

Devoir non surveillé n°10 (pour le 18 avril 2015)

Les centrales nucléaires de la génération 6 prévues vers les années 2030 devront être sûres et présenter un rendement important. Une option étudiée parmi 6 grands choix est le réacteur à très haute température refroidi à l'hélium. Ce type de réacteur offrirait l'avantage d'améliorer l'efficacité de la conversion énergétique, compte tenu de la température élevée de la source chaude et de permettre en sus la production d'hydrogène. Dans ces installations de forte puissance, on utilise le cycle de Brayton (ou cycle de Joule) pour extraire le travail et, en fin de compte, produire de l'électricité.

Le gaz utilisé dans la centrale est l'hélium, dont les caractéristiques sont :

$$C_{Vm} = 3R/2, C_{pm} = 5R/2 \text{ avec } R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$$

$$M_{\text{He}} = 4,00 \times 10^{-3} \text{ kg.mol}^{-1}$$

Dans l'ensemble du problème, le gaz est supposé parfait.

Sur chacune des étapes, on appliquera le premier principe industriel :

Pour un fluide en écoulement stationnaire traversant une conduite au sein de laquelle il reçoit un travail utile molaire $W_{u,m}$ et un transfert thermique molaire Q_m , le premier principe s'écrit :

$$\Delta H_m = H_{s,m} - H_{e,m} = W_{u,m} + Q_m$$

avec $H_{s,m}$ l'enthalpie molaire en sortie et $H_{e,m}$ l'enthalpie molaire du fluide en entrée.

3.1 Cycle de Brayton

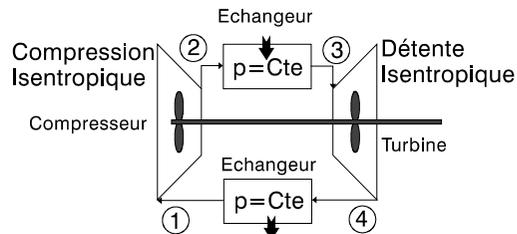


Figure n° 1 : Cycle de Brayton

Un gaz parfait circule dans une installation. Il échange du travail avec l'extérieur dans le compresseur et la turbine. Le travail fourni par le passage du gaz dans la turbine sert d'une part à faire fonctionner le compresseur (turbine et compresseur montés sur le même axe) et d'autre part à fabriquer de l'électricité. Les transferts thermiques ont lieu dans des échangeurs. Le fluide, ici un gaz d'hélium, décrit le cycle de Brayton. Ce cycle est constitué de deux isobares et de deux isentropiques :

- compression adiabatique réversible du point 1 avec une température $T_1 = 300 \text{ K}$ et une pression $p_1 = 20 \times 10^5 \text{ Pa}$ vers le point 2 à la pression $p_2 = 80 \times 10^5 \text{ Pa}$,
- détente isobare du point 2 vers le point 3 à la température $T_3 = 1300 \text{ K}$,
- détente adiabatique réversible de 3 vers 4 (de $p_3 = p_2$ à $p_4 = p_1$),
- compression isobare de 4 vers 1.

3.1.1 Pour une transformation isentropique, justifier que la relation entre T et p peut se mettre sous la forme : $\frac{T}{p^\beta} = \text{Constante}$.

Exprimer β en fonction de γ (avec $\gamma = \frac{C_{pm}}{C_{Vm}}$).

3.1.2 Déterminer les températures T_2 et T_4 . Effectuer l'application numérique.

3.1.3 Tracer le cycle de Brayton sur un diagramme $p = f(V_m)$.

3.1.4 Calculer les travaux W_{12} et W_{34} échangés avec l'extérieur (travaux utiles reçus) lors des transformations isentropiques 12 et 34.

Effectuer l'application numérique pour une mole d'hélium.

3.1.5 Exprimer les transferts thermiques reçus Q_{23} et Q_{41} . Effectuer l'application numérique pour une mole d'hélium.

