Thermodynamique appliqué

Cycles moteurs

Alessandro Parente

Université Libre de Bruxelles, Service d'Aéro-Thermo-Mécanique, Avenue F. D. Roosevelt 50, 1050 Bruxelles, Belgique, Tel: +32 2 650 26 73, Fax: +32 2 650 27 10

Planning

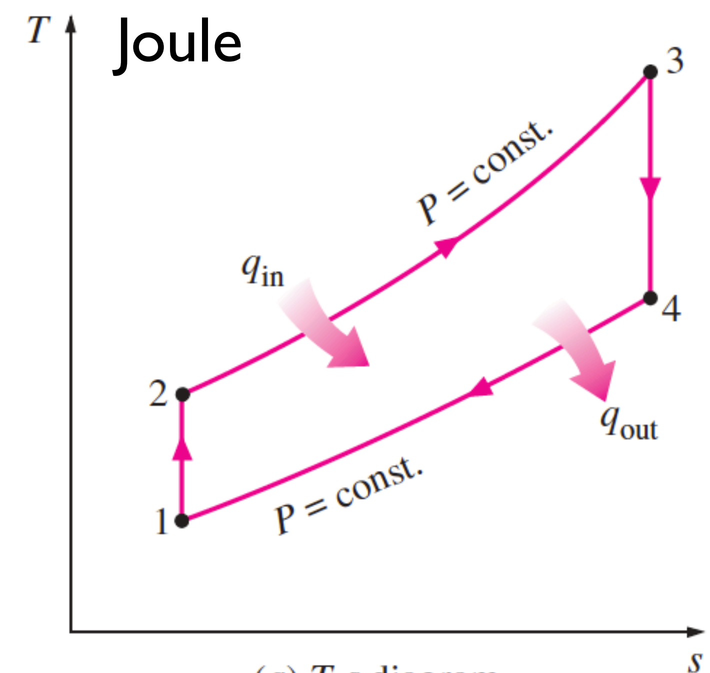
- 16/11 - Cycle de Rankine et Rankine-Hirn (2h)
- 23/11 - Cycles de Joule, Ericsson, Otto, Stirling, Diesel (3h)
- 30/11 - Cycles frigorifiques et Relations thermodynamiques (3h)
- 7/12 - Mélanges de gaz (2h)
- 13/12 - Combustion (2h) + questions

Agenda

- Introduction
  - Travail réversible pour systèmes fermés et ouverts
  - Le diagramme entropique
    - Compression, détente
    - Chauffe, refroidissiment
- Cycle Rankine-Hirn
  - Analyse énergétique
  - Cycle réel vs. cycle ideal
  - Améliorations au cycle
    - Baisse de la pression de condenseur
    - Surchauffe de la vapeur
    - Augmentation de la pression maximale
  - Alternatives au cycle de Rankine Hirn
    - Cycle à resurchauffe
    - Cycle à soutirage

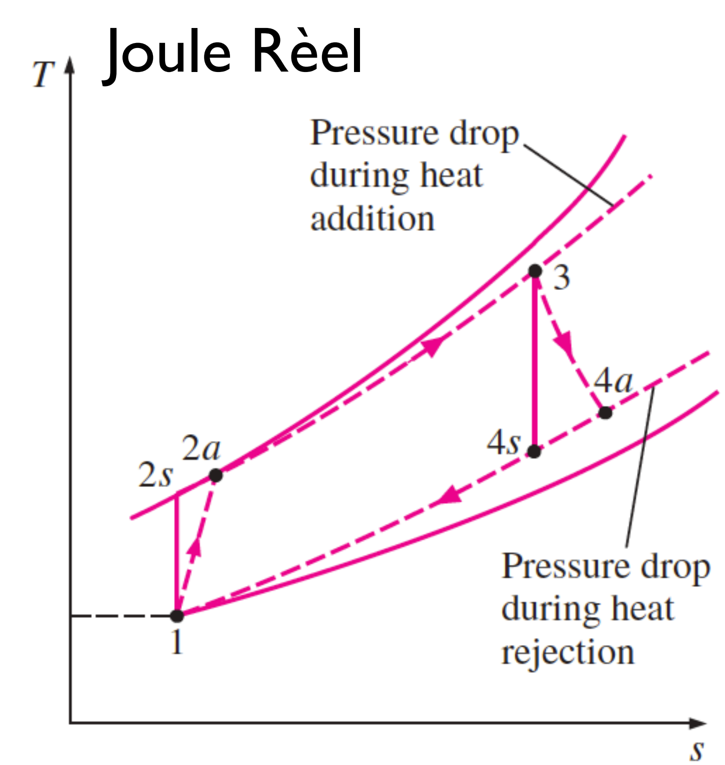
Introduction

- **Cycle**: ensemble de transformations après lesquelles le fluide moteur retourne à son état initiale
  - Générateurs de puissance comme la centrale thermique à vapeur réalisent un cycle
  - Moteurs à combustion interne (moteurs volumétriques et turbines à gaz) n'effectuent pas un cycle: le fluide moteur quitte le dispositif avec une composition/ pression/température différente que à l'entrée.



(a) T-s diagram

- **Cycle idéalises**: cycles qui approximent le processus réel:
  - Approche pratique pour analyser les performances des systèmes moteurs
  - Fluide moteur:
    - Substance à changement de phase
    - Gaz parfait (C_p constant)



Introduction

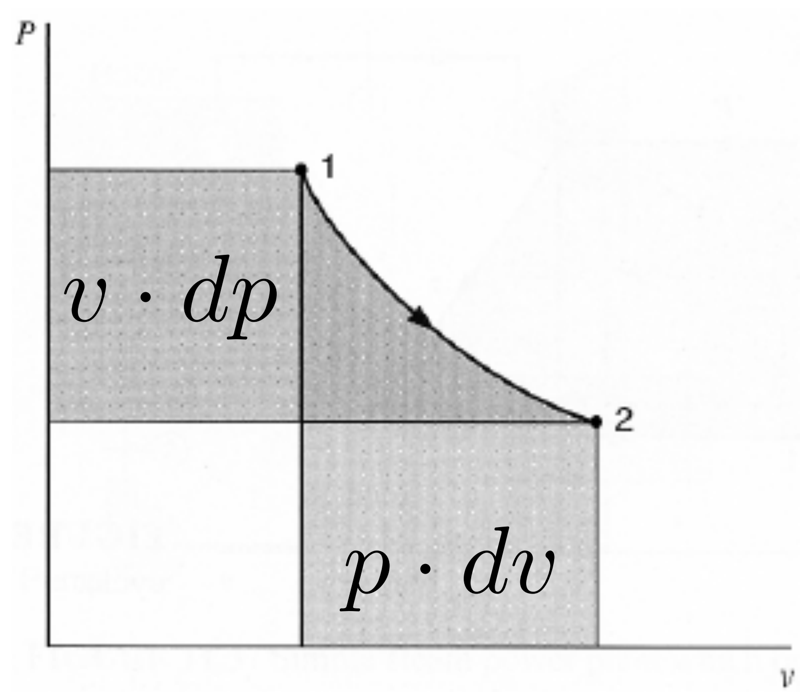
Travail réversible

- Cycles moteurs:
  - Systèmes fermés en évolution temporelle → travail de déplacement de frontière

$$dw_{rev} = -p \cdot dv$$

  - Systèmes ouverts en régime permanent, qui font intervenir du travail à l'arbre d'une machine tournante

$$dw_{rev} = v \cdot dp$$



Introduction

Travail réversible

- Expression du travail associé aux systèmes permanents en fonction des propretés du fluide

premier principe pour systèmes ouvertes	$$\delta q_{rev} + \delta w_{rev} = dh + dke + dpe$$
Définition d'entropie	$$\delta q_{rev} = T \cdot ds$$
Equation de Gibbs	$$T \cdot ds = dh - v \cdot dp$$ $$\delta q_{rev} = dh - v \cdot dp$$
travail réversible (*v=cte* → équation Bernoulli)	$$\delta w_{rev} = v \cdot dp + dke + dpe$$ $$v = cte \quad \delta w_{rev} = v\left(p_2 - p_1\right) + \frac{\left(v_2^2 - v_1^2\right)}{2} + g\left(z_2 - z_1\right)$$
dke et *dpe* ≈ 0 (majorité systèmes TD)	$$\delta w_{rev} = v \cdot dp$$ > 0 compresseur, pompe < 0 turbine

- Diagramme entropique (*T-s*) - Très pratique pour les échanges de chaleur: l'aire inscrite sous une transformation réversible est égale à la quantité de chaleur échangée

$$\delta q_{rev} = T \cdot ds$$

- Transformations adiabatique (compression et détente): lignes droites
- Transformations *v*=cte ou *p*=cte (gaz parfait) → fonction exponentielle

Entropie d'un gaz parfait (Eq. 7.18, 7.20)

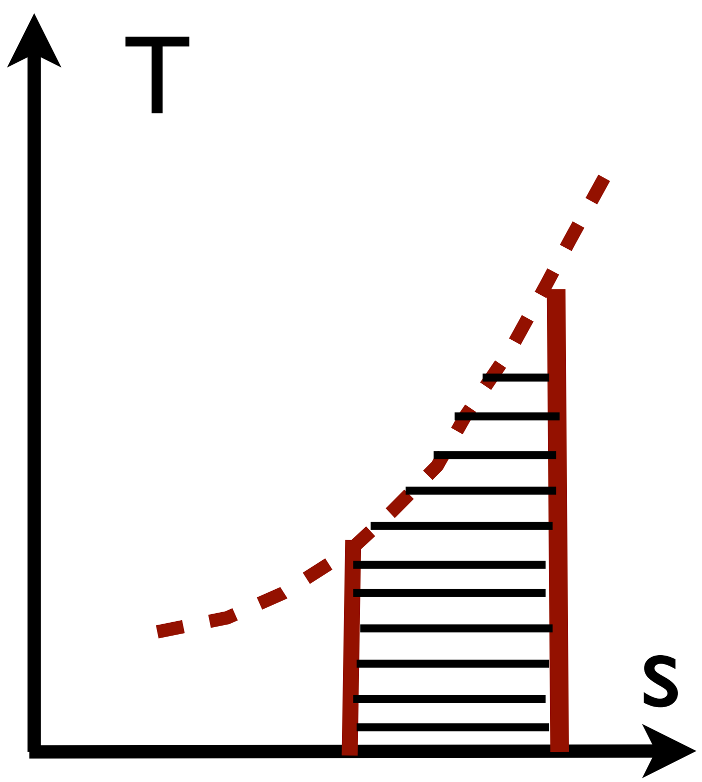
$$ds = c_p \cdot \frac{dT}{T} - R \cdot \frac{dp}{p} = c_v \cdot \frac{dT}{T} + R \cdot \frac{dv}{v}$$

$$p = cte \quad ds = cp \cdot \frac{dT}{T} \quad s = c_p\, lnT + B \quad T = k \cdot e^{\frac{s}{cp}}$$

