

# **Chapter 3**

## **Cycles de Puissance à Gaz**

**Prof. Cherif OULD LAHOUCINE**  
**Université du 8 Mai 1945 de Guelma**

# Objectifs

Les objectifs du chapitre 3 sont les suivants:

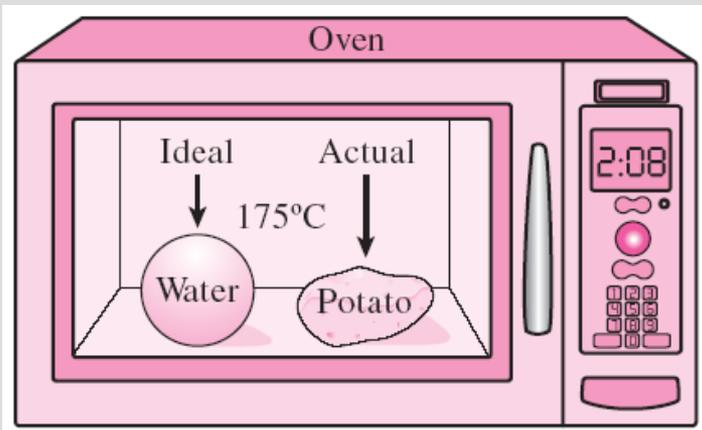
- Évaluer les performances des cycles de puissance du gaz pour lesquels le fluide de travail reste un gaz pendant tout le cycle.
- Élaborer des hypothèses simplificatrices applicables aux cycles de puissance au gaz,
- Revoir le fonctionnement des moteurs alternatifs.
- Analyser les cycles d'alimentation en gaz fermés et ouverts.
- Résoudre des problèmes basés sur les cycles d'Otto, Diesel, Stirling et Ericsson.
- Résoudre des problèmes basés sur les cycles de Brayton; le Brayton avec régénération; et le Brayton avec intercooler, réchauffage et régénération.

# CONSIDÉRATIONS DE BASE DANS L'ANALYSE DES CYCLES DE PUISSANCE

La plupart des dispositifs produisant de l'énergie fonctionnent sur des cycles.

**Cycle idéal:** Un cycle qui ressemble étroitement au cycle réel mais qui est entièrement constitué de processus internes réversibles.

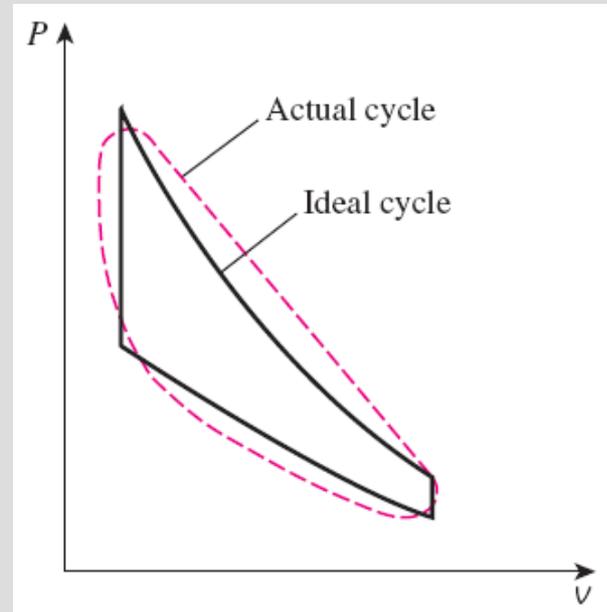
**Les cycles réversibles** tels que **le cycle Carnot** ont l'efficacité thermique la plus élevée de tous les moteurs thermiques fonctionnant entre les mêmes niveaux de température. Contrairement aux cycles idéaux, ils sont totalement réversibles et inadaptés en tant que modèle réaliste.



La modélisation est un outil d'ingénierie puissant qui fournit une grande perspicacité et simplicité au détriment de la perte de précision.

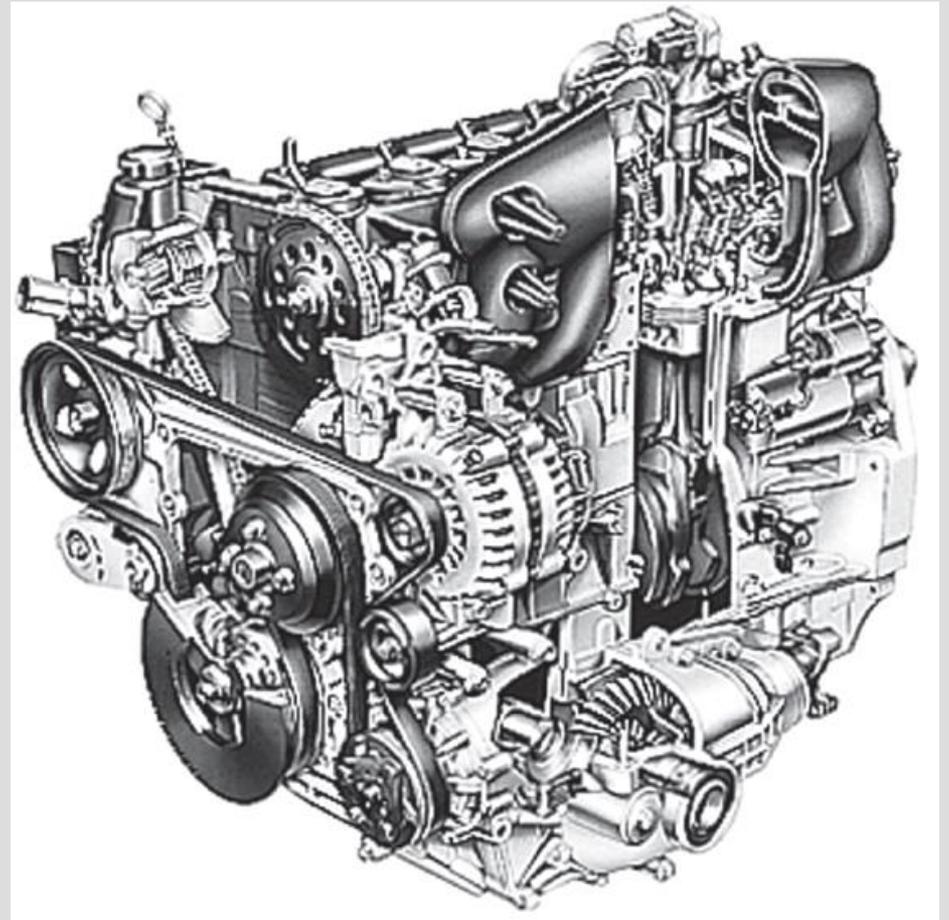
Efficacité thermique des moteurs thermiques:

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \quad \text{or} \quad \eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}}$$



L'analyse de nombreux processus complexes peut être réduite à un niveau gérable en utilisant certaines idéalizations (simplifications).

Les cycles idéaux sont réversibles en interne, mais, contrairement au cycle de Carnot, ils ne sont pas nécessairement réversibles à l'extérieur. Par conséquent, l'efficacité thermique d'un cycle idéal, en général, est inférieure à celle d'un cycle totalement réversible opérant entre les mêmes limites de température. Cependant, il est encore considérablement plus élevé que l'efficacité thermique d'un cycle réel en raison des idéalizations utilisées.



**FIGURE 2**

Un moteur automobile avec la chambre de combustion exposée.

*Photos General Motors*

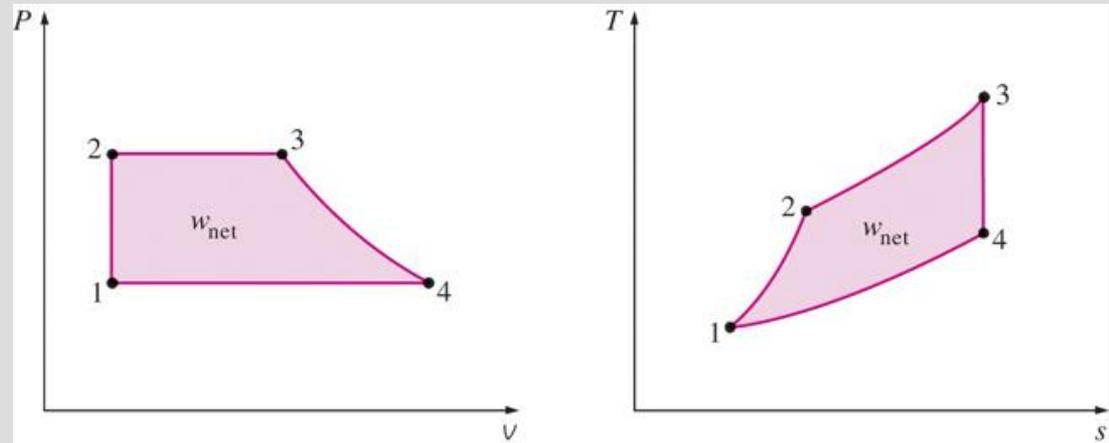
Sur un diagramme en  $T$ - $s$ , le rapport entre la surface entourée par la courbe cyclique et la surface sous la courbe du processus d'addition de chaleur représente l'efficacité thermique du cycle. **Toute modification qui augmente le rapport de ces deux zones augmentera également l'efficacité thermique du cycle.**

Des précautions doivent être prises dans l'interprétation des résultats des cycles idéaux.

## Les idéalizations et les simplifications dans l'analyse des cycles de puissance:

Le cycle n'implique aucun frottement. Par conséquent, le fluide de travail ne subit aucune perte de charge lorsqu'il circule dans des tuyaux ou des dispositifs tels que des échangeurs de chaleur.

1. Tous les processus d'expansion et de compression se déroulent de manière *quasi-statique*.
2. Les tuyaux reliant les divers composants d'un système sont bien isolés et le transfert de chaleur à travers eux est négligeable.

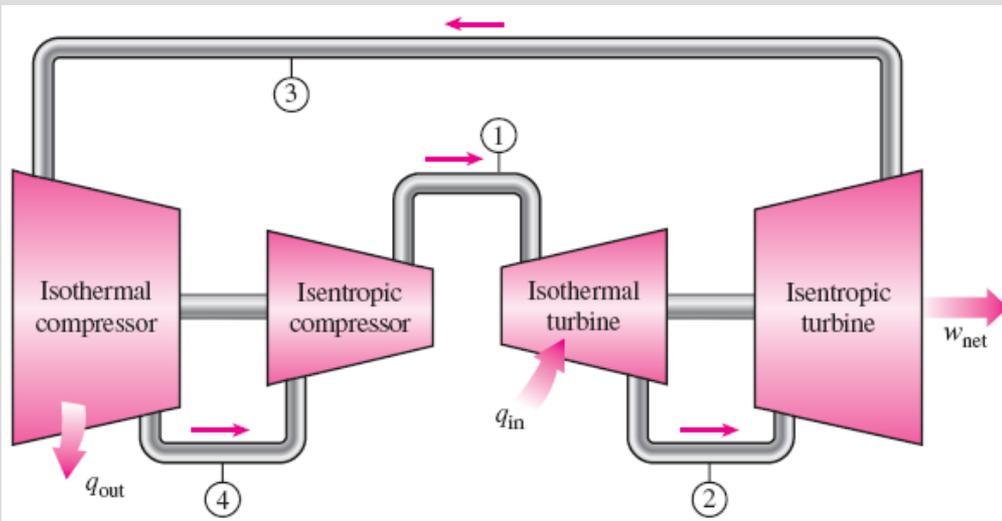


Sur les diagrammes  $P$ - $v$  et  $T$ - $s$ , la zone entourée par la courbe de processus représente le travail net du cycle.

