

2. Notions fondamentales

2.5 *Thermodynamique*

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

- Comment nomme-t-on l'énergie à apporter pour changer d'état ?
 - A. Sensible
 - B. Nucléaire
 - C. Latente
 - D. Interne
 - E. Aucune de ces réponses

Question



ENR2020

- Comment nomme-t-on l'énergie à apporter pour changer d'état ?
 - C. Latente

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Notions fondamentales
- Lois de la thermodynamique
- Notion d'efficacité
- Les cycles thermodynamiques
- Exergie
- Conclusion

Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs de la capsule***
- Notions fondamentales
- Lois de la thermodynamique
- Notion d'efficacité
- Les cycles thermodynamiques
- Exergie
- Conclusion

Introduction et objectifs

- Qu'est-ce que la thermodynamique ?
 - *Therme*: chaleur
 - *Dynamis*: puissance
 - Science de l'énergie
 - Fondée sur l'observation expérimentale (Lois de la thermodynamique)

Introduction et objectifs

- Objectifs de cette présentation
 - Appréhender les notions fondamentales de thermodynamique.
 - Comprendre les lois qui régissent l'évolution d'un système.
 - Connaître les cycles thermodynamiques les plus utilisés pour les énergies renouvelables.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- ***Notions fondamentales***
- Lois de la thermodynamique
- Notion d'efficacité
- Les cycles thermodynamiques
- Exergie
- Conclusion

Notions fondamentales

Énergie macroscopique

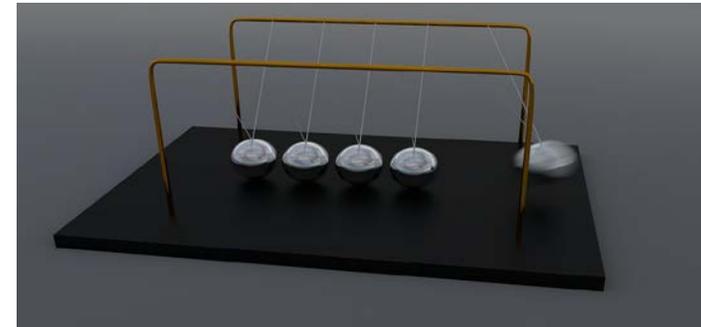
- Énergie potentielle (gravité)
- Énergie cinétique

$$PE = mgz$$

- m: masse [kg]
- g: constante gravitationnelle = 9,81 [m/s²]
- z: hauteur [m]
- PE [J]

$$KE = \frac{1}{2}mv^2$$

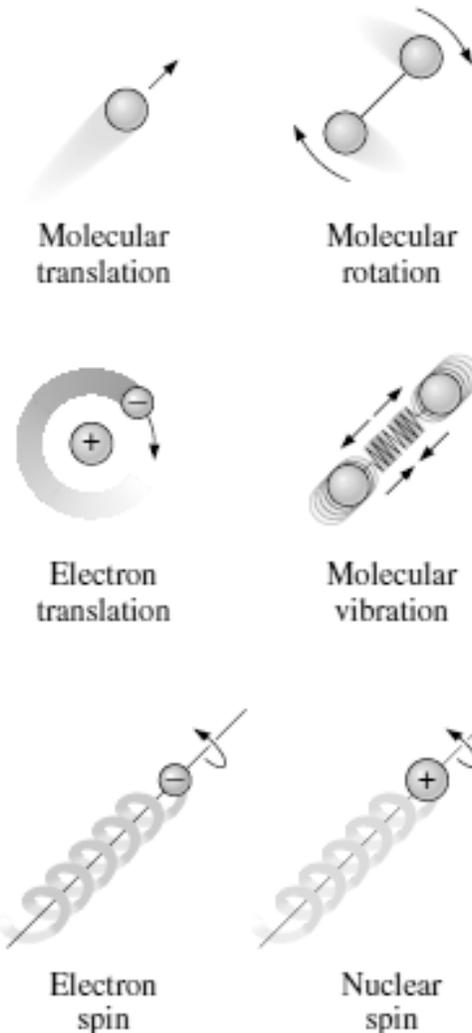
- m: masse [kg]
- v: vitesse [m/s]
- KE [J]



Notions fondamentales

Énergie interne (U)

- Chimique
 - Cohésion entre noyau et électron
- Nucléaire
 - Cohésion du noyau
- Travail (W)
- Thermique (Q)
 - Sensible (changement de température)
 - Latente (changement de phase)



Notions fondamentales

Énergie interne (U)

- Énergie sensible

$$\Delta Q_s = mc (T_2 - T_1)$$

- m: Masse [kg]
- T: Température [K]
- c: Capacité thermique massique [J/(kg.K)]
- Q_s: Énergie sensible [J]

= Capacité thermique isobare (c_p)
Si évolution à pression constante

= Capacité thermique isochore (c_v)
Si évolution à volume constante

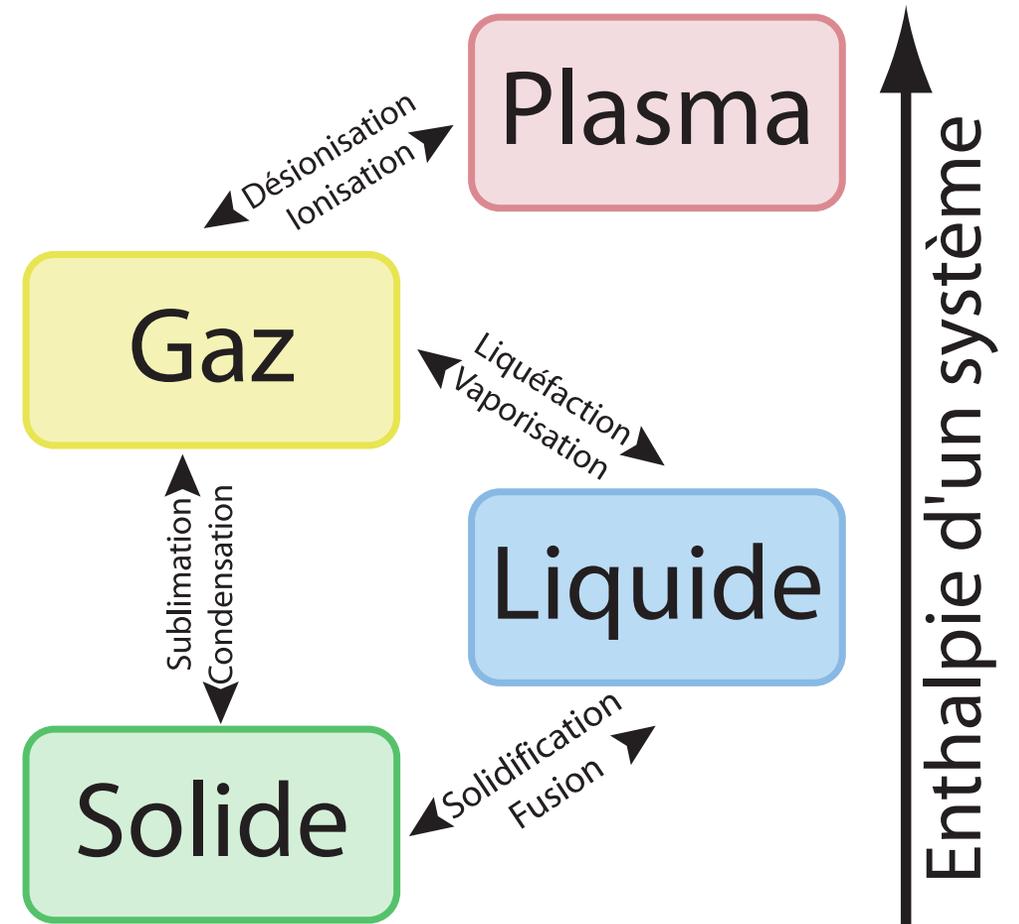
Notions fondamentales

Énergie interne (U)

- Énergie latente

$$\Delta Q_l = m L_{1 \rightarrow 2}$$

- m: Masse [kg]
- $L_{1 \rightarrow 2}$: Chaleur latente de changement d'un état 1 vers un état 2 = $-L_{2 \rightarrow 1}$ [J/kg]
- Q_l : Énergie latente [J]



Notions fondamentales

Énergie interne (U)

- Énergie latente à pression atmosphérique (eau)
 - Fusion 333,7 kJ/kg
 - Vaporisation 2257,1 kJ/kg
- On a donc avantage, lorsque c'est possible, à utiliser un changement de phase liquide-gaz plutôt que solide-liquide

Notions fondamentales

Énergie interne (U)

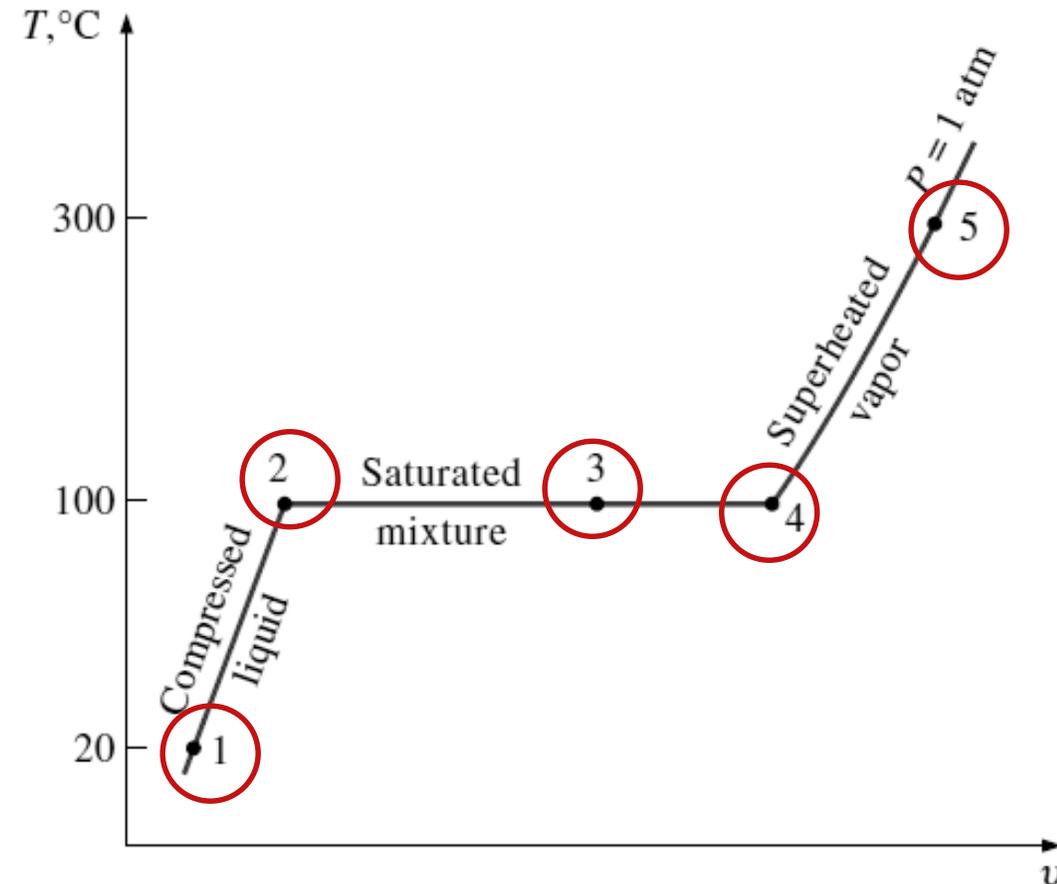
- L'eau bout-elle toujours à 100°C ?
 - Ça dépend de la pression!

