

Leçon 14 : Machines thermiques (réelles)

Corentin Lemaire

9 décembre 2020

Prérequis

- 1er et 2nd principes de la thermodynamique
- Théorème de Bernoulli

1 Thermodynamique des machines dithermes

- 1.1 Diagramme de Raveau
- 1.2 Cycle et rendement de Carnot
- 1.3 Une grande variété de machines

2 Exemple d'une machine motrice : le turboréacteur

- 2.1 Description
- 2.2 Cycle de Joule-Breyton
- 2.3 Calcul du rendement

3 Le turboréacteur en pratique

- 3.1 Dimensionnement
- 3.2 Facteurs d'irréversibilité
- 3.3 Zoom sur la tuyère

Introduction

- Leçon pour clore la thermodynamique, notamment en première année
- Importance historique : Carnot, *les machines à feu*, 1824
- Problème qui se pose ici : **Comment transformer de la chaleur en travail ?**

1 Thermodynamique des machines dithermes

1.1 Diagramme de Raveau

1.2 Cycle et rendement de Carnot

1.3 Une grande variété de machines

2 Exemple d'une machine motrice : le turboréacteur

2.1 Description

2.2 Cycle de Joule-Breyton

2.3 Calcul du rendement

3 Le turboréacteur en pratique

3.1 Dimensionnement

3.2 Facteurs d'irréversibilité

3.3 Zoom sur la tuyère

On considère un fluide réalisant des cycles entre une source froide (T_f), une source chaude (T_c) et un système mécanique.
Au cours d'un cycle, le fluide reçoit les transferts thermiques Q_f et Q_c , ainsi que le travail W .

Application du premier principe

$$\Delta U = 0 = Q_f + Q_c + W \Rightarrow W = -Q_c - Q_f$$

Donc :

- si $Q_c > -Q_f$, on a $W < 0$, le fluide cède du travail au système mécanique : on a un moteur
- si $Q_c < -Q_f$, on a $W > 0$, il s'agit d'un récepteur

Application du second principe

$$\Delta S = 0 = \frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} + S_c, \text{ avec } S_c > 0$$

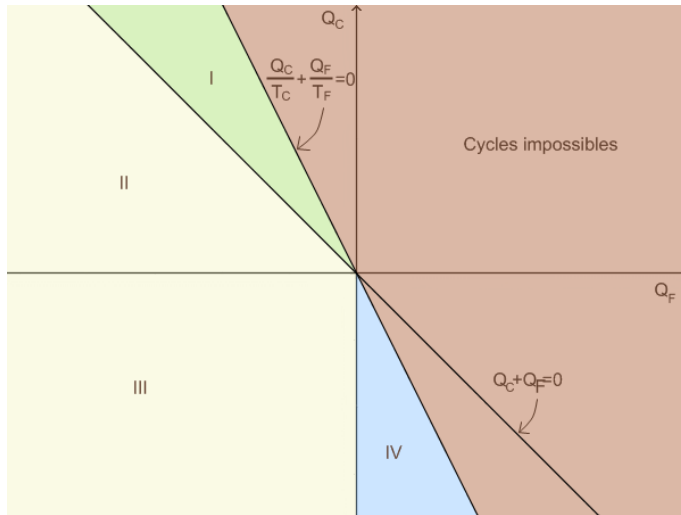
Donc :

$$\frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} < 0, \text{ inégalité de Clausius-Carnot}$$

On note au passage l'impossibilité d'un moteur monotherme.

Diagramme de Raveau On distingue 4 zones dans ce diagramme :

- Zone I, moteur, $Q_c > 0$, $Q_f < 0$
- Zone IV, pompe à chaleur ou réfrigérateur, $Q_c > 0$, $Q_f > 0$
- Zone II et III, peu intéressantes



source : Wikipédia.

1 Thermodynamique des machines dithermes

1.1 Diagramme de Raveau

1.2 Cycle et rendement de Carnot

1.3 Une grande variété de machines

2 Exemple d'une machine motrice : le turboréacteur

2.1 Description

2.2 Cycle de Joule-Breyton

2.3 Calcul du rendement

3 Le turboréacteur en pratique

3.1 Dimensionnement

3.2 Facteurs d'irréversibilité

3.3 Zoom sur la tuyère

Quel rendement peut-on obtenir ?

