

MEC1210 THERMODYNAMIQUE

ENSEIGNANT: MARTIN GARIÉPY
BUREAU: JAB-5067
TELEPHONE: (514)340-4711 ext. 7450
COURRIEL: martin.gariepy@polymtl.ca

SEPTEMBRE 2011

D'après les notes de cours de Pr. Huu Duc Vo



Cycles thermodynamiques communs

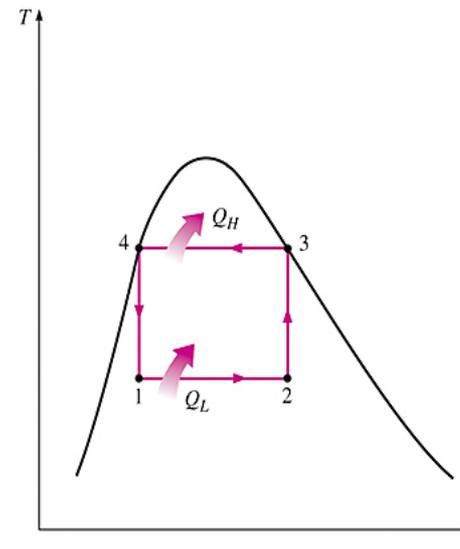
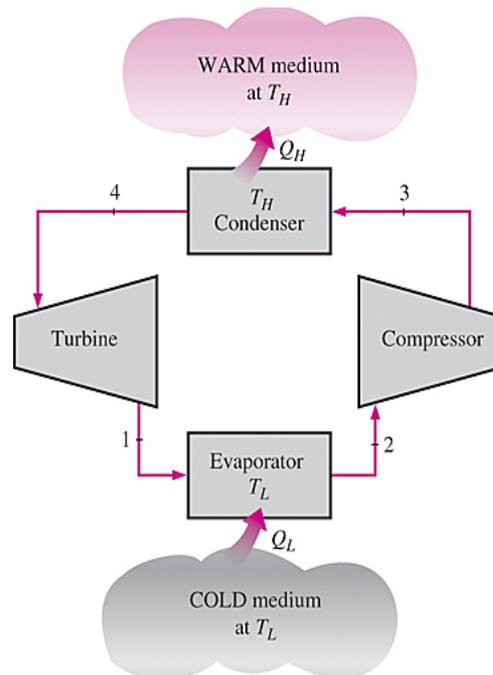
OBJECTIFS

- Analyser les cycles de puissance à vapeur;
- Étudier les diverses modifications du cycle de Rankine;
- Discuter du fonctionnement des machines frigorifiques;
- Décrire les principaux éléments et le fonctionnement des moteurs à combustion interne;
- Résoudre des problèmes portant sur les cycles Otto, Diesel, et de Brayton



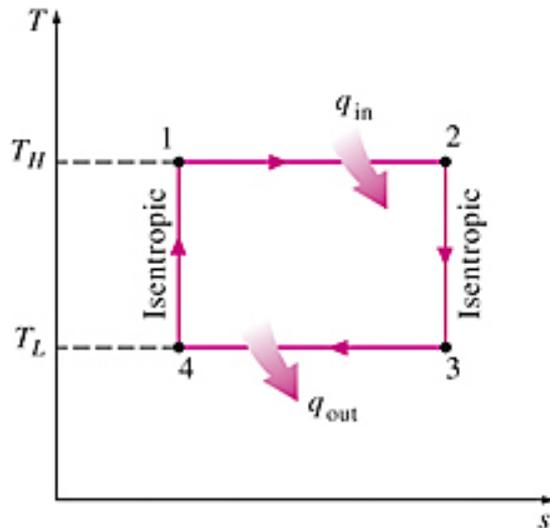
Les cycles de puissance à vapeur

- Le fluide moteur est évaporé puis condensé
- La plupart des centrales thermiques et nucléaires fonctionnent selon des cycles à vapeur



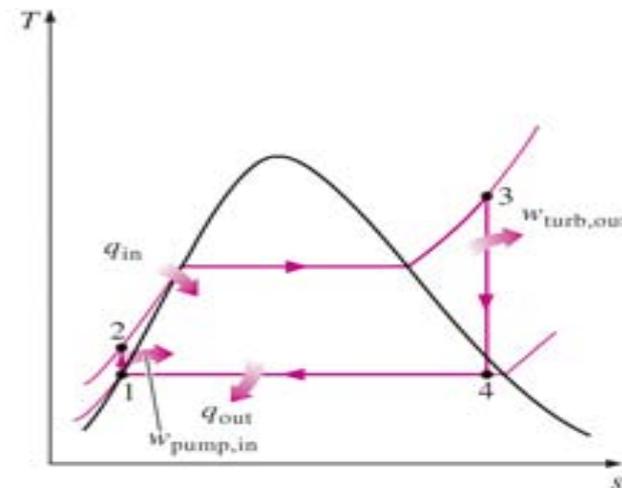
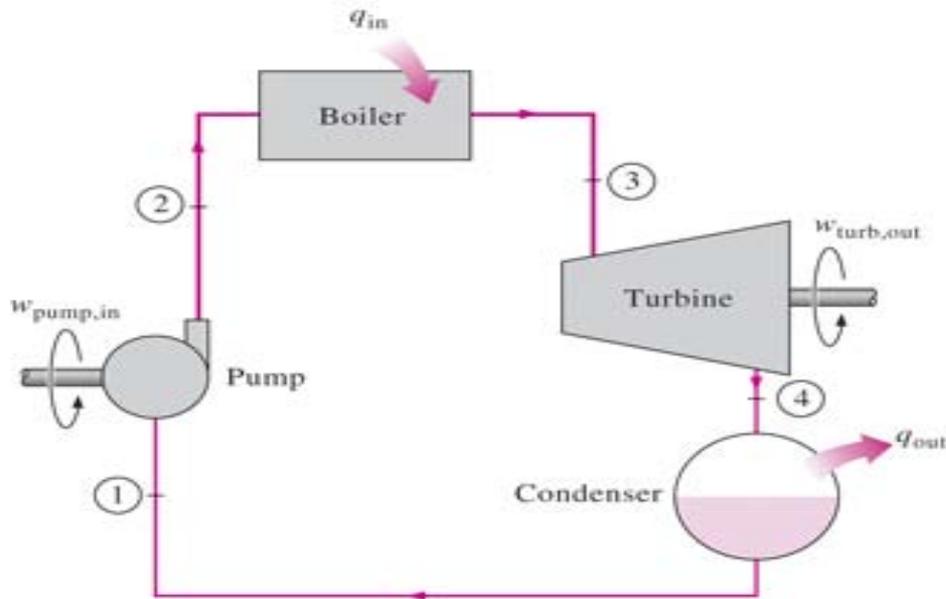
Le cycle Carnot à vapeur

- Cycle thermique le plus efficace qui peut être réalisé à l'aide de deux réservoirs thermiques donnés.
- **1-2** l'eau est chauffée de façon réversible et isotherme dans la chaudière;
- **2-3** subit une détente isentropique dans la turbine
- **3-4** condensée de façon réversible et isotherme dans le condenseur
- **4-1** compression isentropique dans le compresseur.



Le cycle Rankine idéal

- Cycle **idéal** correspondant à une centrale thermique élémentaire à vapeur d'eau



- Rendement thermique

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}}$$

$$W_{net} = q_{in} - q_{out} = W_{turb,out} - W_{pompe,in}$$

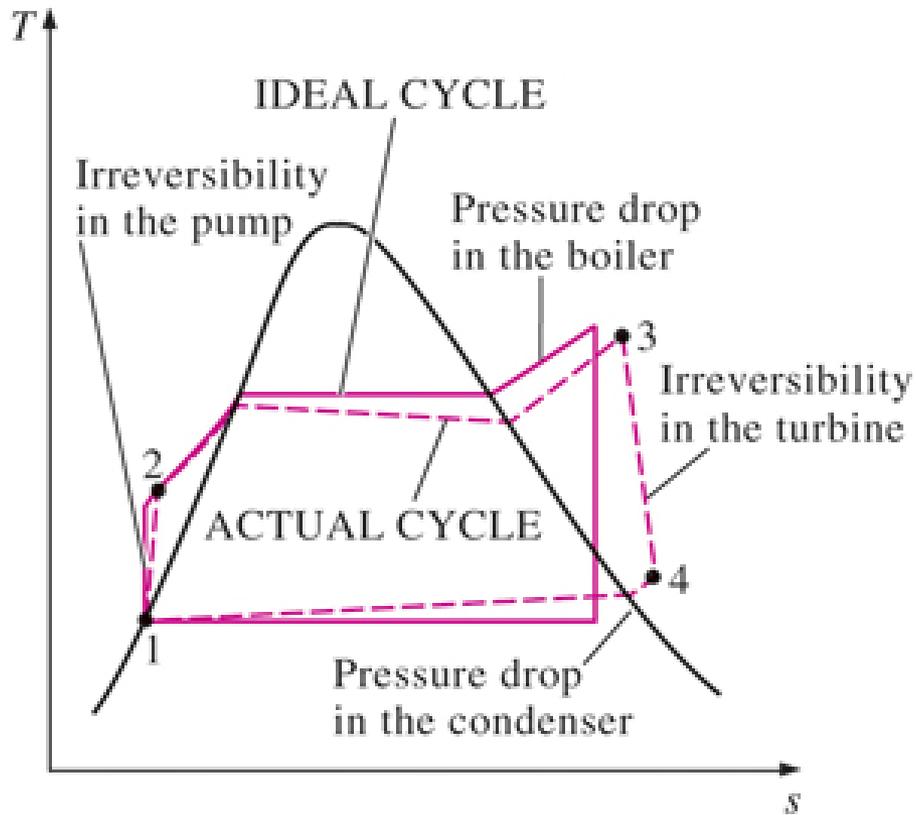


Exemple p.471

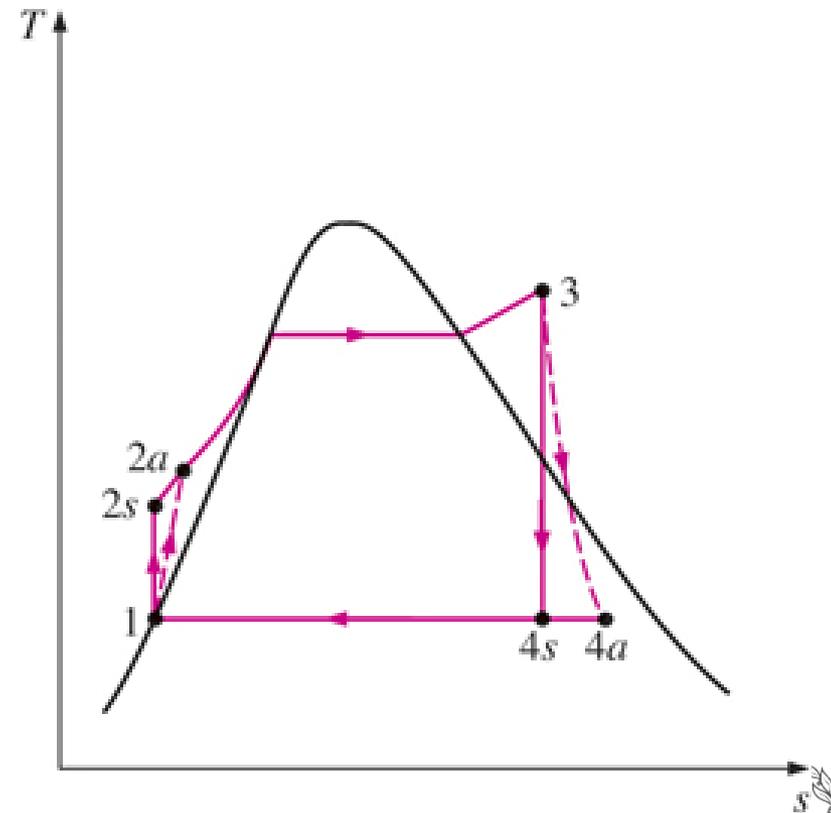
Soit un cycle de Rankine idéal. La vapeur d'eau pénètre dans la turbine à 3 Mpa et à 350 °C, et elle est condensée dans le condenseur à 75 kPa. Déterminez le rendement du cycle.