Saturation (boiling) pressure of water at various temperatures

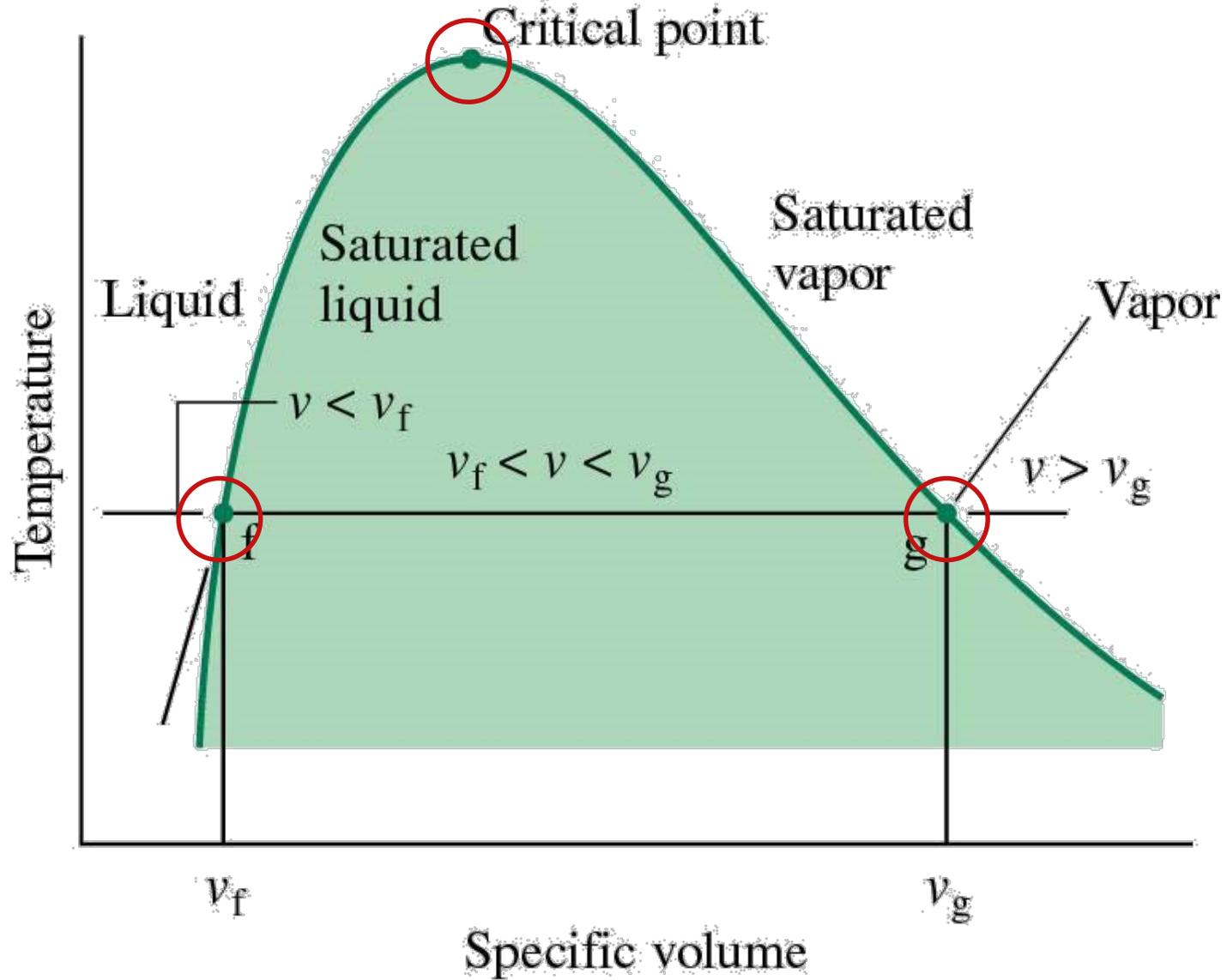
Temperature, $T, ^\circ\text{C}$	Saturation pressure, $P_{\text{sat}}, \text{kPa}$
-10	0.26
-5	0.40
0	0.61
5	0.87
10	1.23
15	1.71
20	2.34
25	3.17
30	4.25
40	7.38
50	12.35
100	101.3 (1 atm)
150	475.8
200	1554
250	3973
300	8581

Notions fondamentales

- Changement de phase
 1. Liquide comprimé
 2. Liquide saturé
 3. Mélange saturé (coexistence liquide et gaz)
 4. Vapeur saturée
 5. Vapeur surchauffée



Notions fondamentales



Notions fondamentales

- Indice f pour liquide saturé
- Indice g pour vapeur saturée
- v_f = Volume massique du liquide saturé
- v_g = Volume massique de la vapeur saturée

$$v_{fg} = v_g - v_f$$

- x = Titre en vapeur

$$x = \frac{m_g}{m_g + m_f}$$

Sat. Temp. press °C kPa T P_{sat}		Specific volume m^3/kg	
		Sat. liquid v_f	Sat. vapor v_g
85	57.83	0.001 033	2.828
90	70.14	0.001 036	2.361
95	84.55	0.001 040	1.982

↑ Specific temperature
↑ Specific volume of saturated liquid
↑ Specific volume of saturated vapor

Corresponding saturation pressure
Specific volume of saturated vapor

Notions fondamentales

- Tables de thermodynamique
- Interpolation linéaire

Pression de vapeur de l'eau	
T	P
150 °C	476,0 kPa
160 °C	618,1 kPa

$$y = y_0 + (y_1 - y_0) \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}$$

Si $T = 158 \text{ [}^\circ\text{C]}$

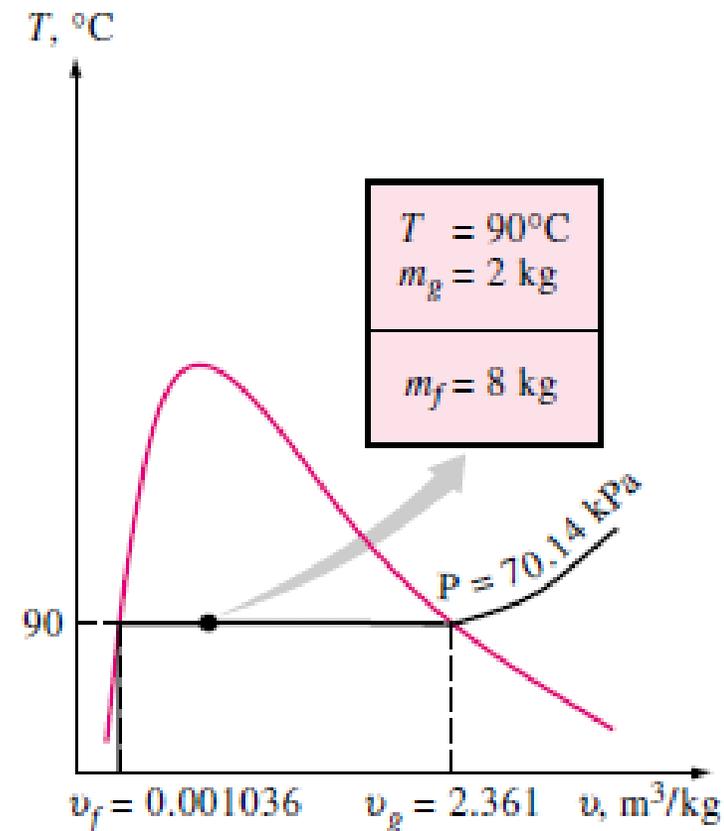
$P = ? \text{ [kPa]}$

Notions fondamentales

- Un réservoir contient 10 kg d'eau à 90°C. Si 8 kg d'eau sont sous forme liquide et le reste sous forme de vapeur, déterminez:

- a) La pression dans le réservoir
- b) Le volume du réservoir
- c) L'enthalpie du mélange

$$v_{moyen} = v_f + xv_g$$



Notions fondamentales

Enthalpie

- Association de l'énergie interne et des forces de pression

$$H = U + PV$$

- U : Energie interne [J]
 - P : pression [Pa]
 - V : Volume [m³]
 - H enthalpie [J], h enthalpie massique [J/kg]
- Représente l'énergie totale d'un système thermodynamique

En thermodynamique, on utilise des lettres minuscules pour des variables indépendantes de la masse (par unité de masse (kg))

Notions fondamentales

Loi des gaz parfaits

- Loi régissant le comportement d'un gaz idéal

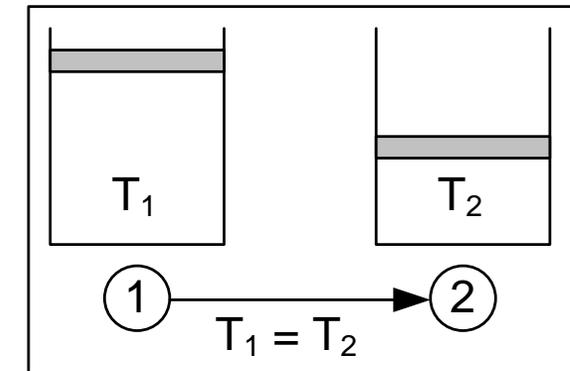
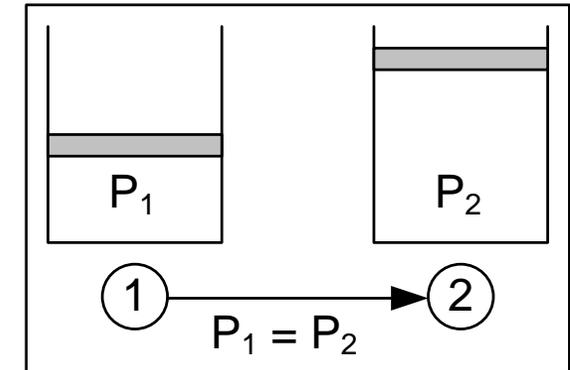
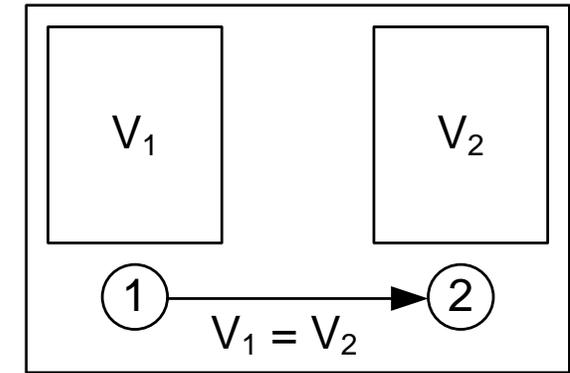
$$PV = nRT$$

- P : pression [Pa]
- V : volume [m³]
- n : quantité de matière [mol]
- R : constante universelle des gaz parfaits = 8,314 J/K.mol
- T : température [K]

Notions fondamentales

Évolutions particulières

- Évolution ISOCHORE (à volume constant)
- Évolution ISOBARE (à pression constante)
- Évolution ISOTHERME (à température constante)



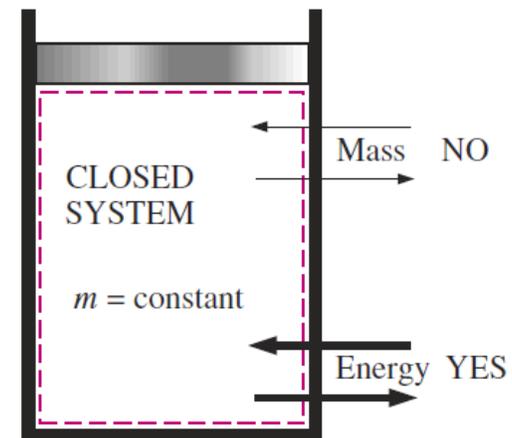
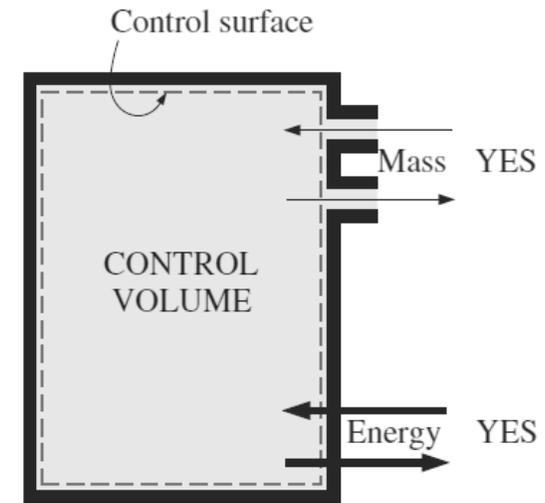
Exemple 1– Système fermé

Un élément électrique de 2 kW plongé dans 5 kg d'eau fonctionne durant 10 min. Pendant ce temps, 300 kJ de chaleur sont perdus de l'eau au profit du milieu extérieur. De combien de degrés la température de l'eau augmentera-t-elle?

- a) 0,4°C
- b) 43,1°C
- c) 57,4°C
- d) 71,8°C
- e) 180,0°C

Notions fondamentales

- Systèmes ouverts
- Systèmes fermés
 - pas de transfert de masse!



Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Notions fondamentales
- ***Lois de la thermodynamique***
- Notion d'efficacité
- Les cycles thermodynamiques
- Exergie
- Conclusion

Question



ENR2020

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

Question



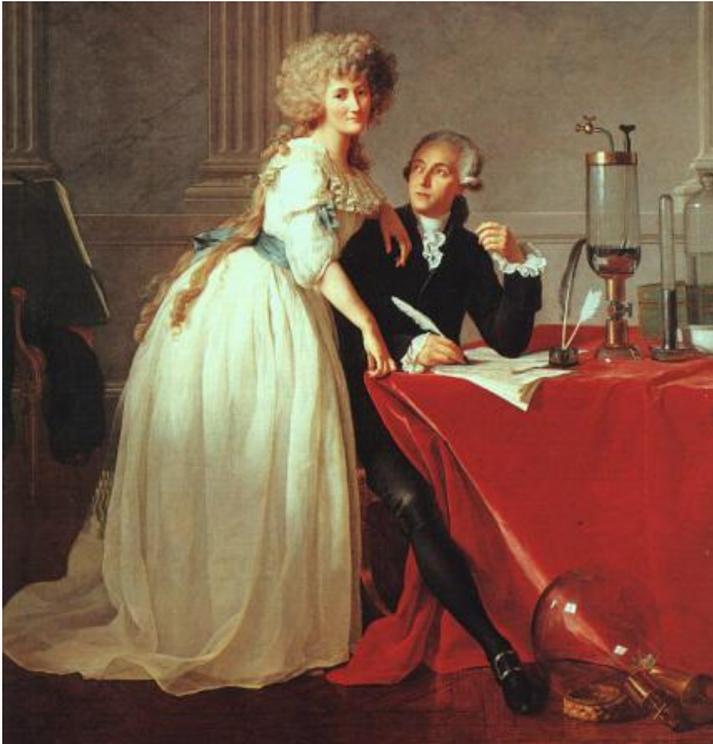
ENR2020

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

Lois de la thermodynamique

Première loi

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



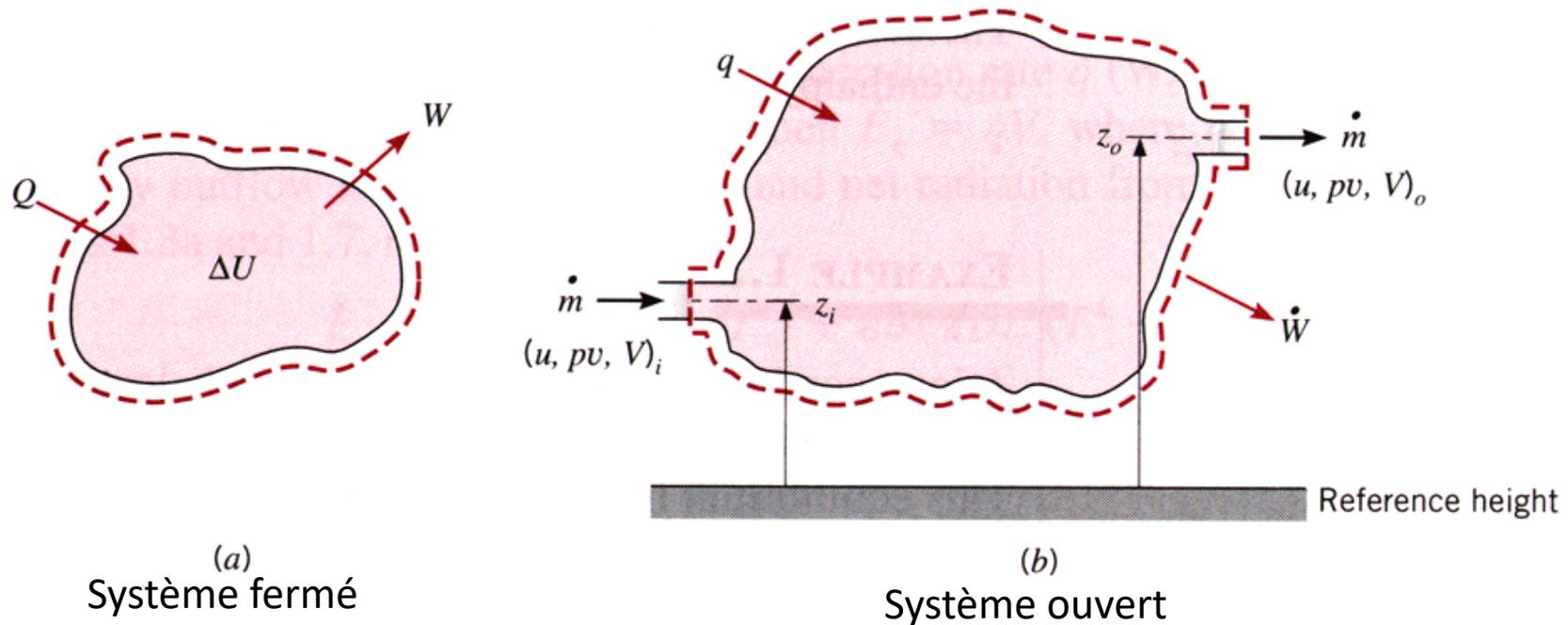
Lavoisier

« 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

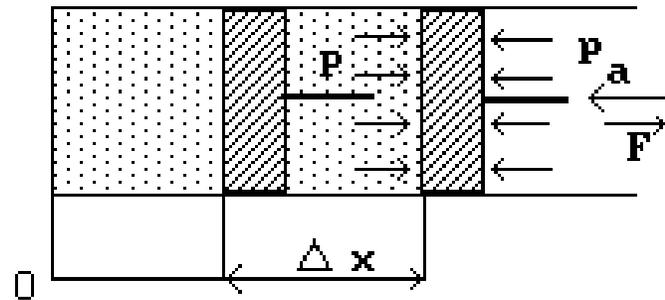
Lois de la thermodynamique

- 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

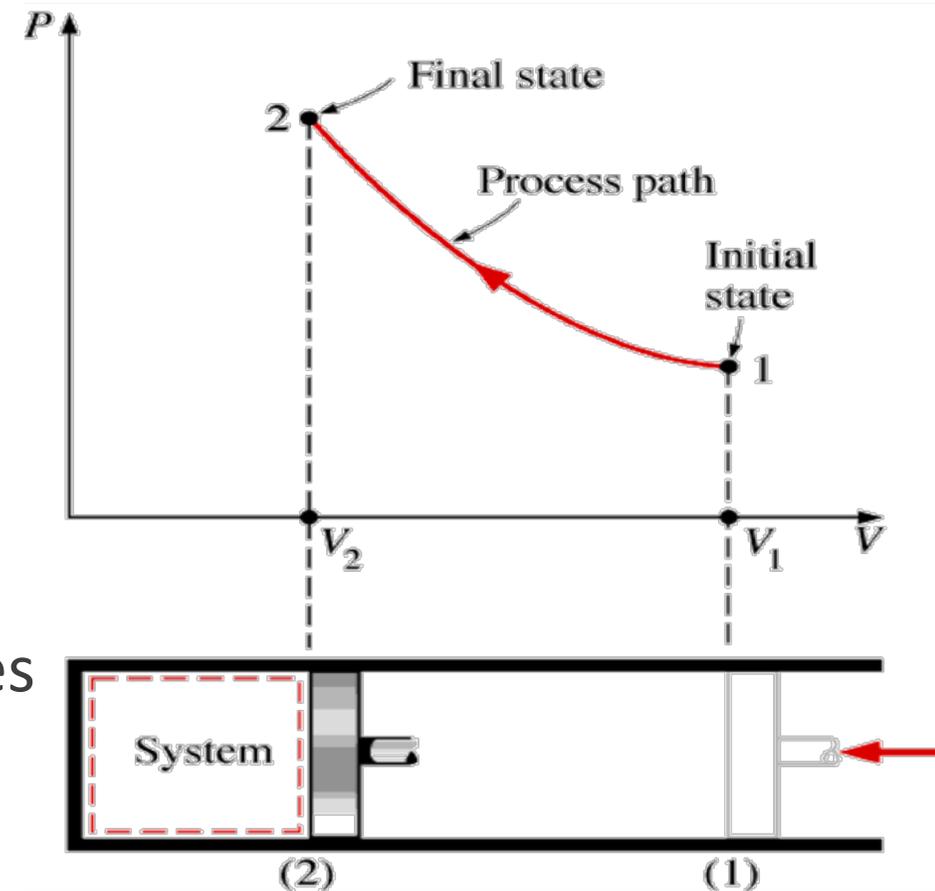
$$\Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

On ne considère que rarement les changements macroscopiques :

$$\Delta E = \Delta U$$

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

- Il y a un signe **négatif** dans l'équation de conservation puisque le travail W est fait **PAR** les 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.



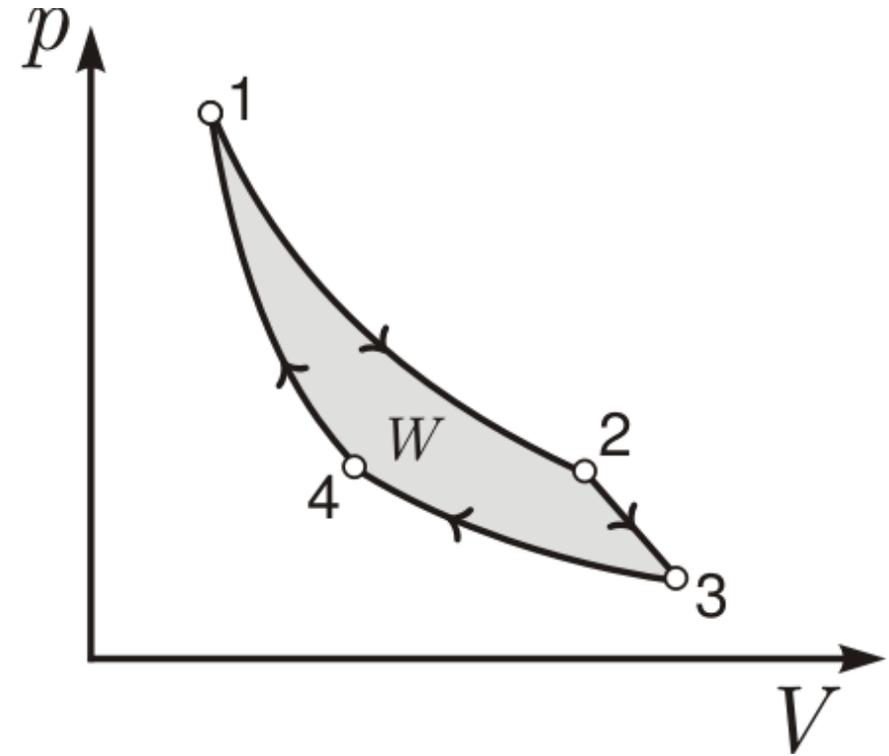
Lois de la thermodynamique

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

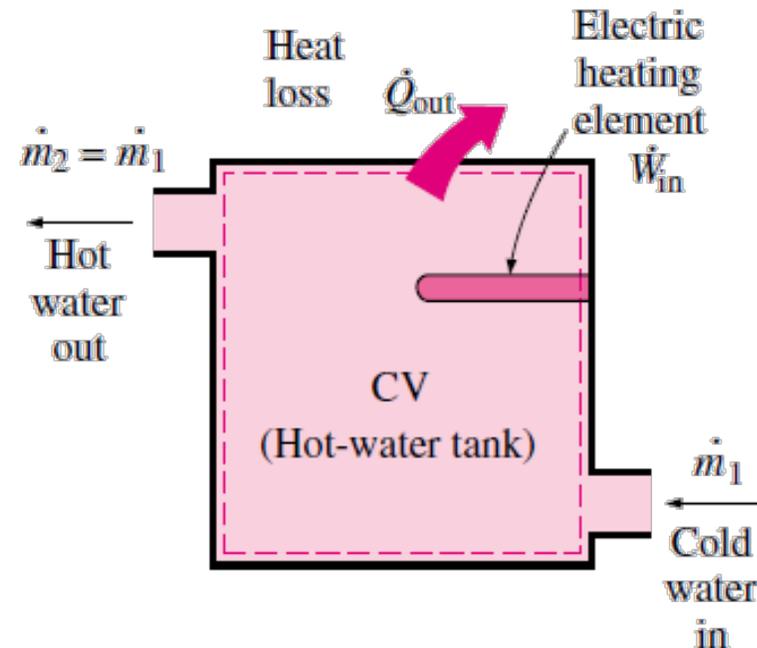
Première loi

- 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

- Introduction et objectifs de la capsule
- Notions fondamentales
- Lois de la thermodynamique
- ***Notion d'efficacité***
- Les cycles thermodynamiques
- Exergie
- Conclusion