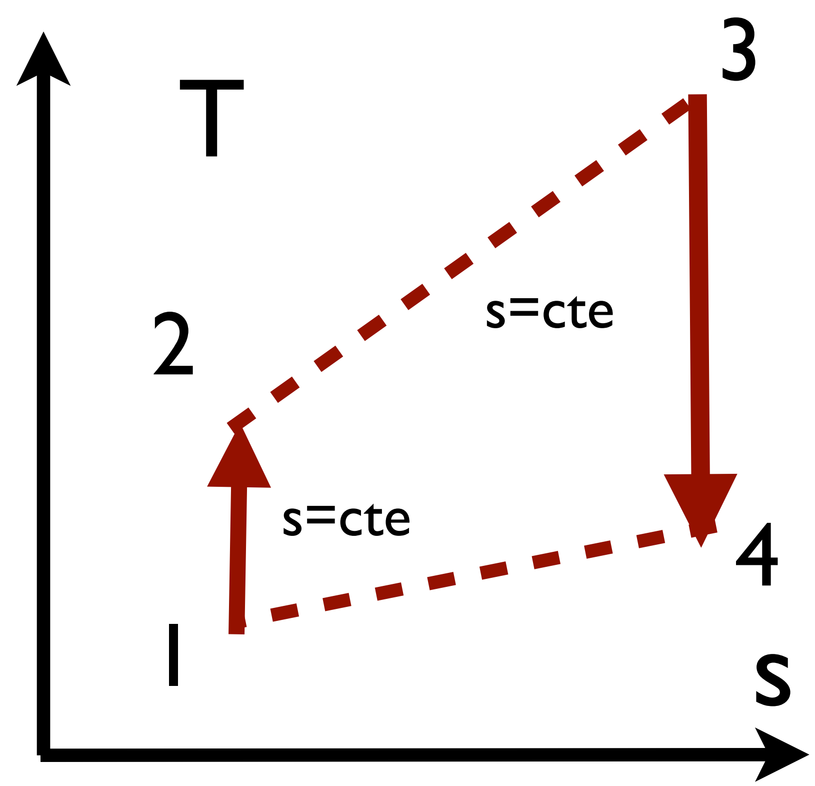
$$v = cte \quad ds = c_v \cdot \frac{dT}{T} \quad s = c_v\, lnT + B \quad T = k \cdot e^{\frac{s}{cv}}$$

Diagramme entropique (T-s)

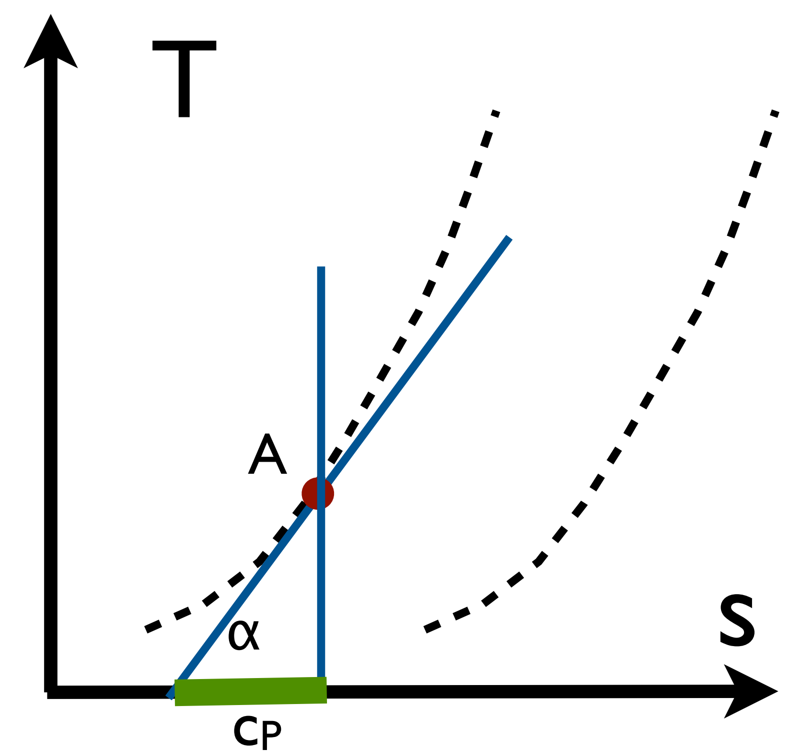
Echanges de chaleur



Compression et détente adiabatiques et réversibles



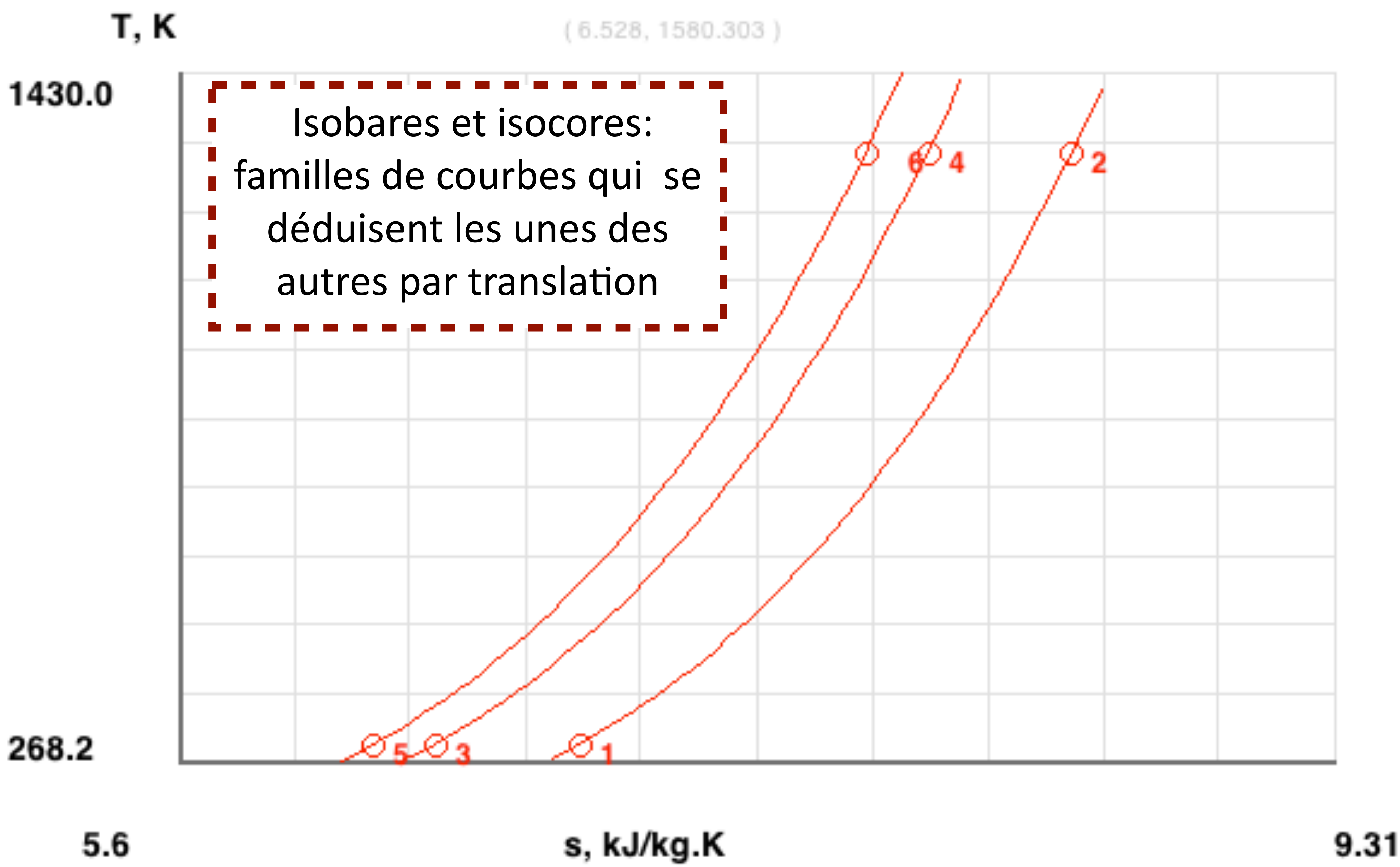
Transformations isobares (et isochores)



$$\frac{T}{c_p} = \frac{dT}{ds} = tg\alpha$$

Diagramme entropique (*T-s*)

