

2.5 Thermodynamique

2.5.2 Lois et efficacité

Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.

Département de génie mécanique

Stéphane Hallé, M.Sc.A., Ph.D.

Patrick Belzile, ing., M.ing.

Pierre-Luc Paradis, M.ing.

Mathieu Patin, M.ing.

Question



ENR2020

- Lequel de ces cycles thermodynamiques est régénératif ?
 - A. Carnot
 - B. Stirling
 - C. Rankine
 - D. Lavoisier
 - E. Fahrenheit

Question



ENR2020

- Lequel de ces cycles thermodynamiques est régénératif ?
 - B. Stirling

Plan de la présentation

- Lois de la thermodynamique
- Notion d'efficacité

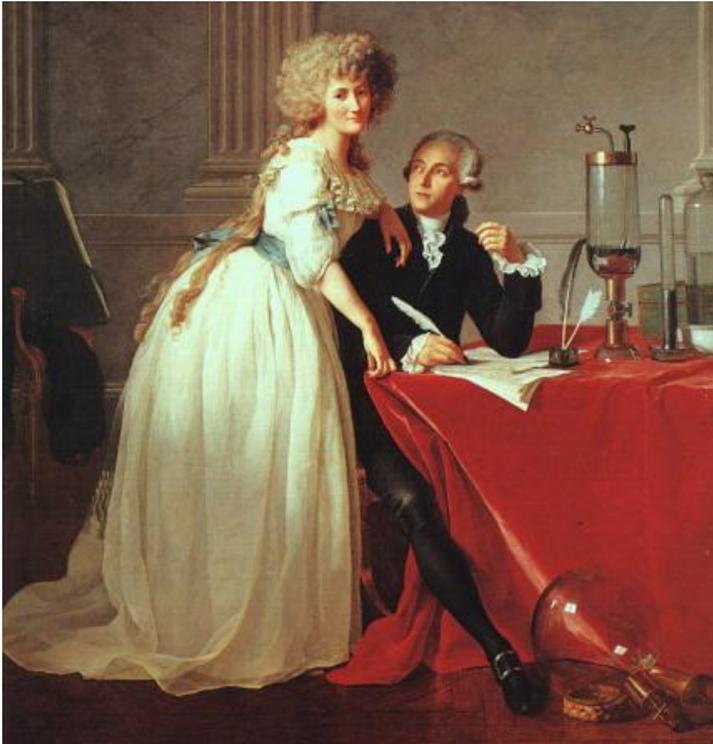
Plan de la présentation

- *Lois de la thermodynamique*
- Notion d'efficacité

Lois de la thermodynamique

Première loi

- « *Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme* »