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

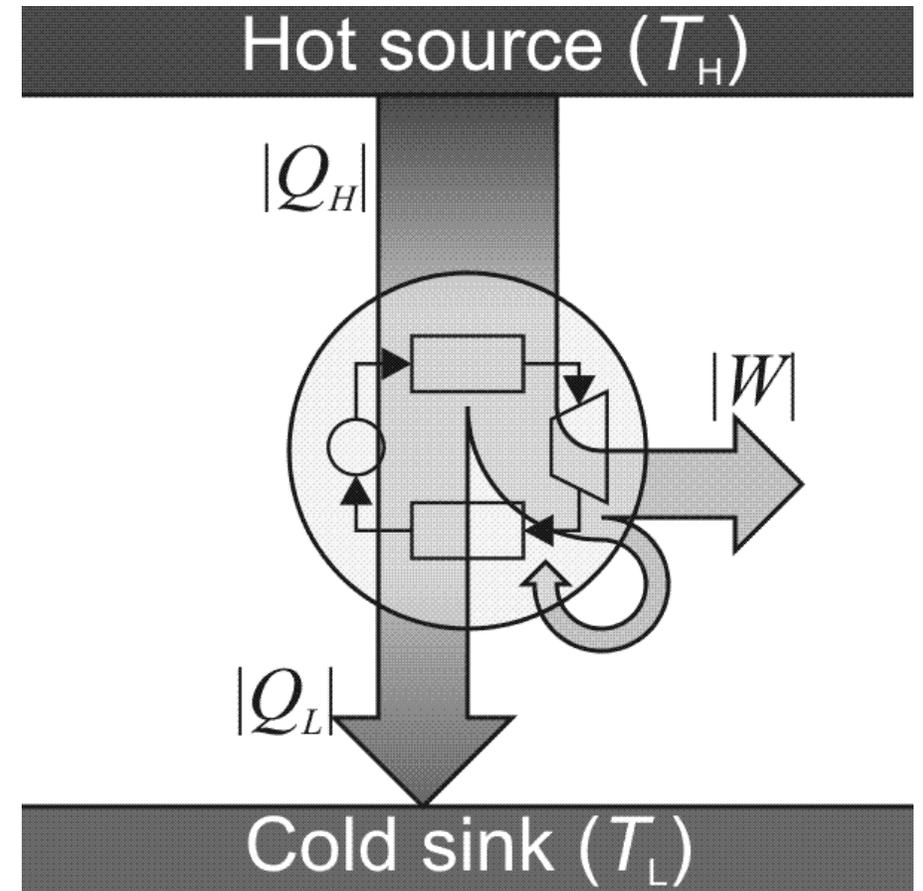
- Machines permettant de produire un travail en transférant de la chaleur d'une source chaude vers une source froide :

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

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

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

Q_L means low (L) temp or cold temp Q_C



Notion d'efficacité

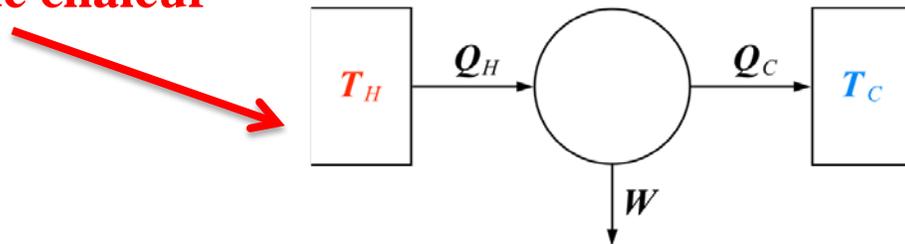
Rendement d'une machine thermique

- Définition selon la première loi :

– *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):

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

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

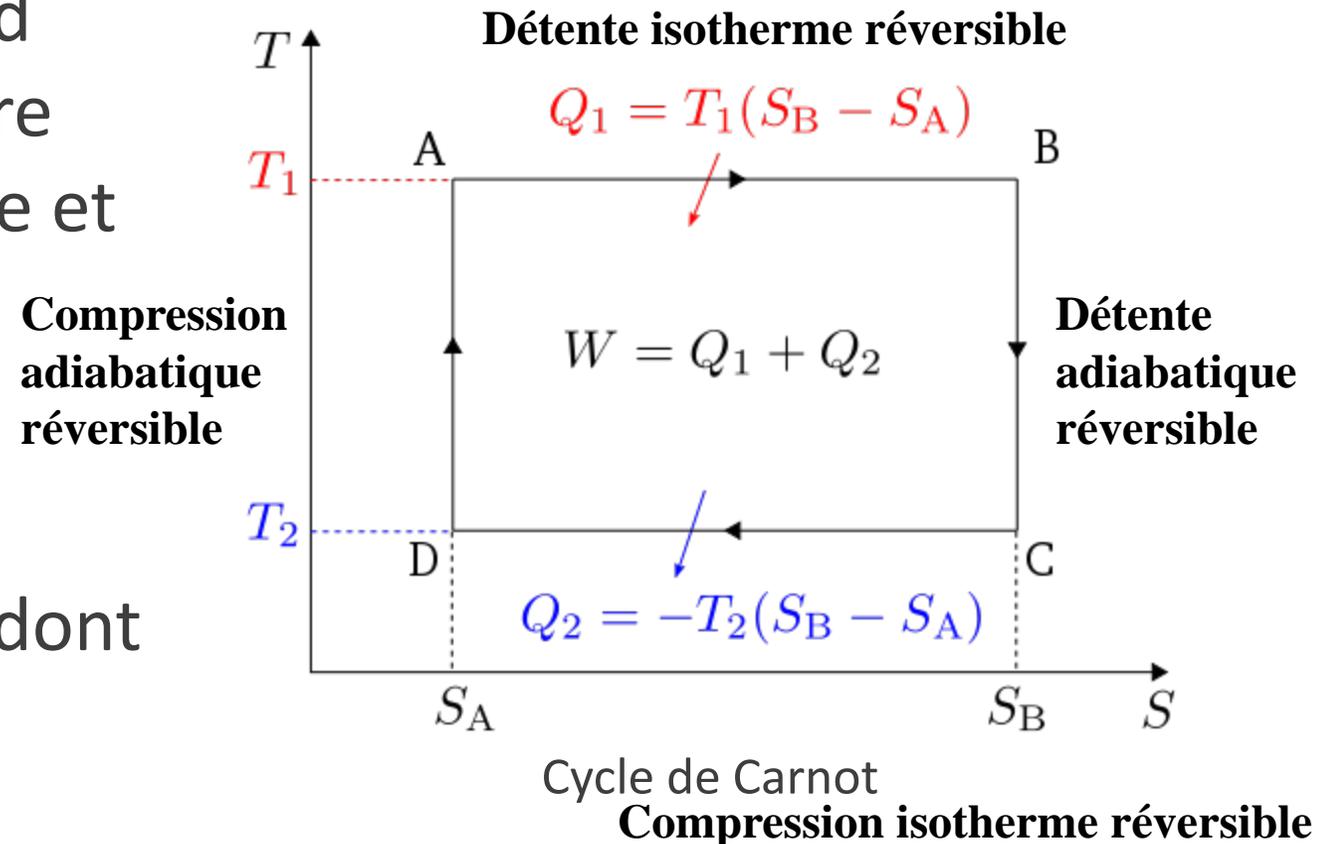
Avec la définition du rendement

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

Notion d'efficacité

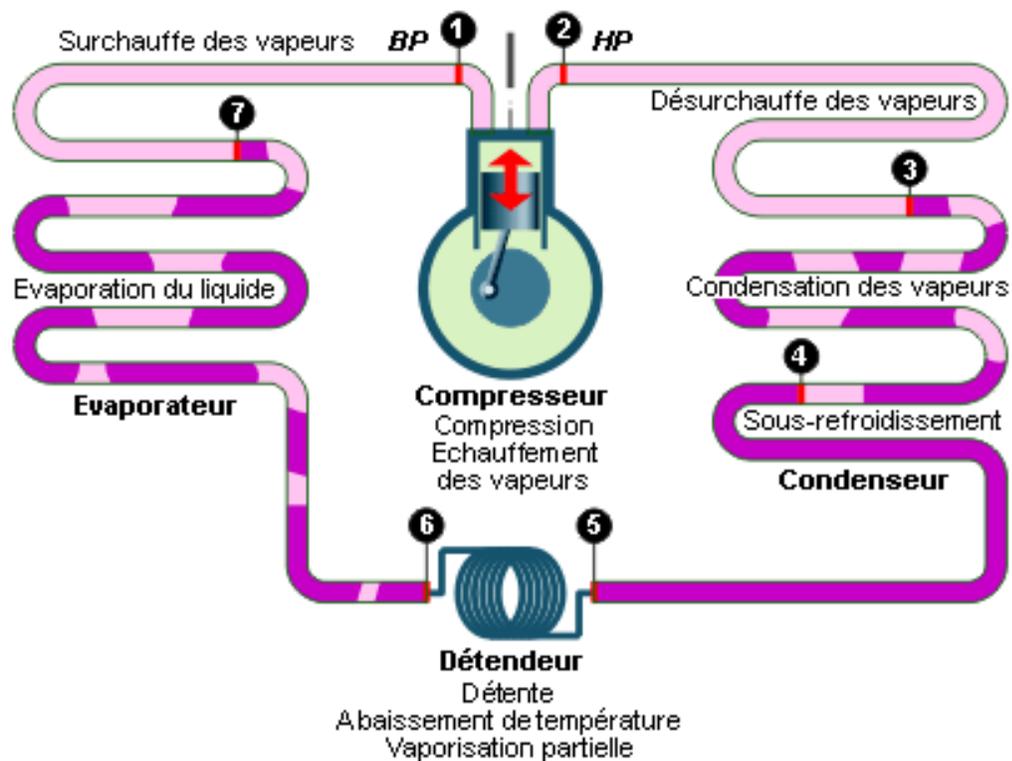
Rendement maximal d'une machine thermique

- Cette limite théorique dépend uniquement de la température 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