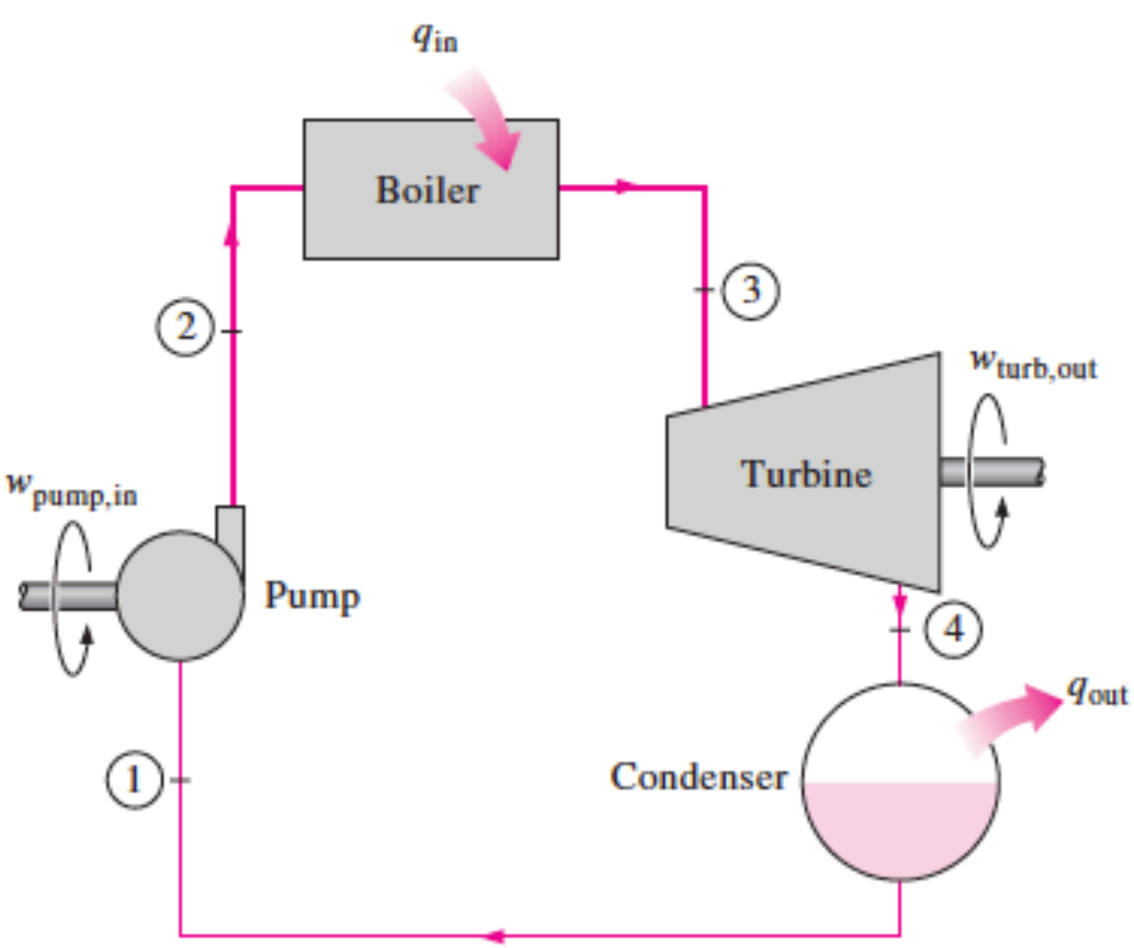
- Isobares pour un gaz idéal à p=1bar, 5 bar et 10 bar

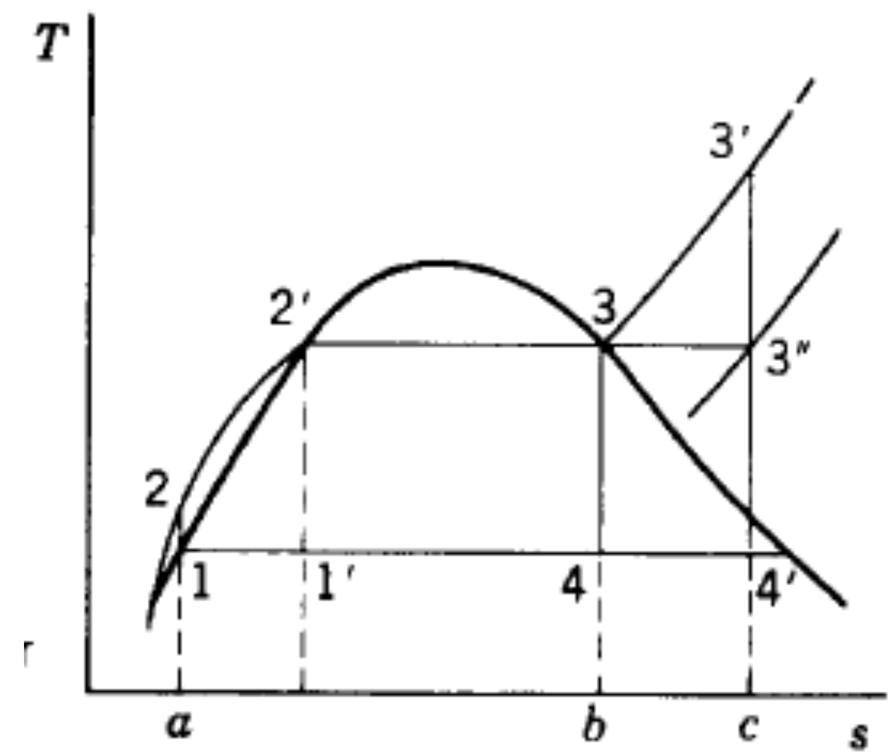


Le cycle de Rankine

Cycle idéal des centrales thermiques à vapeur d'eau

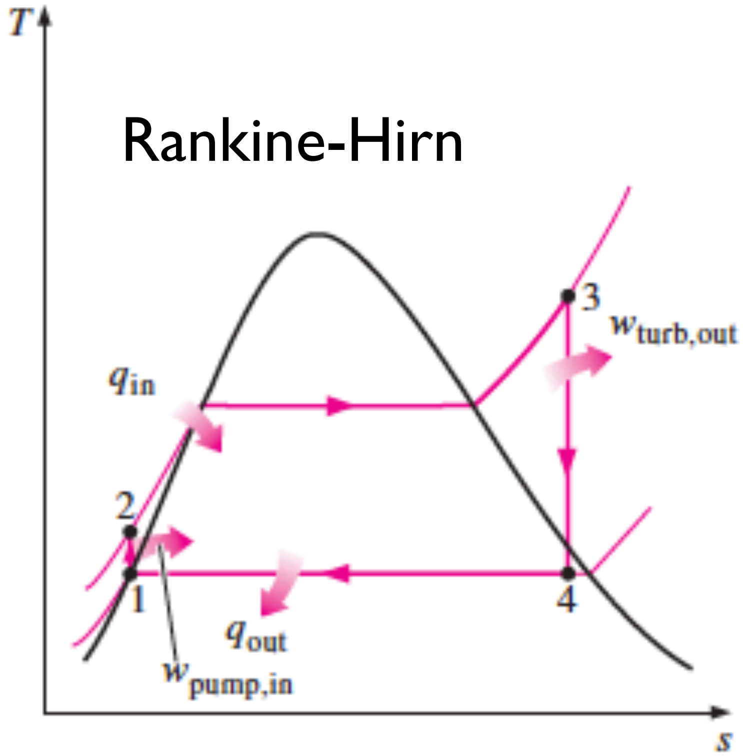
- 4 transformations de systèmes ouverts en régime permanent
  - 1–2 : pompage adiabatique et réversible dans la pompe, à partir d'un état de liquide saturé
  - 2–3 : échange de chaleur isobare dans la chaudière jusqu'à l'état de vapeur saturée
  - 3–4 : détente adiabatique et réversible dans la turbine
  - 4–1 : échange de chaleur isobare dans le condenseur





Le cycle de Rankine

- Travail effectué d'autant plus grand que la différence de volume massique entre les phases de détente et de compression est grande $w_{net} = w^*_{turbine} - w_{pompe}$
  - Changement de phase afin de maximiser cette différence



$$w_{pompe} = v_L \cdot \int_{p_1}^{p_2} dp = v_L\left(p_2 - p_1\right)$$

$$w_{turbine} = \int_{p_4}^{p_3} v_V \cdot dp$$

$$v_L << v_V \rightarrow w_{pompe} << \left|w_{turbine}\right|$$

- Une variante est le **cycle de Hirn** dans lequel la vapeur est surchauffée avant d'être détendue (centrales électriques)

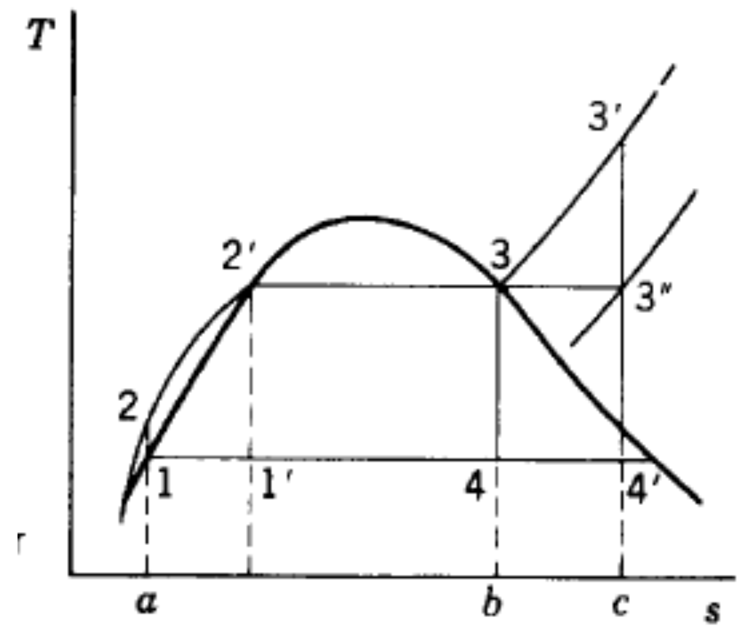
Le cycle de Rankine

Analyse énergétique

$$\boxed{q + w = h_2 - h_1}$$

Remarque "pratique" pour les cycles idéals
Les systèmes qui échangent de la chaleur n'échangent pas de travail et vice versa!