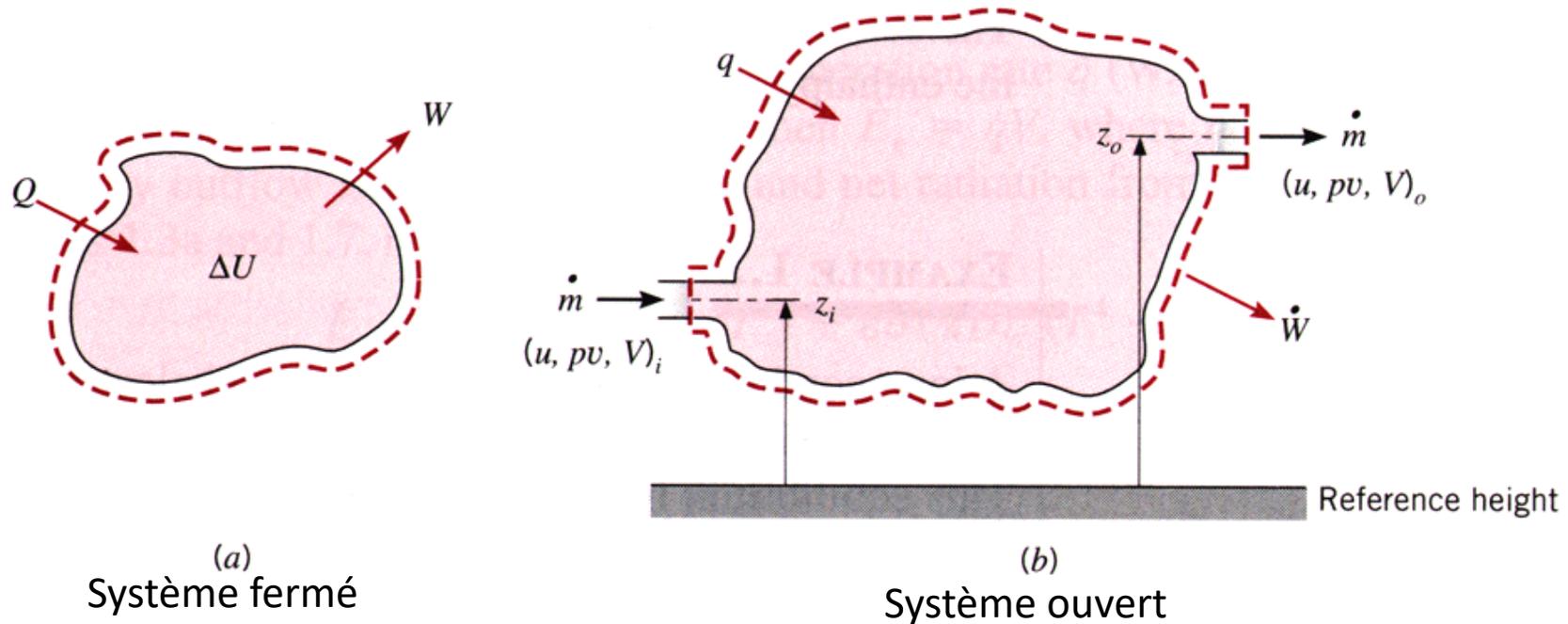
Lavoisier

« Toutes les variations de chaleur, soit réelles, soit apparentes, qu'éprouve un système de corps en changeant d'état se reproduisent en ordre inverse, lorsque le système repasse à son état initial ».

Lois de la thermodynamique

Première loi

- Conservation sur un volume de contrôle



Rappel du thème 2.2

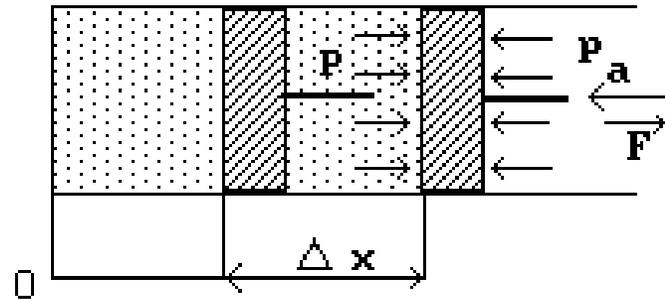
Lois de la thermodynamique

- Exemples de systèmes ouverts:



Lois de la thermodynamique

- Exemples de systèmes fermés:
 - Un bâtiment non ventilé;
 - Une fournaise fermée;
 - Un réservoir;
 - Ensemble piston/cylindre.



Lois de la thermodynamique

Première loi

- Pour l'évolution d'un système fermé

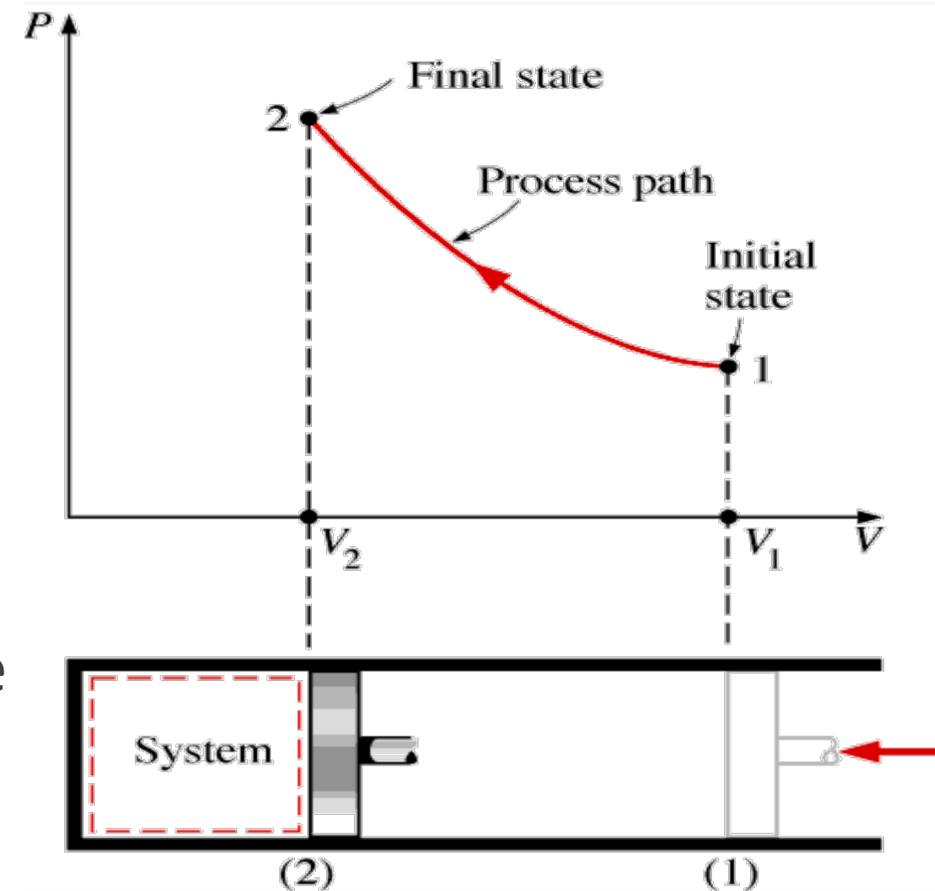
$$\Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

