

## 2.5 Thermodynamique

### 2.5.3 Cycles et exergie

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

*Département de génie mécanique*

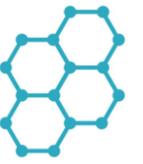
*Stéphane Hallé, M.Sc.A., Ph.D.*

*Patrick Belzile, ing., M.ing.*

*Pierre-Luc Paradis, M.ing.*

*Mathieu Patin, M.ing.*

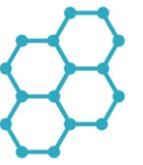
# Question



ENR2020

- 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

- Les cycles thermodynamiques
- Exergie
- Conclusion

# Plan de la présentation

- *Les cycles thermodynamiques*
- Exergie
- Conclusion

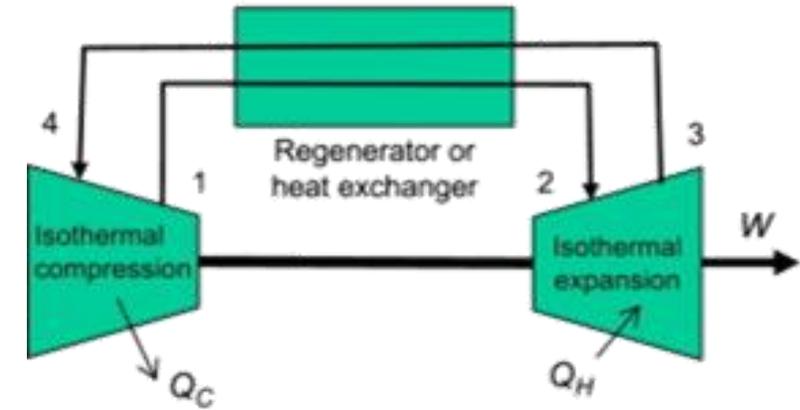
# Les cycles thermodynamiques

## 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

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

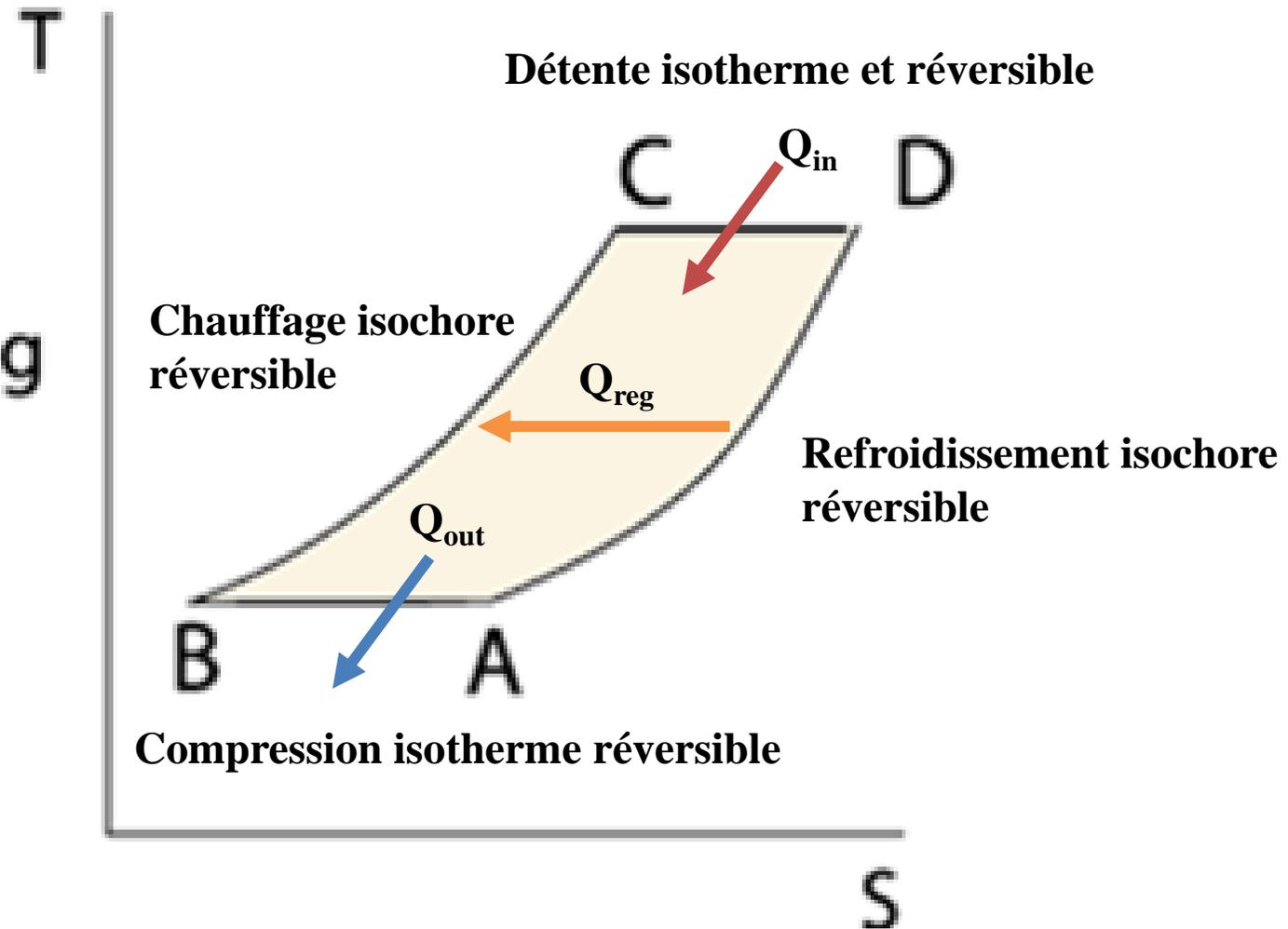
- Appareils volumineux et coûteux



# Les cycles thermodynamiques

Cycle de Stirling

Stirling



# Les cycles thermodynamiques

## Cycle de Stirling

- Domaine d'utilisation
  - Solaire concentré (Concentrated Solar Power, *CSP*)