Théorème de Carnot

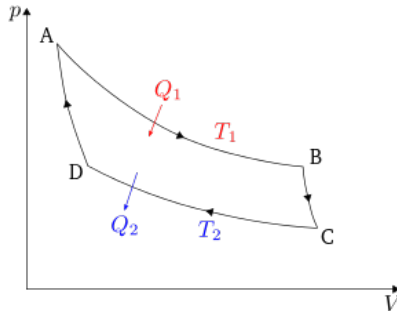
Le rendement d'une machine thermique est plafonné par un rendement théorique :

- pour une machine ditherme, ce rendement ne dépend que de T_f et T_c . Il s'agit du rendement du cycle de Carnot
- le rendement maximum est obtenu pour un cycle réversible

Cycle de Carnot

Il s'agit d'un cycle à 2 isothermes et 2 adiabatiques

- pour un moteur $\eta_{max} = \frac{W}{Q_c} \leq 1 - \frac{T_f}{T_c}$
- pour un frigo $e_{max} = \frac{Q_f}{W} \leq \frac{T_f}{T_c - T_f}$
- pour une PAC $e_{max} = -\frac{Q_c}{W} \leq \frac{T_c}{T_c - T_f}$



source : Wikipédia.

1 Thermodynamique des machines dithermes

- 1.1 Diagramme de Raveau
- 1.2 Cycle et rendement de Carnot
- 1.3 Une grande variété de machines

2 Exemple d'une machine motrice : le turboréacteur

- 2.1 Description
- 2.2 Cycle de Joule-Breyton
- 2.3 Calcul du rendement

3 Le turboréacteur en pratique

- 3.1 Dimensionnement
- 3.2 Facteurs d'irréversibilité
- 3.3 Zoom sur la tuyère

Il existe une grande variété de machines thermiques. On peut distinguer :

- Les moteurs des récepteurs
- Dans les moteurs, on distingue les rotatifs (Rankine, Hirn) des alternatifs (Stirling, Diesel,...)
- Les machines à combustion interne et externe

Dans cette leçon, on étudiera le turboréacteur, qui met en jeu de la thermodynamique et de la mécanique des fluides. Le bilan se fera sur un cycle ouvert.

1 Thermodynamique des machines dithermes

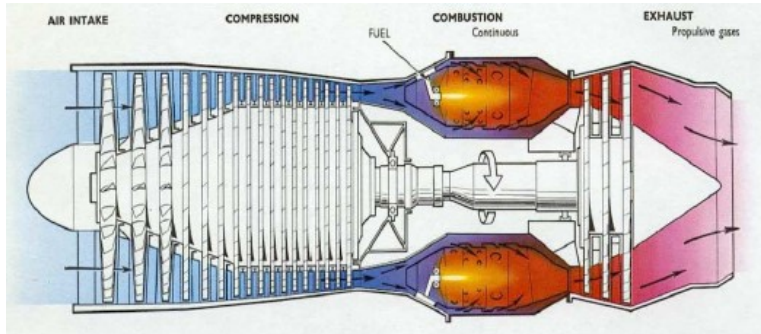
- 1.1 Diagramme de Raveau
- 1.2 Cycle et rendement de Carnot
- 1.3 Une grande variété de machines

2 Exemple d'une machine motrice : le turboréacteur

- 2.1 Description
- 2.2 Cycle de Joule-Breyton
- 2.3 Calcul du rendement

3 Le turboréacteur en pratique

- 3.1 Dimensionnement
- 3.2 Facteurs d'irréversibilité
- 3.3 Zoom sur la tuyère



source : Olivier Bonnefoy.

Dans un turboréacteur, on trouve un compresseur, une chambre de combustion, une turbine qui entraîne le compresseur et une tuyère.

1 Thermodynamique des machines dithermes

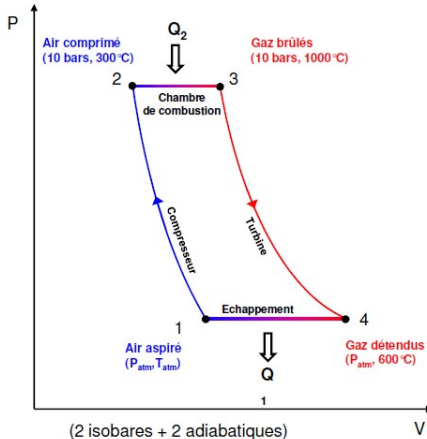
- 1.1 Diagramme de Raveau
- 1.2 Cycle et rendement de Carnot
- 1.3 Une grande variété de machines

2 Exemple d'une machine motrice : le turboréacteur

- 2.1 Description
- 2.2 Cycle de Joule-Breyton
- 2.3 Calcul du rendement

3 Le turboréacteur en pratique

- 3.1 Dimensionnement
- 3.2 Facteurs d'irréversibilité
- 3.3 Zoom sur la tuyère



- 2 adiabatiques
- 2 isobares
- différent d'un cycle de Rankine car la compression n'est pas négligeable

source : Olivier Bonnefoy.