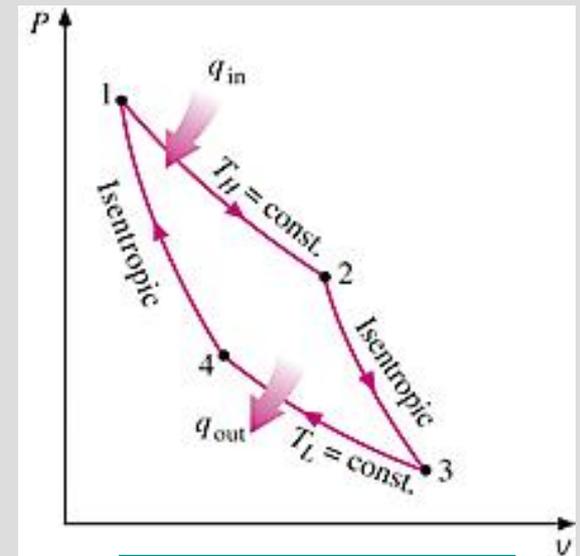
# LE CYCLE DE CARNOT ET SA VALEUR EN INGÉNIERIE

Le cycle de Carnot est composé de quatre processus totalement réversibles: l'addition de chaleur isotherme, l'expansion isentropique, le rejet de chaleur isotherme et la compression isentropique.

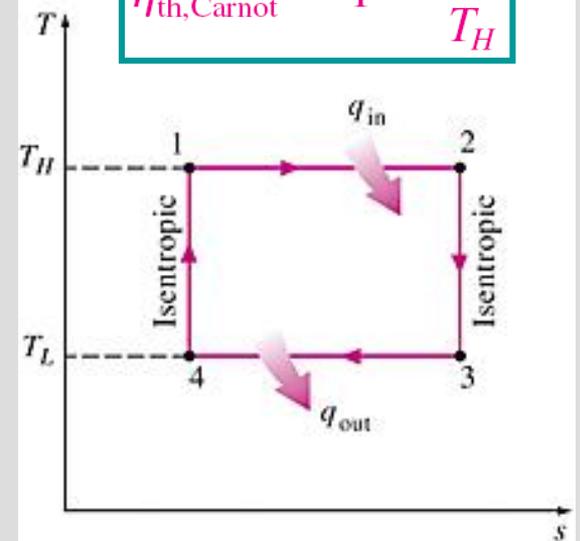
**Pour les cycles idéaux et réels:** Le rendement thermique augmente avec une augmentation de la température moyenne à laquelle la chaleur est fournie au système ou avec une diminution de la température moyenne à laquelle la chaleur est rejetée du système.



Un moteur Carnot à écoulement constant.

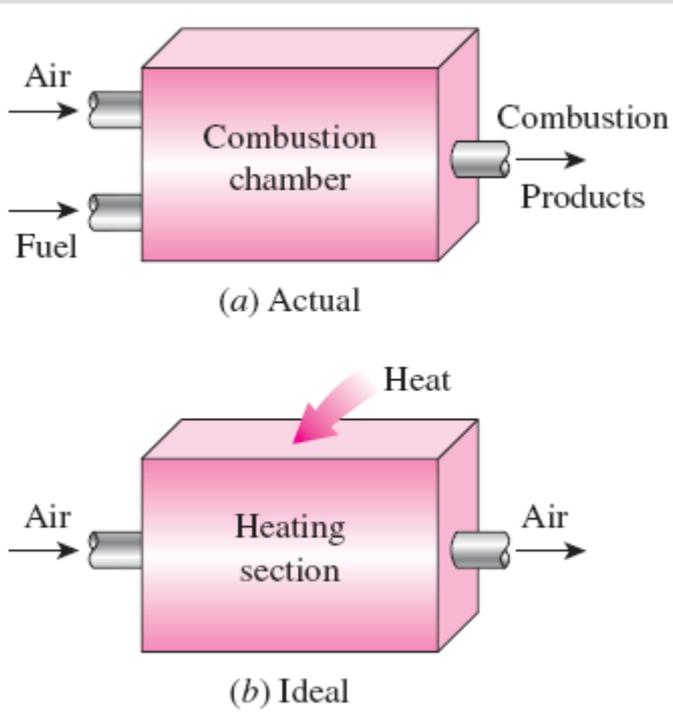


$$\eta_{th,Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$



Diagrammes P-v et T-s d'un cycle de Carnot.

# HYPOTHESES DE L'AIR-STANDARD



## Hypothèses de l'air standard :

Le fluide de travail est de l'air, qui circule en continu dans une boucle fermée et se comporte toujours comme un gaz parfait.

1. Tous les processus qui composent le cycle sont réversibles en interne.
2. Le processus de combustion est remplacé par un processus d'addition de chaleur provenant d'une source externe.
3. Le processus d'échappement est remplacé par un processus de rejet de chaleur qui restaure le fluide de travail à son état initial.

Le processus de combustion est remplacé par un processus d'addition de chaleur dans des cycles idéaux.

**Hypothèses d'air-standard froid:** Lorsque le fluide de travail est considéré comme de l'air avec des chaleurs spécifiques constantes à température ambiante ( $25^{\circ}\text{C}$ ).

**Cycle air-standard:** Un cycle pour lequel les hypothèses de l'air-standard sont applicables.

# UN APERÇU DES MOTEURS ALTERNATIFS

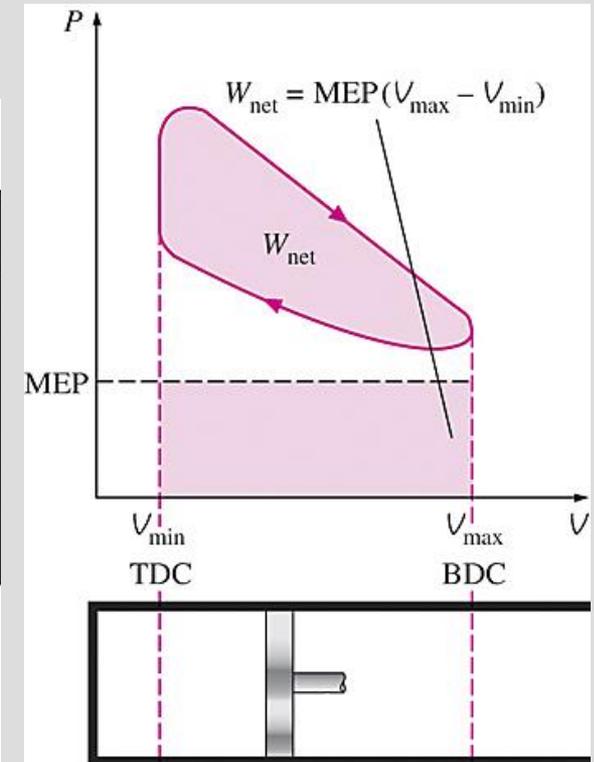
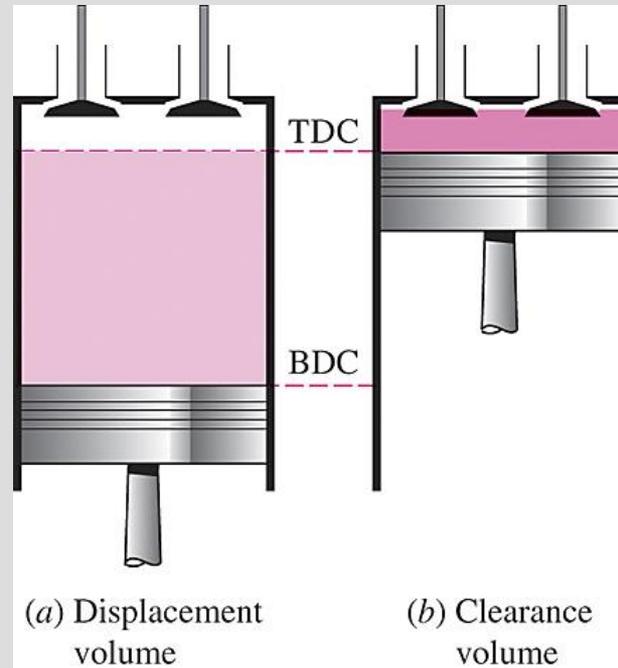
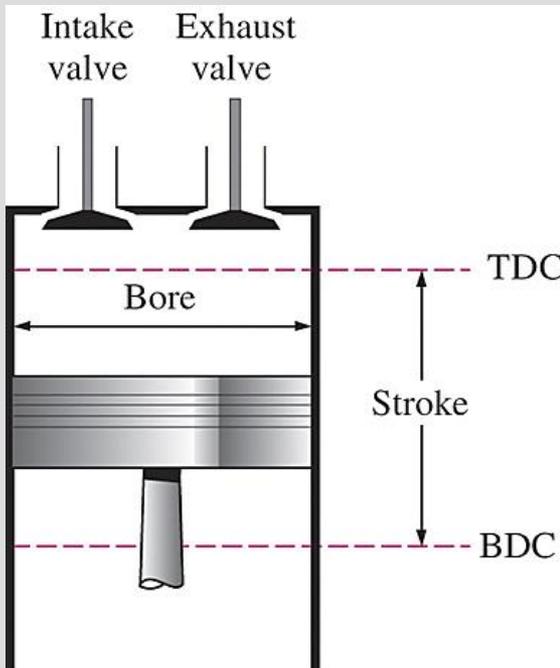
Rapport de Compression  $W_{net} = MEP \times \text{Piston area} \times \text{Stroke} = MEP \times \text{Displacement volume}$

$$r = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_{BDC}}{V_{TDC}}$$

Pression effective  
moyenne

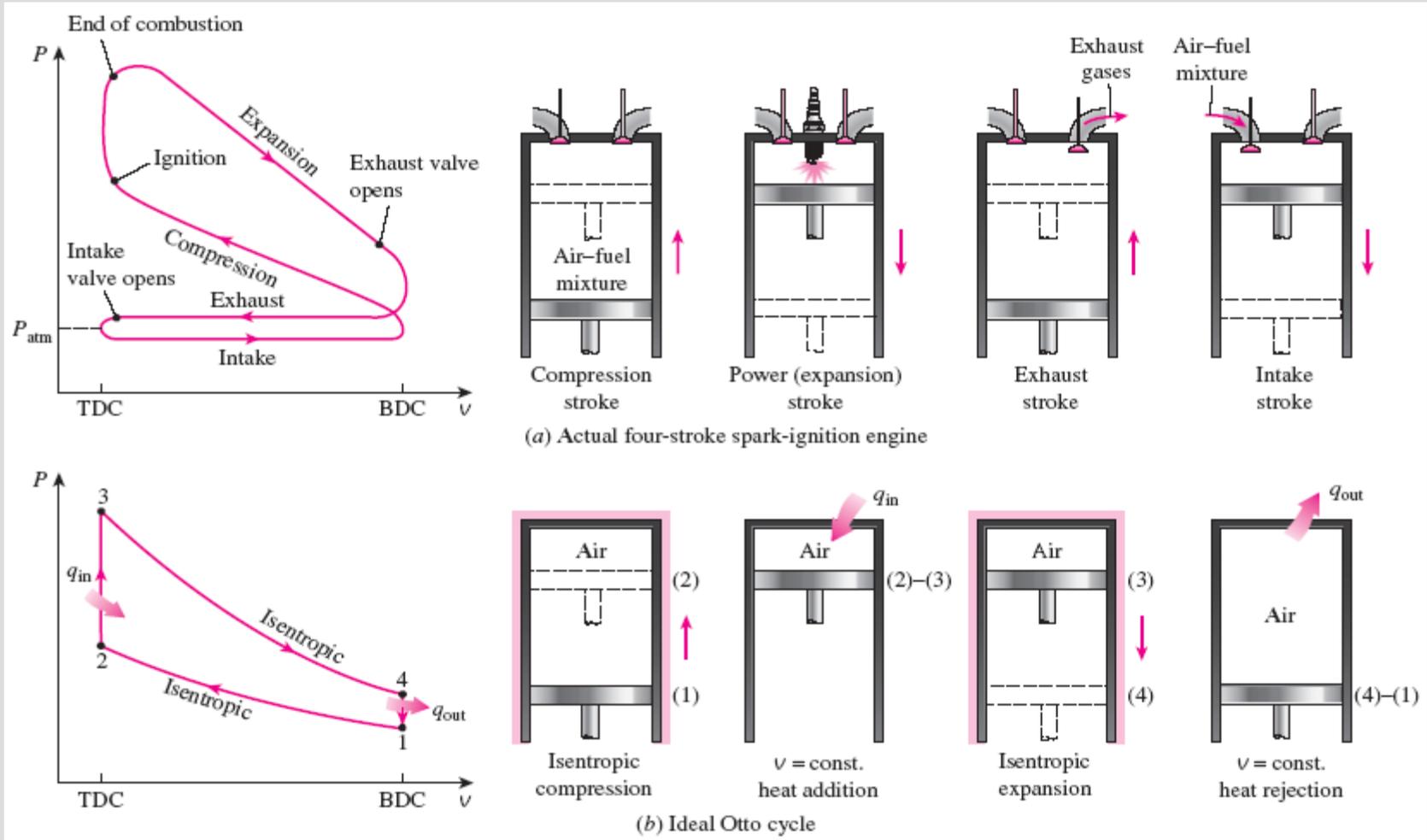
$$MEP = \frac{W_{net}}{V_{max} - V_{min}} = \frac{W_{net}}{V_{max} - V_{min}} \quad (\text{kPa})$$

- Moteurs à allumage par étincelle (SI)
- Moteurs à allumage par compression (CI)



Nomenclature pour les moteurs alternatifs.