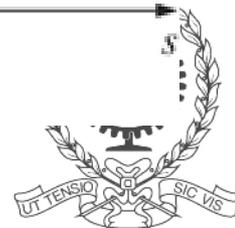
Le cycle Rankine actuel (non idéal)



(a)



(b)



Exemple p.474

Soit une centrale thermique fonctionnant selon un cycle de puissance à vapeur d'eau. Le rendement isentropique de la turbine est de 87 % et celui de la pompe est de 85%. Déterminez:

- Le rendement thermique du cycle
- La puissance nette produite par la centrale, sachant que le débit massique de vapeur est de 15 kg/s

ETAT	P (kPa)	T (°C)	h (kJ/kg)	v (m ³ /kg)
1	9	38		0.001009
2	16000			
3	15900	35	160.1	
4	15200	625	3647.6	
5	15000	600	3583.1	
6	10		2115.3	

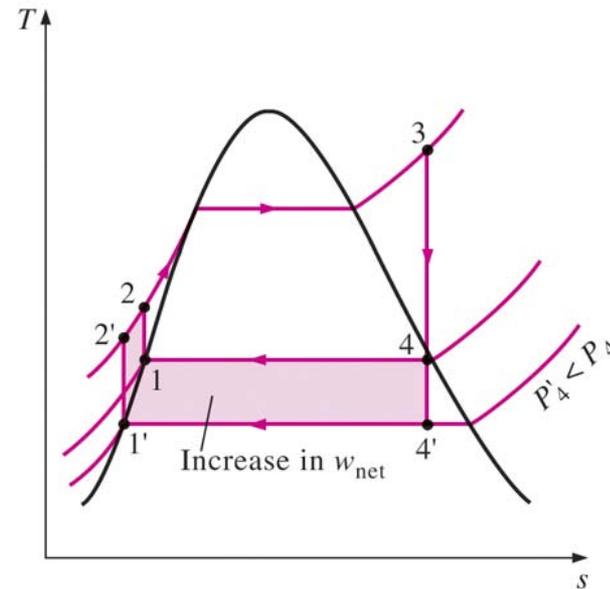


Comment accroître le rendement du cycle de Rankine?

- Augmenter T_H (température à laquelle la chaleur est fournie au fluide) et diminuer T_L (température à laquelle la chaleur est évacuée dans le condenseur)

Pour ce faire, on peut:

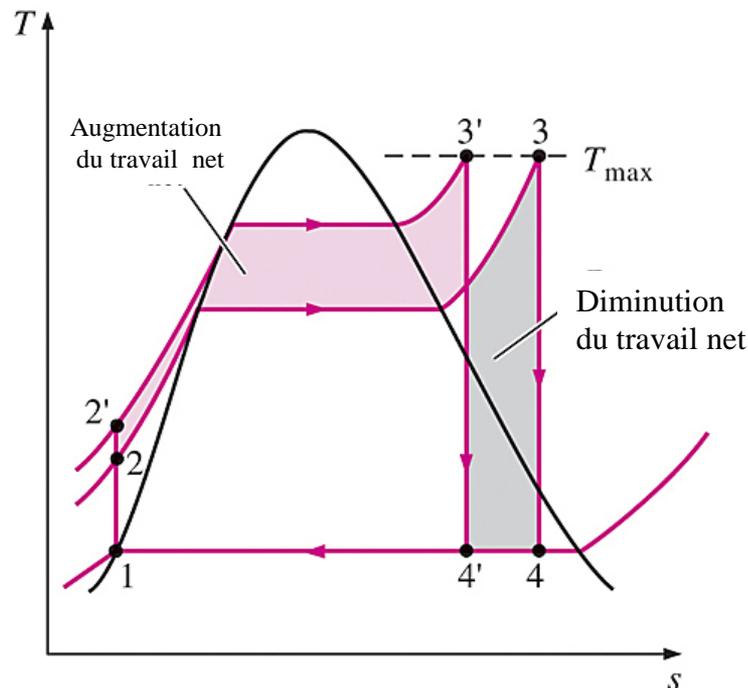
- Diminuer la pression dans le condenseur (a pour effet de diminuer T_L)



Comment accroître le rendement du cycle de Rankine?

Pour ce faire, on peut:

- Chauffer la vapeur à haute température (chaudière)



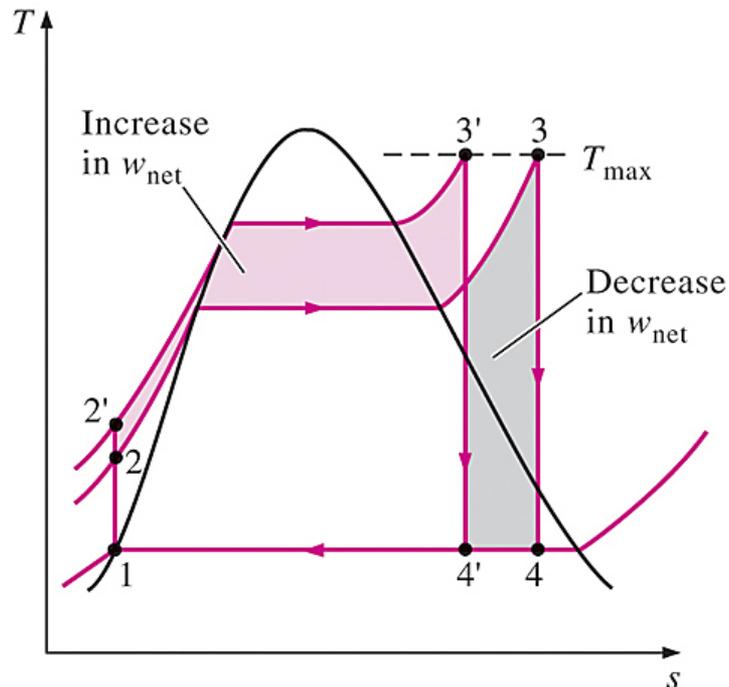
ATTENTION : Des limites structurelles empêchent d'augmenter la température au delà de 620°C



Comment accroître le rendement du cycle de Rankine?

Pour ce faire, on peut:

- Augmenter la pression dans la chaudière



ATTENTION : Des limites structurelles empêchent d'augmenter la pression à plus de 30 MPa



Exemple p.477

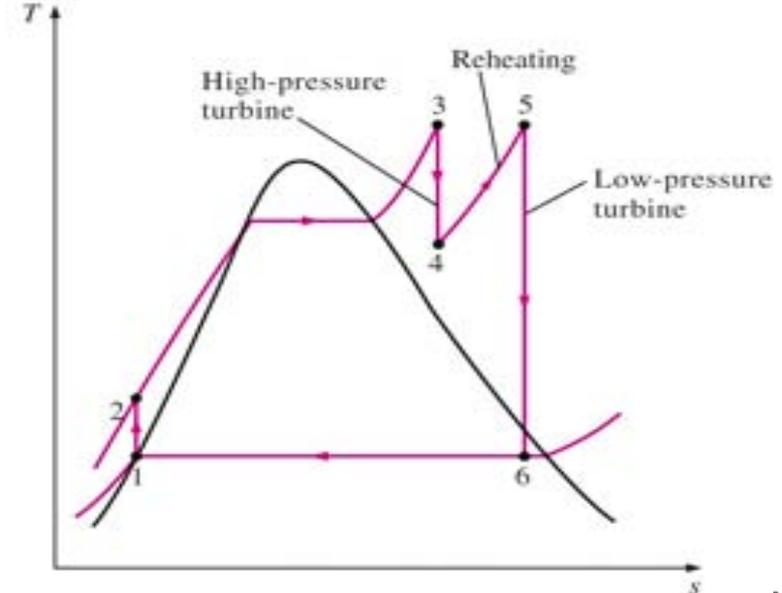
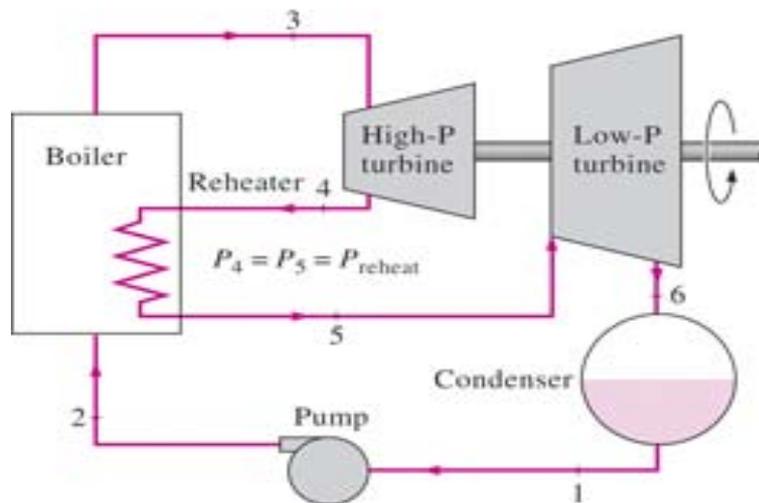
Soit une centrale thermique fonctionnant selon le cycle de Rankine idéal. La vapeur d'eau entre dans la turbine à 3 Mpa et à 350 °C, et elle est condensée dans le condenseur à 10 kPa. Déterminez:

- Le rendement thermique du cycle
- Le rendement thermique si la vapeur est surchauffée à 600 °C
- Le rendement thermique si la pression dans la chaudière est accrue à 15 Mpa et que la température de la vapeur à l'entrée de la turbine est maintenue à 600 °C.