On ne considère que rarement les changements macroscopiques :

$$\Delta E = \Delta U$$

$$\Delta E = \Delta Q - \Delta W$$

- Il y a un signe ***négalif*** dans l'équation de conservation puisque le travail W est fait ***PAR*** le système et non ***SUR*** le système.
- Implicitement, les termes Q et W sont des termes *net* ou la différence entre ce qui sort et ce qui entre.



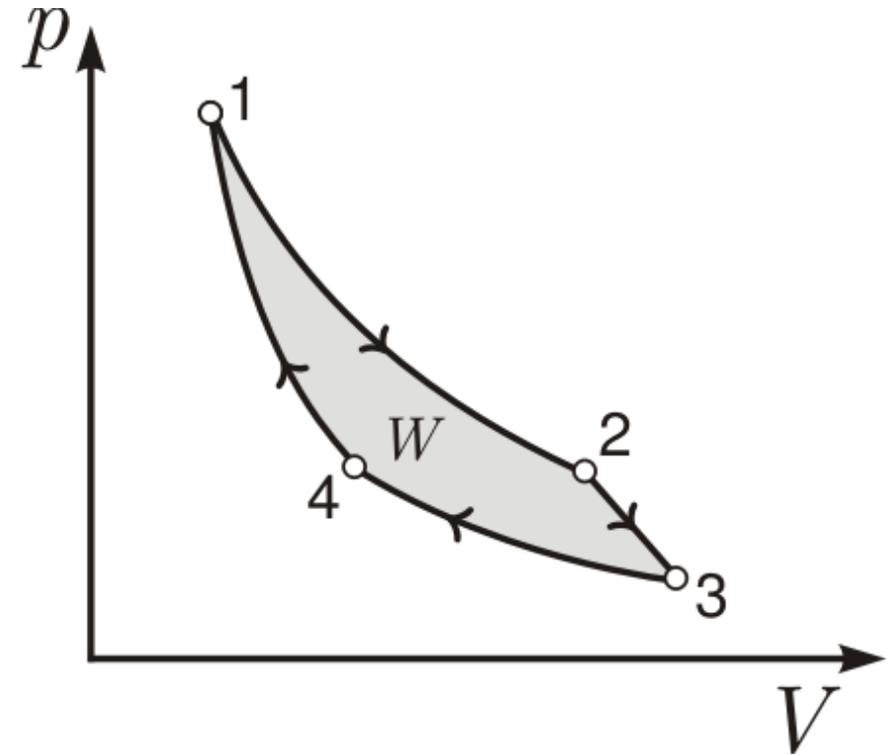
Lois de la thermodynamique

Première loi

- Pour l'évolution d'un système fermé dans un cycle thermodynamique

$$\oint E = 0 = \oint U$$

$$\oint Q = \oint W$$



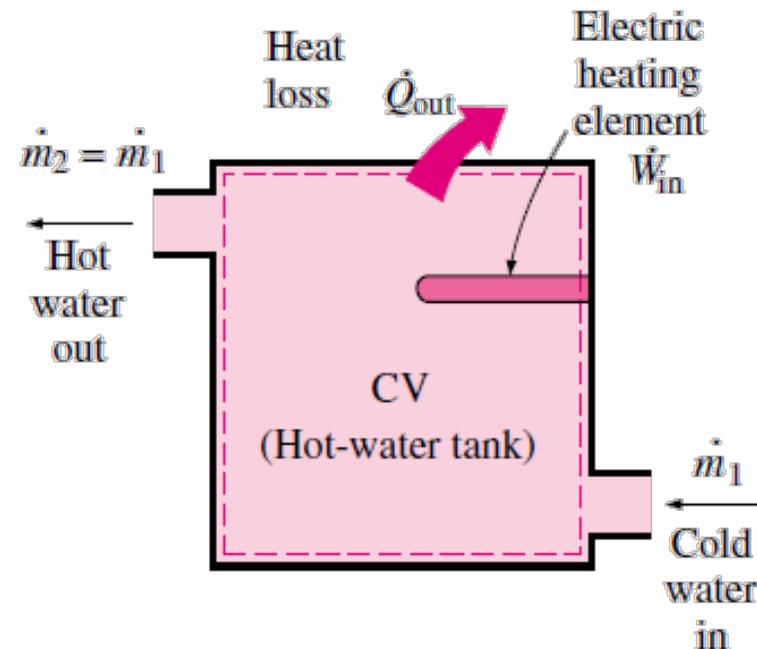
Lois de la thermodynamique

Première loi

- Pour un système ouvert
 - En régime établi ou permanent, lorsque KE et PE sont négligeables, que les débits entrant et sortant sont identiques et que le fluide est un gaz parfait :

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_g = 0$$

$$\dot{m} c_p (T_{in} - T_{out}) + \dot{W}_{in} = \dot{Q}_{out}$$



Lois de la thermodynamique

Seconde loi

- Cette loi développe une nouvelle grandeur thermodynamique : l'entropie S

$$S = \frac{\delta Q}{T}$$

- Mesure le désordre dans un système
- Lors d'un cycle, l'entropie peut seulement augmenter ou rester constante :