# CYCLE OTTO: LE CYCLE IDÉAL POUR LES MOTEURS À ALLUMAGE COMMANDÉ



Cycles réels et idéaux dans les moteurs à allumage commandé et leurs diagrammes P-v.

## Cycle à quatre temps

1 cycle = 4 temps = 2 révolutions

## Cycle à deux temps

1 cycle = 2 temps = 1 révolution

- 1-2 Isentropic compression
- 2-3 Constant-volume heat addition
- 3-4 Isentropic expansion
- 4-1 Constant-volume heat rejection

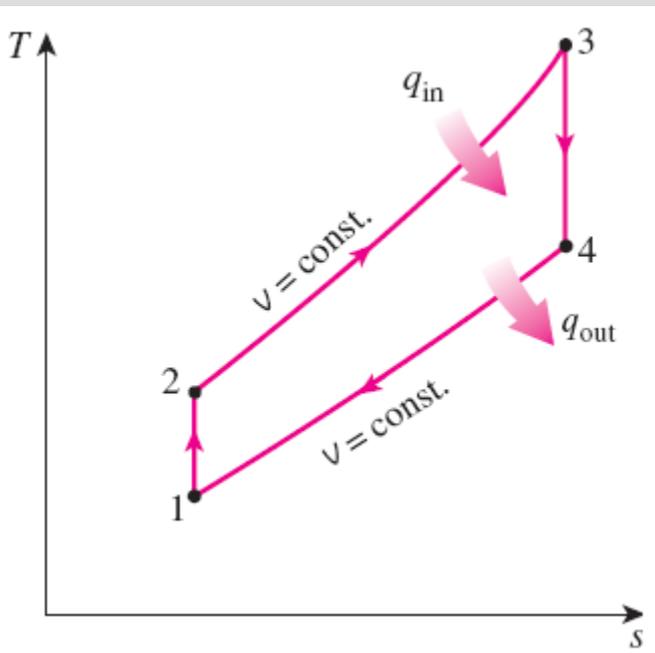


Diagramme  
 $T$ - $s$  du cycle  
idéal d'Otto.

Les moteurs à deux temps sont généralement moins efficaces que leurs homologues à quatre temps, mais ils sont relativement simples et peu coûteux et ils ont des rapports puissance/poids et puissance/volume élevés.

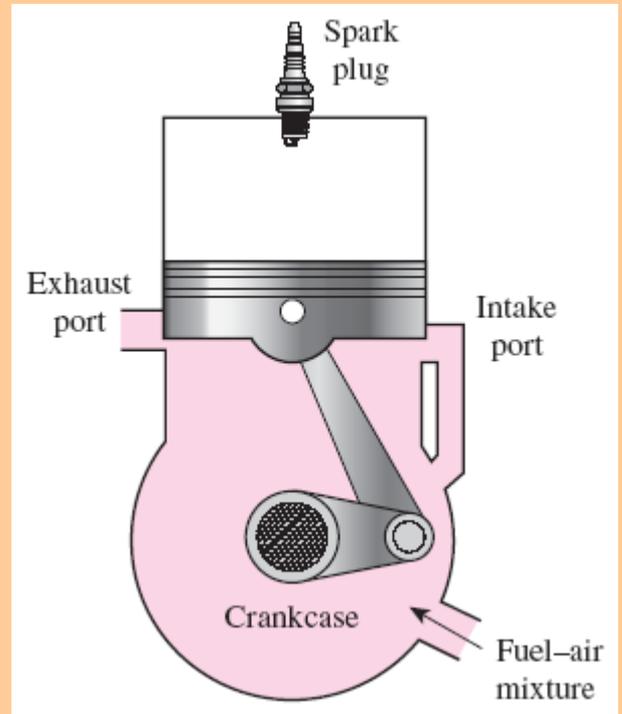


Schéma d'un moteur  
alternatif à deux temps.



**Figure 3.** Les moteurs à deux temps sont couramment utilisé dans les motos et les tondeuses à gazon.

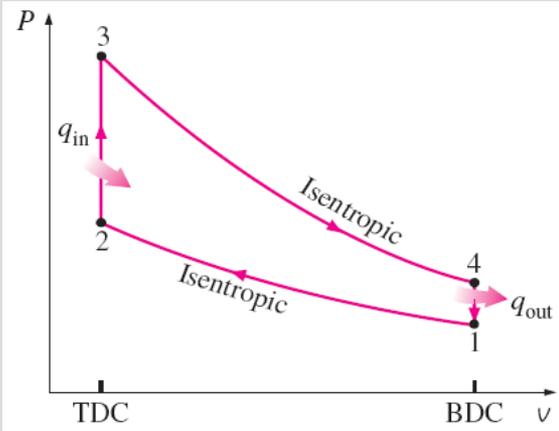
$$(q_{in} - q_{out}) + (w_{in} - w_{out}) = h_{exit} - h_{inlet}$$

$$q_{in} = u_3 - u_2 = c_v(T_3 - T_2)$$

$$q_{out} = u_4 - u_1 = c_v(T_4 - T_1)$$

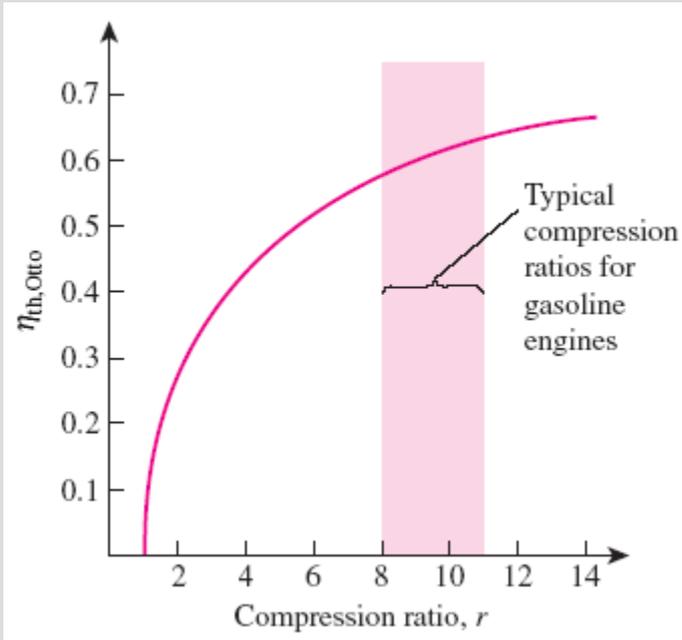
$$\eta_{th,Otto} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{k-1} = \frac{T_4}{T_3} \quad r = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

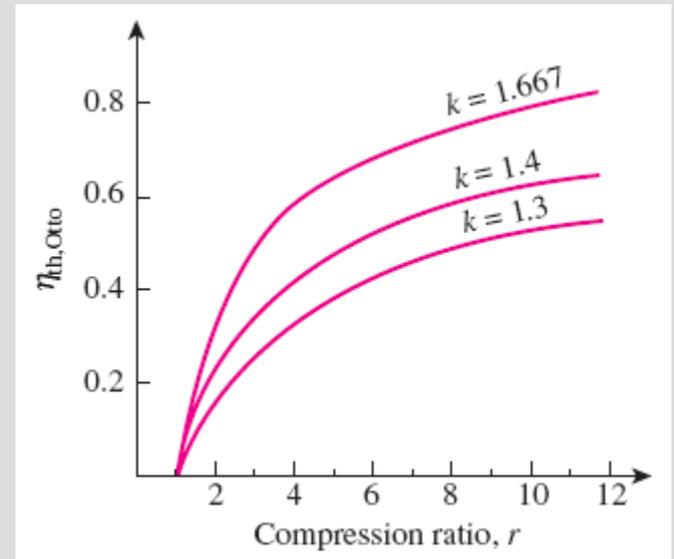


$$\eta_{th,Otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

Dans les moteurs à allumage par étincelle (SI), le taux de compression est limité par l'auto-allumage ou le cliquetis du moteur



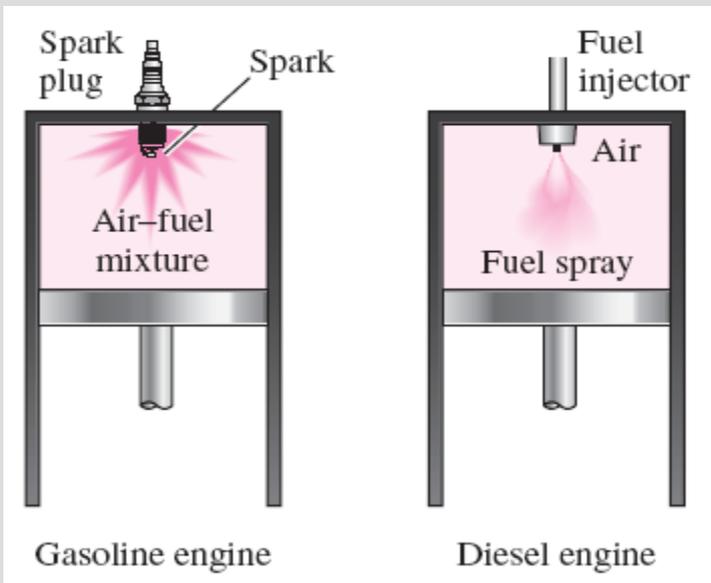
Efficacité thermique du cycle idéal d'Otto en fonction du taux de compression ( $k = 1.4$ ).



L'efficacité thermique du cycle Otto augmente avec le rapport de chaleur spécifique  $k$  du fluide de travail.

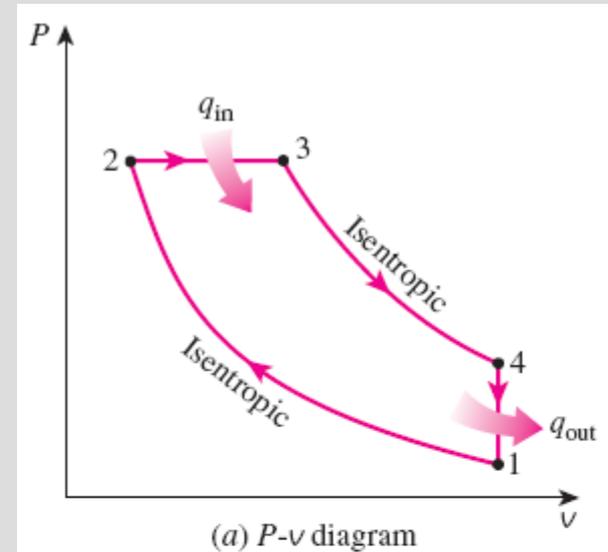
# CYCLE DIESEL: LE CYCLE IDÉAL POUR MOTEURS À ALLUMAGE PAR COMPRESSION

Dans les moteurs diesel, seul l'air est comprimé pendant la course de compression, ce qui élimine la possibilité d'auto-allumage (cliquetis du moteur). Par conséquent, les moteurs diesel peuvent être conçus pour fonctionner à des taux de compression beaucoup plus élevés que les moteurs SI, généralement entre 12 et 24.