- *Pompe (q=0)* $$w_{pompe} = h_2 - h_1 = v\,(p_2 - p_1) = 1/\rho\,(p_2 - p_1)$$
- *Chaudière (w=0)* $$q_{in} = h_3 - h_2$$
- *Turbine (q=0)* $$w^*_{turbine} = h_3 - h_4$$
- *Condenseur (w=0)* $$q_{out} = h_1 - h_4$$

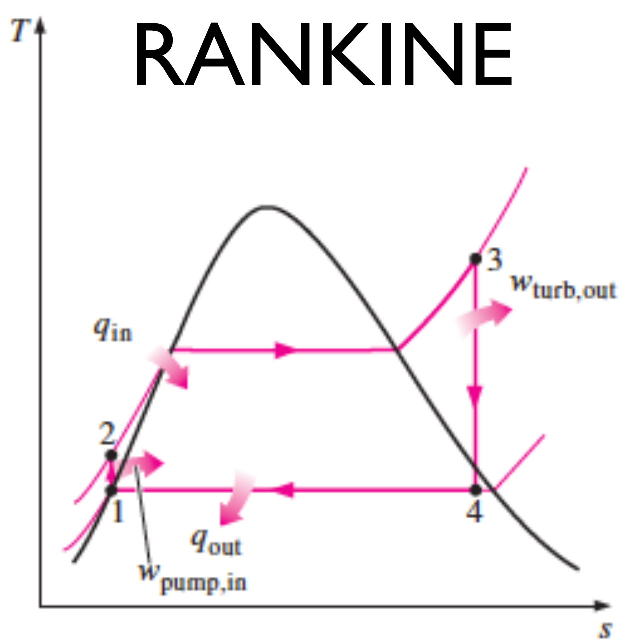


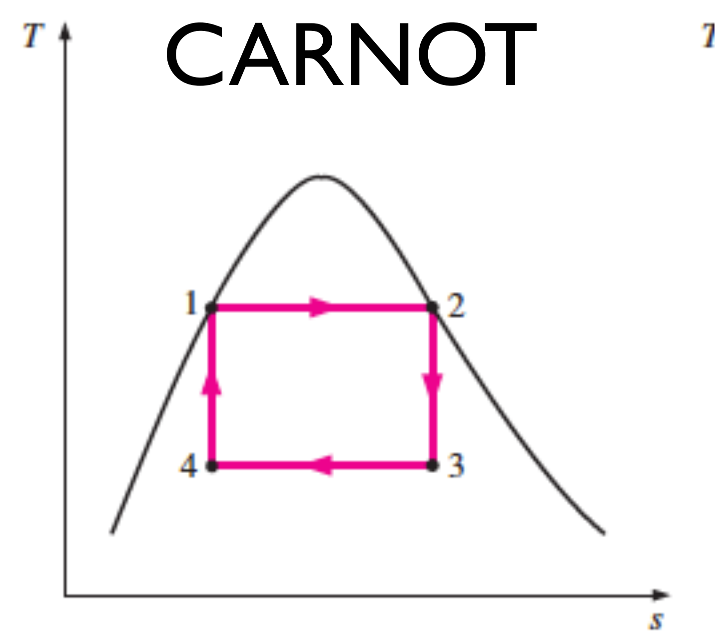
- *Efficacité thermique* $$\epsilon_{th} = \frac{aire \quad 1-2-2'-3-4-1}{aire \quad a-2-2'-3-b-a}$$

$$\epsilon_{th} = \frac{w^*_{turbine} - w_{pompe}}{q_{in}} = \frac{q_{in} - q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}}$$

Le cycle de Rankine

- Rendement exergétique du cycle de Rankine (>80 %) inférieure à celui du cycle de Carnot (production d'entropie chauffage 2 – 2')

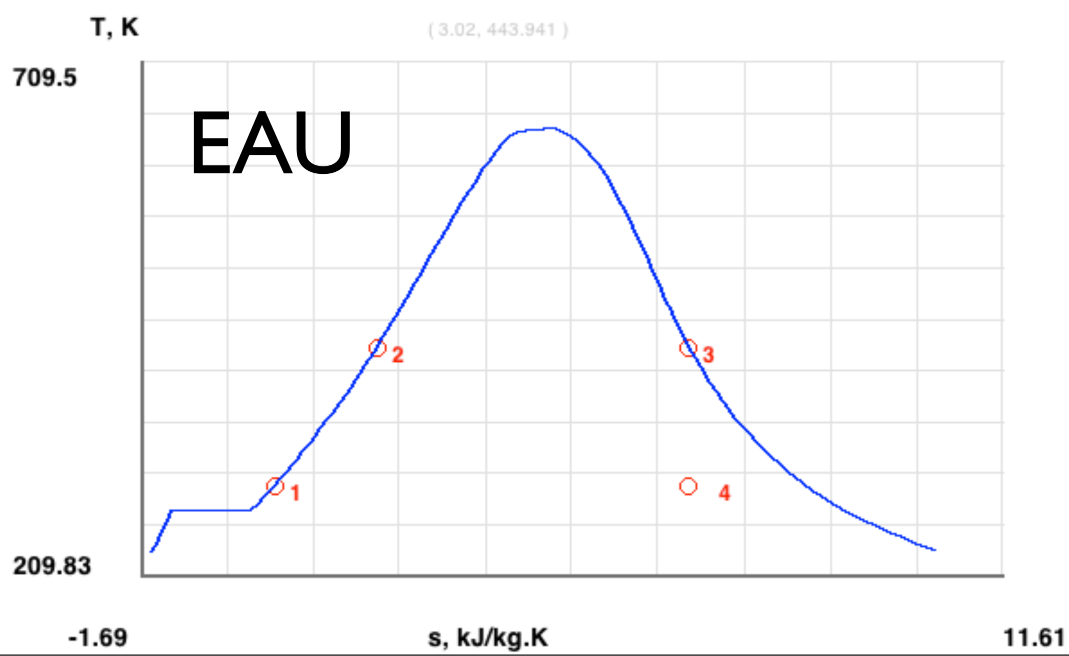


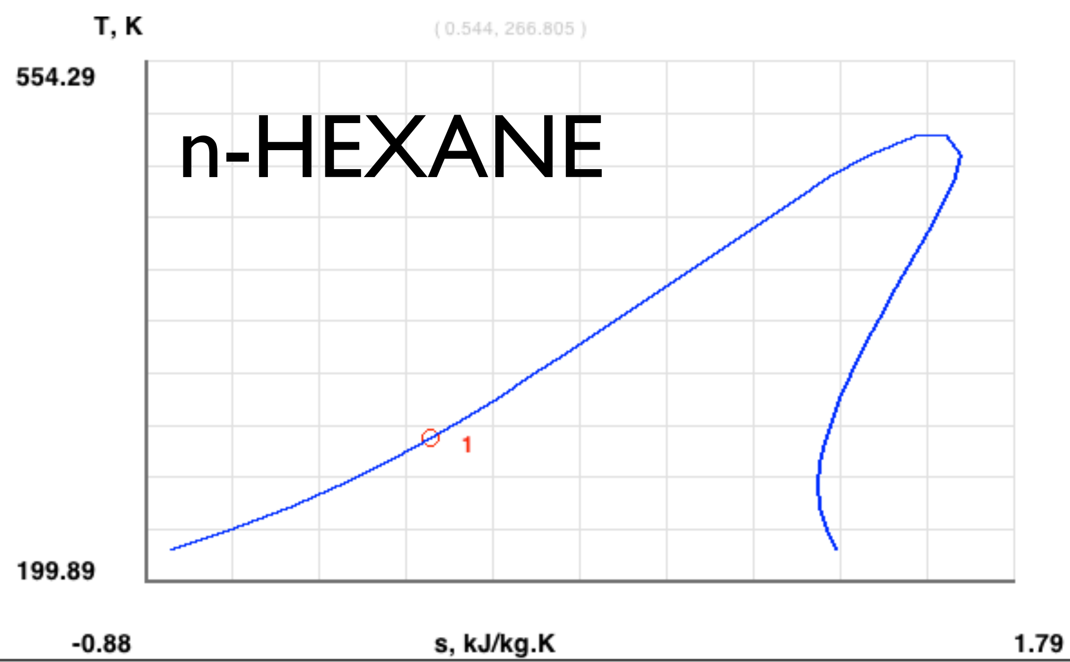


- Cycle de Carnot pour le centrales thermiques?? Non!
  - Compression d'un mélange liquide/vapeur → grands dangers d'endommagement des matériels
  - Titre de vapeur à la sortie de la turbine pas assez élevé (érosion)

Le cycle de Rankine

- Inconvénients du cycle de Rankine.
  - **Condenseur** Le condenseur sous vide pour utiliser l'ambiance comme source froide (en générale eau 298 K) → complications technologiques
  - **Condensation partielle dans la turbine** Titre de vapeur à la sortie de la turbine inférieur à 0.88 (valeur limite pour éviter l'érosion)
    - T_C < 573 K (titre après détente > 0.88)
    - Machine volumétrique → puissances limitées
    - Fluides organiques (cloche penchée vers la droite du diagramme Ts)