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \oint s \geq 0$$

Lois de la thermodynamique

Seconde loi

- Deux énoncés découlent de cette loi
 - La chaleur ne peut pas spontanément s'écouler des régions froides vers les régions chaudes sans travail externe en cours d'exécution sur le système (pompe à chaleur, par exemple);
 - Aucun appareil fonctionnant en cycle ne peut transformer la totalité de la chaleur prélevée en travail.

Plan de la présentation

- Lois de la thermodynamique
- ***Notion d'efficacité***

Notion d'efficacité

- Selon la deuxième loi de la thermodynamique, il est impossible de concevoir une **machine thermique réelle** dont le **rendement est 100%**
 - Quel est donc le rendement maximal d'une machine thermique?
 - Celui d'une machine thermique réversible!
 - Le cycle de Carnot est le plus connu des cycles réversibles.

Notion d'efficacité

Machines thermiques

- Machines permettant de produire un travail en transférant de la chaleur d'une source chaude vers une source froide :

$$\Delta E = 0 \Rightarrow E_{in} = E_{out}$$

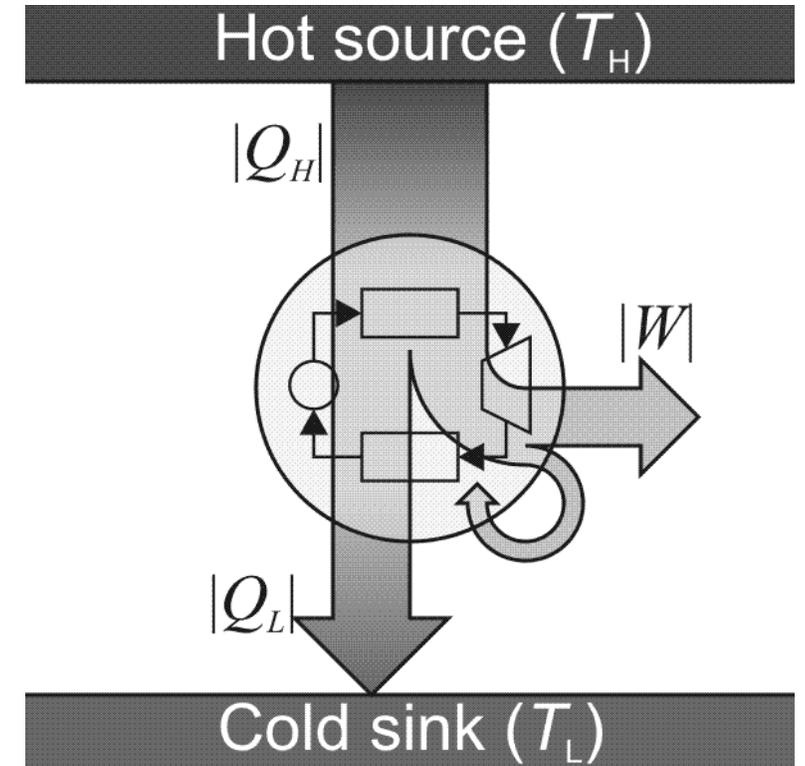
$$Q_H = Q_C + W_{net,out}$$

$$Q_H - Q_C = W_{net,out}$$

Note :