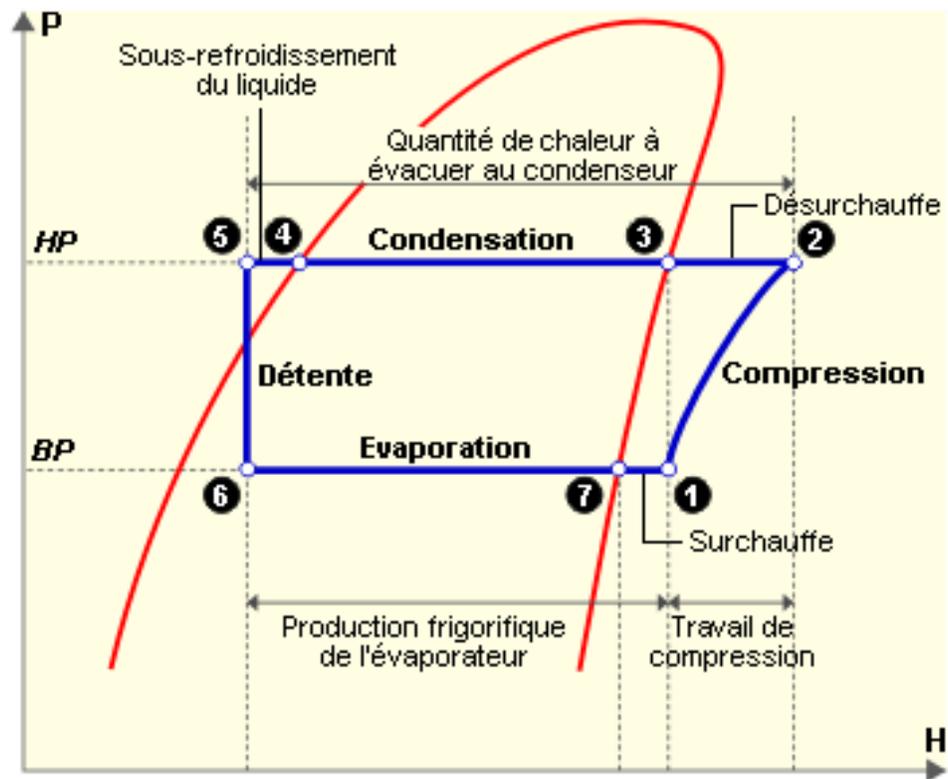


Diagramme enthalpique du cycle frigorifique

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**

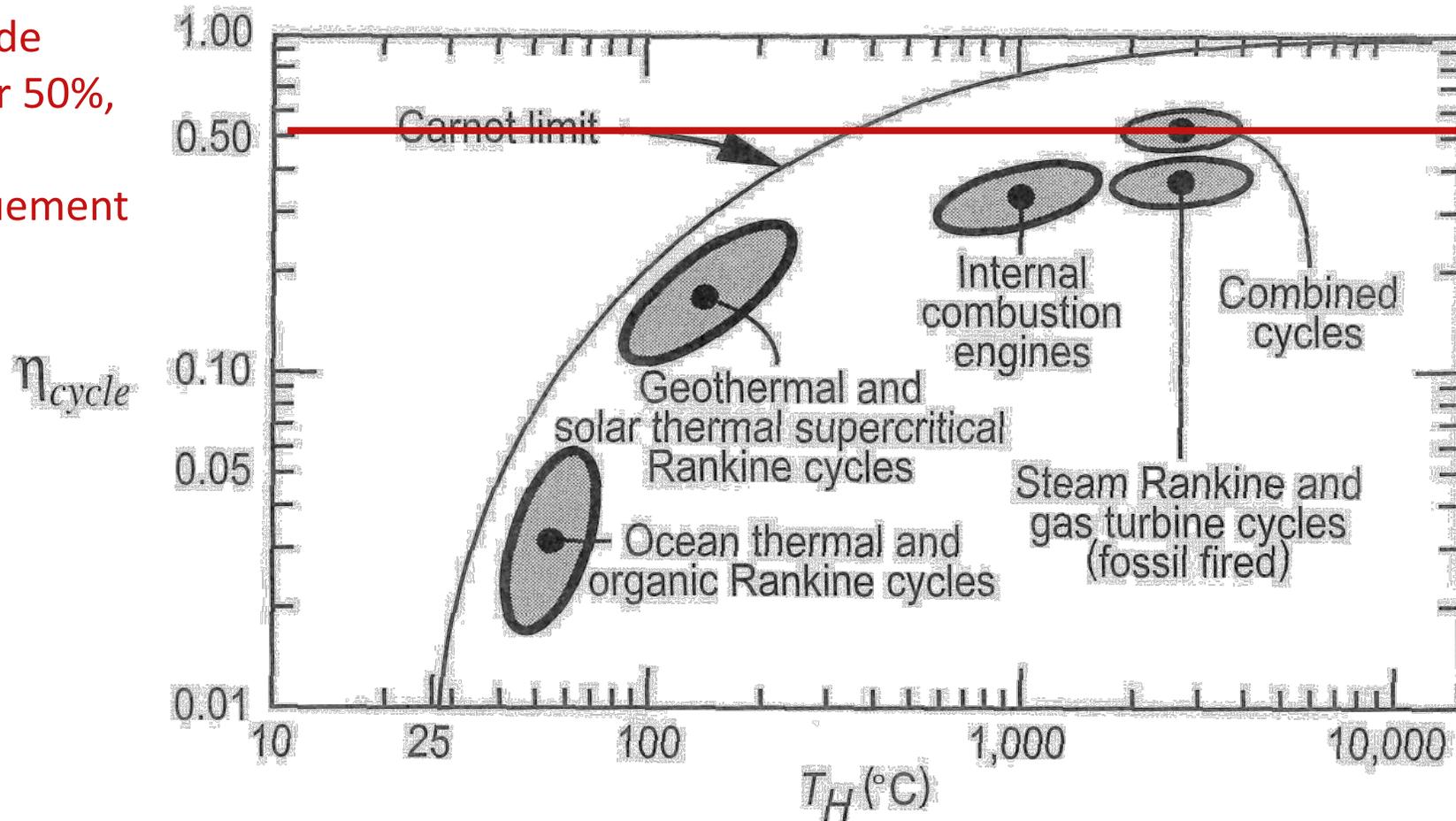
$$\eta_{totale} = \eta_{compresseur} \times \eta_{turbine}$$

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





Question

- La grandeur qui représente le travail maximal que peut fournir un système lorsqu'il se met à l'équilibre thermodynamique avec son environnement est appelée ?
 - A. L'enthalpie
 - B. L'énergie interne
 - C. L'exergie
 - D. L'entropie
 - E. Aucune de ces réponses

Question



ENR2020

- La grandeur qui représente le travail maximal que peut fournir un système lorsqu'il se met à l'équilibre thermodynamique avec son environnement est appelée ?
 - C. L'exergie

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Notions fondamentales
- Lois de la thermodynamique
- Notion d'efficacité
- ***Les cycles thermodynamiques***
- Exergie
- Conclusion

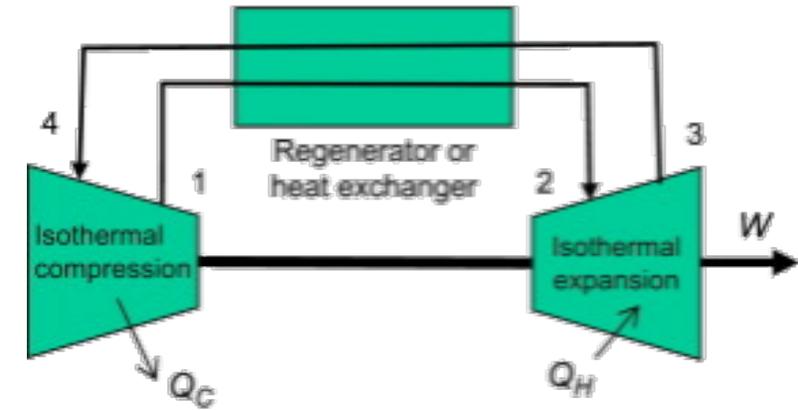
Les cycles thermodynamiques

Cycle de Stirling

- Cycle
 - Qui peut fournir du travail ou transmettre de la chaleur
 - Régénératif : échange de la chaleur en interne ce qui augmente le rendement
- Comme pour le cycle de Carnot son efficacité maximale est égale à la limite théorique

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

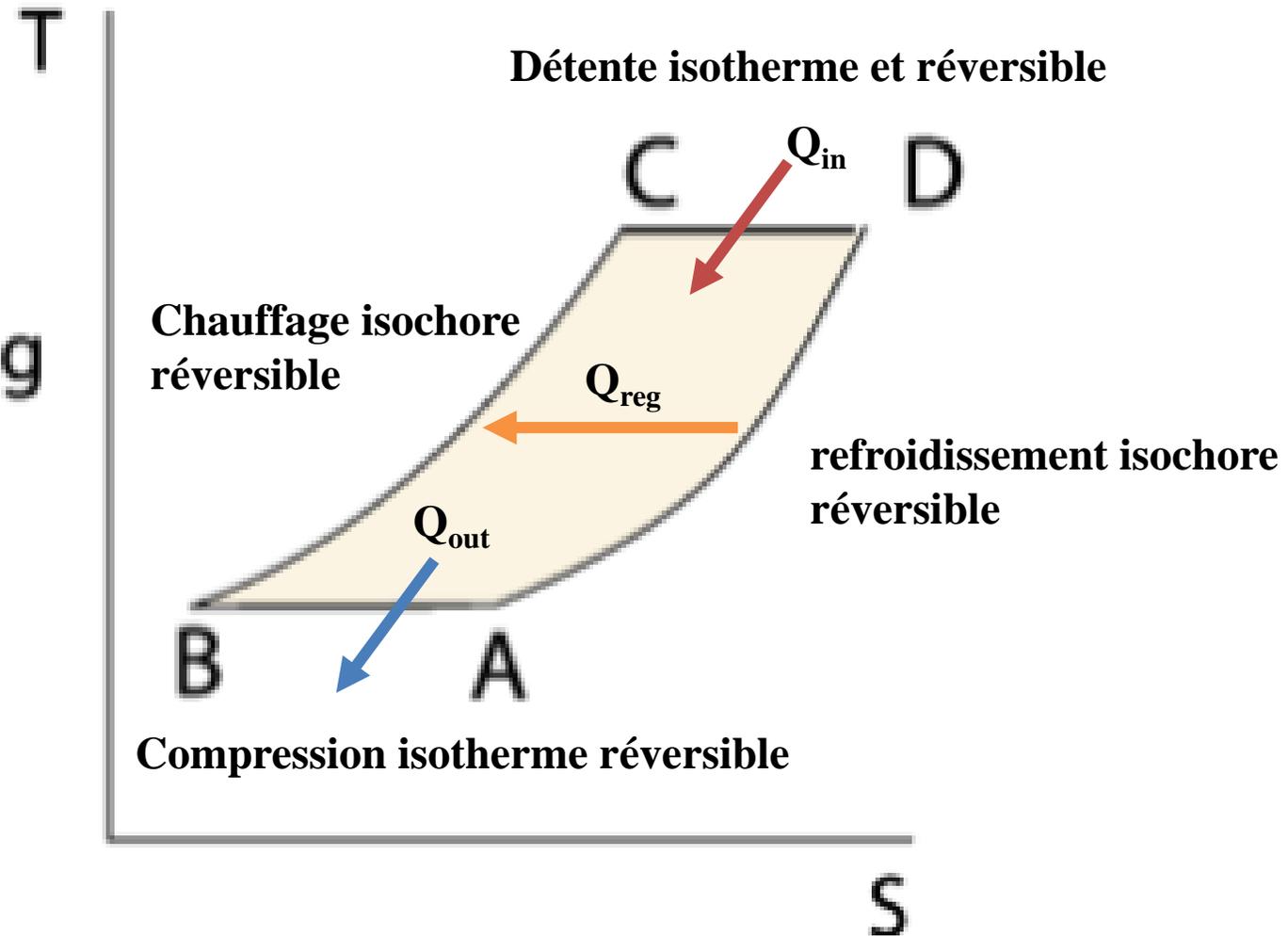
- Appareils volumineux et coûteux



Les cycles thermodynamiques

Cycle de Stirling

Stirling



Les cycles thermodynamiques

Cycle de Stirling

- Domaine d'utilisation
 - Solaire concentré

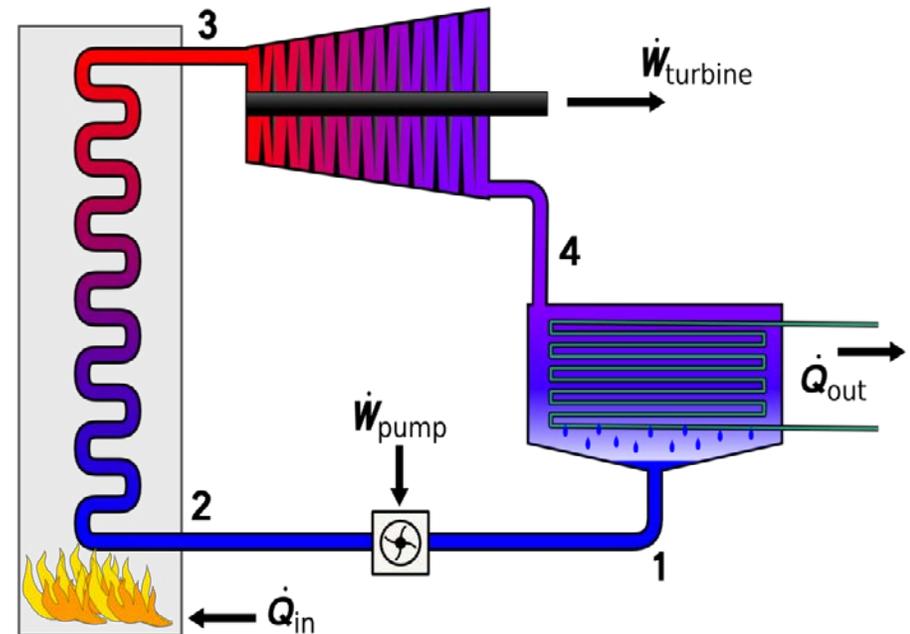


Sandia National Laboratories

Les cycles thermodynamiques

Cycle de Rankine

- Cycle similaire au cycle de Carnot, mais plus facile à réaliser techniquement
- Fonctionne généralement avec de l'eau alternant entre phases liquide et solide
- Cycle très utilisé dans la production d'électricité (nucléaire, gaz, charbon...)