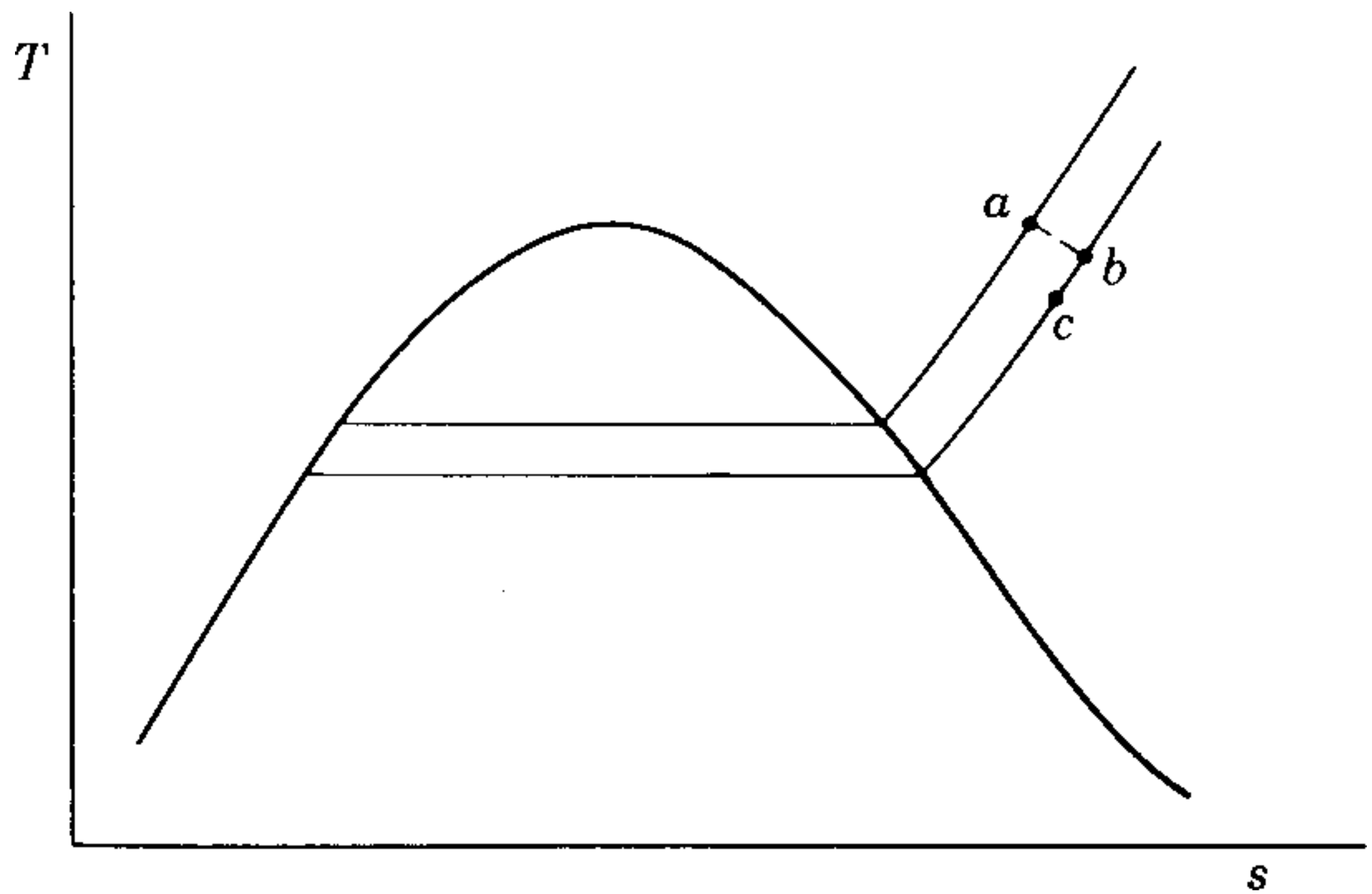




Le cycle de Rankine

Cycle réel vs. cycle ideal

- Écarts entre cycle de Rankine réel et idéal
  - **Pertes en tuyauterie**
    - Pertes de charge dues à la dissipation visqueuse
    - Pertes de chaleur vers l’ambiance



a – b : perte de charge

$h_b = h_a$ ($q = w = 0$) et $p_b < p_a$.

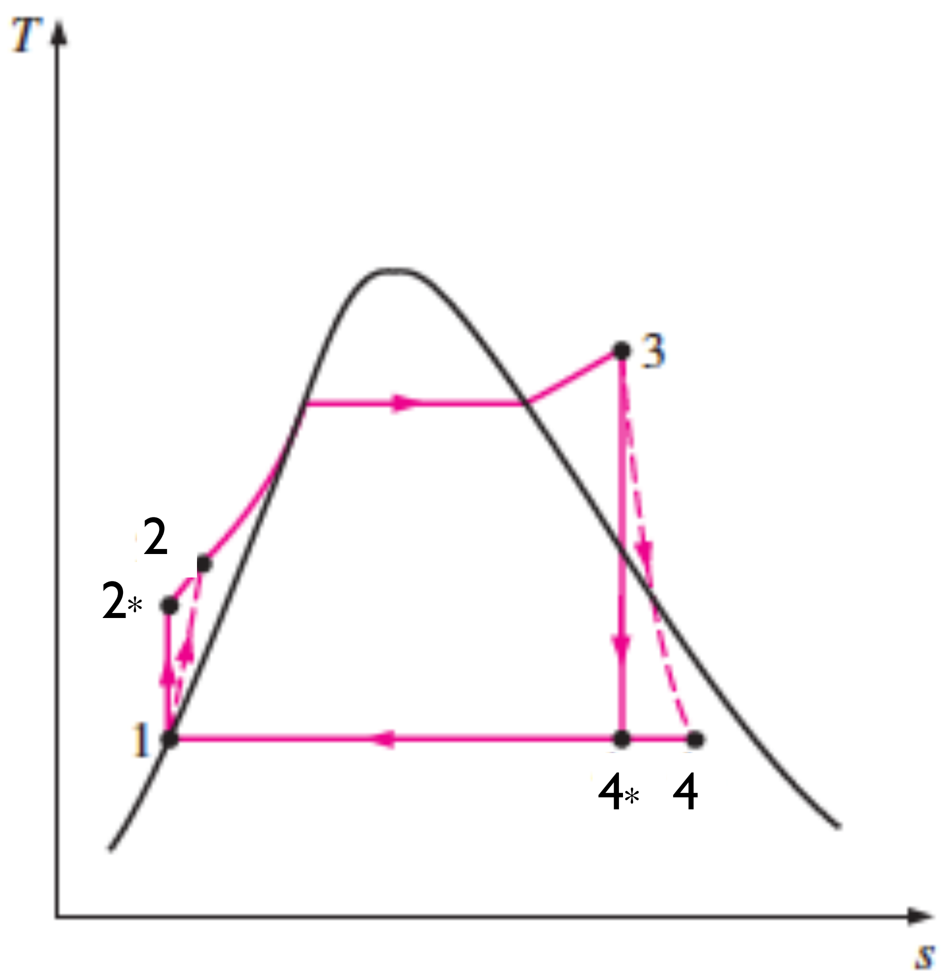
b – c transfert de chaleur

$h_b > h_c$ ($q < 0$), et $p_b = p_c$

Le cycle de Rankine

Cycle réel vs. cycle ideal

- Écarts entre cycle de Rankine réel et idéal
  - **Pertes dans la turbine et dans la pompe**
    - Pertes par dissipation visqueuse (rendements isentropiques)