Dans la figure ci-contre, $Q_L = \text{low (L)}$ qui est plus souvent associé à froid (cold) Q_C

Dans la figure, $Q_H = \text{high (H)}$ qui est plus souvent associé à chaud (hot) Q_H



Notion d'efficacité

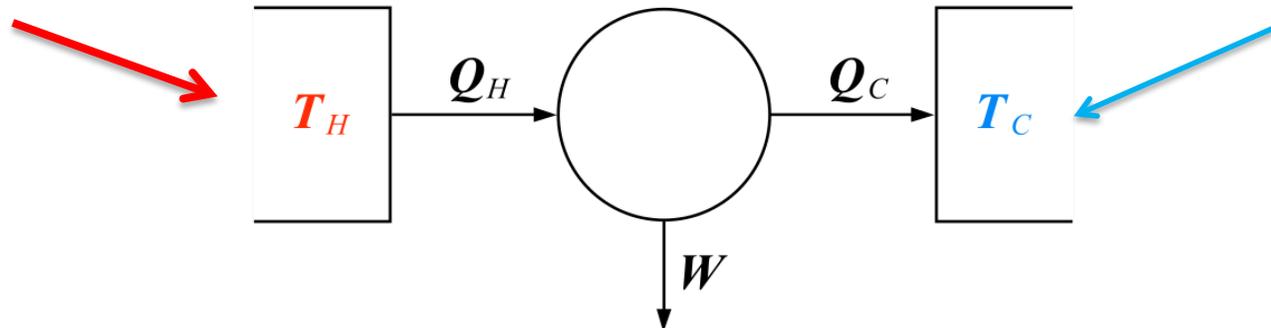
Rendement d'une machine thermique

- Définition selon la première loi :

$$\text{– Rendement thermique} = \frac{\text{Travail net produit}}{\text{Chaleur prélevée}}$$

$$\eta_{th} = \frac{W_{net,out}}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H}$$

Réservoir chaud ou
source de chaleur



Réservoir froid ou
puits de chaleur

Notion d'efficacité

Rendement maximal d'une machine thermique

- Selon la seconde loi, le rendement maximal est pour un cycle réversible (sans création d'entropie):