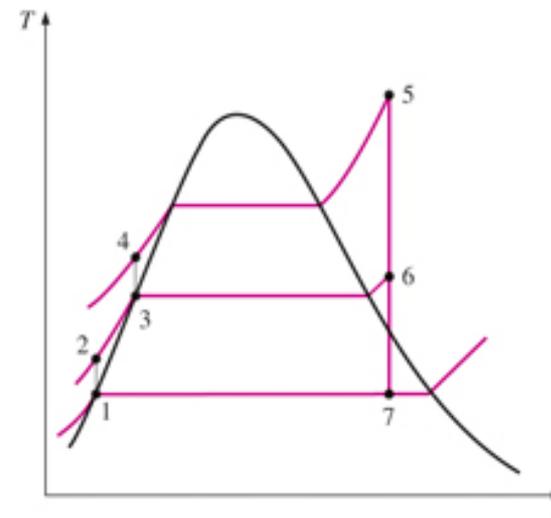
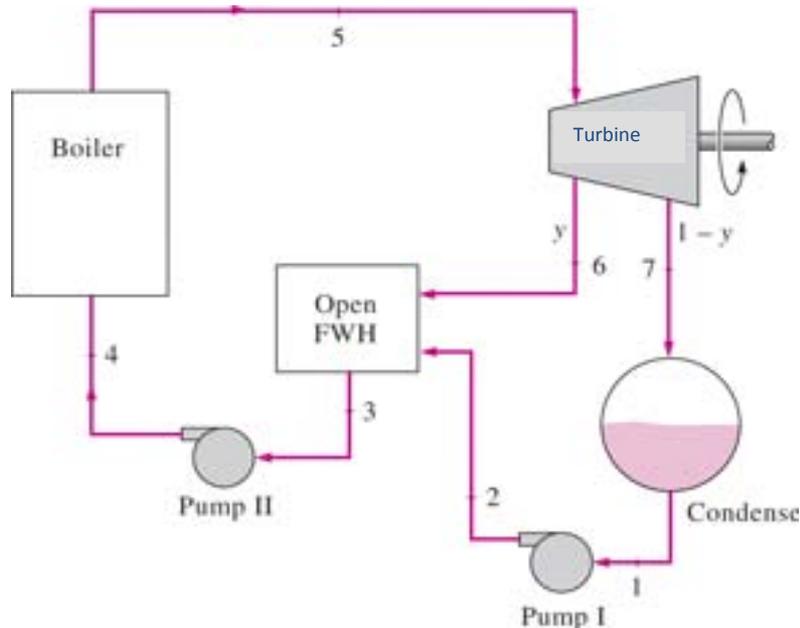
Comment accroître le rendement du cycle de Rankine?

- Par un cycle de resurchauffe
- Insérer un 2ième étage de turbine et rechauffer la vapeur d'eau entre les deux étages pour extraire plus de travail



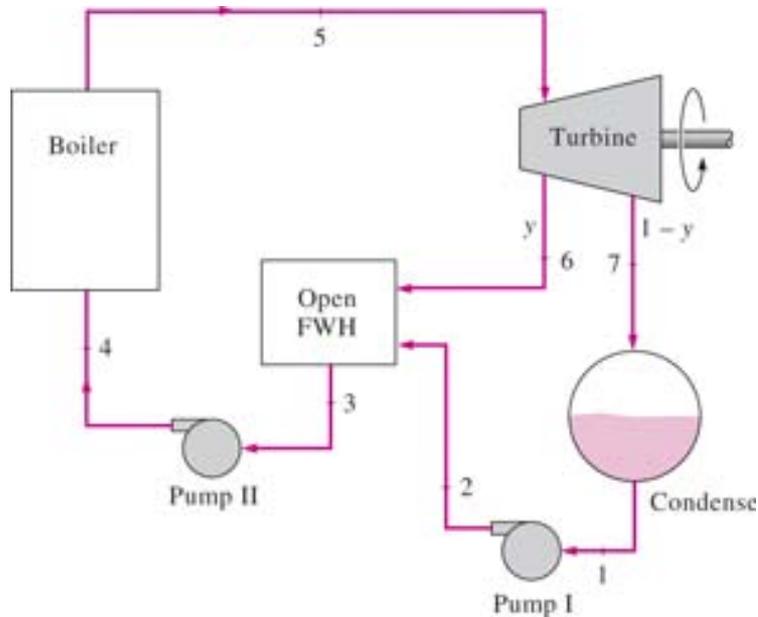
Comment accroître le rendement du cycle de Rankine?

- Par un cycle de régénération
- Chauffer partiellement le fluide avant son entrée dans la chaudière en récupérant une partie de la chaleur sortant de la turbine



Exemple p.477

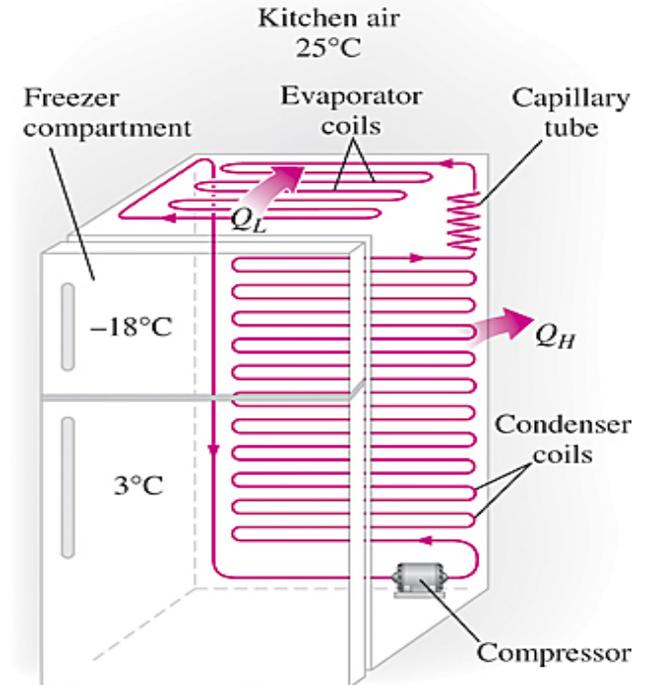
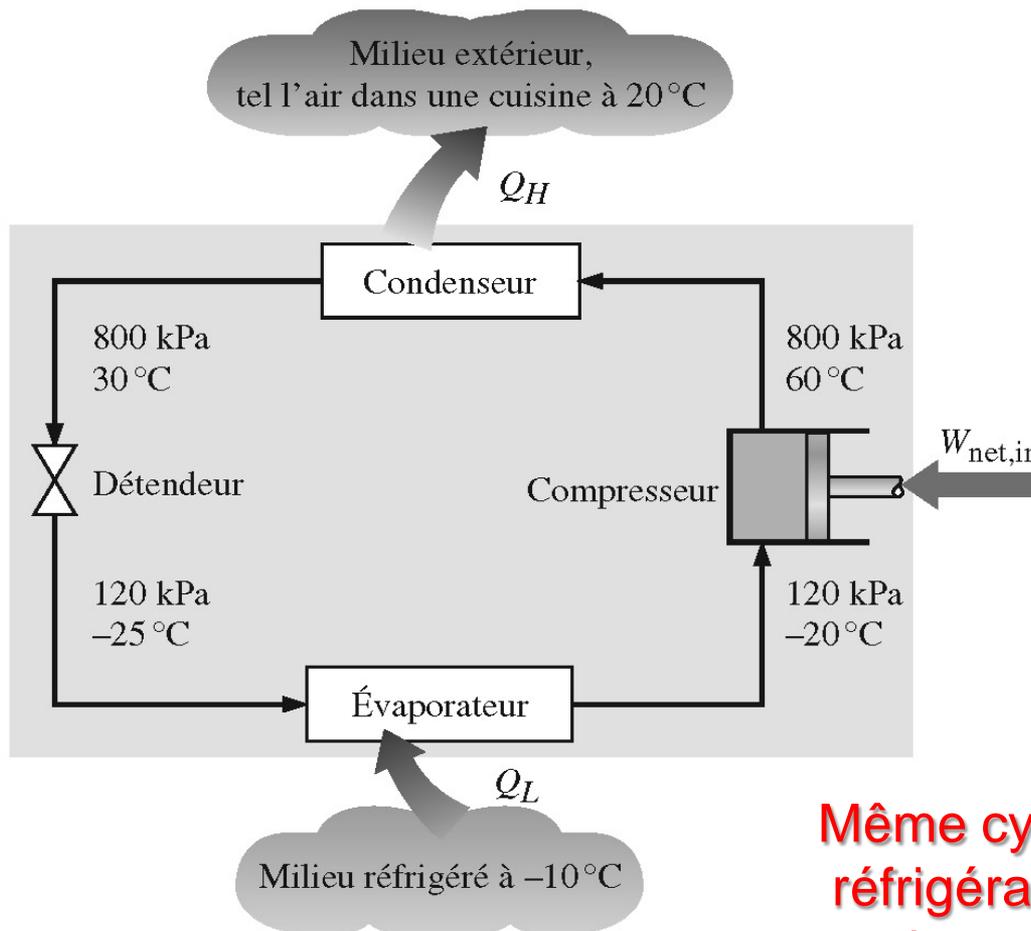
Soit une centrale thermique fonctionnant selon le cycle à régénération idéal avec un seul réchauffeur à mélange. La vapeur d'eau est admise dans la turbine à 15 MPa et à 600 °C, et elle est condensée dans le condenseur à 10 kPa. Une partie de la vapeur est soutirée à 1.2 MPa pour être détournée vers le réchauffeur à mélange. Déterminez la fraction de vapeur soutirée de la turbine et le rendement thermique du cycle.