Les cycles thermodynamiques

Cycle de Rankine

- Le cycle de Rankine décrit étroitement le processus par lequel les moteurs thermiques à **vapeur** que l'on trouve couramment dans les centrales thermiques génèrent de l'**électricité**.
- La puissance dépend de la **différence de température** entre une source de chaleur et une source froide. Plus la différence est élevée, plus la puissance mécanique peut être extraite efficacement de l'énergie thermique, selon le théorème de Carnot.
- Les sources de chaleur utilisées dans ces centrales sont généralement la **fission nucléaire** ou la **combustion de combustibles fossiles** ou l'**énergie solaire concentrée**.

Les cycles thermodynamiques

Cycle de Rankine

- L'efficacité du cycle de Rankine est limitée par la **chaleur latente de vaporisation** élevée du fluide de travail.
- De plus, à moins que la pression et la température n'atteignent des niveaux super critiques dans la chaudière à vapeur, **la plage de température** sur laquelle le cycle peut fonctionner **est assez petite**: les températures d'entrée de la turbine à vapeur sont généralement d'environ **565°C** et les températures du condenseur de vapeur sont d'environ **30°C**.
- Cela donne un rendement Carnot maximal théorique pour la turbine à vapeur seule d'environ **63,8%** par rapport à un rendement thermique global réel allant jusqu'à **42%** pour une centrale électrique au charbon moderne.

Les cycles thermodynamiques

Cycle de Rankine

- Cette faible température d'entrée de la turbine à vapeur (par rapport à une turbine à gaz) est la raison pour laquelle le cycle de Rankine (vapeur) est souvent utilisé comme **cycle de fond pour récupérer la chaleur** autrement rejetée dans les centrales à turbine à gaz à cycle combiné.
- La source froide (la plus froide est la meilleure) utilisée dans ces centrales sont généralement des **tours de refroidissement** et une grande masse d'eau (rivière ou mer). L'efficacité du cycle de Rankine est limitée du côté froid par la température pratique plus basse du fluide de travail.

Les cycles thermodynamiques

Cycle de Rankine

- Le fluide de travail dans un cycle Rankine suit une boucle fermée et est réutilisé en permanence.
- La vapeur d'eau avec des gouttelettes condensées que l'on voit souvent s'échapper des centrales électriques est créée par les systèmes de refroidissement (pas directement à partir du cycle d'alimentation en boucle fermée de Rankine).
- Cette chaleur «d'échappement» est représentée par le « Q_{out} » s'écoulant du côté inférieur du cycle illustré plus loin dans le diagramme $T - s$.
- Les tours de refroidissement fonctionnent comme de grands échangeurs de chaleur en absorbant la chaleur latente de vaporisation du fluide de travail et en évaporant simultanément l'eau de refroidissement dans l'atmosphère.

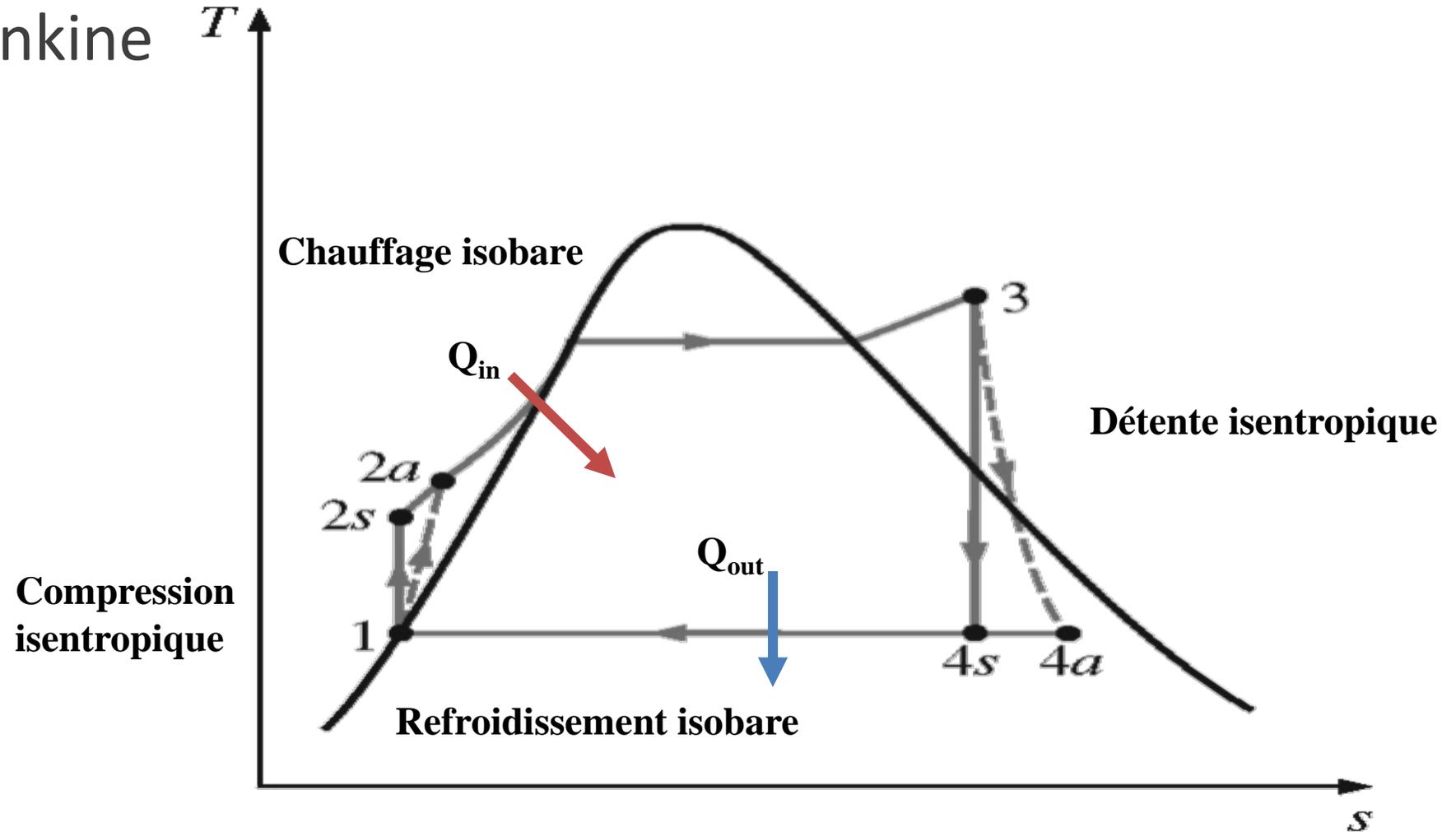
Les cycles thermodynamiques

Cycle de Rankine

- Bien que de nombreuses substances puissent être utilisées comme fluide de travail dans le cycle de Rankine, **l'eau** est généralement le fluide de choix en raison de ses propriétés favorables, telles que sa chimie non toxique et non réactive, son abondance et son faible coût, ainsi que ses propriétés thermodynamiques.
- En condensant la vapeur de travail en un liquide, la pression à la sortie de la turbine est abaissée et **l'énergie requise par la pompe d'alimentation ne consomme que 1% à 3%** de la puissance de sortie de la turbine et ces facteurs contribuent à un rendement plus élevé pour le cycle.
- Cet avantage compense en partie les basses températures de la vapeur admise dans la ou les turbine (s) à vapeur. Les turbines à gaz, par exemple, ont des températures d'entrée de turbine approchant les 1500°C. Cependant, l'efficacité thermique des grandes centrales à vapeur et des grandes centrales à turbine à gaz modernes est similaire.

