier principe en système ouvert, exprimer en fonction de $\dot{n}, c_p, T_0$ et T_1 la puissance mécanique utile P_{u1} reçue par le gaz au niveau du premier étage de compression. Vérifier numériquement que $P_{u1} = 727 \text{ W}$ (donner le résultat avec 4 chiffres significatifs).

On pose $x \triangleq \frac{P_2}{P_0}$ (taux de compression global) et $y \triangleq \frac{P_1}{P_0}$ (taux de compression du premier étage).

2. Exprimer γ puis $\frac{\gamma-1}{\gamma}$ en fonction de R et de c_p (simplifier au maximum !). Montrer que la puissance utile totale apportée au gaz vaut $P_{tot} = \dot{n} c_p T_0 \left[y^{(R/c_p)} + \left(\frac{x}{y} \right)^{R/c_p} - 2 \right]$.

Pour un taux de compression globale x fixé, on veut que la puissance mécanique P_{tot} à apporter soit la plus petite possible.

3. Montrer qu'il faut choisir pour cela $y = \sqrt{x}$ et en déduire la valeur numérique de P_{tot} si $x = 10$.

Dans l'échangeur thermique, l'eau entre à 10°C et ressort à 50°C . On donne la capacité thermique massique de l'eau : $c_{eau} = 4181 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

4. Appliquer le premier principe en système ouvert à cet échangeur (en supposant qu'il n'y a aucune perte vers l'extérieur), et en déduire le débit massique de l'eau de refroidissement. Application numérique.