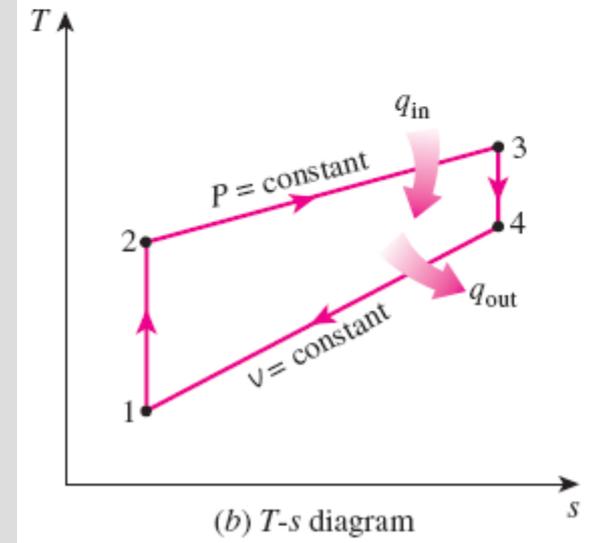


- 1-2 compression isentropique
- 2-3 ajout de chaleur à volume constant
- 3-4 expansion isentropique
- 4-1 rejet de chaleur à volume constant.

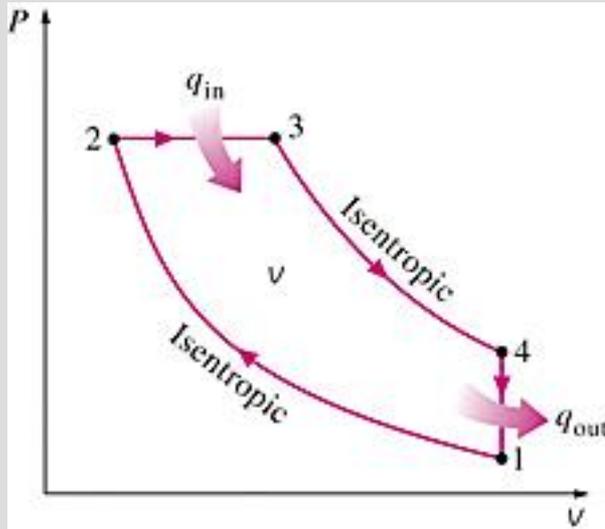
Dans les moteurs diesel, la bougie d'allumage est remplacée par un injecteur de carburant, et seule l'air est comprimé pendant le processus de compression.



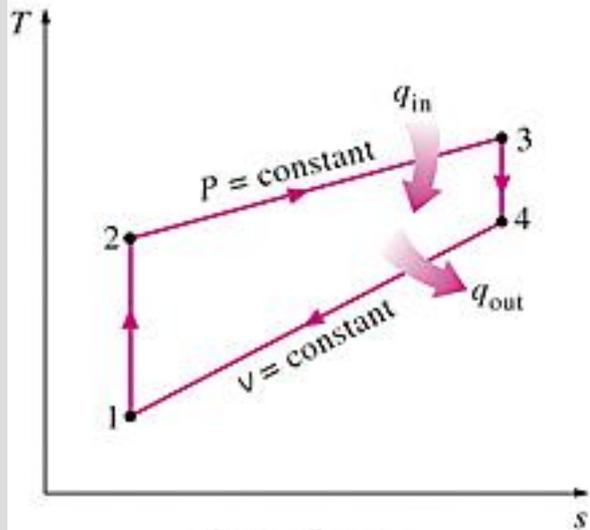
(a) P-v diagram



(b) T-s diagram



(a)  $P$ - $v$  diagram



(b)  $T$ - $s$  diagram

$$q_{in} - w_{b,out} = u_3 - u_2 \rightarrow q_{in} = P_2(v_3 - v_2) + (u_3 - u_2) = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2)$$

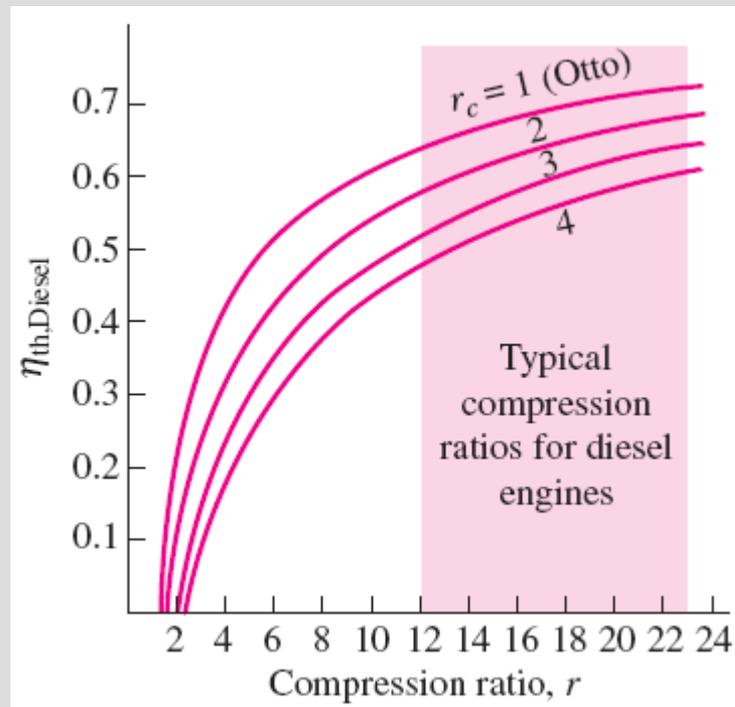
$$-q_{out} = u_1 - u_4 \rightarrow q_{out} = u_4 - u_1 = c_v(T_4 - T_1)$$

$$\eta_{th,Diesel} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{k(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{kT_2(T_3/T_2 - 1)}$$

$$r_c = \frac{V_3}{V_2} = \frac{v_3}{v_2} \quad \text{Rapport de coupure}$$

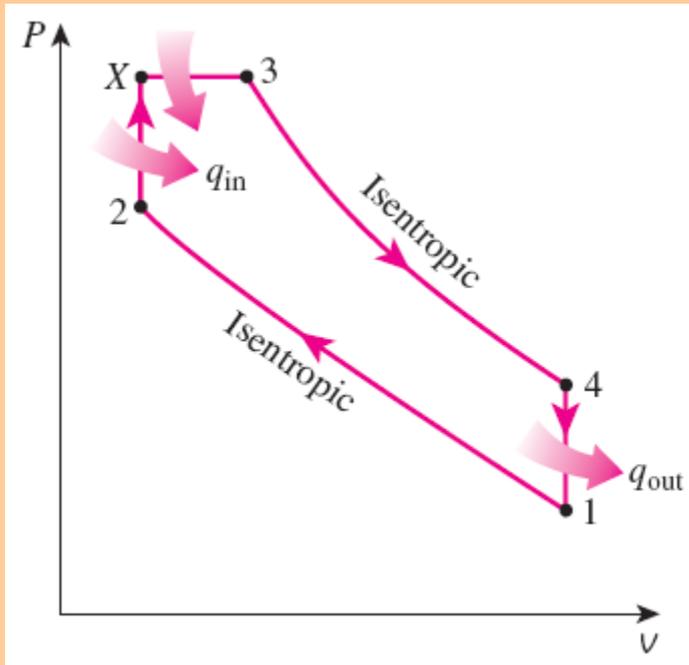
$$\eta_{th,Diesel} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \left[ \frac{r^k - 1}{k(r - 1)} \right]$$

$\eta_{th,Otto} > \eta_{th,Diesel}$  pour le même taux de compression



Efficacité thermique du cycle Diesel idéal en fonction des taux de compression et de coupure ( $k = 1.4$ ).

**Cycle double:** Un modèle de cycle idéal plus réaliste pour un moteur à allumage par compression moderne à grande vitesse.



*Diagramme P-V d'un cycle double idéal.*

## QUESTIONS ???

Les moteurs diesel fonctionnent à des rapports air-carburant plus élevés que les moteurs à essence.

Pourquoi?

Malgré des rapports puissance / poids plus élevés, les moteurs à deux temps ne sont pas utilisés dans les automobiles. Pourquoi?

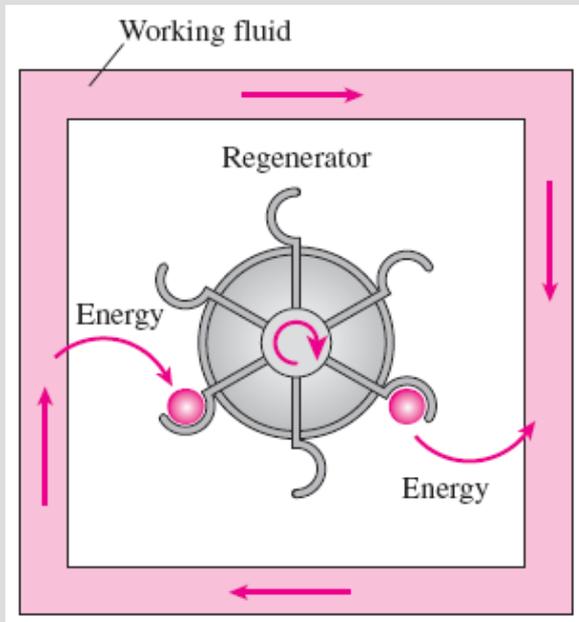
Les moteurs diesel stationnaires sont parmi les dispositifs de production d'énergie les plus efficaces (environ 50%). Pourquoi?

Qu'est-ce qu'un turbocompresseur? Pourquoi sont-ils principalement utilisés dans les moteurs diesel par rapport aux moteurs à essence.

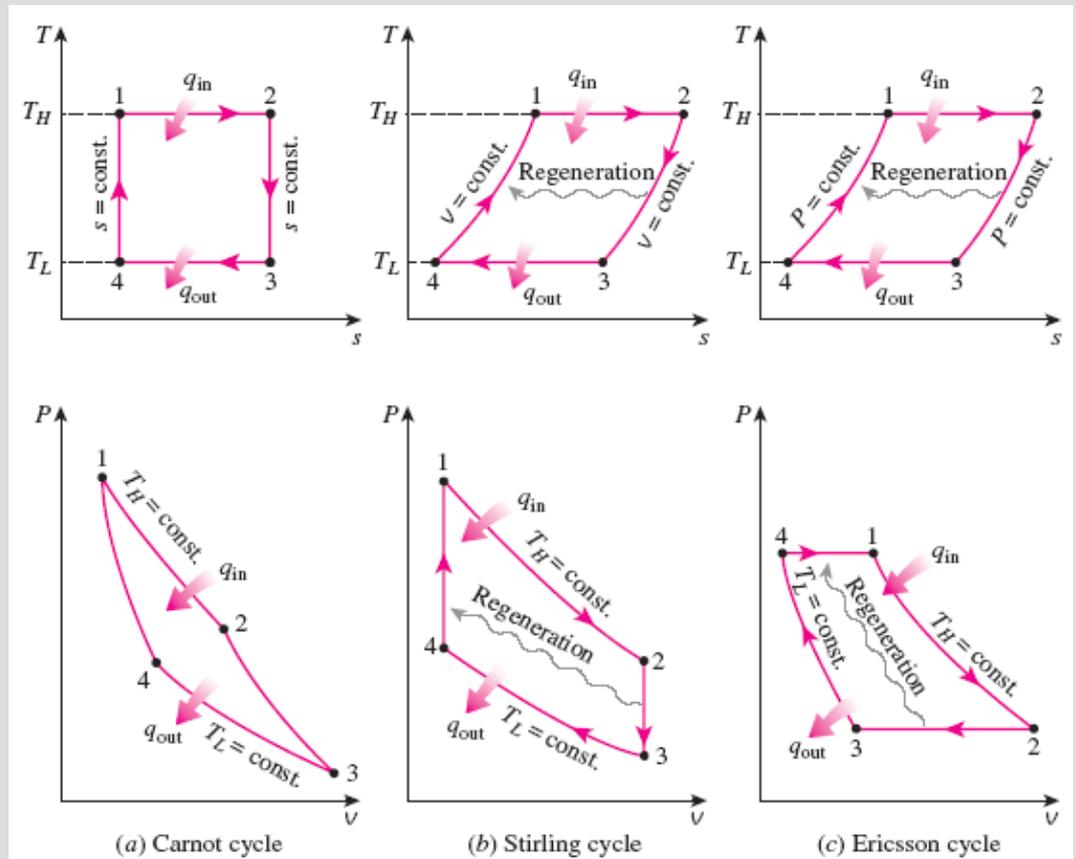
# LES CYCLES DE STIRLING ET ERICSSON

## Cycle de Stirling

- 1-2  $T = \text{expansion (détente) constante}$  (ajout de chaleur de la source externe)
- 2-3  $v = \text{régénération constante}$  (transfert de chaleur interne du fluide de travail au régénérateur)
- 3-4  $T = \text{compression constante}$  (rejet de chaleur vers la source externe)
- 4-1  $v = \text{régénération constante}$  (transfert de chaleur interne du régénérateur vers le fluide de travail)



Un régénérateur est un dispositif qui emprunte de l'énergie au fluide de travail pendant une partie du cycle et la rembourse (sans intérêt) pendant une autre partie.