$$\Delta S_{total} = 0 \Rightarrow \frac{Q_H}{T_H} = \frac{Q_C}{T_C}$$

$$Q_C = \frac{Q_H}{T_H} T_C$$

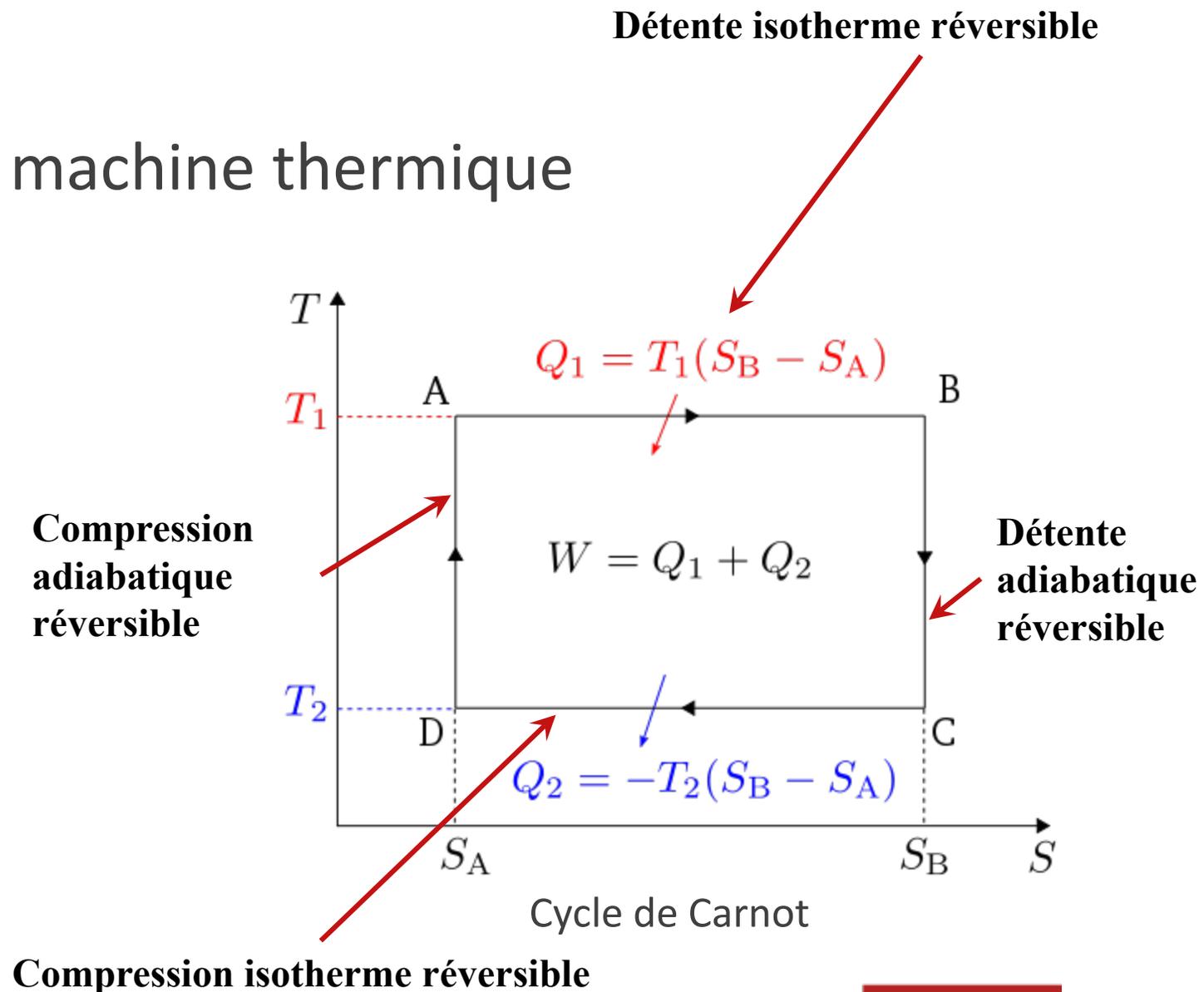
Avec la définition du rendement

$$\eta_{max} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

Notion d'efficacité

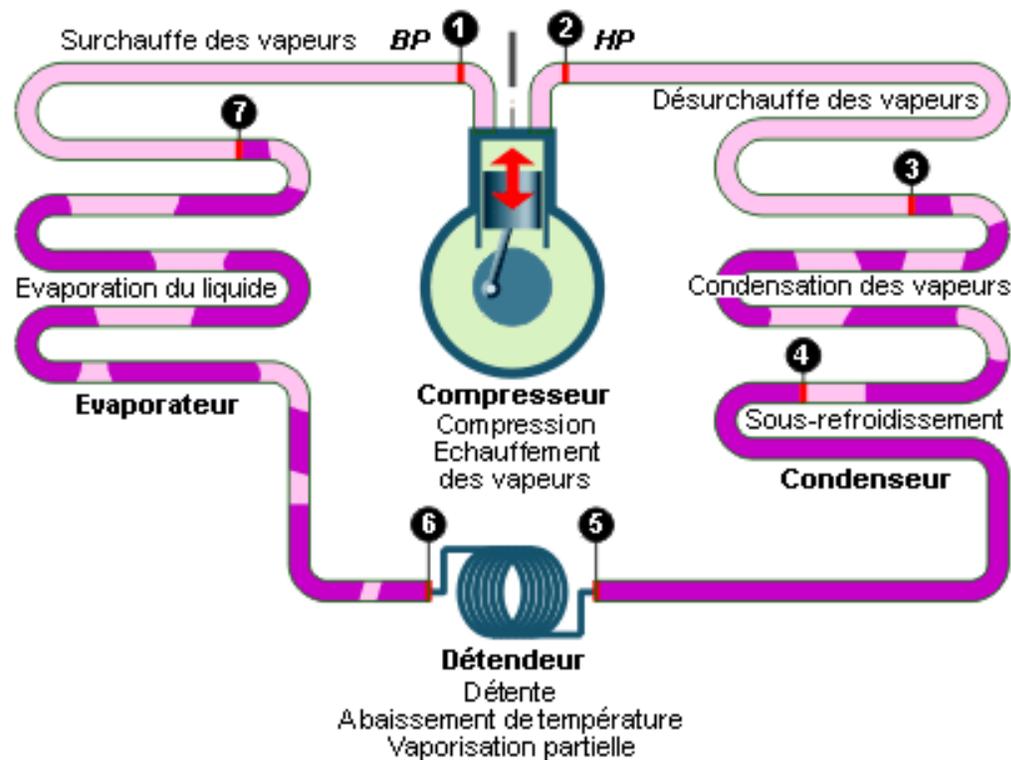
Rendement maximal d'une machine thermique

- Cette limite théorique dépend uniquement des températures de la source et du puits.
- Elle peut théoriquement être atteinte par plusieurs cycles, dont le cycle de Carnot.