- P1 = 10 kPa
- P2 = 1.2 MPa
- P3 = 1.2 MPa
- P4 = 15 MPa
- P5 = 15 MPa, T5 = 600 °C
- P6 = 1.2 MPa
- P7 = 10 kPa



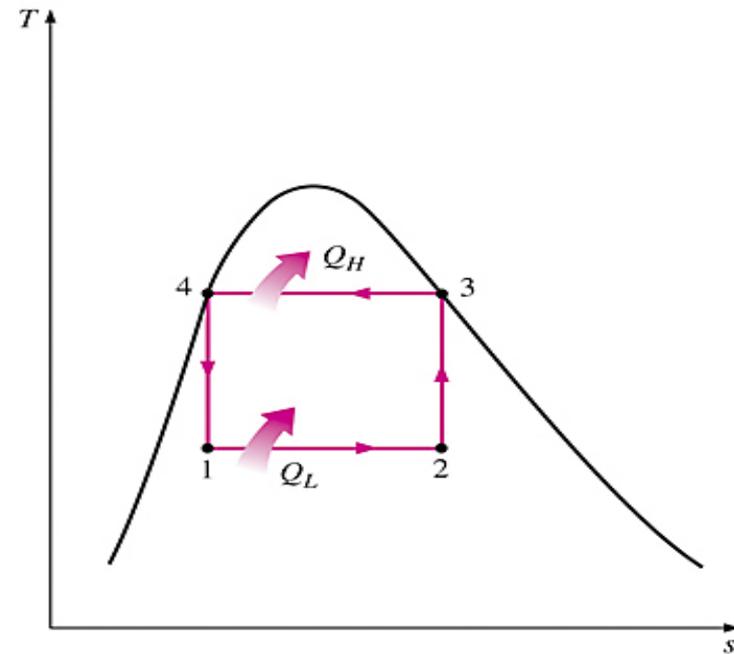
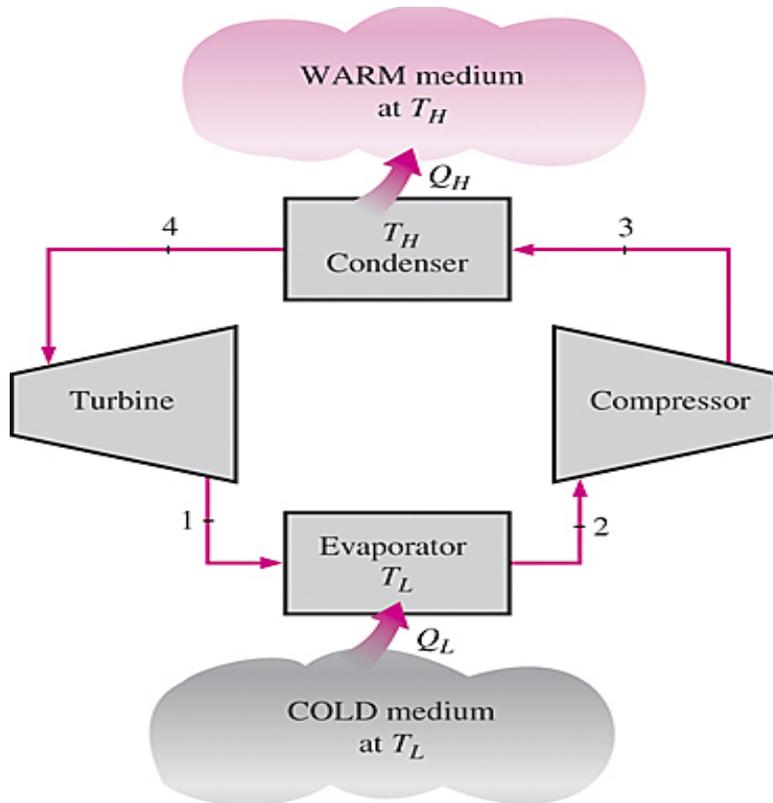
Cycle de réfrigération



Même cycle pour un réfrigérateur et une thermopompe



Cycle de Carnot inversé

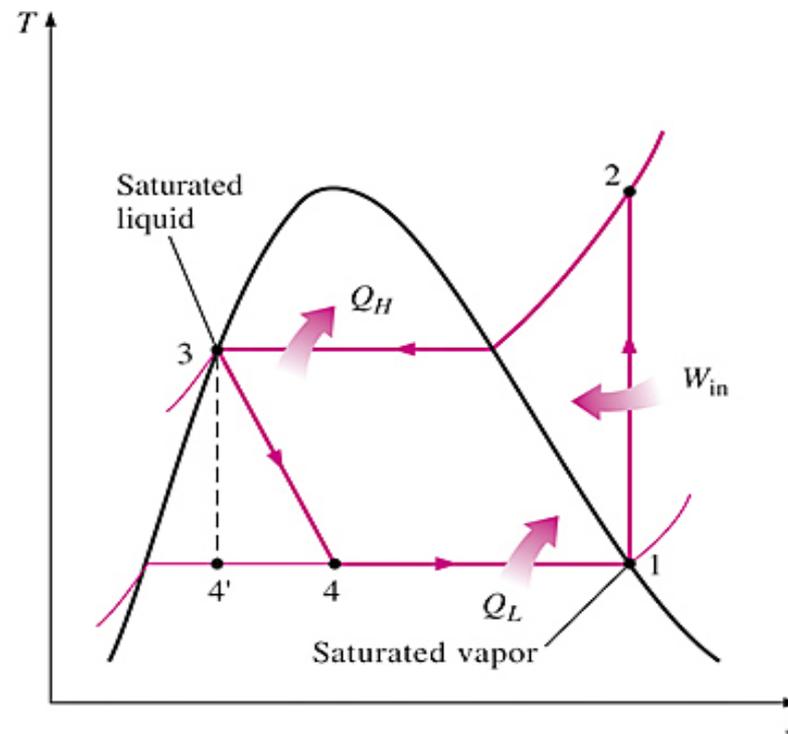
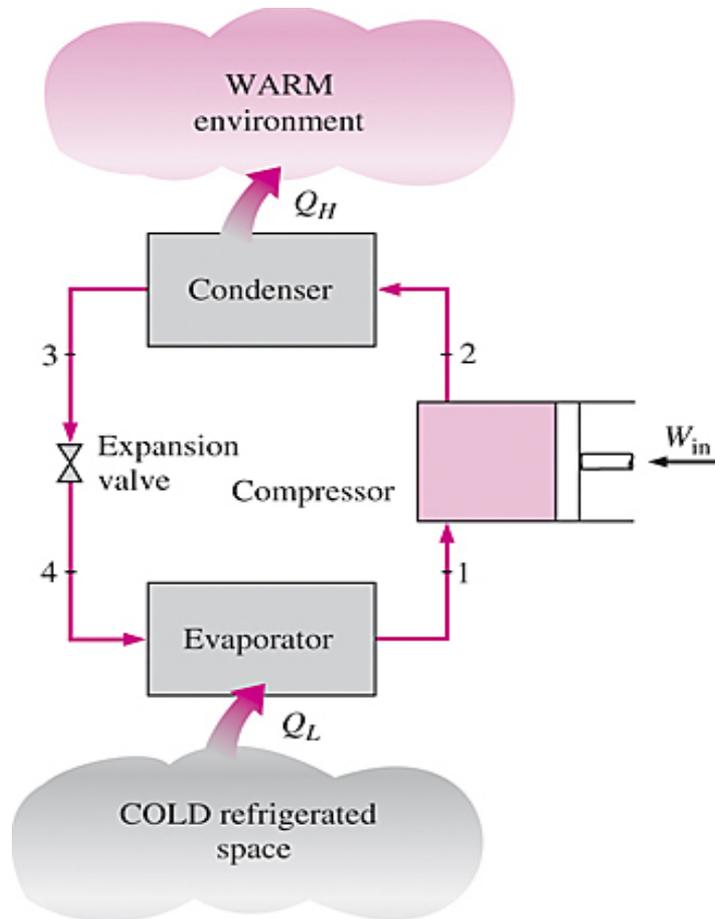


$$COP_{R,Carnot} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1}$$

$$COP_{TP,Carnot} = \frac{1}{1 - \frac{T_L}{T_H}}$$

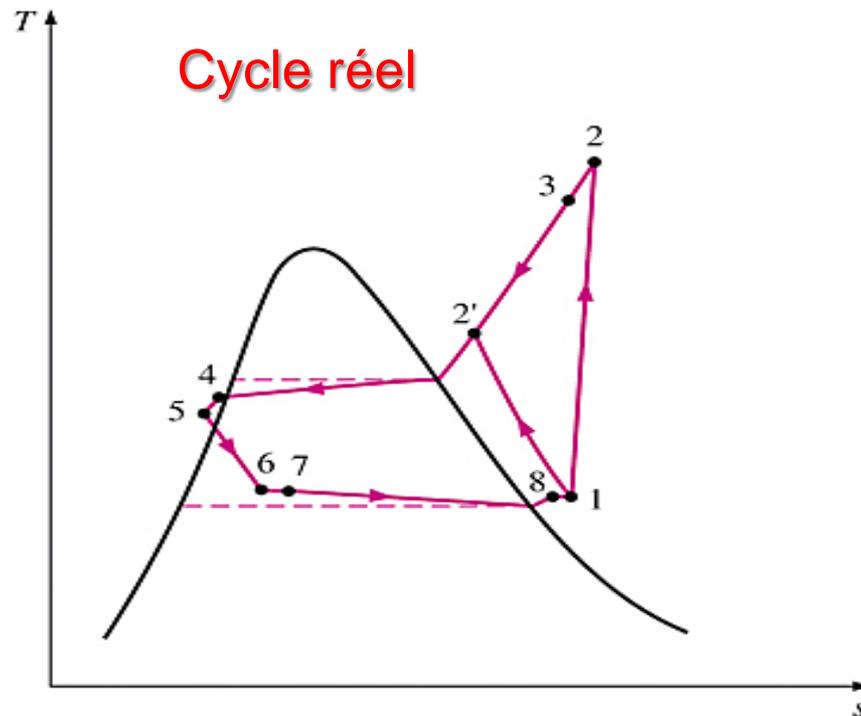


Cycle de Réfrigération à compression de vapeur idéal



Cycle de Réfrigération à compression de vapeur réel

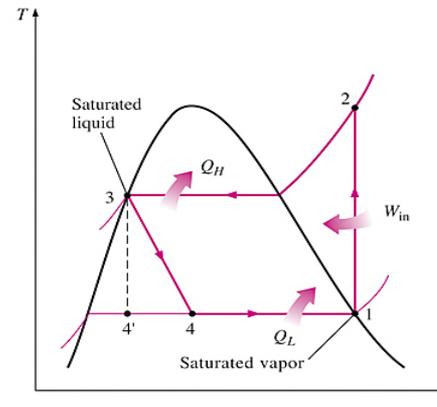
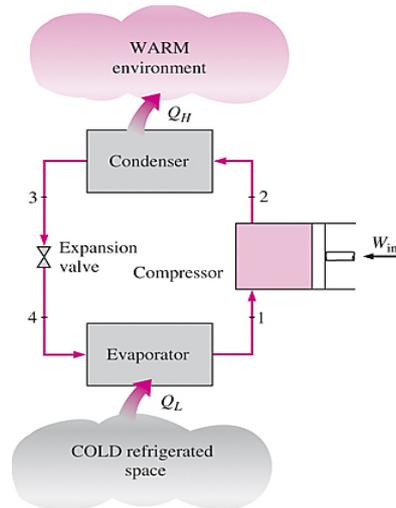
- Compression non-isentropique
- Perte de chaleur le long des conduites
- Perte de pression dans l'évaporateur
- etc



Exemple p.526

Soit un réfrigérateur qui fonctionne selon le cycle de réfrigération à compression de vapeur idéal. Le fluide frigorigène est le R134a. La pression dans le condenseur est de 0.8 MPa, de 0.14 MPa dans l'évaporateur et le débit massique du R134a est de 0.05 kg/s. Déterminez:

- La puissance thermique extraite du milieu réfrigéré et la puissance consommée par le compresseur
- La puissance thermique évacuée dans le milieu extérieur
- Le COP du réfrigérateur