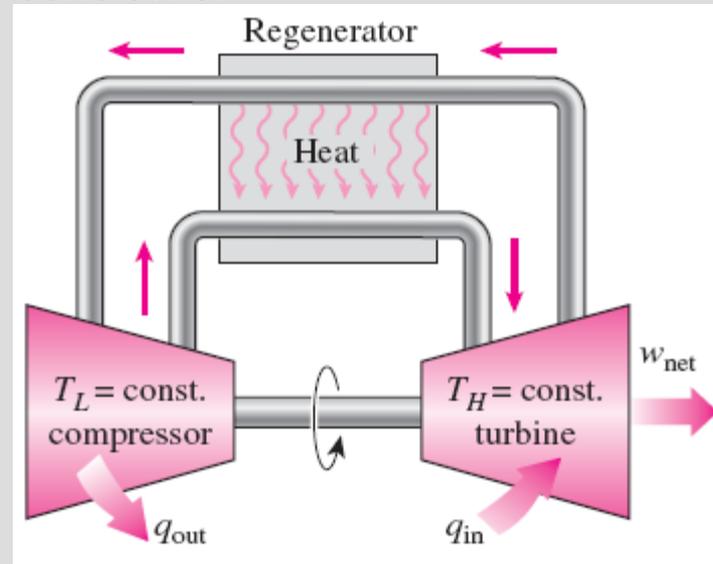
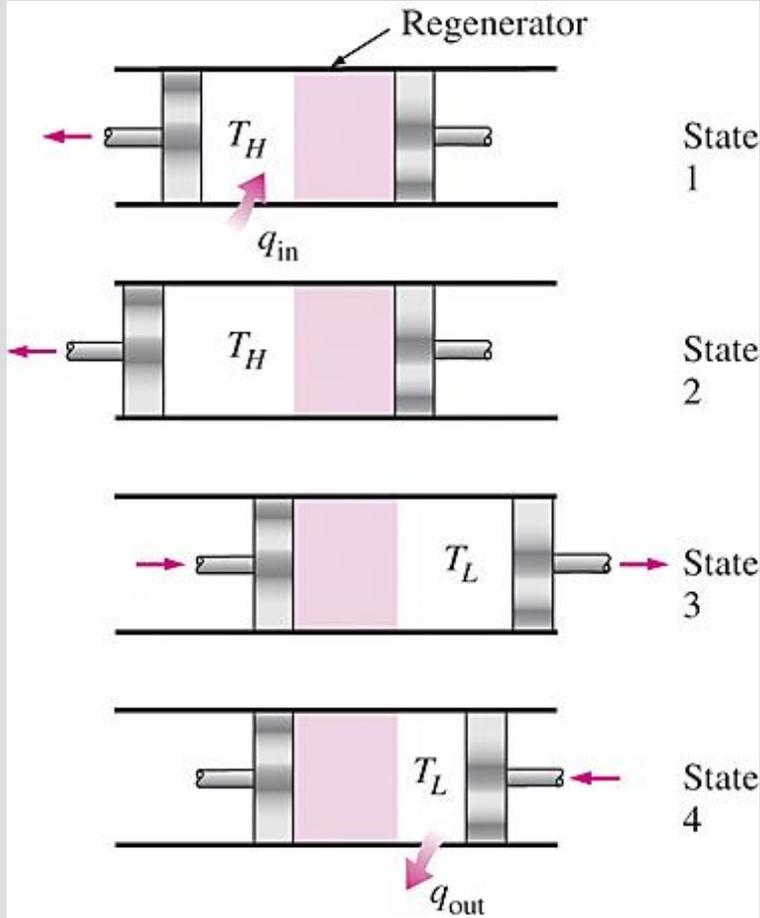
T-s et P-v diagrammes des cycles de Carnot, Stirling et Ericsson 16

Les cycles Stirling et Ericsson délivrent un message: *La régénération peut augmenter l'efficacité.*

Les cycles de Stirling et Ericsson sont totalement réversibles, tout comme le cycle de Carnot, et donc:

$$\eta_{th,Stirling} = \eta_{th,Ericsson} = \eta_{th,Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Le cycle d'Ericsson ressemble beaucoup au cycle de Stirling, sauf que les deux processus à volume constant sont remplacés par deux processus à pression constante.



L'exécution du cycle de Stirling.

Un moteur Ericsson à débit constant.

# CYCLE DE BRAYTON: LE CYCLE IDÉAL POUR LES MOTEURS À TURBINE À GAZ

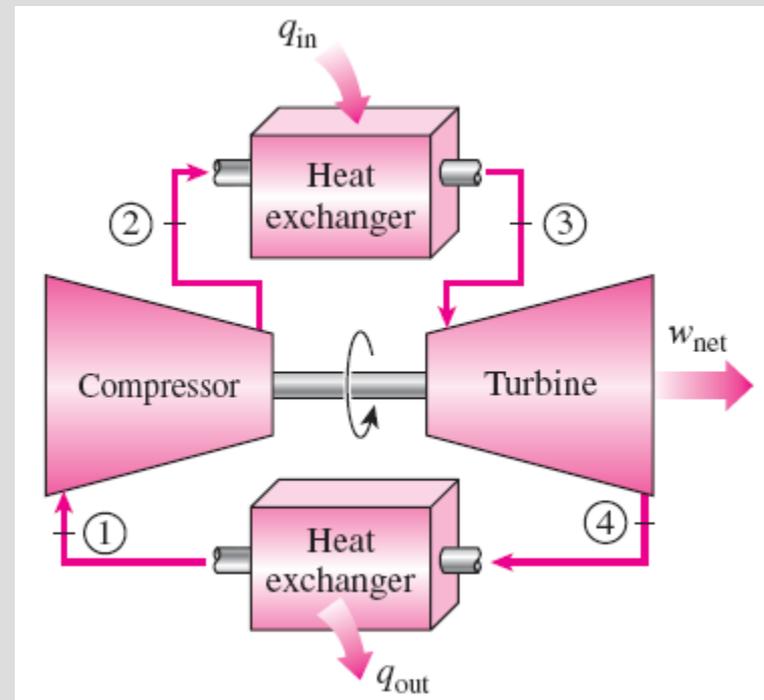
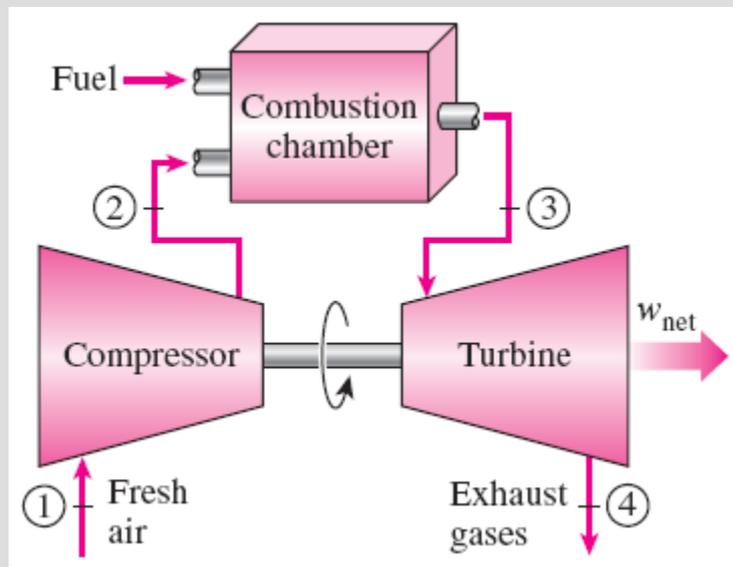
Le processus de combustion est remplacé par un processus d'addition de chaleur à pression constante provenant d'une source externe, et le processus d'échappement est remplacé par un processus de rejet de chaleur à pression constante dans l'air ambiant.

1-2 Compression isentropique (dans un compresseur)

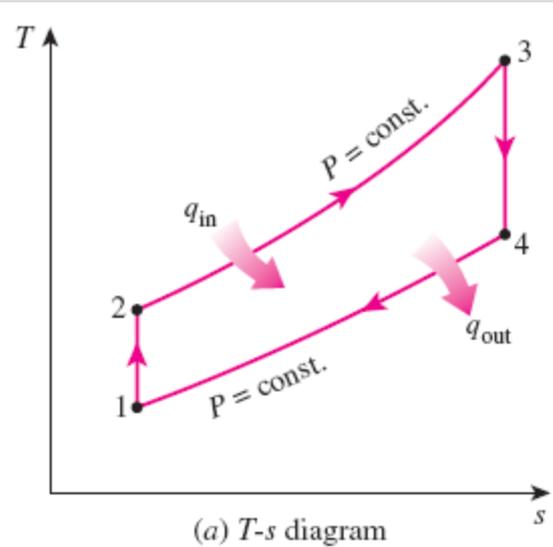
2-3 Ajout de chaleur à pression constante

3-4 Expansion isentropique (dans une turbine)

4-1 Rejet de chaleur à pression constante



Un moteur à turbine à gaz à cycle ouvert. Un moteur à turbine à gaz à cycle fermé.