Les cycles thermodynamiques

Cycle de Rankine



Les cycles thermodynamiques

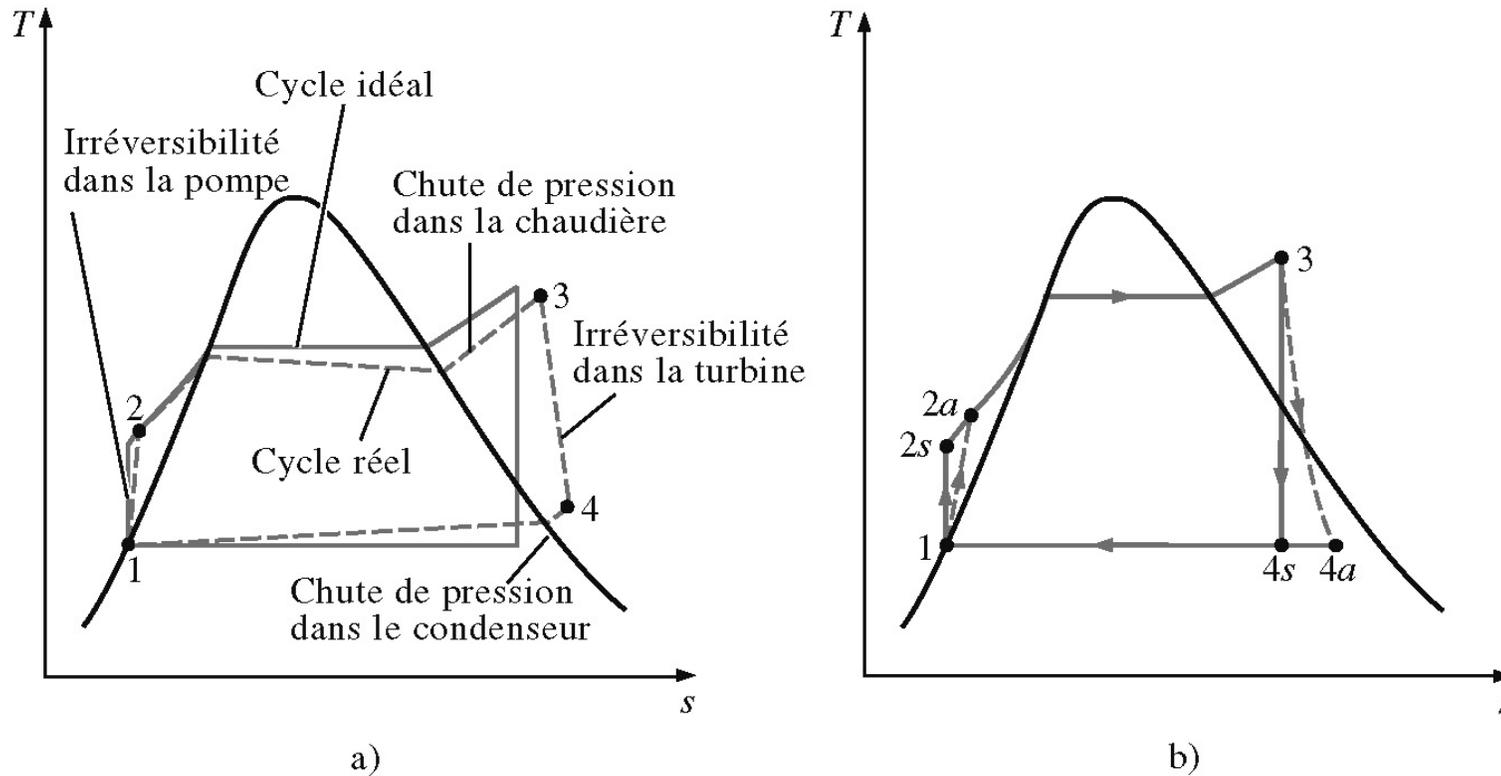


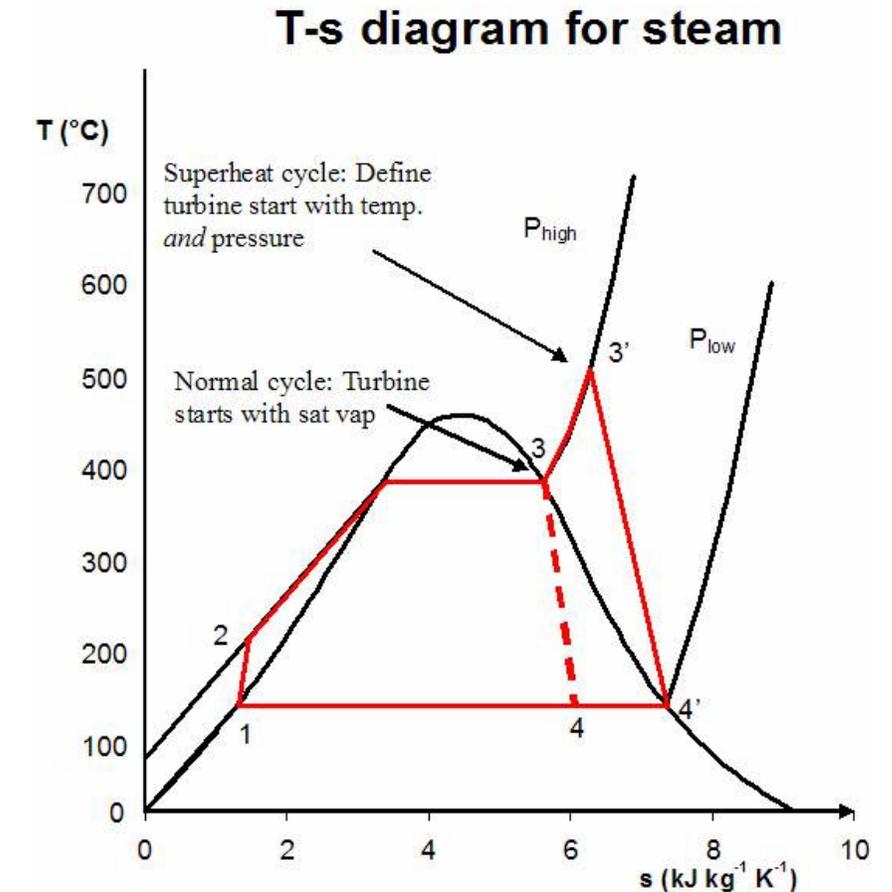
FIGURE 10.4

- a) Écart entre le cycle à vapeur réel et le cycle de Rankine idéal.
- b) Effets des irréversibilités dans la turbine et la pompe sur le cycle de Rankine.

Les cycles thermodynamiques

Cycle de Rankine (Vapeur surchauffée)

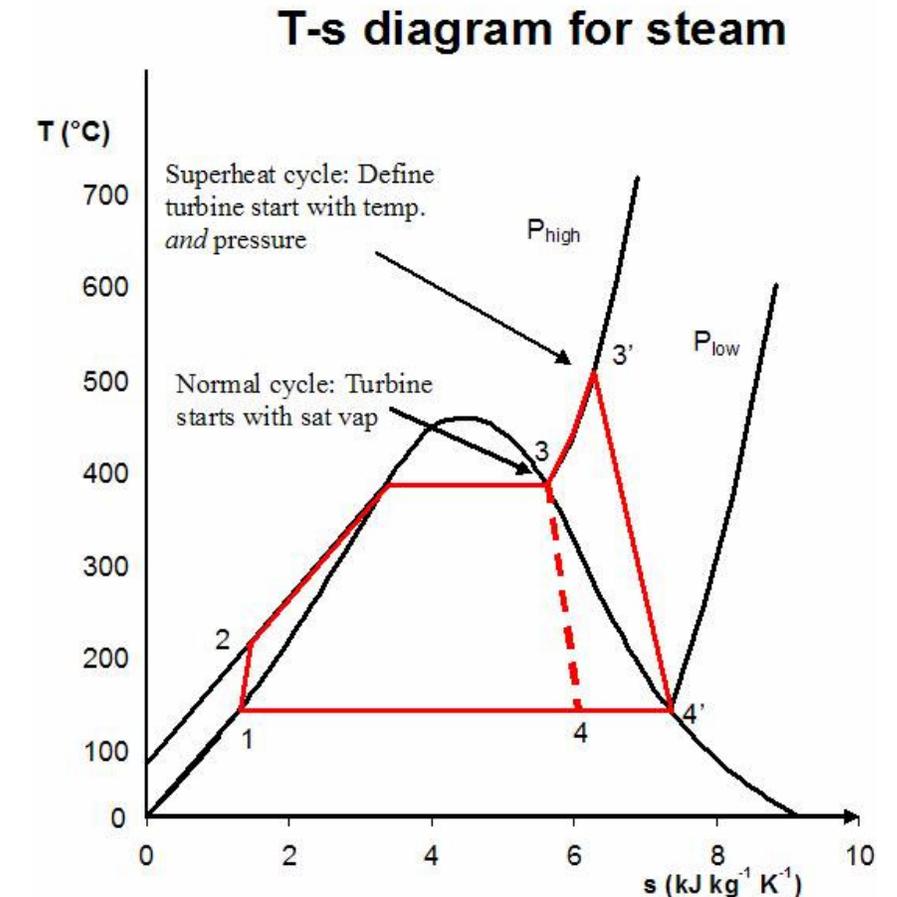
- Dans un cycle réel de centrale électrique (le nom de cycle «Rankine» n'est utilisé que pour le cycle idéal), la compression par la pompe et la détente dans la turbine ne sont pas isentropiques.
- En d'autres termes, ces processus sont irréversibles et l'entropie est augmentée au cours des deux processus.
- Cela augmente quelque peu la puissance requise par la pompe et diminue la puissance générée par la turbine.



Les cycles thermodynamiques

Cycle de Rankine (Vapeur surchauffée)

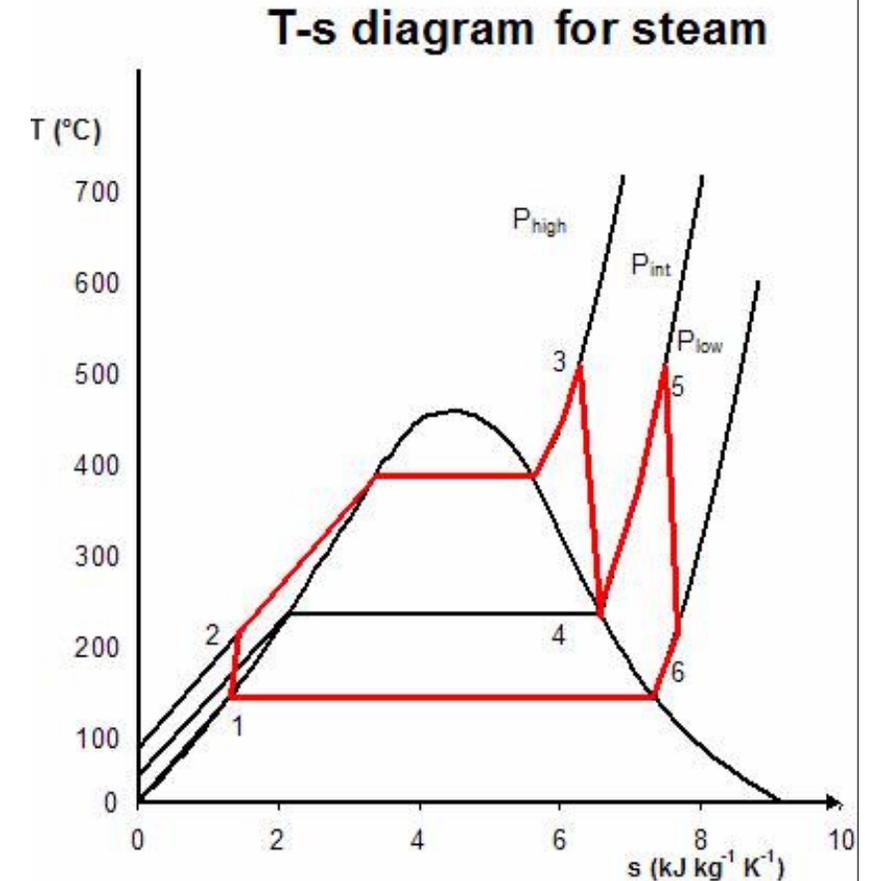
- En particulier, l'efficacité de la turbine à vapeur sera limitée par la formation de gouttelettes d'eau. Au fur et à mesure que l'eau se condense, des gouttelettes d'eau frappent les aubes de turbine à grande vitesse, provoquant des piqûres et de l'érosion, diminuant progressivement la durée de vie des aubes de turbine et l'efficacité de la turbine.
- Le moyen le plus simple de surmonter ce problème est de surchauffer la vapeur. Sur le diagramme $T - s$ ci-contre, l'état 3 est à la limite de la région biphasique de la vapeur et de l'eau, donc après l'expansion, la vapeur sera très humide. En surchauffant, l'état 3 se déplacera vers la droite (et vers le haut) en 3' dans le diagramme et produira donc une vapeur plus sèche après détente.



Les cycles thermodynamiques

Cycle de Rankine (Réchauffage de la vapeur)

- Le but d'un cycle de **réchauffage** est d'éliminer l'humidité transportée par la vapeur aux étapes finales du processus d'expansion. Dans cette variante, deux turbines fonctionnent en série. Le premier accepte la vapeur de la chaudière à haute pression. Une fois que la vapeur a traversé la première turbine, elle rentre dans la chaudière et est réchauffée avant de traverser une seconde turbine à pression inférieure. Les températures de réchauffage sont très proches ou égales aux températures d'entrée, alors que la pression de réchauffage optimale nécessaire n'est que d'un quart de la pression d'origine de la chaudière.



Les cycles thermodynamiques

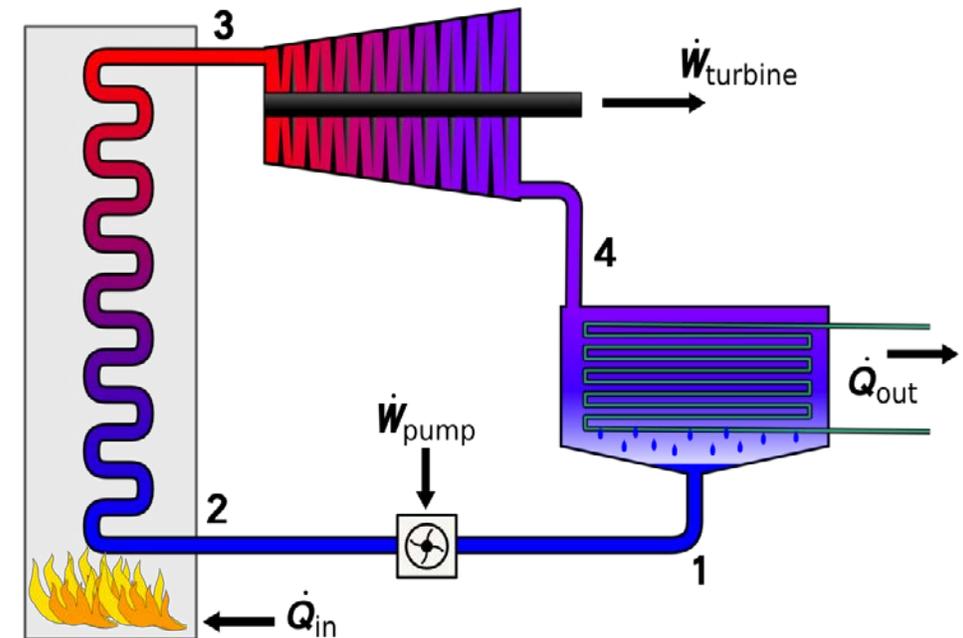
Cycle de Rankine (Réchauffage de la vapeur)

- Le cycle de réchauffage a été introduit pour la première fois dans les années 1920, mais n'a pas été opérationnel pendant longtemps en raison de difficultés techniques. Dans les années 1940, il a été réintroduit avec la fabrication croissante de chaudières à haute pression, et finalement le double réchauffage a été introduit dans les années 1950. L'idée du double réchauffage est d'augmenter la température moyenne. Il a été observé que plus de deux étapes de réchauffage ne sont généralement pas nécessaires, puisque l'étape suivante n'augmente l'efficacité du cycle que de moitié autant que l'étape précédente. Aujourd'hui, le double réchauffage est couramment utilisé dans les centrales électriques fonctionnant sous pression supercritique.