Cycle de moteurs à combustion interne

- Convertit de l'énergie chimique (provenant du combustible) en chaleur et en travail
- Le fluide demeure en phase gazeuse durant tous le cycle
- Pour l'étude des cycles, on émet les hypothèses suivantes:
 - Le fluide est de l'air (pas d'admission ou d'expulsion de gaz chauds provenant de la combustion)
 - Toutes les évolutions sont réversibles
 - Cp et Cv peuvent être pris constant à 25 °C

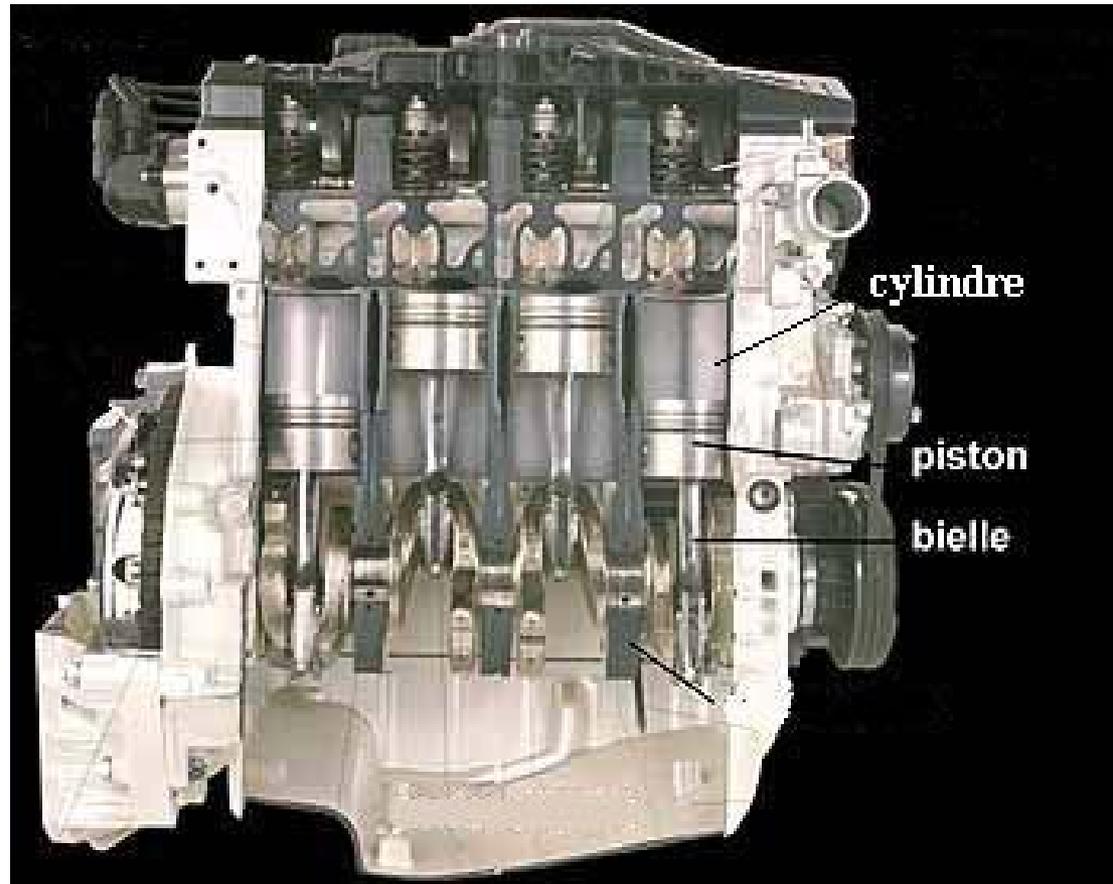
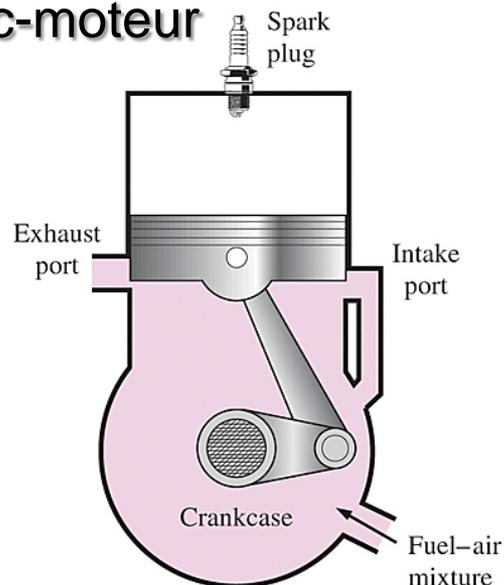
- De façon générale, le rendement est donné par: $\eta_{th} = \frac{W_{net}}{q_{in}}$



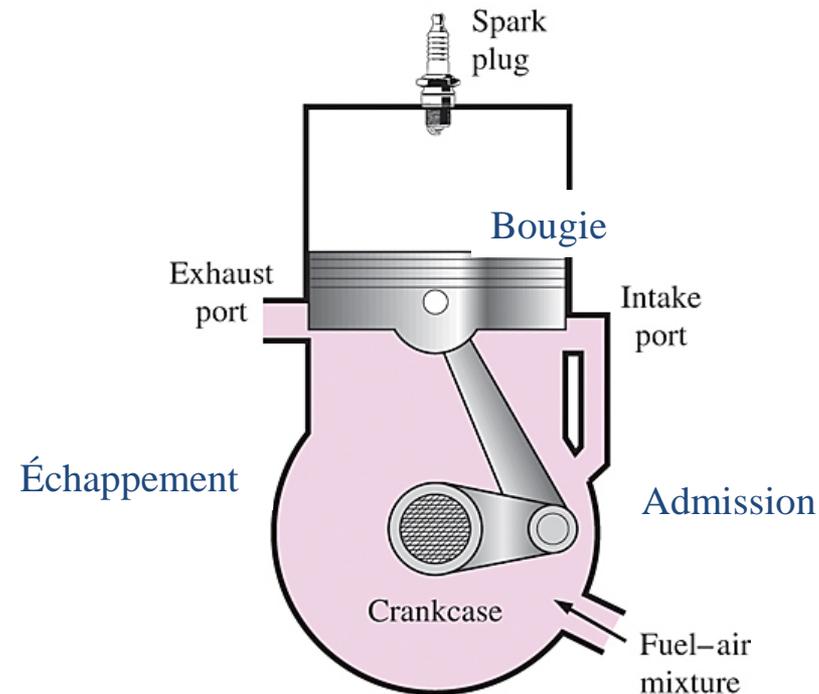
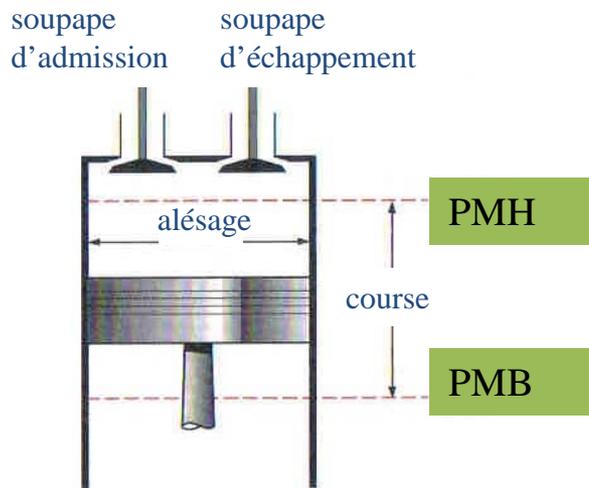
Cycle de moteurs à combustion interne

Un moteur à combustion est principalement composé de:

- 1) Une chambre à combustion
- 2) Un cylindre
- 3) Un piston
- 4) Système bielle-manivelle
- 5) Bloc-moteur



Cycle de moteurs à combustion interne



taux de compression:

$$r \equiv \frac{V_{PMB}}{V_{PMH}}$$

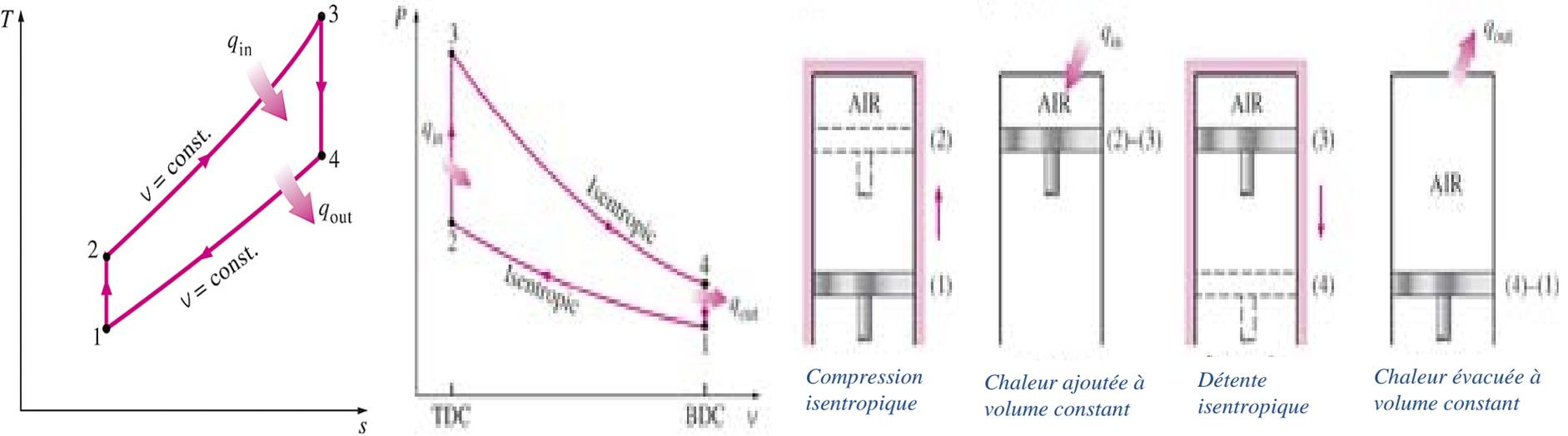
Pression moyenne effective:

$$PME \equiv \frac{W_{net,out}}{V_{PMB} - V_{PMH}}$$

Mélange air-carburant



Le cycle d'OTTO



Cycle d'Otto théorique

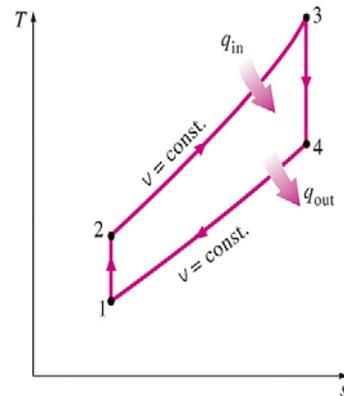


Exemple p.422

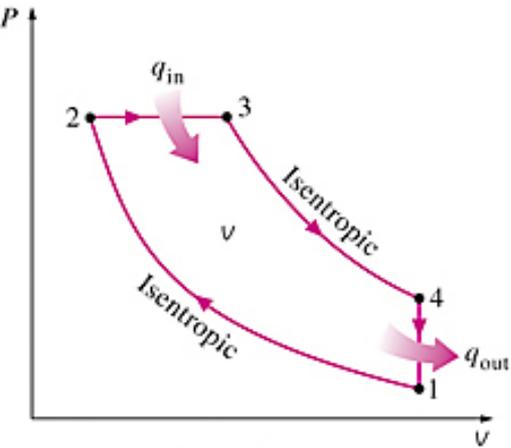
Soit un cycle d'Otto théorique dont le taux de compression est de 8. Au début de la course de compression, l'air se trouve à 100 kPa et à 17 C. La chaleur fournie à l'air par cycle est de 800 kJ/kg. Déterminez:

- La température et la pression maximales du cycle
- Le travail produit
- Le rendement thermique
- La pression moyenne effective du cycle

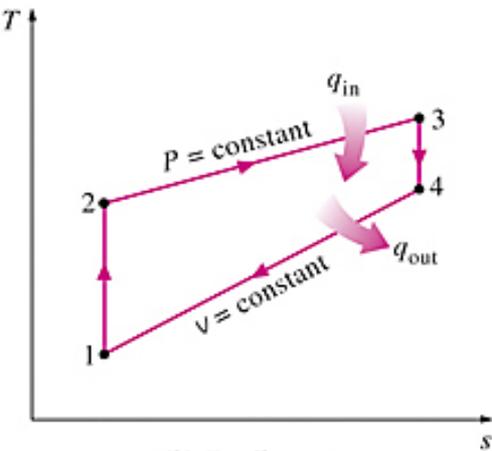
Supposez que les chaleurs massiques de l'air varient en fonction de la température.



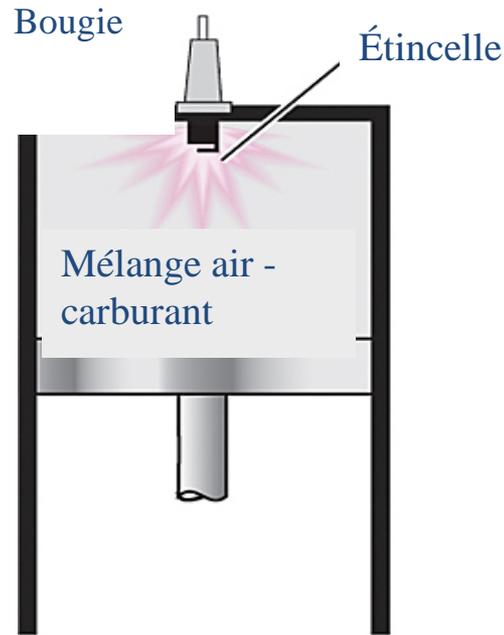
Le cycle DIESEL



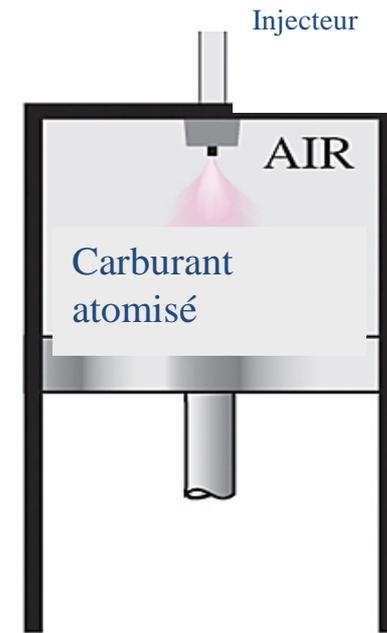
(a) P - v diagram



(b) T - s diagram



Moteur à essence



Moteur Diesel

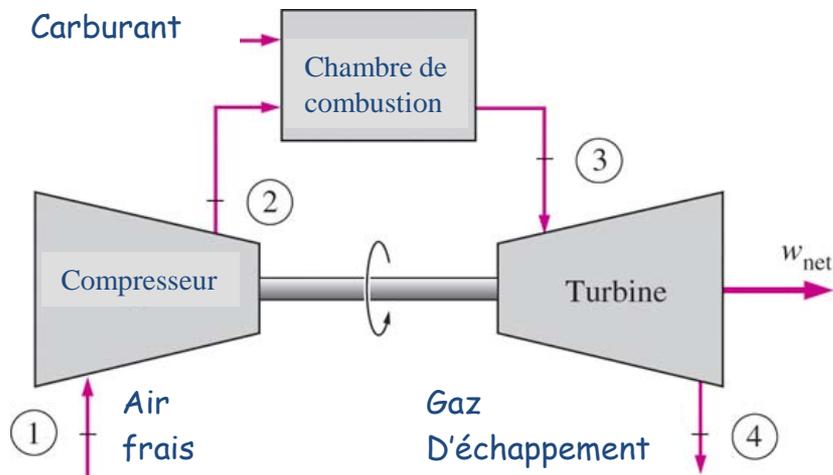


Exemple p.425

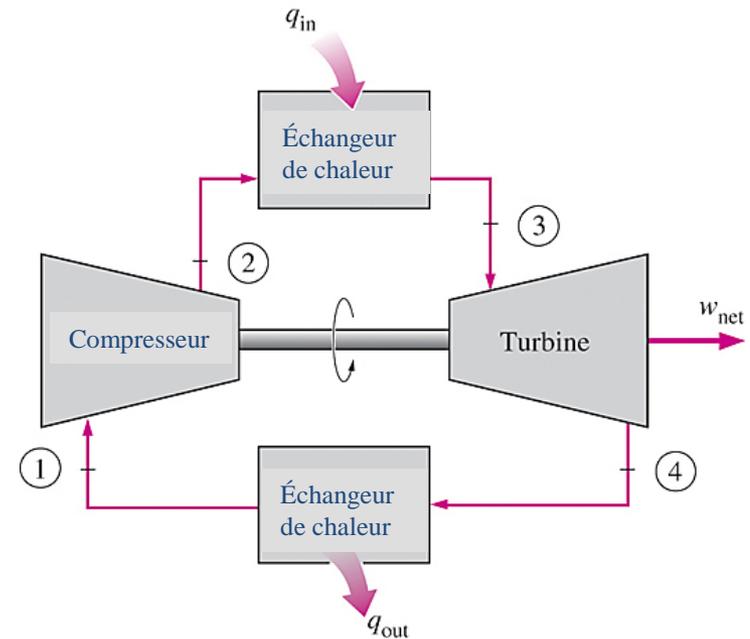
Soit un cycle Diesel dont le taux de compression est de 18. La chaleur transmise au fluide moteur par cycle est de 1800 kJ/kg. Au début de la compression, la pression de l'air est de 100 kPa et la température, de 15 °C. Déterminez le rendement thermique et la pression moyenne effective du cycle.



Cycle de turbine à gaz: le cycle de BRAYTON



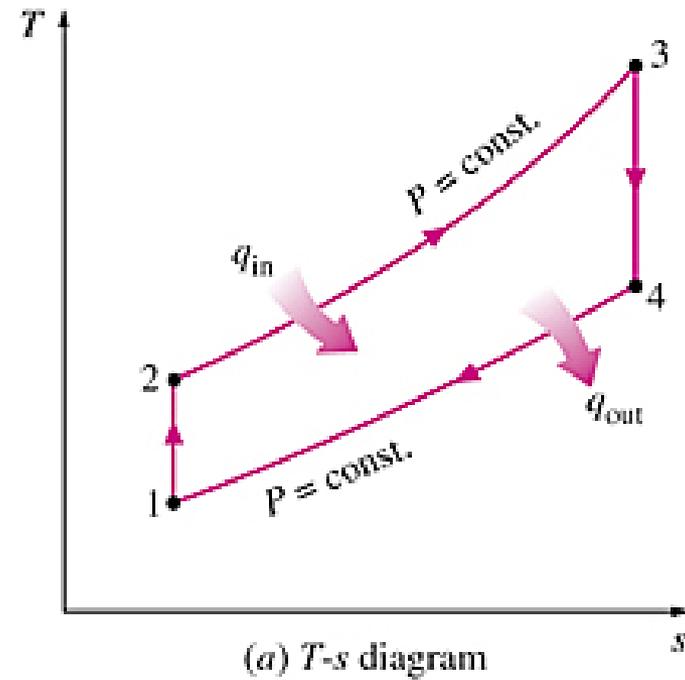
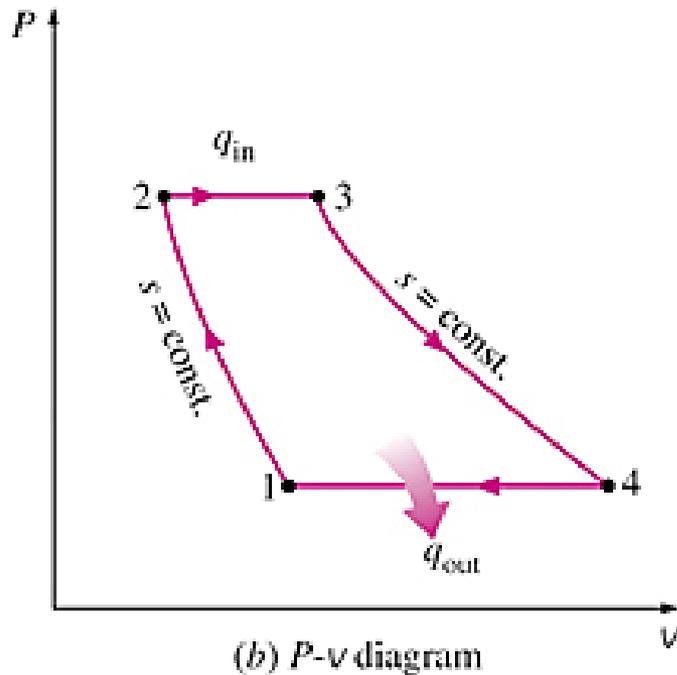
Cycle ouvert