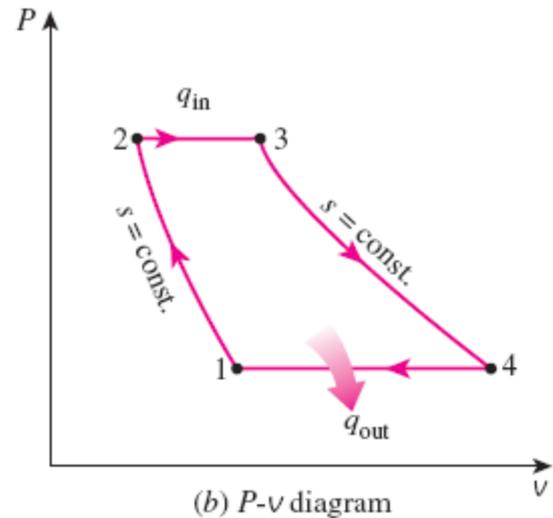
$$(q_{in} - q_{out}) + (w_{in} - w_{out}) = h_{exit} - h_{inlet}$$

$$q_{in} = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2)$$

$$q_{out} = h_4 - h_1 = c_p(T_4 - T_1)$$

$$\eta_{th,Brayton} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)}$$

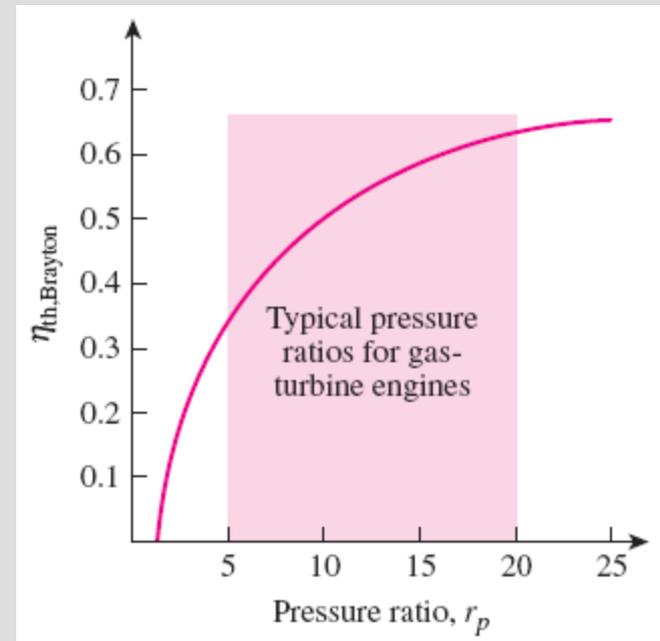
$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(k-1)/k} = \frac{T_3}{T_4} \quad r_p = \frac{P_2}{P_1} \quad \text{Rapport de Pression}$$



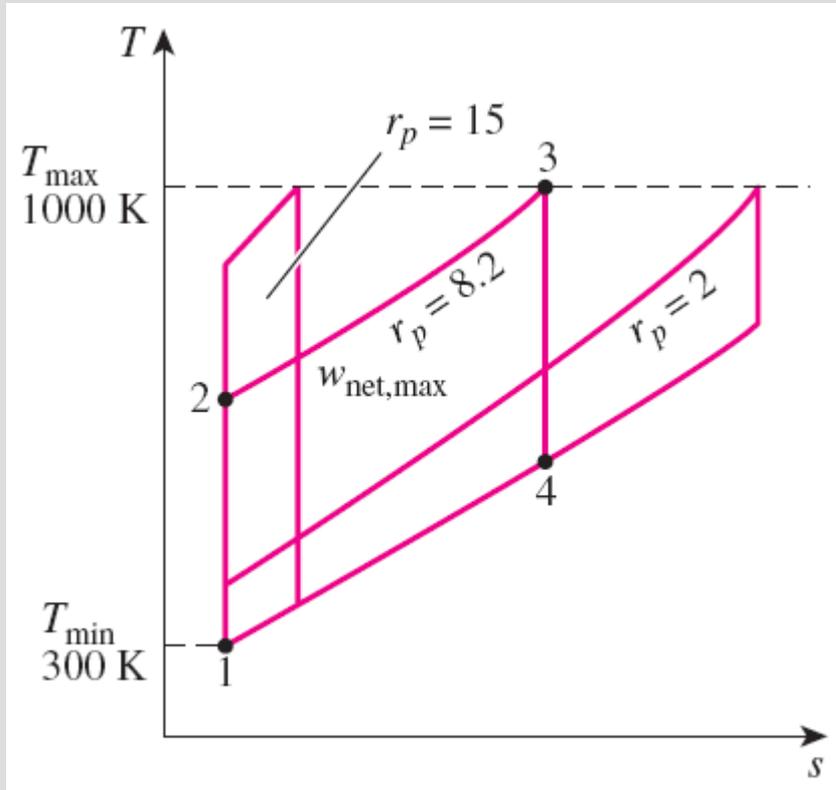
$$\eta_{th,Brayton} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}}$$

Diagrammes T-s et P-v pour le cycle idéal de Brayton.

Efficacité thermique du cycle de Brayton idéal en fonction du rapport de pression.



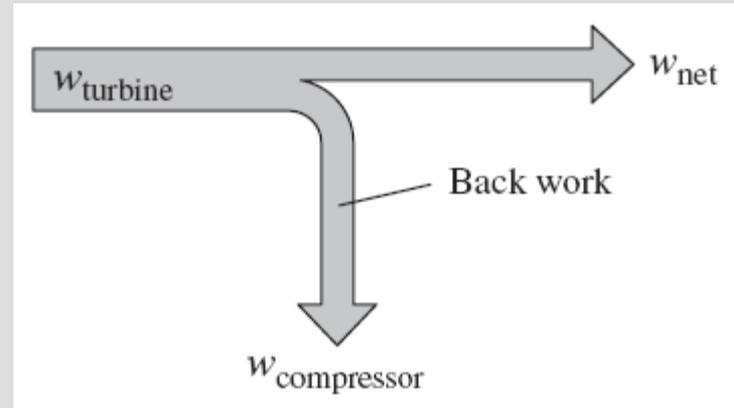
Les deux principaux domaines d'application des moteurs à turbine à gaz sont *la propulsion des avions* et la *production d'énergie électrique*.



Pour les valeurs fixes de T<sub>min</sub> et T<sub>max</sub>, le travail net du cycle de Brayton d'abord augmente avec le rapport de pression, puis atteint un maximum à  $r_p = (T_{max}/T_{min})^{k/[2(k-1)]}$ , et finalement diminue.

La température la plus élevée du cycle est limitée par la température maximale que les aubes de turbine peuvent supporter. Ceci limite également les rapports de pression qui peuvent être utilisés dans le cycle.

L'air contenu dans les turbines à gaz fournit l'oxygène nécessaire à la combustion du combustible et sert de liquide de refroidissement pour maintenir la température des divers composants dans des limites sûres. Un rapport air-carburant de 50 ou plus n'est pas rare.



La fraction du travail de la turbine utilisée pour entraîner le compresseur est appelée le rapport de travail arrière.

# Développement de turbines à gaz

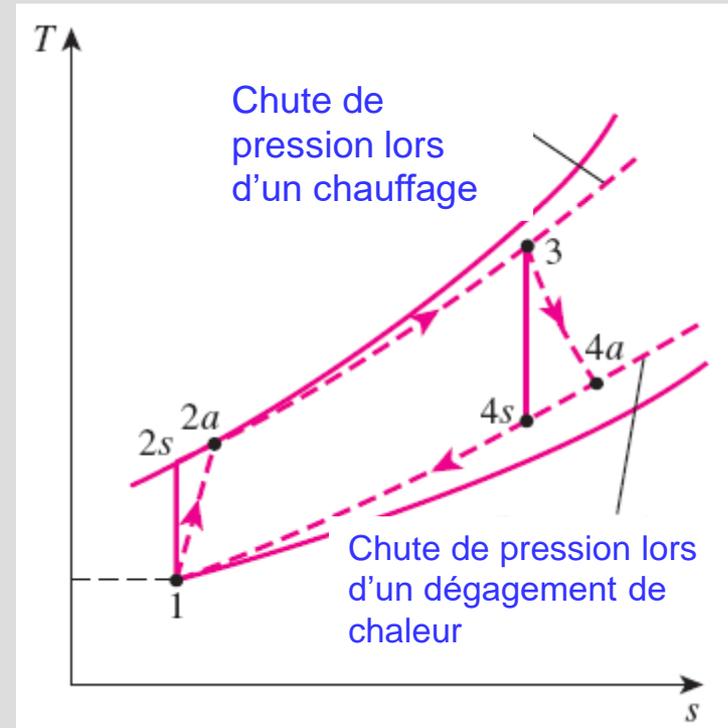
1. Augmentation des températures d'entrée de la turbine
2. Augmenter l'efficacité des composants des turbomachines (turbines, compresseurs)
3. Ajouter des modifications au cycle de base (intercooling, régénération ou récupération, et réchauffage).

## Déviations des cycles gaz-turbine réels de ceux idéalisés

**Raisons:** Irréversibilités dans les turbines et les compresseurs, pertes de charge, pertes de chaleur

Efficacités isentropiques des compresseurs et turbines

$$\eta_C = \frac{w_s}{w_a} \cong \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \quad \eta_T = \frac{w_a}{w_s} \cong \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}}$$



La déviation d'un cycle réel de turbine à gaz par rapport au cycle de Brayton idéal en raison d'irrégularités

# CYCLE DE BRAYTON AVEC REGENERATION

Dans les moteurs à turbine à gaz, la température des gaz d'échappement quittant la turbine est souvent considérablement plus élevée que la température de l'air sortant du compresseur.

Par conséquent, l'air à haute pression quittant le compresseur peut être chauffé par les gaz d'échappement chauds dans un échangeur de chaleur à contre-courant (un **régénérateur** ou un **recupérateur**).

L'efficacité thermique du cycle de Brayton augmente à la suite de la régénération car moins de carburant est utilisé pour la même sortie de travail.

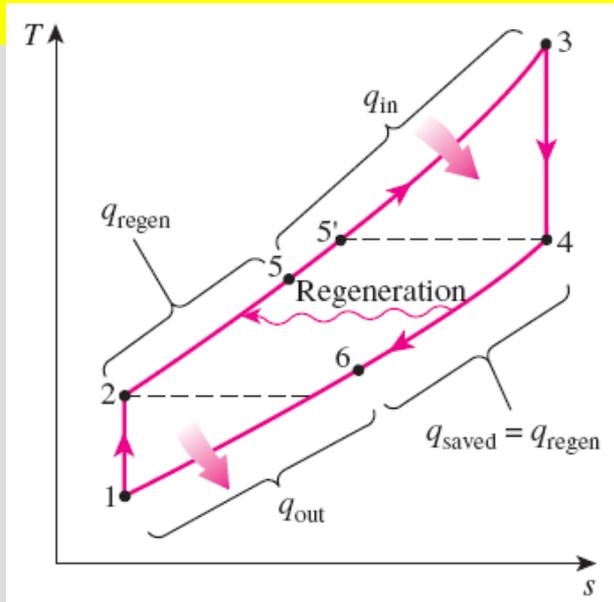
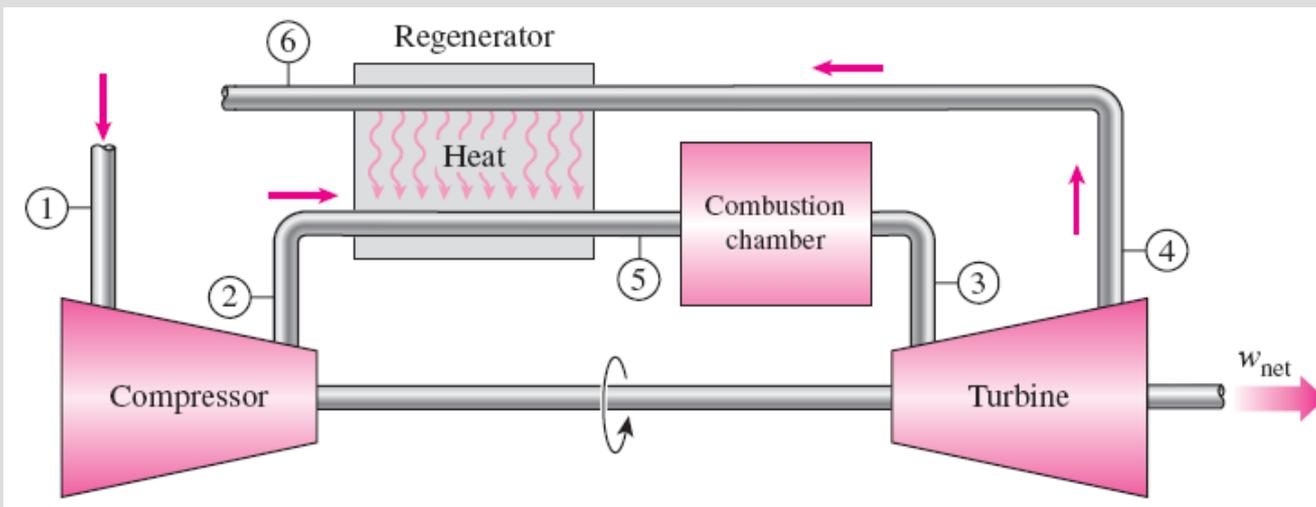
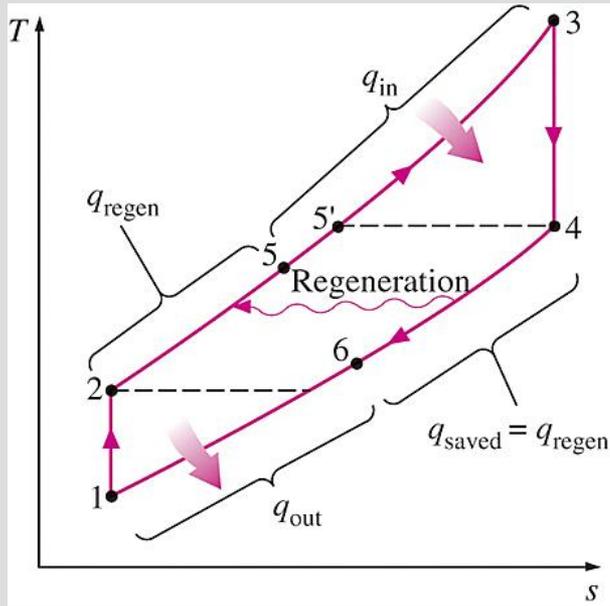


Diagramme  $T$ - $s$  d'un cycle de Brayton avec régénération.