Notion d'efficacité

Efficacité d'une pompe à chaleur



Cycle frigorifique élémentaire

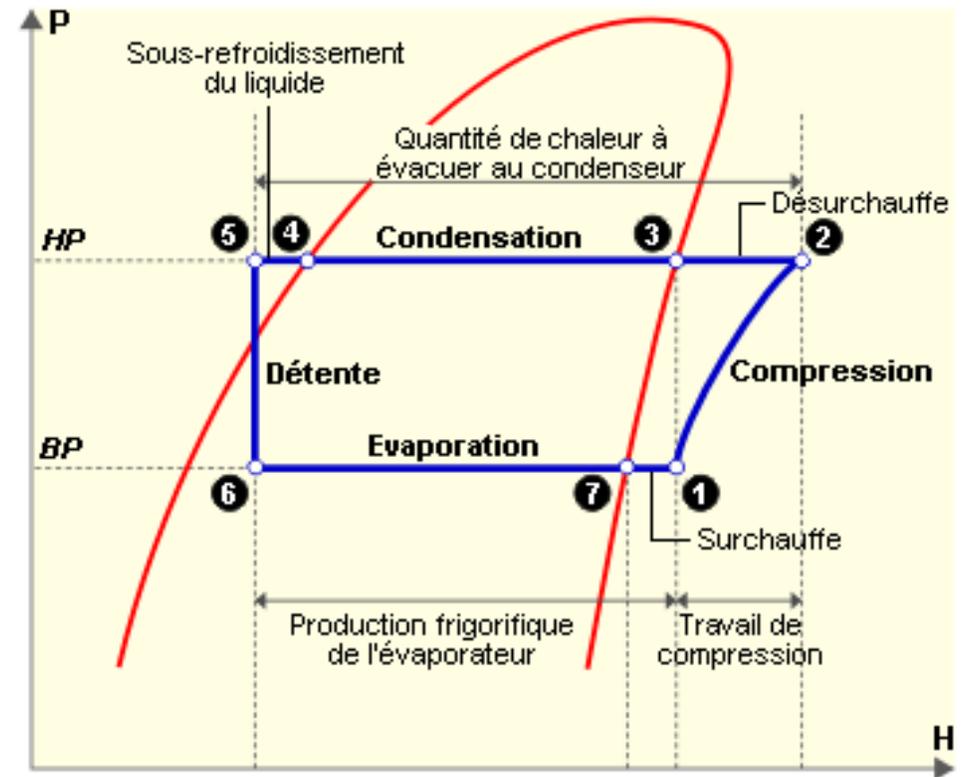


Diagramme enthalpique du cycle frigorifique

Notion d'efficacité

Efficacité d'une pompe à chaleur

- Pompe à chaleur (réfrigération)

- Coefficient de performance réfrigérateur = $\frac{\text{Chaleur extraite}}{\text{Travail requis}}$

$$COP_R = \frac{Q_C}{W_{net,in}} = \frac{1}{\frac{Q_H}{Q_C} - 1}$$

- Pompe à chaleur (chauffage)

- Coefficient de performance thermopompe = $\frac{\text{Chaleur rejetée}}{\text{Travail requis}}$

$$COP_{HP} = \frac{Q_H}{W_{net,in}} = \frac{1}{1 - \frac{Q_C}{Q_H}}$$

Notion d'efficacité

Efficacité d'une pompe à chaleur

- Lien entre les deux COP

$$COP_{HP} = COP_R + 1$$

– Pourquoi ?

- À cause de l'ajout du travail du compresseur.
- On peut facilement démontrer cette égalité à partir du bilan sur la machine thermique (MT).

Notion d'efficacité

Efficacité d'une pompe à chaleur réversible

- Pompe à chaleur (réfrigération) $COP_R = \frac{1}{\frac{T_H}{T_C} - 1}$

- Pompe à chaleur (chauffage, hp) $COP_{HP} = \frac{1}{1 - \frac{T_C}{T_H}}$

Attention: Utiliser des Kelvins !