Cycle fermé

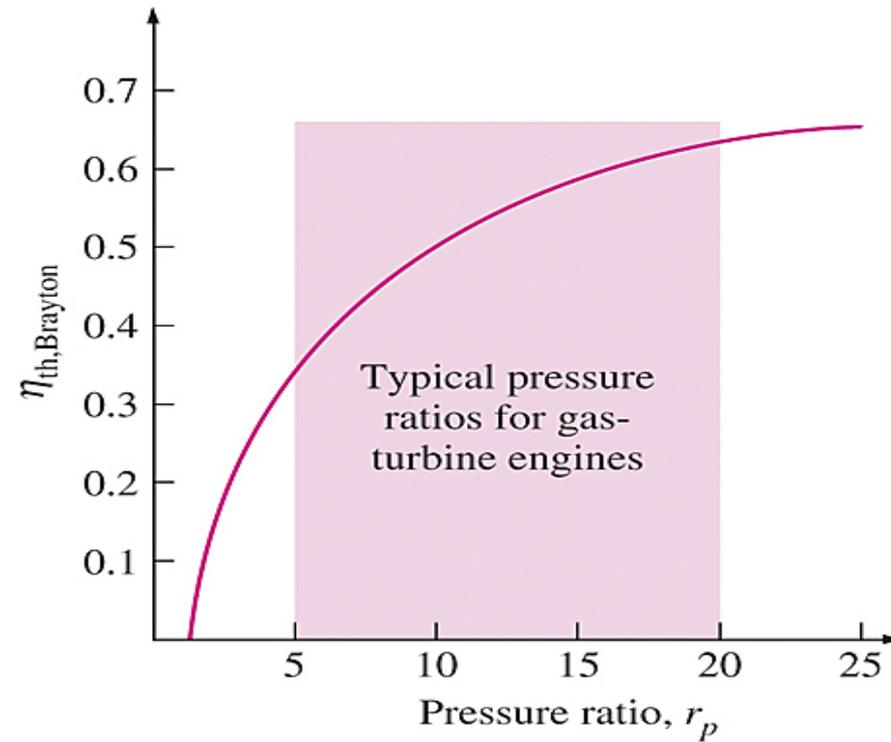


Le cycle de Brayton



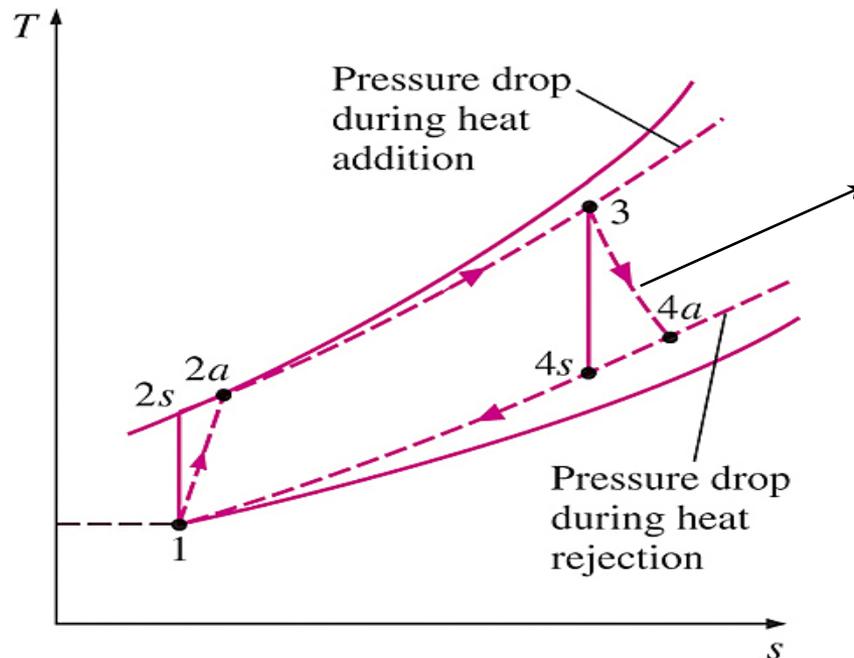
Le cycle de Brayton

$$\eta_{th,Brayton} = 1 - \frac{1}{r_p^{\frac{k-1}{k}}}$$



Le cycle de Brayton

- Écart entre le cycle idéal de la turbine à gaz et le cycle réel (actuel)

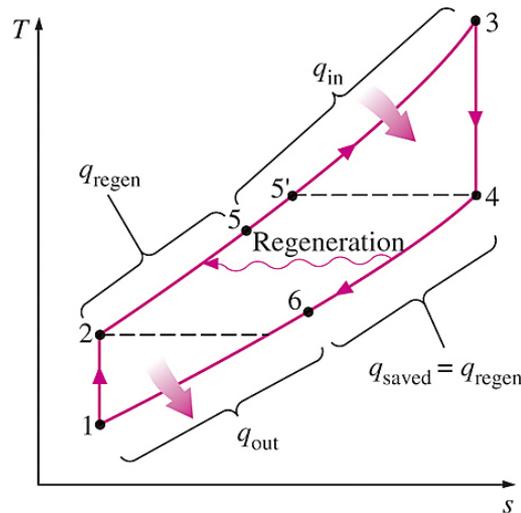
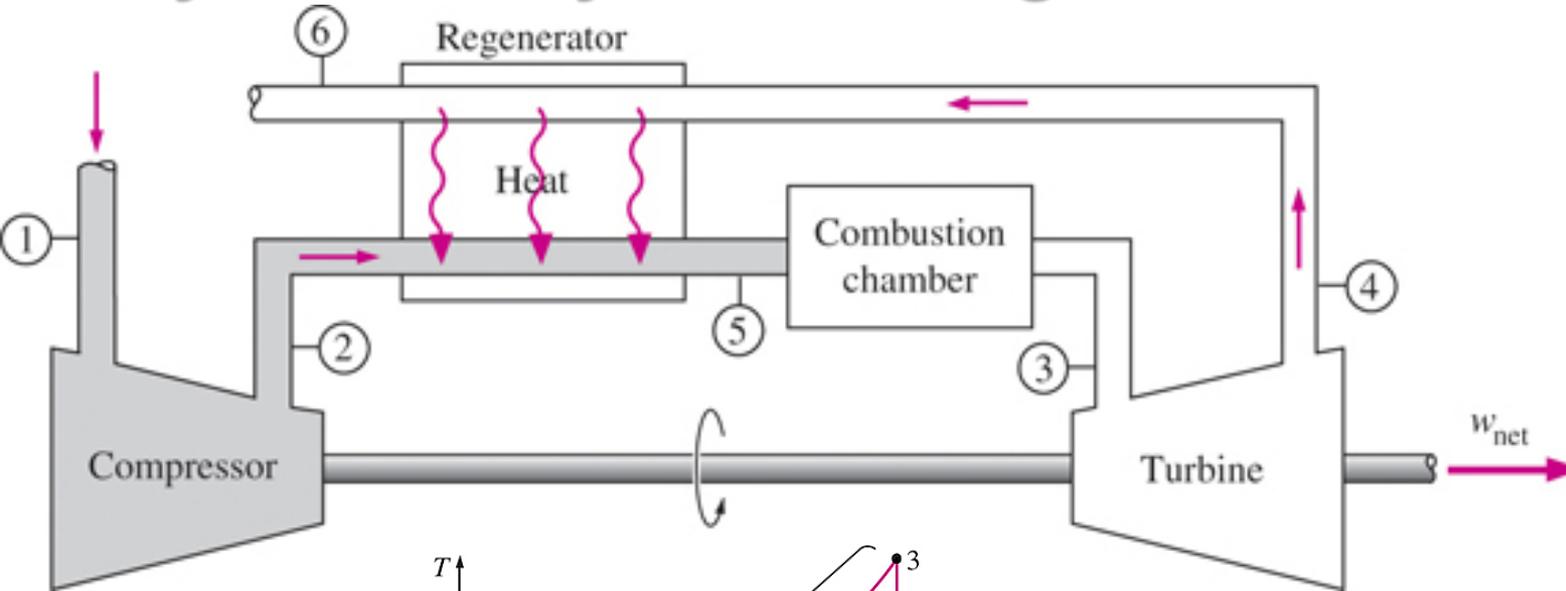


$$\eta_{turbine} = \frac{w_a}{w_s} \approx \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}}$$

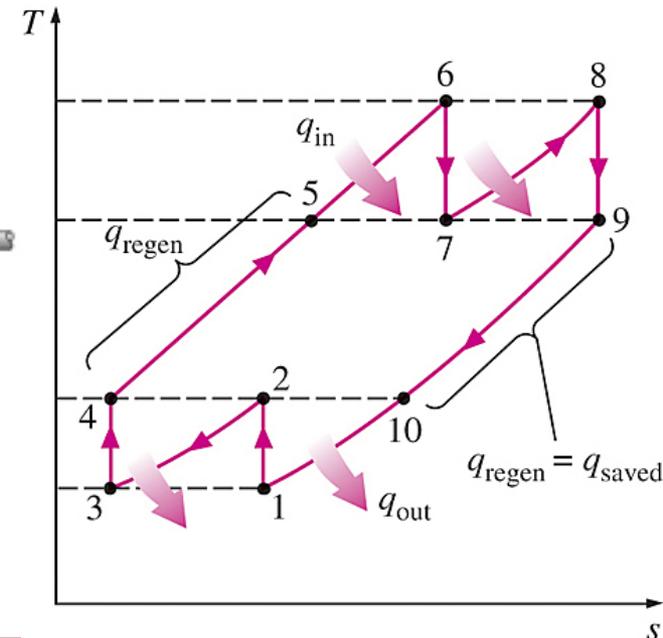
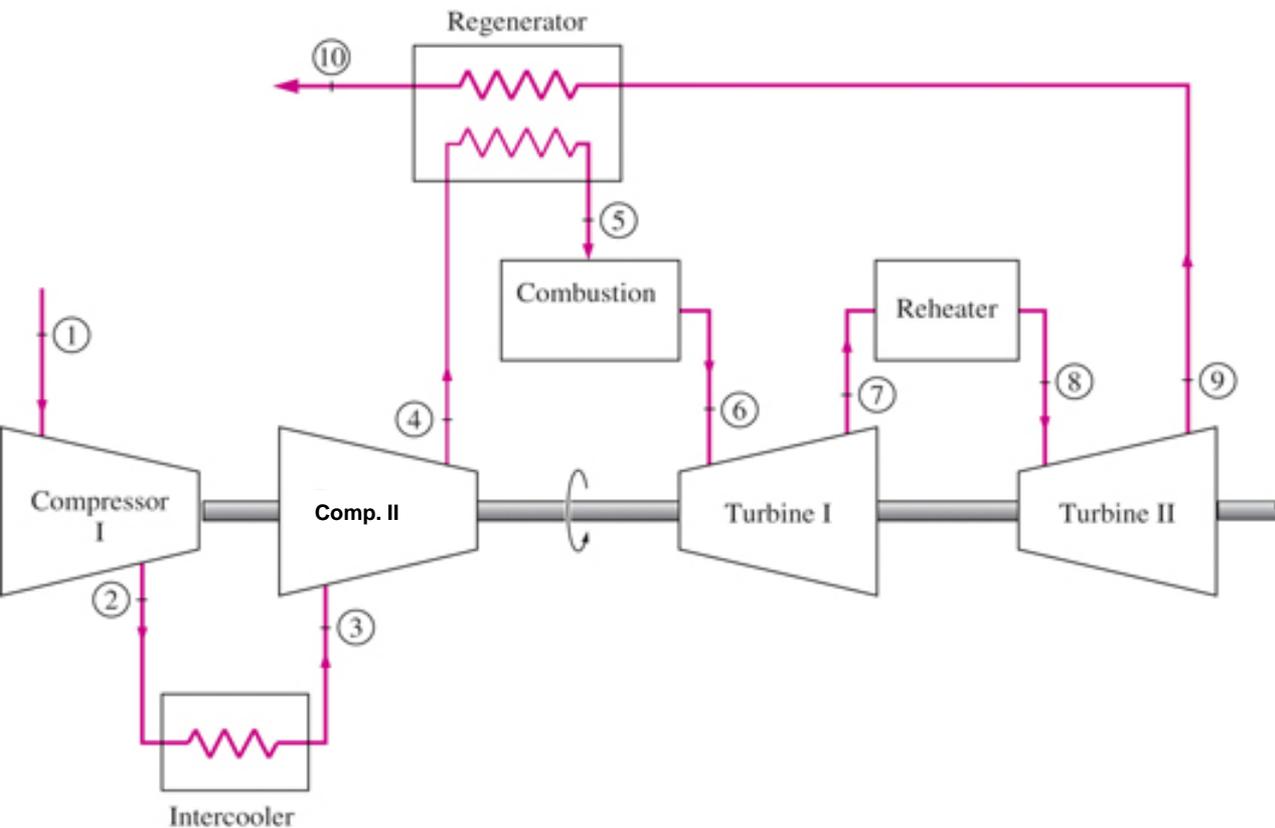
$$\eta_{compresseur} = \frac{w_s}{w_a} \approx \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1}$$