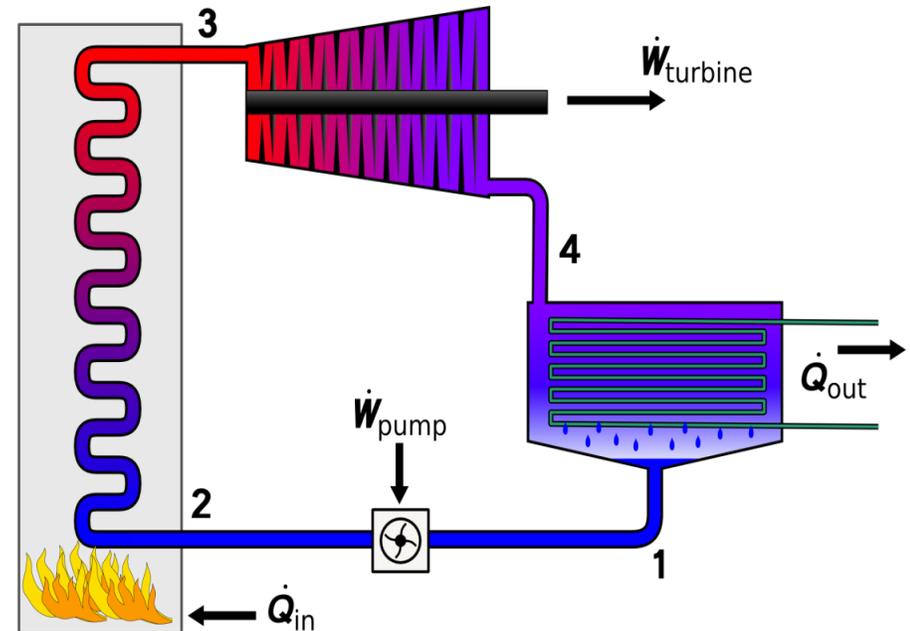


Sandia National Laboratories

# 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 gazeuse
- 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.

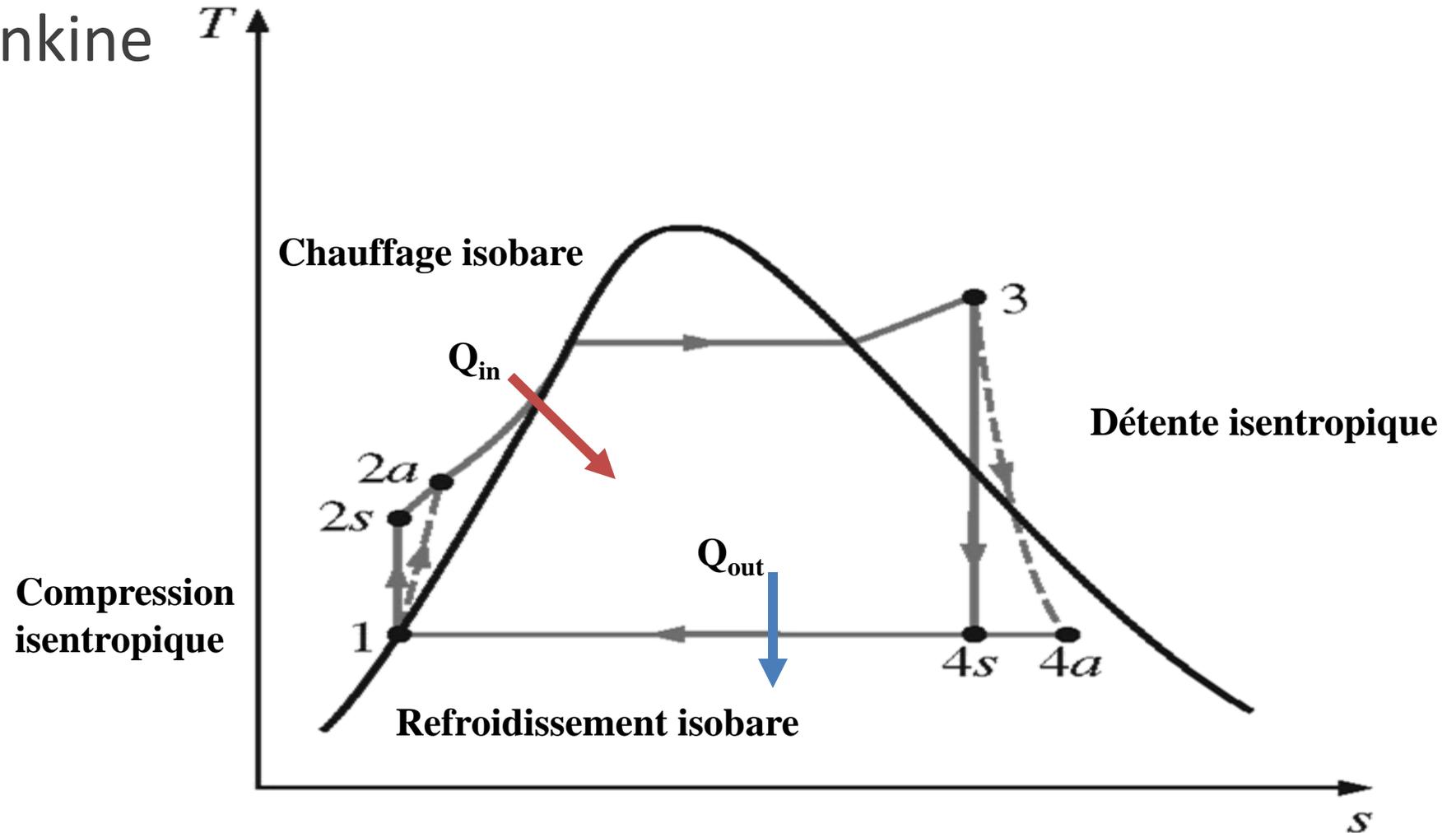