Un moteur à turbine à gaz avec régénérateur.



$$q_{\text{regen,act}} = h_5 - h_2$$

$$q_{\text{regen,max}} = h_{5'} - h_2 = h_4 - h_2$$

$$\epsilon = \frac{q_{\text{regen,act}}}{q_{\text{regen,max}}} = \frac{h_5 - h_2}{h_4 - h_2} \quad \text{Efficacité du régénérateur}$$

$$\epsilon \cong \frac{T_5 - T_2}{T_4 - T_2} \quad \text{Efficacité selon les hypothèses standard de l'air froid}$$

$$\eta_{\text{th,regen}} = 1 - \left( \frac{T_1}{T_3} \right) (r_p)^{(k-1)/k} \quad \text{Sous des hypothèses standard d'air froid}$$

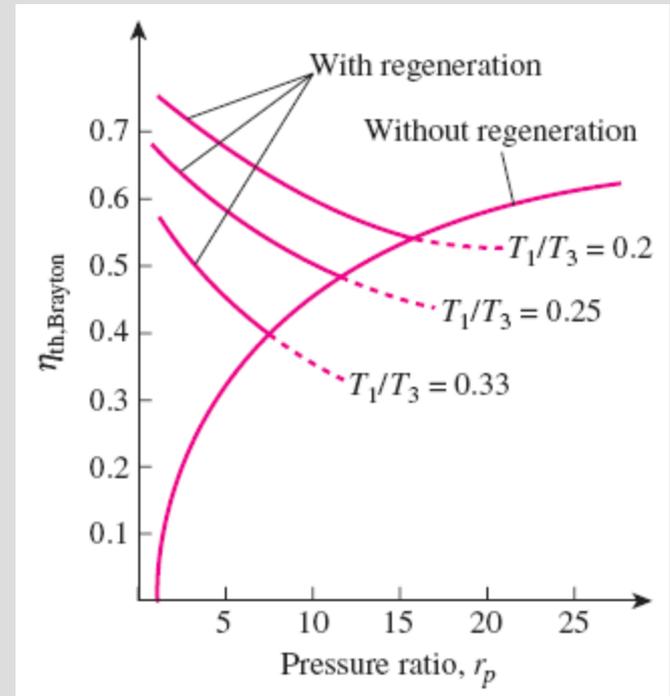
Diagramme  $T$ - $s$  d'un cycle de Brayton avec régénération.

L'efficacité thermique dépend du rapport entre les températures minimales et maximales ainsi que le rapport de pression.

La régénération est plus efficace à des rapports de pression plus faibles et à des rapports de température minimum-maximum faibles.

La régénération peut-elle être utilisée à des rapports de pression élevés?

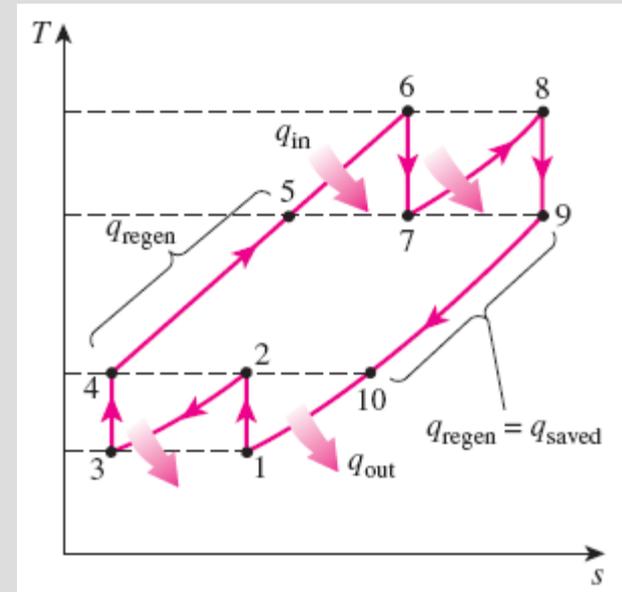
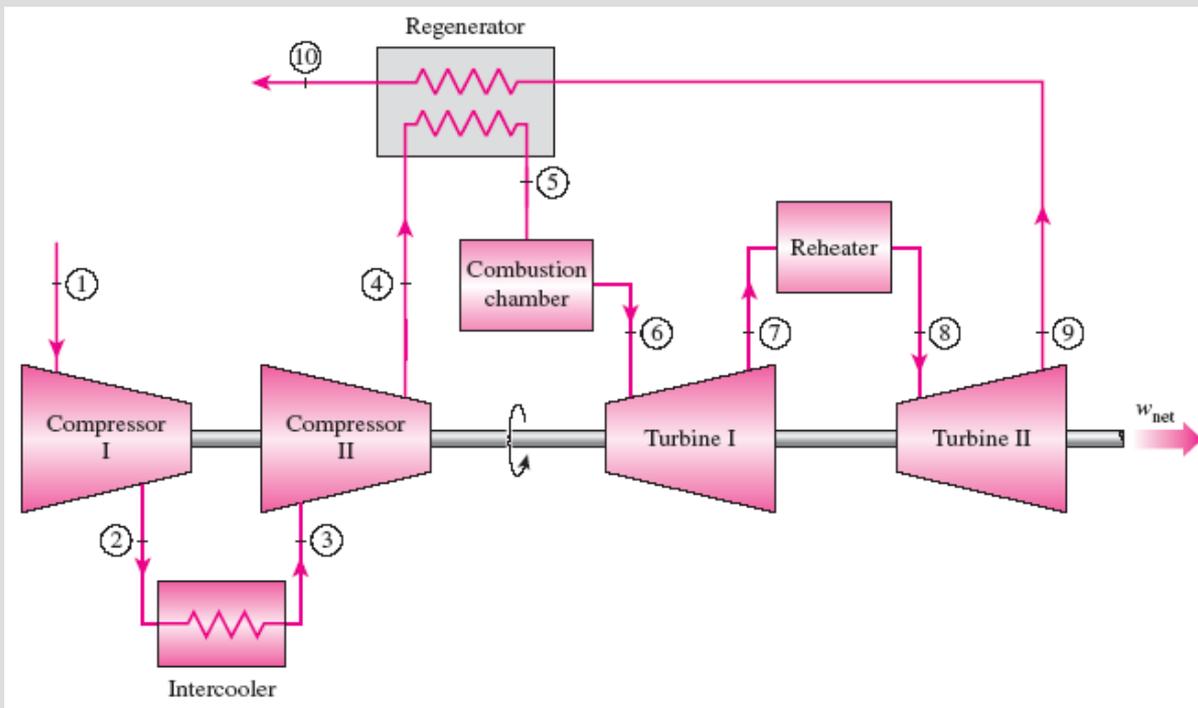
Efficacité thermique du cycle Brayton idéal avec et sans régénération.



# LE CYCLE DE BRAYTON AVEC INTERCOOLING, RÉCHAUFFAGE ET RÉGÉNÉRATION

Pour minimiser l'apport de travail au compresseur et maximiser le travail à la sortie de la turbine:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_4}{P_3} \quad \text{and} \quad \frac{P_6}{P_7} = \frac{P_8}{P_9}$$

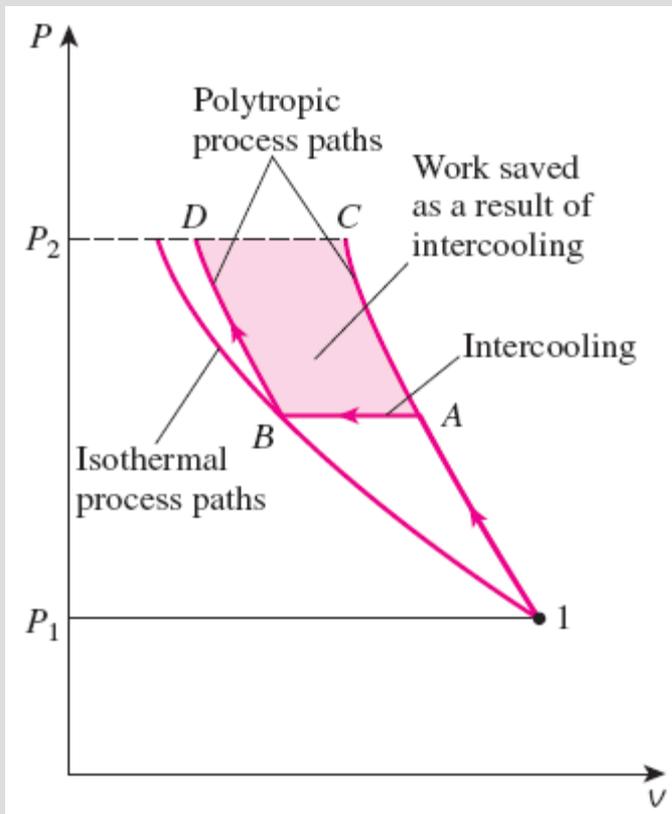


Moteur à turbine à gaz avec compression à deux étages avec intercooler, détente à deux étages avec réchauffage et régénération et diagramme T-s.

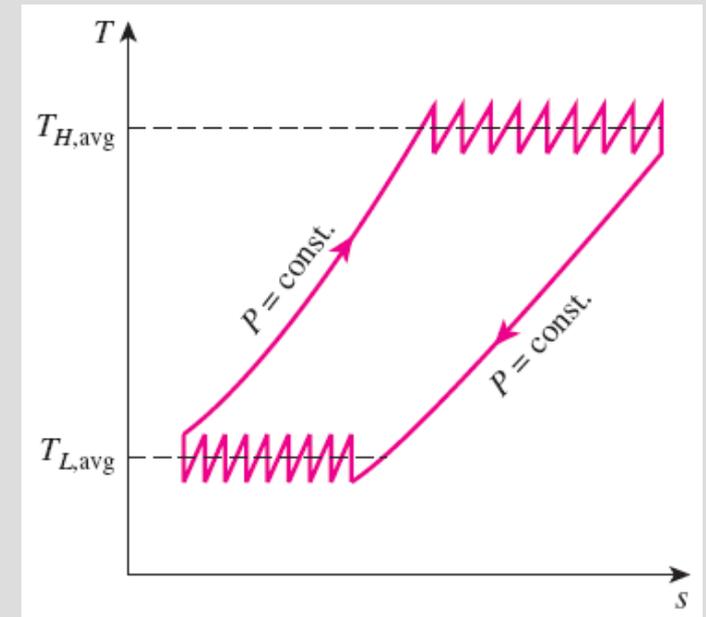
**Compression à plusieurs étages avec intercooler:** Le travail nécessaire pour comprimer un gaz entre deux pressions spécifiées peut être réduit en effectuant le processus de compression par étapes et en refroidissant le gaz entre les deux. Cela maintient le volume spécifique aussi bas que possible.

**L'expansion à plusieurs étages avec réchauffage:** maintient le volume spécifique du fluide de travail aussi élevé que possible pendant un processus de détente, maximisant ainsi la production de travail.