1 Thermodynamique des machines dithermes

- 1.1 Diagramme de Raveau
- 1.2 Cycle et rendement de Carnot
- 1.3 Une grande variété de machines

2 Exemple d'une machine motrice : le turboréacteur

- 2.1 Description
- 2.2 Cycle de Joule-Breyton
- 2.3 Calcul du rendement

3 Le turboréacteur en pratique

- 3.1 Dimensionnement
- 3.2 Facteurs d'irréversibilité
- 3.3 Zoom sur la tuyère

Sur les adiabatiques $W = \Delta H = c_p \delta T$ Sur les isobares $Q = \Delta H$
On en déduit :

$$\eta = \frac{-W_2 - W_1}{Q_1} = -\frac{T_4 - T_3 + T_2 - T_1}{T_3 - T_2}$$
$$\eta = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

Sur les adiabatiques, on applique la loi de Laplace : $\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$ D'où

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{1}{\Pi}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \text{ avec } \Pi = \frac{P_2}{P_1}$$

1 Thermodynamique des machines dithermes

- 1.1 Diagramme de Raveau
- 1.2 Cycle et rendement de Carnot
- 1.3 Une grande variété de machines

2 Exemple d'une machine motrice : le turboréacteur

- 2.1 Description
- 2.2 Cycle de Joule-Breyton
- 2.3 Calcul du rendement

3 Le turboréacteur en pratique

- 3.1 Dimensionnement
- 3.2 Facteurs d'irréversibilité
- 3.3 Zoom sur la tuyère

En pratique c'est T_3 qui va limiter l'énergie récupérable :

$$\begin{aligned}W_{\text{récup}} &= -c_p(T_4 - T_3) - c_p(T_2 - T_1) \\&= c_p T_1 \left[\frac{T_3}{T_1} \left(1 - \left(\frac{1}{\Pi} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) - \left(\Pi^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \right] \\&= c_p T_1 \left[\tau \left(1 - \Pi^{-\lambda} \right) - \left(\Pi^{\lambda} - 1 \right) \right]\end{aligned}$$

avec $\tau = \frac{T_3}{T_1}$ et $\lambda = \frac{\gamma-1}{\gamma} > 0$, d'où $\Pi^{\lambda} > 1$

On montre que

$$\frac{dW_{\text{récup}}}{d\Pi} = \lambda \Pi^{\lambda-1} \frac{dW_{\text{récup}}}{d\Pi^{\lambda-1}} = 0 \text{ pour } \Pi^{2\lambda} = \tau \text{ soit } \Pi = \left(\frac{T_3}{T_1} \right)^{\frac{\lambda}{2}}$$

$$\text{alors } \eta = 1 - \sqrt{\frac{T_1}{T_3}}$$

1 Thermodynamique des machines dithermes

- 1.1 Diagramme de Raveau
- 1.2 Cycle et rendement de Carnot
- 1.3 Une grande variété de machines

2 Exemple d'une machine motrice : le turboréacteur

- 2.1 Description
- 2.2 Cycle de Joule-Breyton
- 2.3 Calcul du rendement

3 Le turboréacteur en pratique

- 3.1 Dimensionnement
- 3.2 Facteurs d'irréversibilité
- 3.3 Zoom sur la tuyère

rendement et travail récupérable réels

Limités par les frottements et la perte de charge

$$\eta_{\text{réel}} = \frac{\tau \eta_t \left(1 - \frac{1}{\Pi^\lambda}\right) - \frac{1}{\eta_c} (\Pi^\lambda - 1)}{(\tau - 1) - \frac{1}{\eta_c} (\Pi^\lambda - 1)} \quad (1)$$

$$W_{\text{réel}} = c_p T_1 \left[\tau \eta_t \left(1 - \frac{1}{\Pi^\lambda}\right) - \frac{1}{\eta_c} (\Pi^\lambda - 1) \right] \quad (2)$$

1 Thermodynamique des machines dithermes

- 1.1 Diagramme de Raveau
- 1.2 Cycle et rendement de Carnot
- 1.3 Une grande variété de machines

2 Exemple d'une machine motrice : le turboréacteur

- 2.1 Description
- 2.2 Cycle de Joule-Breyton
- 2.3 Calcul du rendement

3 Le turboréacteur en pratique

- 3.1 Dimensionnement
- 3.2 Facteurs d'irréversibilité
- 3.3 Zoom sur la tuyère

Voir :

- tuyère de Laval
- relation de Hugoniot
- calculs de poussée dans Chèze et Bauer

Conclusion

- Ouverture sur importance industrielle des concepts présentés
- Plus grosse machine thermique du monde c'est le système océan-atmosphère.

Bibliographie

- Énergétique, Chèze & Bauer
- Machines thermiques, éléments de cours, Bonnefoy (Mines de Saint-Étienne)
- Thermodynamique appliquée, Cycles moteurs, Parente (ULB)