Les cycles thermodynamiques

Cycle de Rankine Organique (ORC)

- Cycle de Rankine avec un fluide organique ayant une température d'ébullition inférieure à celle de l'eau
- Permet de convertir de la chaleur provenant de sources plus froides
- Très utilisé notamment en énergies renouvelables



Les cycles thermodynamiques

Cycle de Rankine Organique (ORC)

- Le cycle organique de Rankine (ORC) utilise un **fluide organique** tel que le n-pentane ou le toluène à la place de l'eau et de la vapeur.
- Cela permet d'utiliser des sources de chaleur à **basse température**, telles que les bassins solaires, qui fonctionnent généralement à environ 70–90°C.
- L'efficacité du cycle est **beaucoup plus faible** en raison de la plage de températures plus basse, mais cela peut être intéressant en raison du coût inférieur impliqué dans la collecte de la chaleur à cette température plus basse.
- Alternativement, des fluides qui ont **des points d'ébullition au-dessus de celui de l'eau** peuvent être utilisés, ce qui peut avoir des avantages thermodynamiques (voir, par exemple, turbine à vapeur de mercure). Les **propriétés du fluide** de travail réel ont une grande influence sur la qualité de la vapeur après l'étape de détente, influençant la conception de l'ensemble du cycle.
- Le cycle Rankine ne restreint pas le fluide de travail dans sa définition, de sorte que le nom «cycle organique» est simplement un **concept marketing** et le cycle ne doit pas être considéré comme un cycle thermodynamique distinct.

Les cycles thermodynamiques

Cycle de Rankine Organique (ORC)

- Domaines d'utilisation
 - Solaire
 - Géothermie
 - Récupération de chaleur
 - Biomasse



Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Notions fondamentales
- Lois de la thermodynamique
- Notion d'efficacité
- Les cycles thermodynamiques
- ***Exergie***
- Conclusion

Exergie

Définition

- Énergie totale = Énergie disponible + Énergie non disponible.
- Travail net = f (état initial, détails de l'évolution, état final).
- Dans un processus entièrement réversible, l'exergie (ψ) représente le travail maximal que peut fournir un système (ou le travail requis minimum) lorsqu'il se met à l'équilibre thermodynamique avec son environnement.

$$\psi = (h - h_o) - T_o (s - s_o) + \frac{V^2}{2} + gz$$

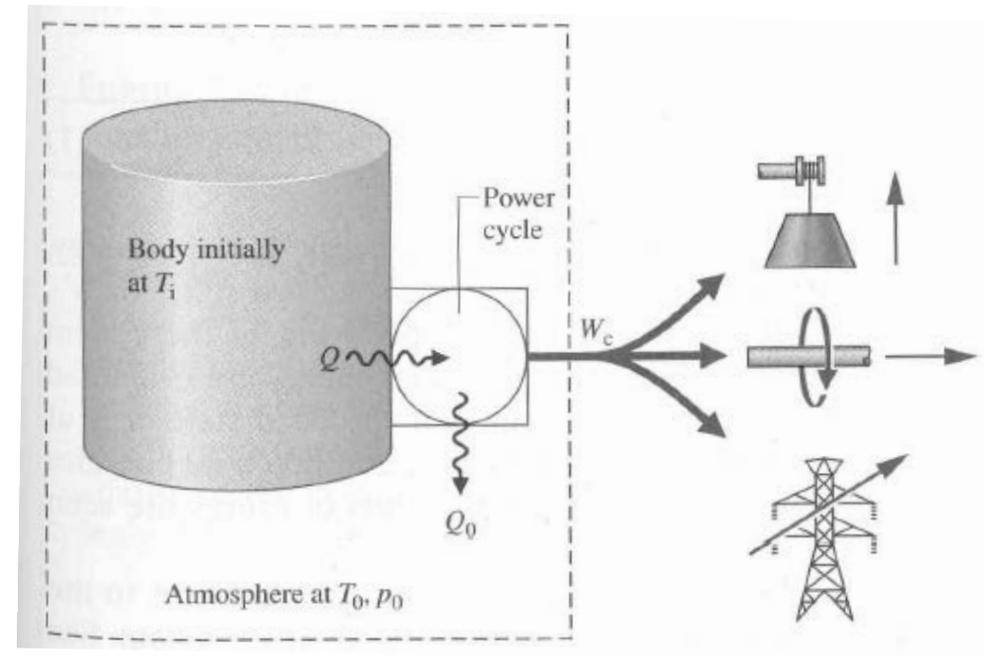
h_o, s_o : état neutre du système «*dead state*»

Exergie

Définition

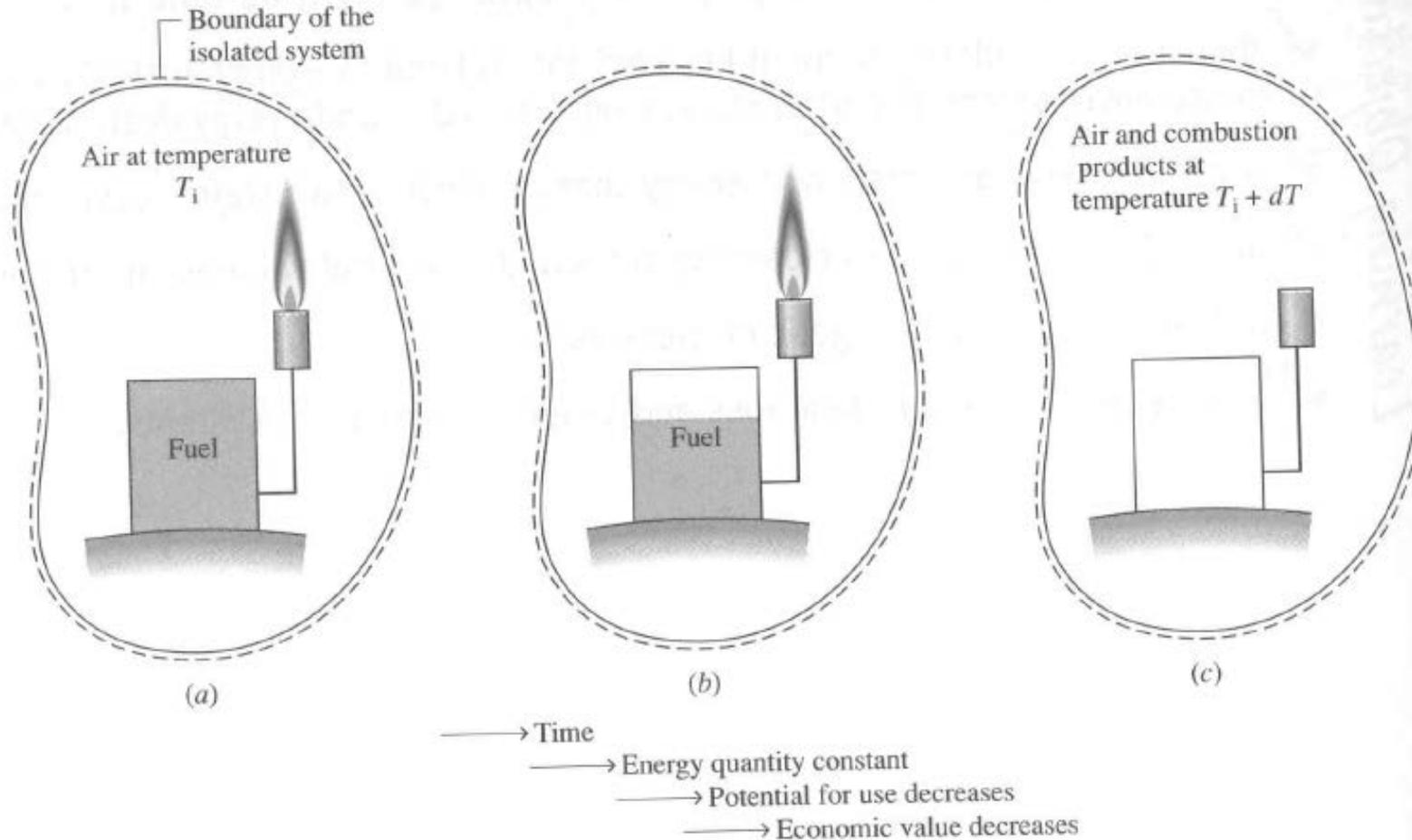
- L'exergie détruite est l'enthalpie créée

$$T_0 ds = \psi_{\text{détruite}} \begin{cases} > 0 & \text{évolution irréversible} \\ = 0 & \text{évolution réversible} \\ < 0 & \text{évolution impossible} \end{cases}$$



Exergie

Énergie totale (a) = Énergie totale (b) = Énergie totale (c)
Valeur économique élevée (a) Valeur économique nulle (c)



Exergie

En bref

- C'est la qualité de l'énergie. Ce qu'il nous est possible (ou pas) de faire avec.
 - Par exemple, si vous avez 1000 kg eau à 30°C que vous désirez utiliser et ramener à 20°C. Vous avez un total de $1000 \text{ kg} \times 4200 \text{ J/kgK} \times 10\text{K} = 42\text{MJ}$ d'énergie.
 - Mais pourriez vous allumer un ampoule de 100W avec 42MJ d'énergie thermique à 25°C en moyenne? Non. Vous pourriez alimenter une serre en chauffage, brièvement. Sous forme thermique ces 42MJ n'ont pas une bonne « qualité », une bonne exergie. Vous ne pouvez pas faire beaucoup de travail avec.

Exergie

En bref

- C'est la qualité de l'énergie. Ce qu'il nous est possible (ou pas) de faire avec.
 - Par contre, ces 42MJ (ou 11,66kWh) pourraient vous permettre de fournir 100W d'éclairage pendant une nuit et plus si cette énergie était stockée dans une batterie à décharge profonde.
 - Vous pourriez actionner un vérin hydraulique et soulever une masse, vous pourriez alimenter une pompe à chaleur et produire 126 MJ de chaleur si le COP est de 3, et enfin vous pourriez afin faire passer dans une résistance électrique pour fournir 42MJ d'énergie thermique (comme les 100 kg d'eau tiède).

Exergie

En bref

- C'est la qualité de l'énergie. Ce qu'il nous est possible (ou pas) de faire avec.
 - Donc, 42MJ d'énergie électrique peut fournir DAVANTAGE de travail que cette même quantité d'énergie thermique, elle permet plus de possibilités, elle a – à valeur égale – une plus grande qualité, une plus grande exergie.

Exergie

En bref

- Encore plus visuelle est l’analogie suivante.
 - Vous considérez une rame de billets de 100 euros de 10kg (ça doit faire une petite fortune!) et 10kg de papier journal. La même masse par analogie avec la même énergie.
 - Vous devez admettre que la « qualité » des euros vous permet de faire bien davantage qu’avec la même masse de papier journal.
 - On peut faire davantage de « travail » (lire voyages, achats, investissements, dépenses folles ou saugrenues) avec les euros qu’avec le journal (litière ou feu de foyer). (on peut faire une litière au chat ou un feu avec des euros aussi...)
 - Par analogie, on dira que l’exergie de 10kg d’euros est plus élevée que l’exergie de 10kg de papier journal.

Exergie

En bref

- Enfin, l'exergie est une énergie réputée « noble » telle que les énergies électrique, mécanique, nucléaire, magnétique et chimique, qui sont des énergies qui peuvent être exploitées sans avoir à subir de transformations préalables.
- L'énergie est ainsi constituée d'une part d'énergie noble, l'exergie (énergie disponible), d'autre part, d'énergie complémentaire, l'anergie (énergie non disponible), avec laquelle il n'y a rien à faire!
- Pour les besoins du cours, c'est suffisant.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Notions fondamentales
- Lois de la thermodynamique
- Notion d'efficacité
- Les cycles thermodynamiques
- Exergie
- ***Conclusion***

Conclusion

- Depuis l'invention des premières machines à vapeur, de gigantesques investissements en recherche furent déployés pour développer et optimiser les systèmes thermodynamiques;
- Ces efforts ont permis notamment la prolifération des moteurs à combustion et de centrales à énergies fossiles;
- Face aux enjeux climatiques, il devient nécessaire d'utiliser l'aboutissement de ces investissements pour développer des énergies plus durables.

Références

- Fermi, E. (1937), Thermodynamics, **155 p.** Chapitre 1 et 2 obligatoires
- Van Wylen, G., Sonntag, E. & Desrochers, P. (1976). Thermodynamique appliquée
- Van Ness, H.C. (1969), Understanding thermodynamics. **102 p.** Chapitre 1 obligatoire
- Çengel, Y. & Boles, M. (2015). Thermodynamics, An Engineering Approach, Eight Edition



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