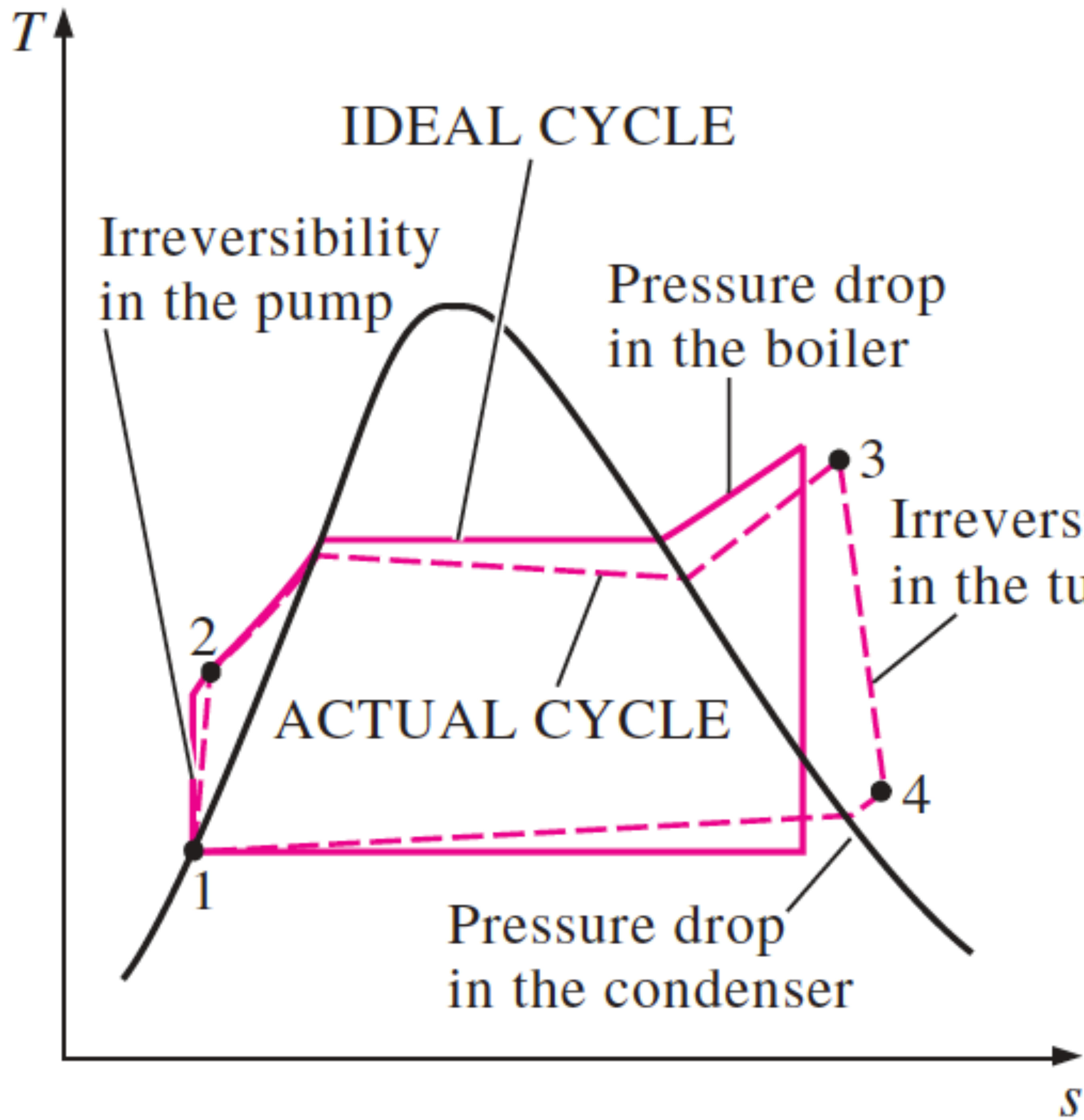


$$\eta_p = \frac{w_{p,ideal}}{w_p} = \frac{h_{2*} - h_1}{h_2 - h_1}$$

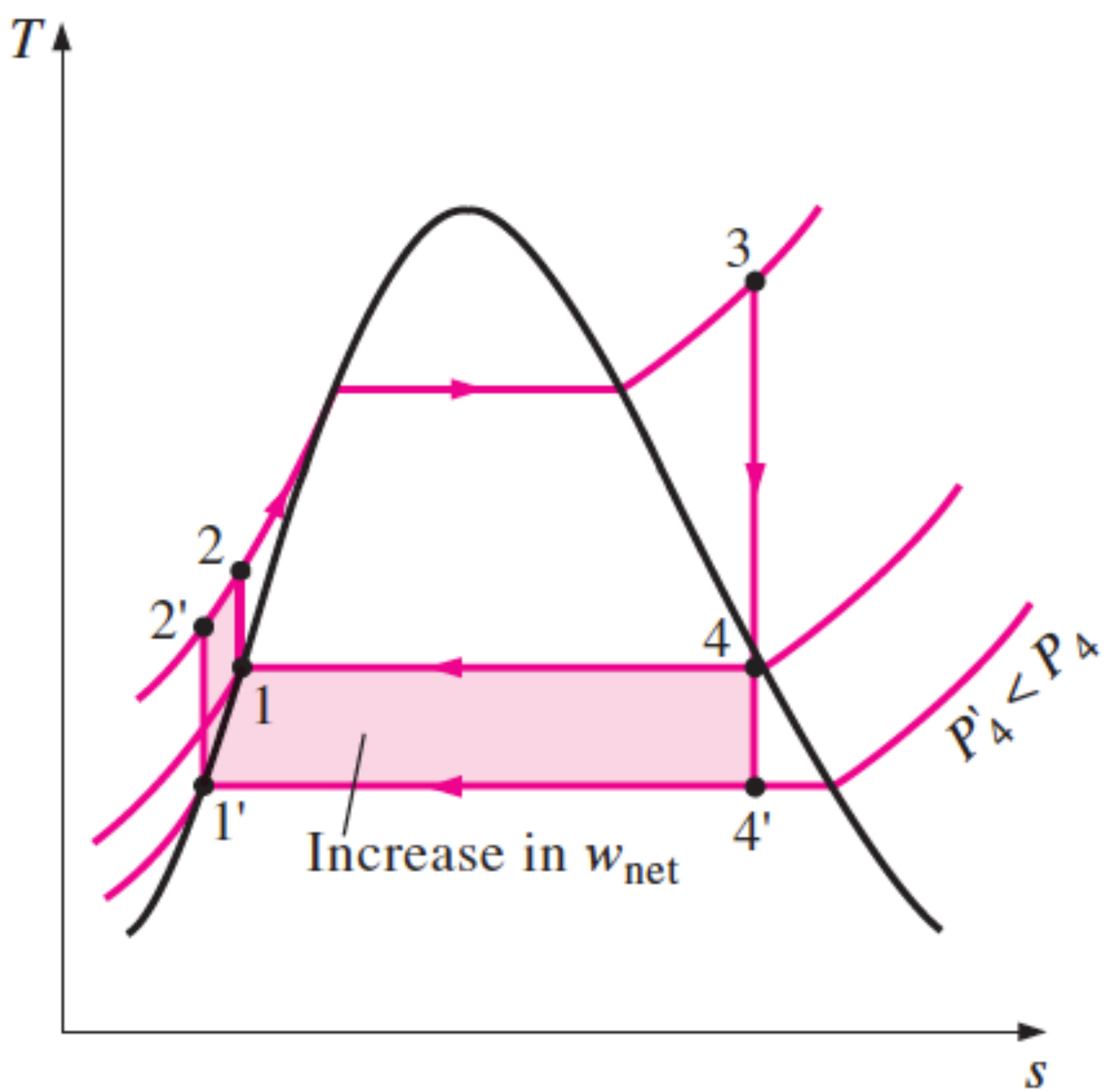
$$\eta_t = \frac{w_t^*}{w_{t,ideal}^*} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4*}}$$

  - **Pertes dans le condenseur**
    - Refroidissement du liquide sous la température de saturation dans le condenseur.

Cycle Rankine-Hirn réel



Baisse de la pression de condenseur



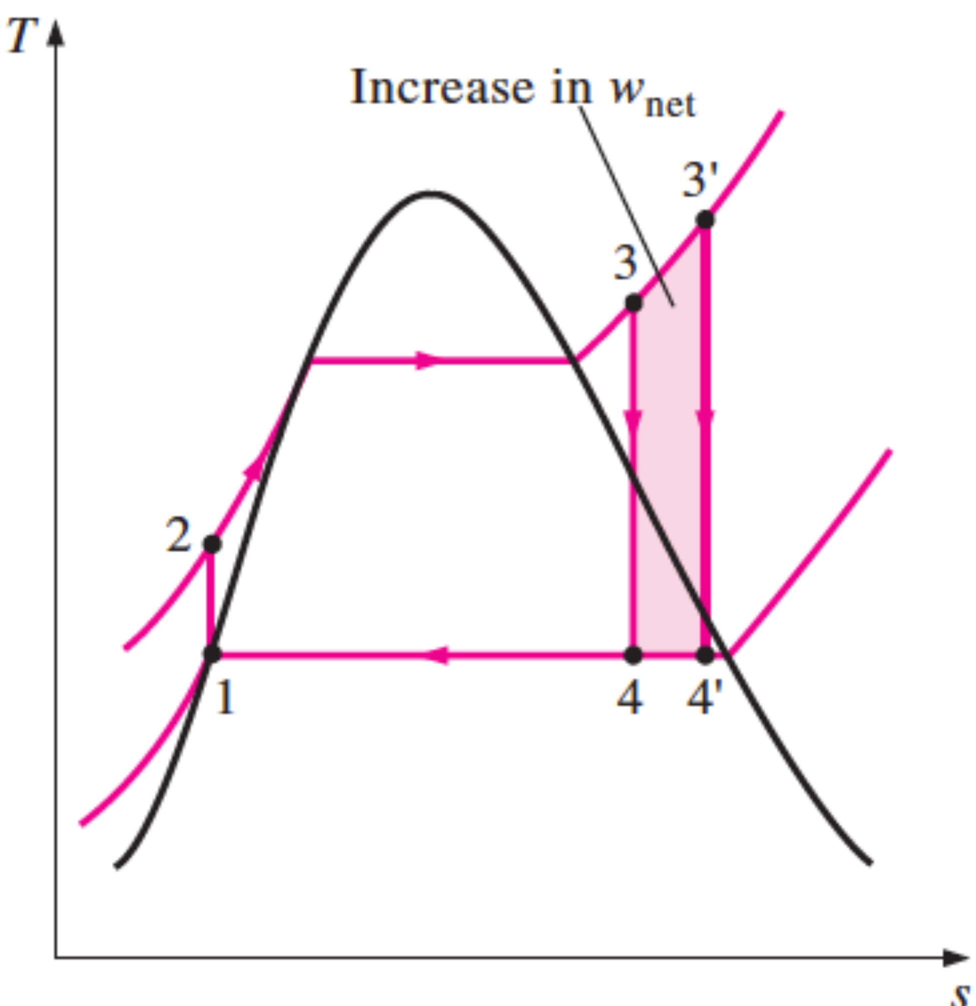
- Le travail net augmente de la surface en rose (1'-2'-2-1-4'-4)
- La chaleur fournie au liquide augmente de l'aire sous la courbe 2'-2 ($dq = T\,ds$)
- L'efficacité thermique augmente

$$\Delta w > \Delta q$$

Attention!

- réduction du titre en baissant p_4
- p_4 telle que $x_L < 0.1 \rightarrow$ diminution du rendement, érosion

Surchauffe de la vapeur (cycle de Rankine-Hirn)



$$\epsilon_{th} = 1 - \frac{q_F}{q_C}$$

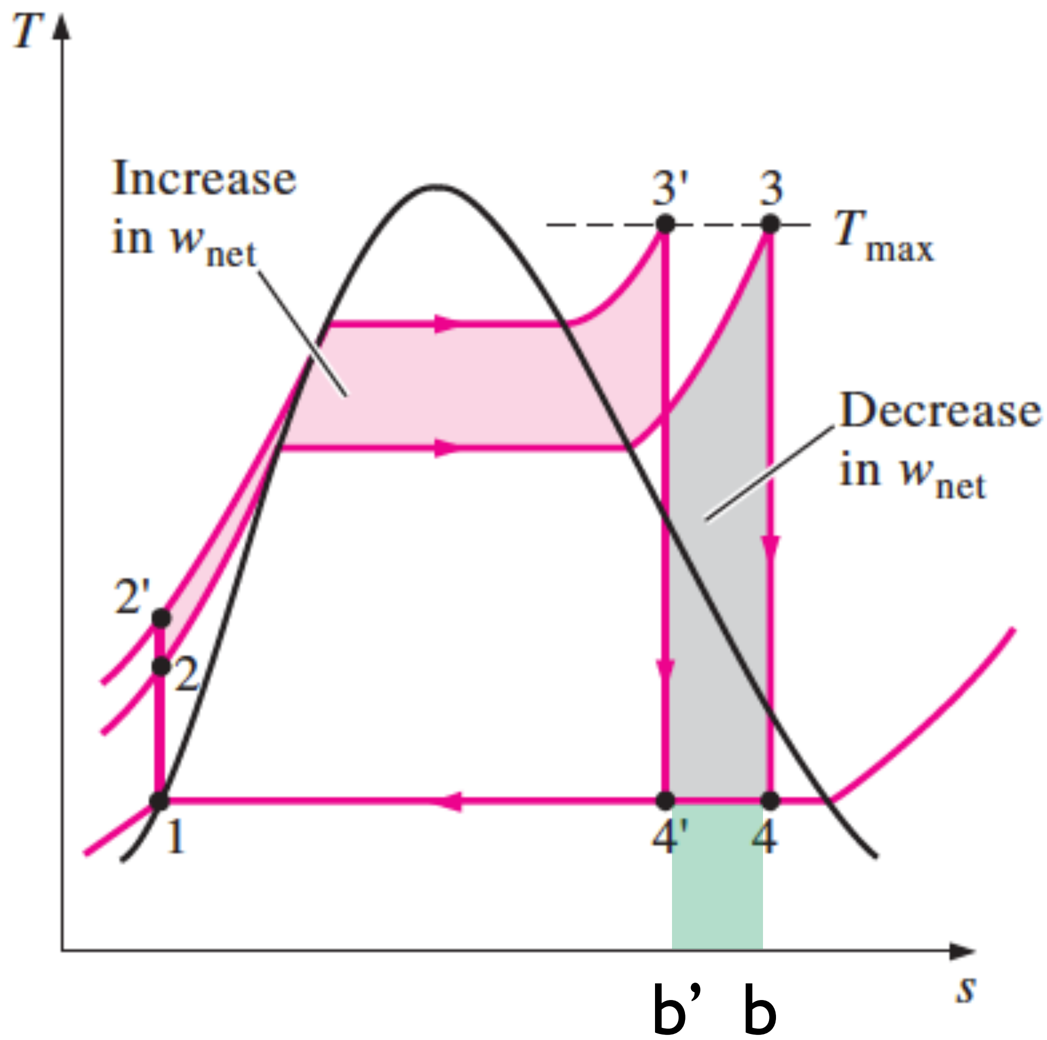
$$\epsilon_{th} = 1 - \frac{\overline{T_F}\,(s_{4'} - s_1)}{\overline{T_H}\,(s_{3'} - s_2)} = 1 - \frac{\overline{T_F}}{\overline{T_H}}$$

- Le travail net augmente de la surface en rose (3-3'-4'-4)
- La chaleur fournie au liquide augmente de l'aire sous la courbe 3-3' (*dq* = *T ds*)
- L'effet net est une augmentation de l'efficacité (la température moyenne lors du chauffage augmente)
- La teneur en eau en 4' diminue

Attention!