Le cycle de Brayton avec régénération



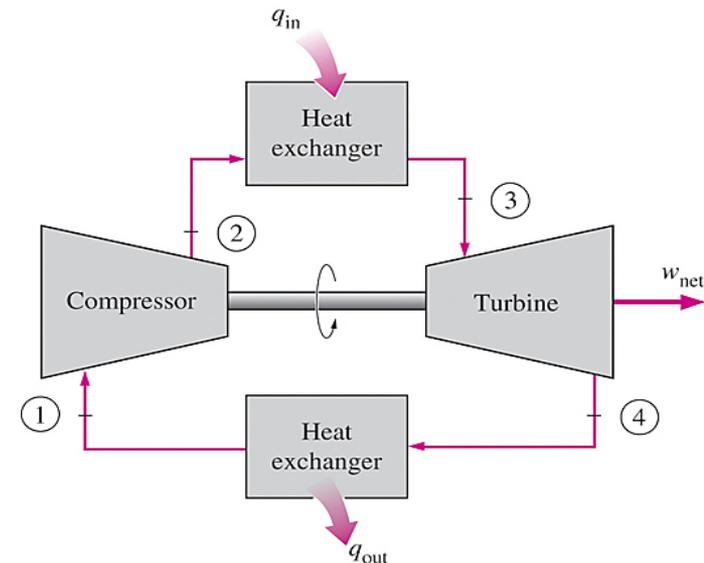
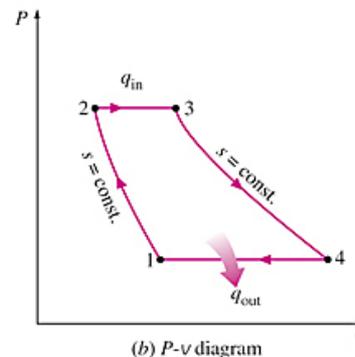
Cycle de Brayton avec refroidissement intermédiaire, réchauffe et régénération



Exemple p. 433

Soit une turbine à gaz fonctionnant selon le cycle de Brayton idéal. Le rapport des pressions est de 8. La température à l'entrée du compresseur est de 300 K et à l'entrée de la turbine, de 1300 K. Déterminez:

- La température du gaz à la sortie du compresseur et de la turbine
- Le rapport du travail consommé par le compresseur au travail que produit la turbine
- Le rendement thermique du cycle

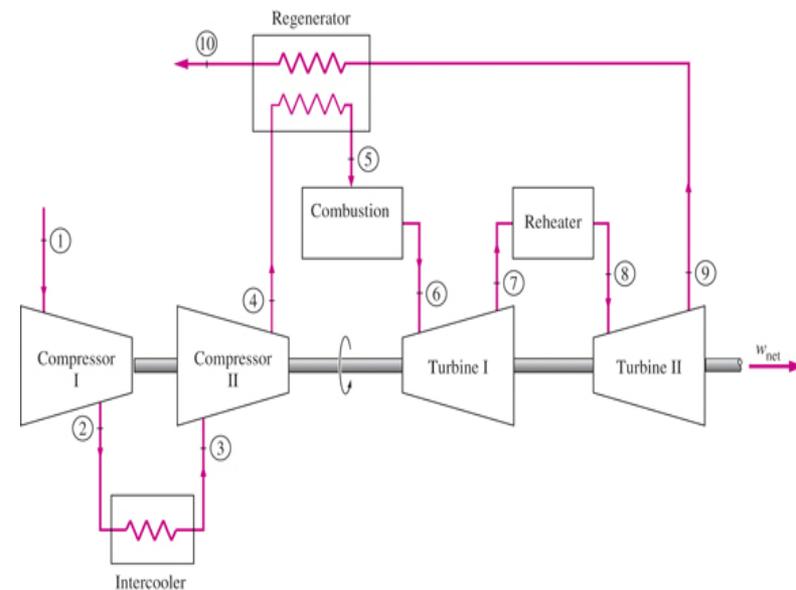


Exemple p. 439

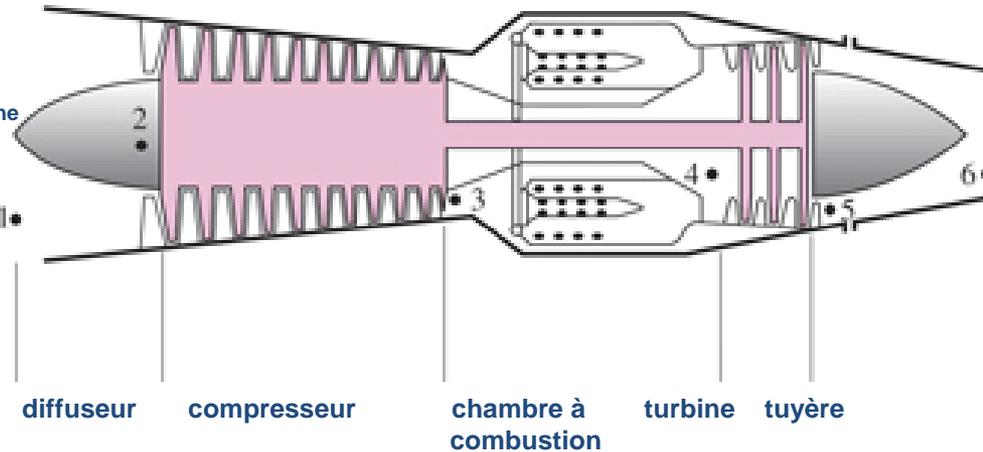
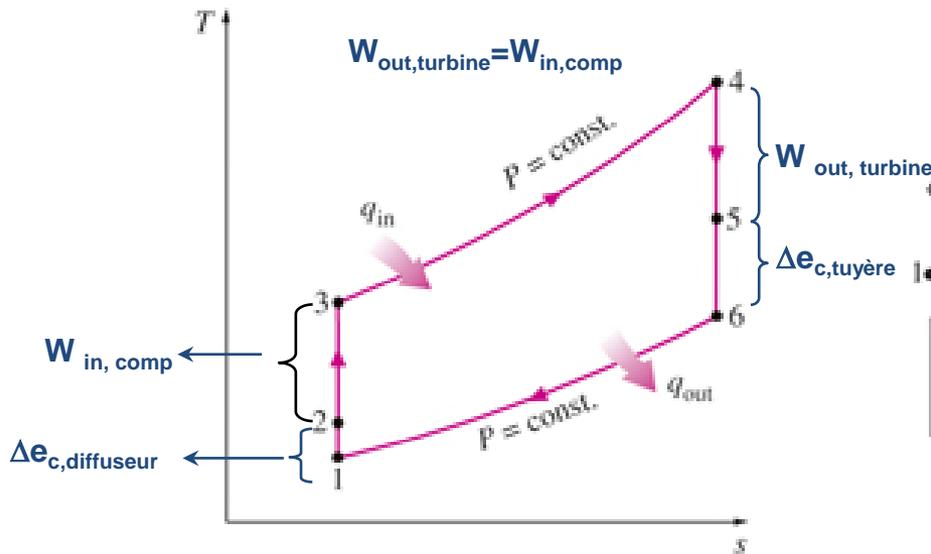
Soit le cycle idéal de la turbine à gaz comprenant deux étages de compression et deux étages de détente. Le rapport de pression est de 8. L'air est admis dans chaque étage de compression à 300 K et dans chaque étage de détente à 1300 K. De plus, il y a un régénérateur dont l'efficacité est de 100 %.

Déterminez:

- Le rapport du travail consommé par le compresseur au travail produit par la turbine
- Le rendement thermique du cycle.



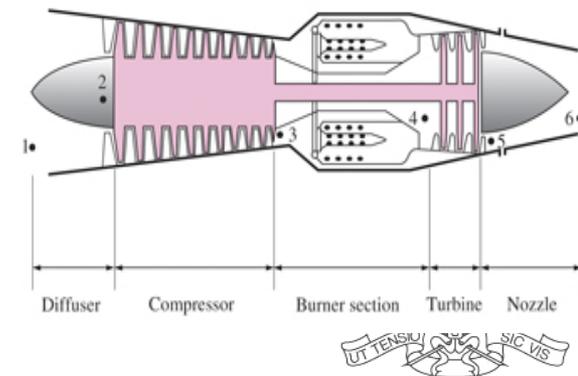
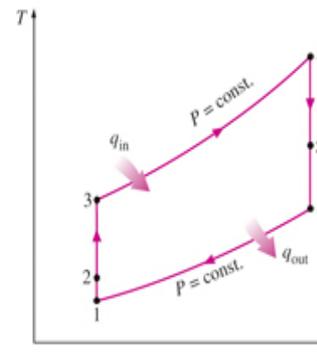
Le cycle théorique de la propulsion par JET



Exemple p. 443

Un avion, propulsé par un turboréacteur, vole à une altitude où la pression atmosphérique est de 35 kPa et la température de l'air extérieur est de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. La vitesse de l'avion est de 260 m/s (936 km/h). Le débit d'air à l'entrée du compresseur est de 45 kg/s et le rapport de pression dans le compresseur, de 10. La température des gaz à l'entrée de la turbine est de $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Déterminez:

- La température et la pression des gaz à la sortie de la turbine
- La vitesse des gaz à la sortie de la tuyère
- Le rendement de propulsion



LECTURE SECTION DU LIVRE

Sections 10.1 à 10.6, 9.3 à 9.5, 9.7 à 9.10, 11.1 à 11.4 du livre, «THERMODYNAMIQUE, une approche pragmatique», Y.A. Çengel, M.A. Boles et M. Lacroix, Chenelière-McGraw-Hill, 2008.