**Le refroidissement et le réchauffage** réduisent toujours le rendement thermique à moins qu'ils ne s'accompagnent d'une régénération. Pourquoi?



Comparaison des entrées de travail à un compresseur à un étage (1AC) et un compresseur à deux étages avec intercooler (1ABD).



Au fur et à mesure que le nombre d'étages de compression et d'expansion augmente, le cycle de la turbine à gaz avec intercooling, réchauffage et régénération approche le cycle Ericsson.

# CYCLES DE PROPULSION PAR REACTION IDEALS

Les moteurs à turbine à gaz sont largement utilisés pour alimenter les avions car ils sont légers et compacts et ont un rapport puissance / poids élevé.

Les turbines à gaz d'aéronef fonctionnent selon un cycle ouvert appelé cycle de propulsion par réaction.

Le cycle de propulsion à réaction idéal diffère du cycle de Brayton idéal simple en ce que les gaz ne sont pas détendus jusqu'à la pression ambiante dans la turbine. Au lieu de cela, ils sont détendus jusqu'à une pression telle que la puissance produite par la turbine est juste suffisante pour entraîner le compresseur et l'équipement auxiliaire.

Le travail net à la sortie d'un cycle de propulsion par réaction est nulle. Les gaz qui sortent de la turbine à une pression relativement élevée sont ensuite accélérés dans une tuyère pour fournir la poussée nécessaire à la propulsion de l'avion.

Les avions sont propulsés en accélérant un fluide dans la direction opposée au mouvement. Ceci est accompli en accélérant légèrement une grande masse de fluide (**moteur à hélice**) ou en accélérant fortement une petite masse de fluide (**moteur à réaction ou à turbo réacteur**) ou les deux (**turbopropulseur**).

Dans les moteurs à réaction, les gaz à haute température et à haute pression quittant la turbine sont accélérés dans une buse pour fournir une poussée.



## Poussée (force propulsive)

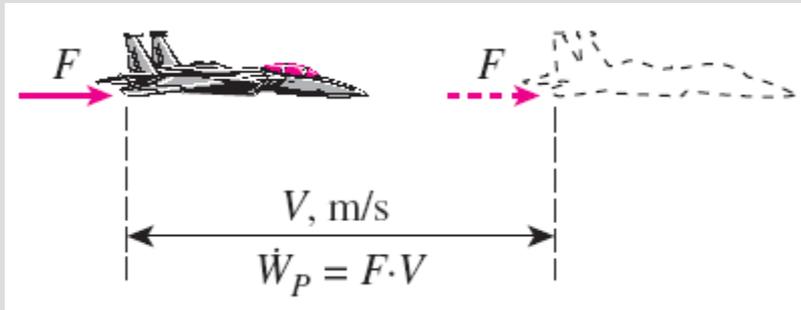
$$F = (\dot{m}V)_{\text{exit}} - (\dot{m}V)_{\text{inlet}} = \dot{m}(V_{\text{exit}} - V_{\text{inlet}}) \quad (\text{N})$$

## Puissance propulsive

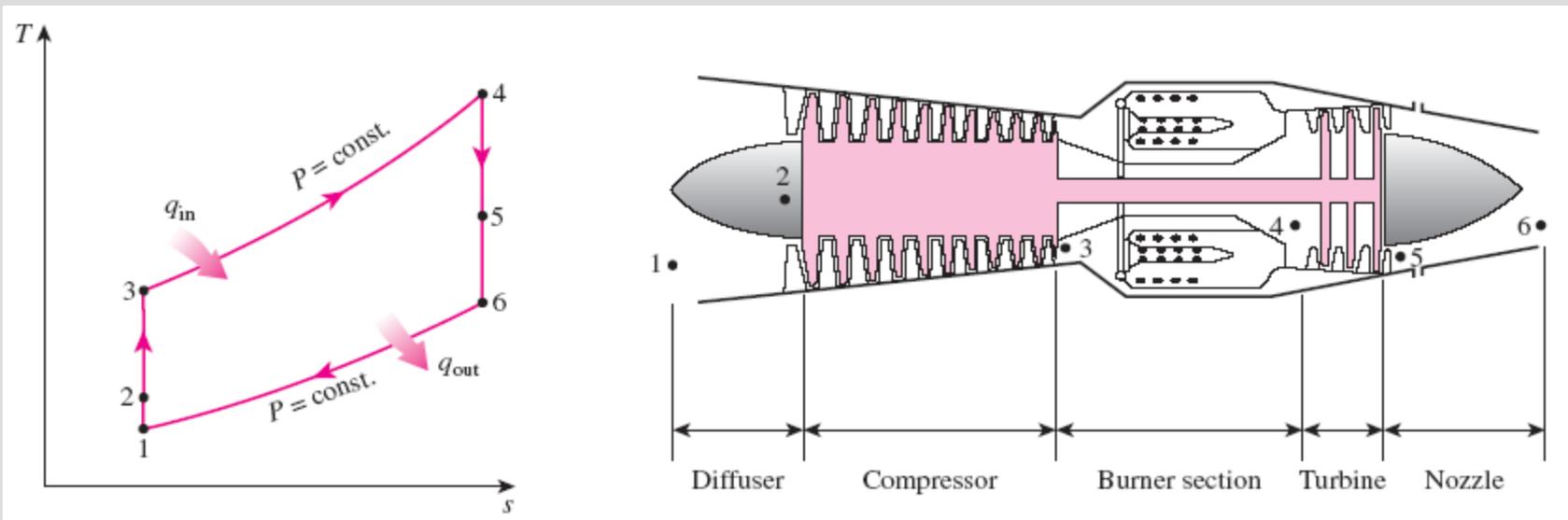
$$\dot{W}_P = FV_{\text{aircraft}} = \dot{m}(V_{\text{exit}} - V_{\text{inlet}})V_{\text{aircraft}} \quad (\text{kW})$$

## Efficacité propulsive

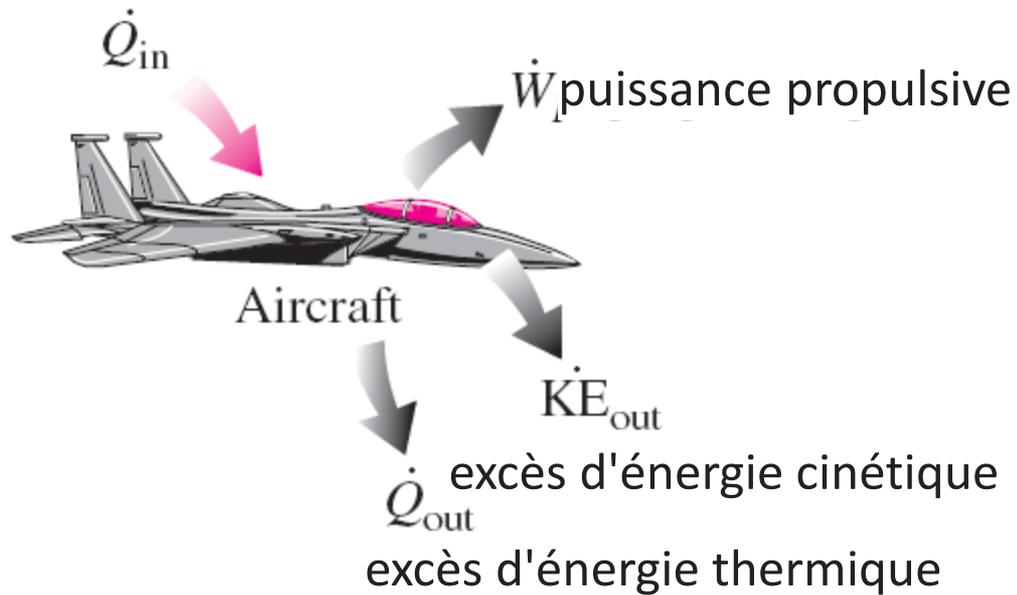
$$\eta_P = \frac{\text{Propulsive power}}{\text{Energy input rate}} = \frac{\dot{W}_P}{\dot{Q}_{\text{in}}}$$



La puissance propulsive est la poussée qui agit sur l'aéronef sur une distance par unité de temps.



Les composants de base d'un turboréacteur et le diagramme T-s pour le cycle idéal du turboréacteur.



l'énergie fournie à un avion (à partir de la combustion d'un carburant) se manifeste sous diverses formes

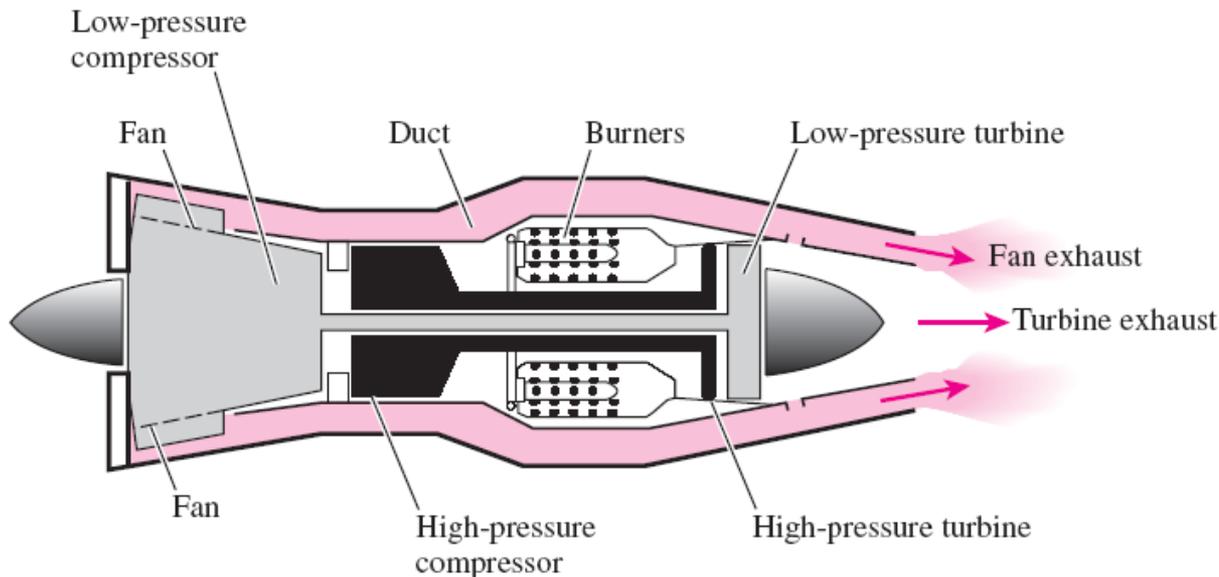
# Modifications des moteurs turbojet

Les premiers avions construits étaient tous à hélice, avec des hélices actionnées par des moteurs essentiellement identiques aux moteurs d'automobiles.

Les moteurs à hélice et les moteurs à propulsion par réaction ont leurs propres forces et limitations, et plusieurs tentatives ont été faites pour combiner les caractéristiques souhaitables des deux moteurs.

Deux de ces modifications sont le moteur *propjet* et le *turbofan*.

Le moteur le plus largement utilisé dans la propulsion des avions est le turbo-réacteur à double flux (ou à jet d'air) dans lequel un grand ventilateur entraîné par la turbine force une quantité considérable d'air à travers un conduit entourant le moteur.



Un moteur à double flux.

# Résumé

- Considérations de base dans l'analyse des cycles de puissance
- Le cycle de Carnot et sa valeur en ingénierie
- Hypothèses de l'air standard
- Un aperçu des moteurs alternatifs
- Cycle Otto: le cycle idéal pour les moteurs à allumage commandé
- Diesel cycle: Le cycle idéal pour les moteurs à allumage par compression
- Cycles de Stirling et Ericsson
- Cycle de Brayton: le cycle idéal pour les moteurs à turbine à gaz
- Le cycle de Brayton avec régénération
- Le cycle de Brayton avec intercooling, réchauffage et régénération
- Cycles de propulsion à réaction idéaux