- L'irréversibilité augmente (la totalité du chauffage est cette fois irréversible) et le rendement exergétique diminue.

Augmentation de la pression maximale



- Le travail net augmente de la surface en rose et diminue de la surface en gris → w_{net} ~ constant
- La chaleur rejetée diminue de l'aire 4'-4-b-b'-4' → efficacité et le rendement exergétique augmentent

$$\epsilon_{th} = 1 - \frac{q_F}{q_C}$$

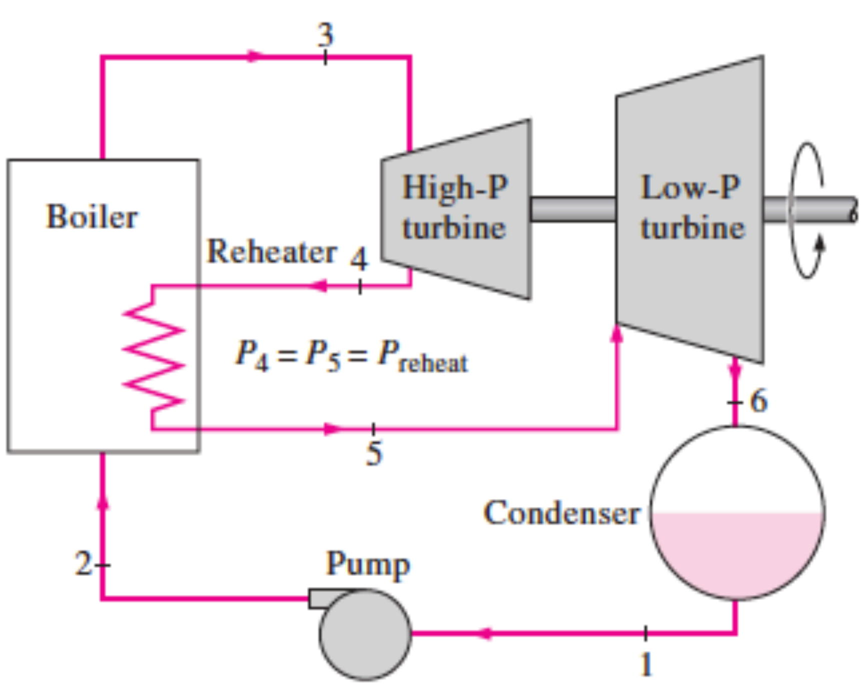
Attention!

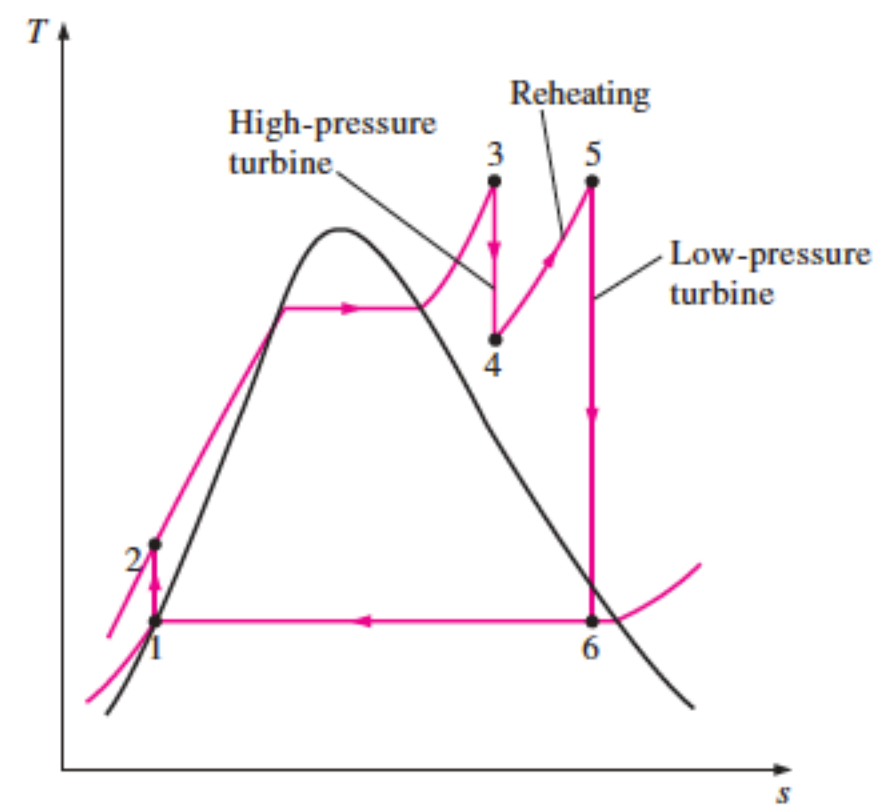
- La teneur en eau augmente

Cycle à resurchauffe

Augmentation de la pression maximum → augmentation de l'efficacité du cycle de Rankine-Hirn et de la teneur en eau à l'échappement

- Introduction d'une ou plusieurs resurchauffes → efficacité presque constante mais teneur en eau réduite





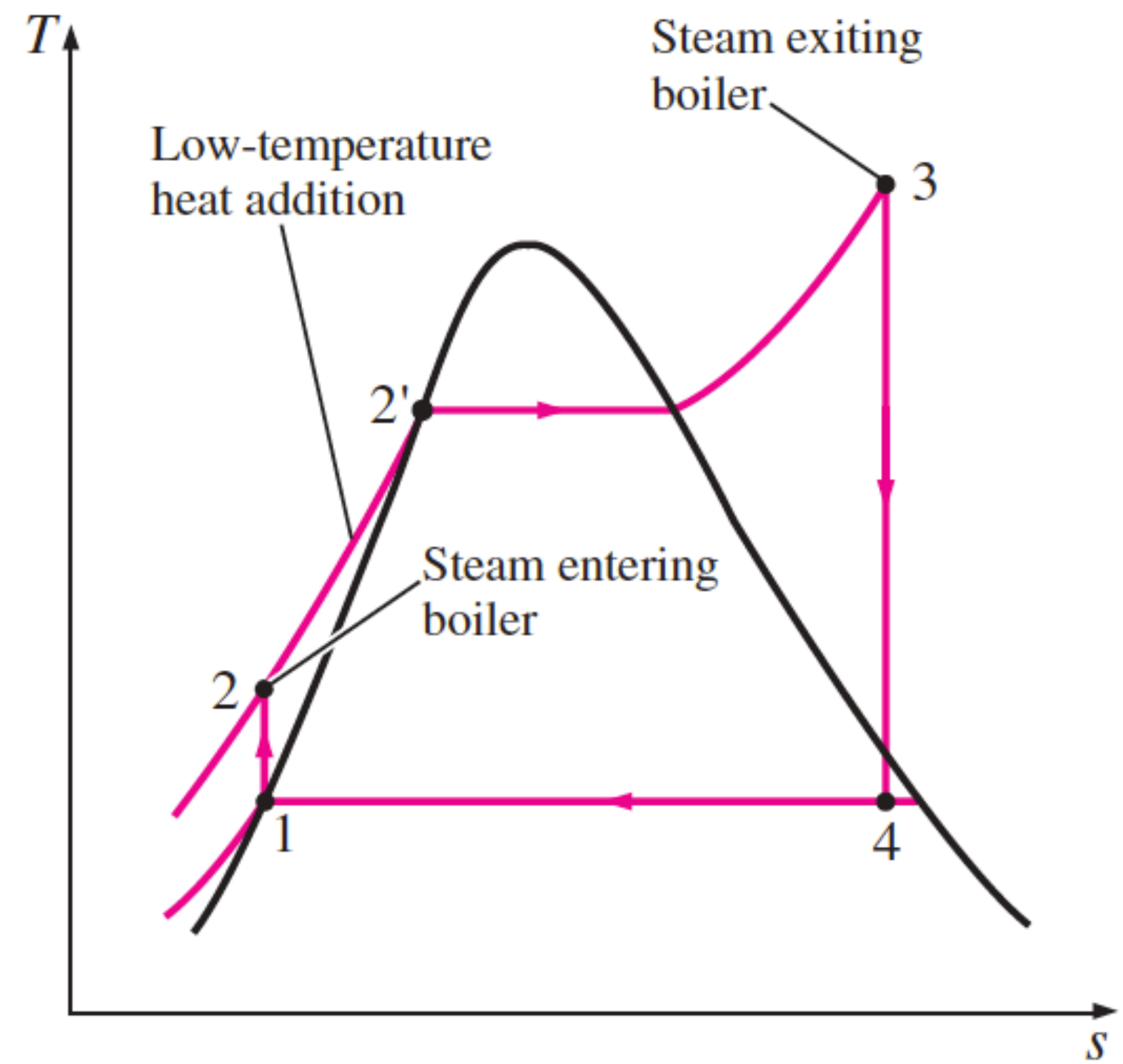
Le cycle de Rankine-Hirn

Alternatives

Cycle à soutirage

Perte d'efficacité thermique et de rendement exergetique du cycle de Rankine-Hirn par rapport au cycle de Carnot:

- transfère de chaleur à basse température (transformation 2-2')
- production d'entropie dans la phase de chauffage