# Les cycles thermodynamiques

## Cycle de Rankine

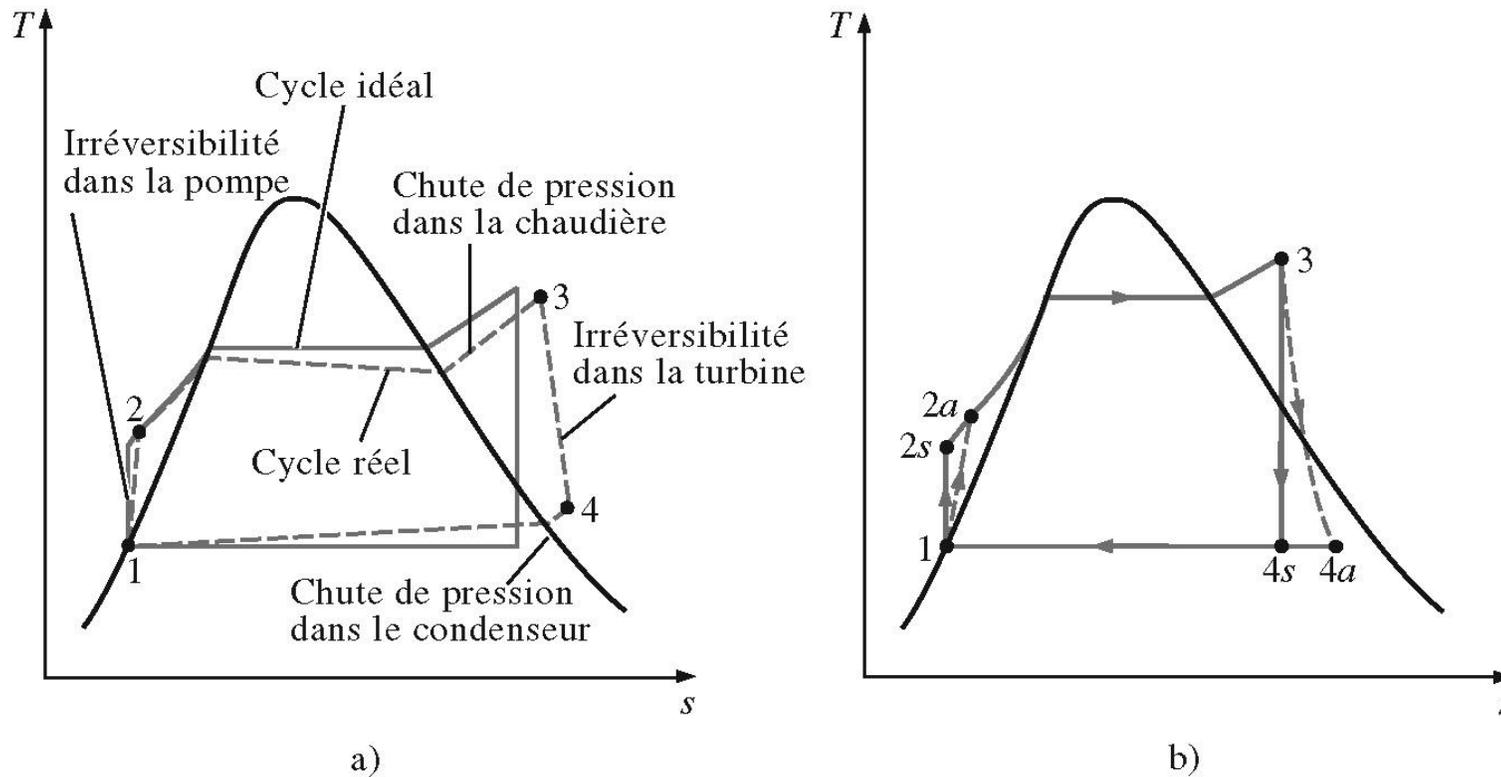
- Bien que de nombreuses substances puissent être utilisées comme fluide de travail dans le cycle de Rankine, **l'eau** est généralement le fluide de choix en raison de ses propriétés favorables, telles que sa