Notion d'efficacité

- Efficacité réelle ou effective

$$\eta_{totale} = \prod_{i=1}^n \eta_i$$

- **Exemple: Efficacité énergétique d'une centrale thermique au gaz**

$$\eta_{totale} = \eta_{extraction} \times \eta_{transport(gaz)} \times \eta_{centrale\ thermique} \times \eta_{transport(elec.)} \times \eta_{distribution(elec.)} \times \eta_{moteur}$$

- **Exemple: Stockage d'air comprimé**

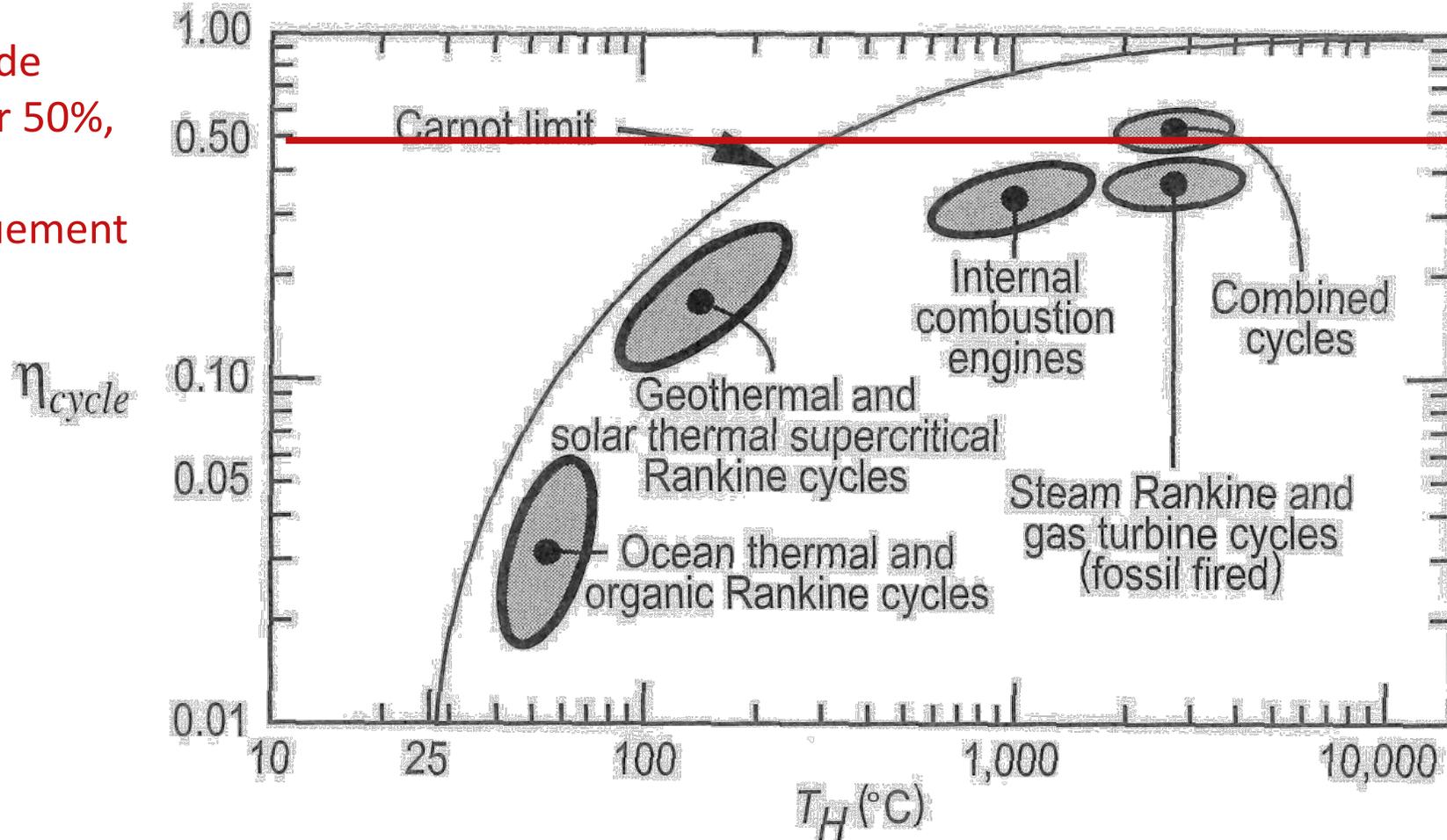
$$\eta_{totale} = \eta_{compresseur} \times \eta_{turbine}$$

Il faut donc prendre en compte plusieurs types de pertes possibles pour déterminer l'efficacité réelle

Notion d'efficacité

Comparaison entre les rendements réels et la limite théorique

Difficile de dépasser 50%, même théoriquement





Merci de votre attention !

Si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

Période de questions