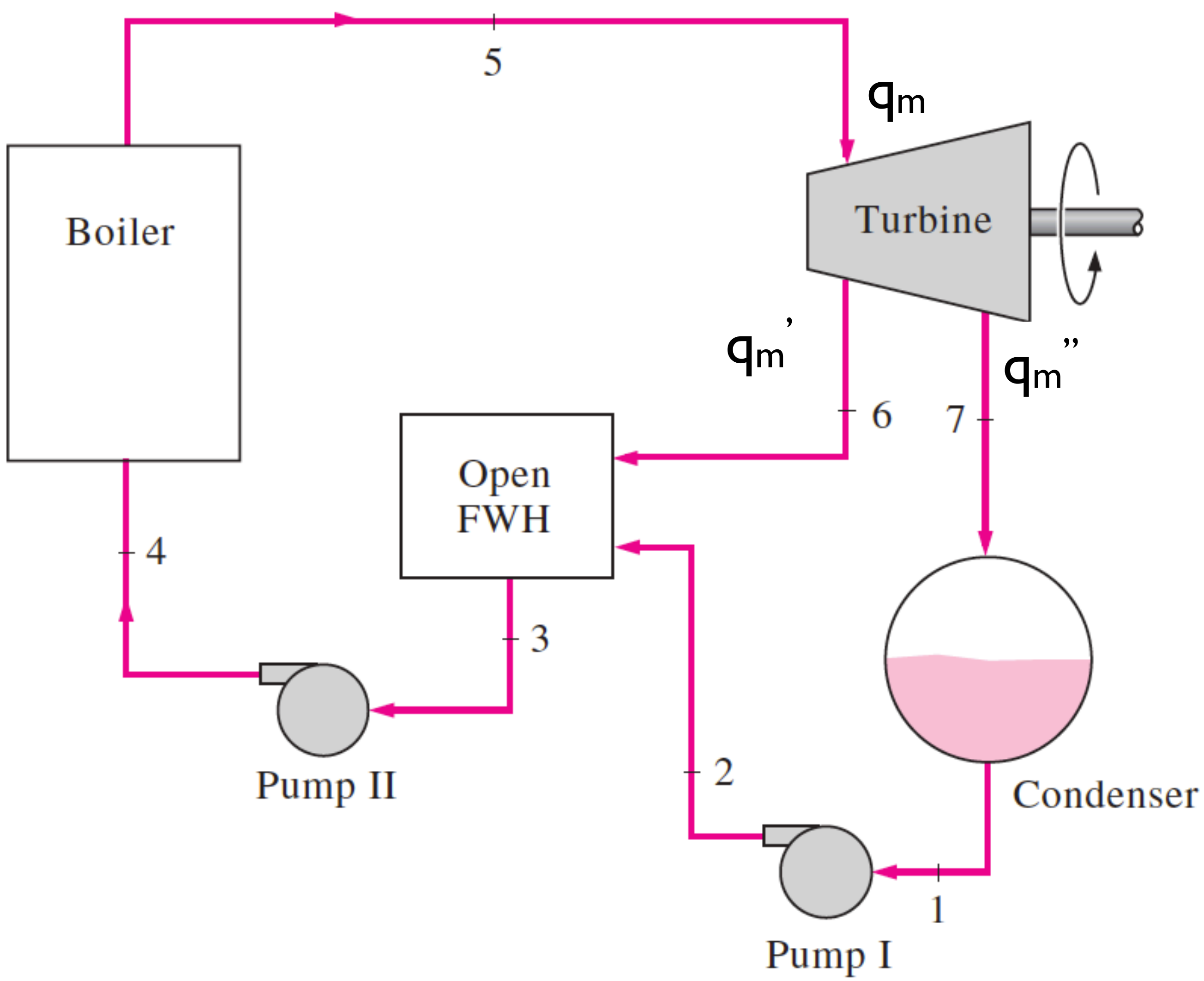
Solution

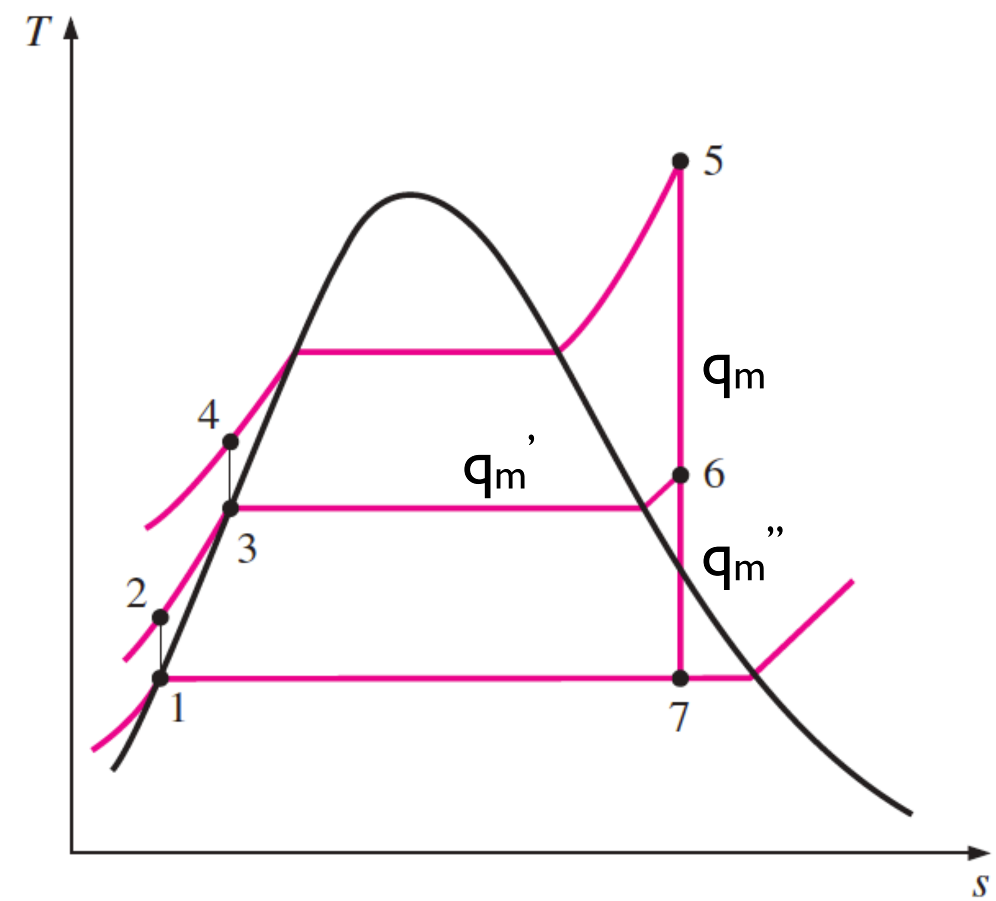
- Prélèvement d'une fraction de vapeur dans la turbine à une pression intermédiaire → réchauffe de l'eau à la sortie de la pompe

Le cycle de Rankine-Hirn

Alternatives

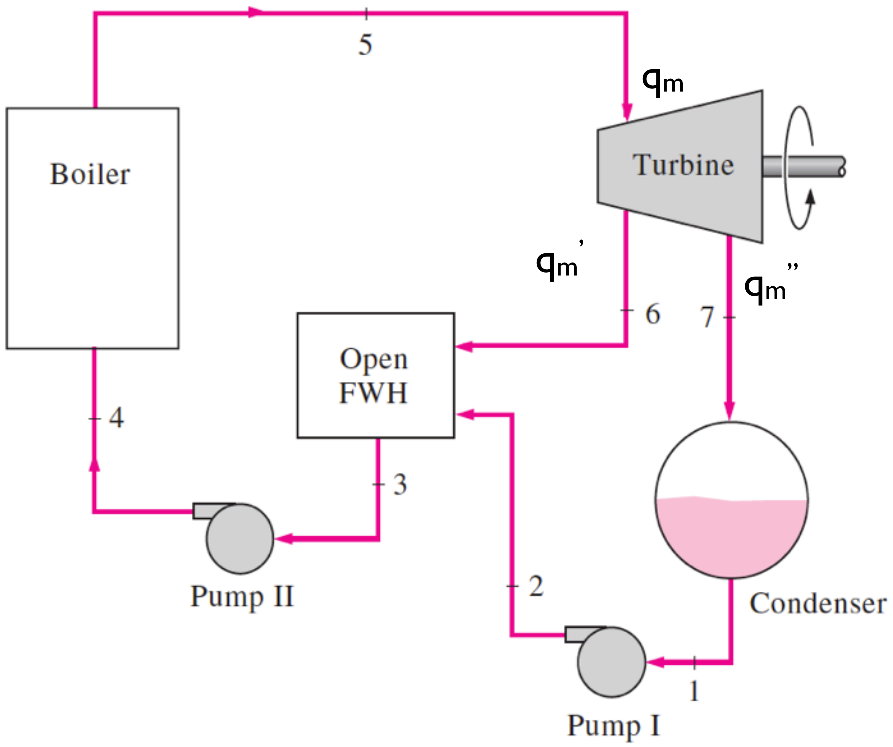
Cycle à soutirage





Le cycle de Rankine-Hirn

Alternatives



Cycle de Rankine-Hirn

$$\epsilon_{th} = \frac{h_5 - h_7}{h_5 - h_2}$$

Cycle à soutirage

$$\epsilon_{th} = \frac{q''_m (h_5 - h_7) + q'_m (h_5 - h_6)}{(q'_m + q''_m)(h_5 - h_3)}$$

Mélangeur qm', qm''

$$(q'_m + q''_m) h_3 = q'_m h_6 + q''_m h_2$$

$$q'_m (h_3 - h_6) = q''_m (h_2 - h_3)$$

Rendement du cycle à soutirage vs. cycle de Rankine

- Puissance consommée par la pompe I ~ 0
- Puissance de la pompe auxiliaire (II) ~ 0

$$\epsilon_{th} = \frac{q''_m (h_5 - h_7) + q'_m (h_5 - h_6)}{q''_m (h_5 - h_2) + q''_m (h_2 - h_3) + q'_m (h_5 - h_3)}$$

$$= \frac{q''_m (h_5 - h_7) + q'_m (h_5 - h_6)}{q''_m (h_5 - h_2) + q'_m (h_3 - h_6) + q'_m (h_5 - h_3)}$$

$$= \frac{q''_m (h_5 - h_7) + q'_m (h_5 - h_6)}{q''_m (h_5 - h_2) + q'_m (h_5 - h_6)}$$

$$= \frac{(h_5 - h_7) + \frac{q'_m}{q''_m}(h_5 - h_6)}{(h_5 - h_2) + \frac{q'_m}{q''_m}(h_5 - h_6)}$$

$$> \frac{h_5 - h_7}{h_5 - h_2} = \epsilon_{th}$$

$$car \quad h_5 > h_6 \quad et \quad \epsilon_{th} < 1$$

Cycle à soutirage

- En pratique, plusieurs soutirages et des réchauffeurs d'eau à mélange sont utilisés