3.1.6 Montrer que l'efficacité se met sous la forme :

$$e = 1 - \frac{1}{(r_p)^\beta} \text{ avec } r_p = \frac{p_2}{p_1}$$

3.1.7 Calculer numériquement cette efficacité et comparer à l'efficacité de Carnot obtenue en utilisant les deux températures extrêmes du cycle.

3.1.8 Exprimer le travail reçu au cours d'un cycle à partir des températures extrêmes T_3 et T_1 , de R (ou C_p), de β et du rapport des pressions r_p .

3.1.9 Montrer que la valeur absolue du travail passe par une valeur maximale en fonction du rapport des pressions r_{pm} pour :

$$r_{pm} = \left(\frac{T_3}{T_1} \right)^{\frac{1}{2\beta}}$$

Calculer numériquement r_{pm} et l'efficacité dans ce cas.

Cette seconde partie est facultative.

3.2 Cycle de Brayton avec régénérateur

L'utilisation d'un régénérateur (ou récupérateur de chaleur) pendant les deux transformations isobares peut se révéler judicieux dans certaines conditions que nous allons déterminer. Si la température à la sortie de la turbine est plus élevée que la température du gaz comprimé à la sortie du compresseur, une partie de l'énergie du gaz sortant de la turbine peut être cédée (en recourant à un régénérateur) au gaz allant vers l'échangeur chaud et ainsi améliorer l'efficacité du cycle de Brayton. On suppose que les transferts thermiques associés au régénérateur sont internes.

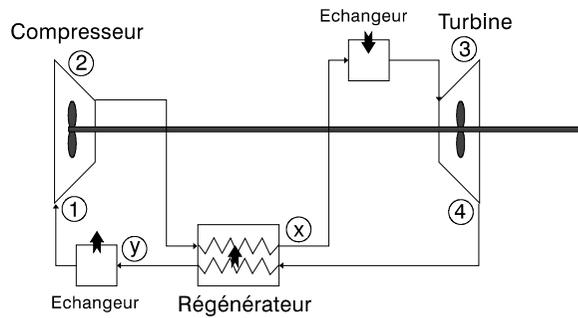


Figure n° 2 : Cycle de Brayton avec régénérateur

Dans le cycle, nous rajoutons deux lettres x et y afin d'isoler la partie échangée dans le régénérateur. Le cycle est donc composé comme indiqué sur la figure n° 2 :

- compression adiabatique réversible du point 1 vers le point 2,
- détente isobare du point 2 vers le point x dans le régénérateur puis du point x au point 3 en contact avec le thermostat chaud,
- détente adiabatique réversible du point 3 vers le point 4,
- compression isobare du point 4 vers le point y dans le régénérateur puis du point y au point 1 en contact avec le thermostat froid.

En supposant un régénérateur parfait, on a : $T_x = T_4$ et $T_y = T_2$.

3.2.1 Calculer algébriquement les transferts thermiques molaires Q_{x3} et Q_{y1} provenant des thermostats. L'application numérique n'est pas demandée.

3.2.2 En déduire l'efficacité et la mettre sous la forme :

$$e = 1 - \left(\frac{T_1}{T_3} \right) (r_p)^\beta .$$

Effectuer l'application numérique avec $p_1 = 20 \times 10^5$ Pa et $p_2 = 80 \times 10^5$ Pa.

3.2.3 Pour quelle valeur de r_{pe} l'efficacité avec régénérateur est égale à l'efficacité sans régénérateur ? Vérifier alors que $T_2 = T_4$, ce qui veut dire que le régénérateur ne joue plus aucun rôle.

3.2.4 Calculer numériquement r_{pe} dans ce cas et expliquer vers quelle valeur devrait tendre r_p pour atteindre l'efficacité de Carnot. Pour y parvenir, on utilise un étagement de la compression et de la détente conduisant au cycle d'Ericsson.