chimie non toxique et non réactive, son abondance et son faible coût, ainsi que ses propriétés 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



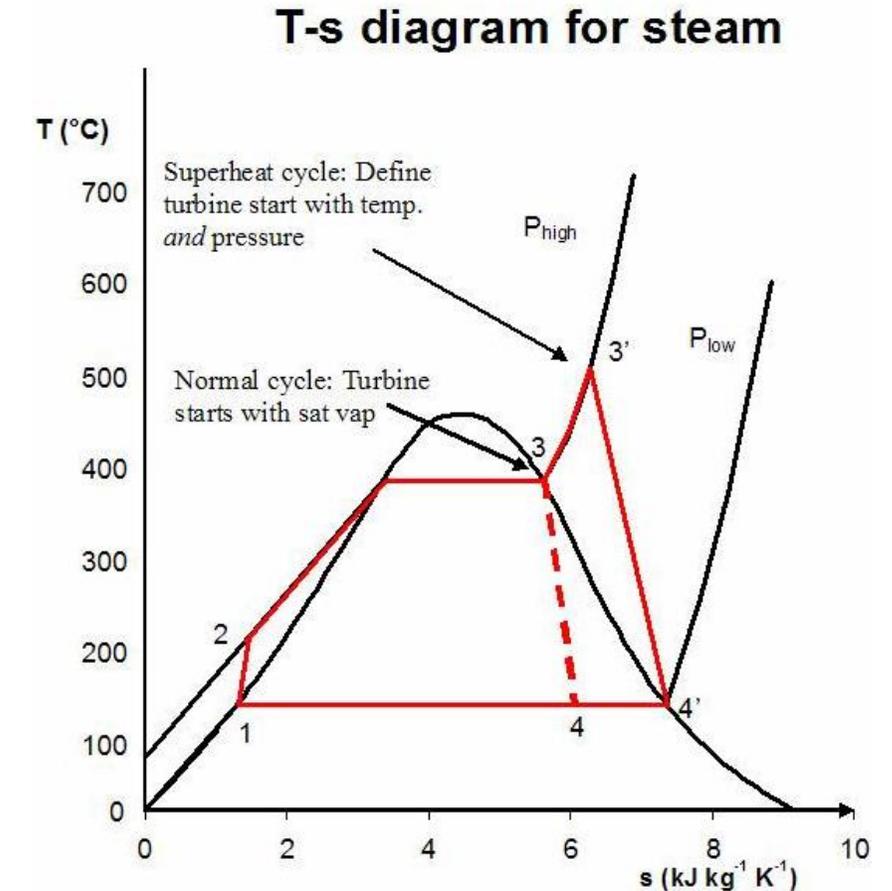
**FIGURE 10.4**

- 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)

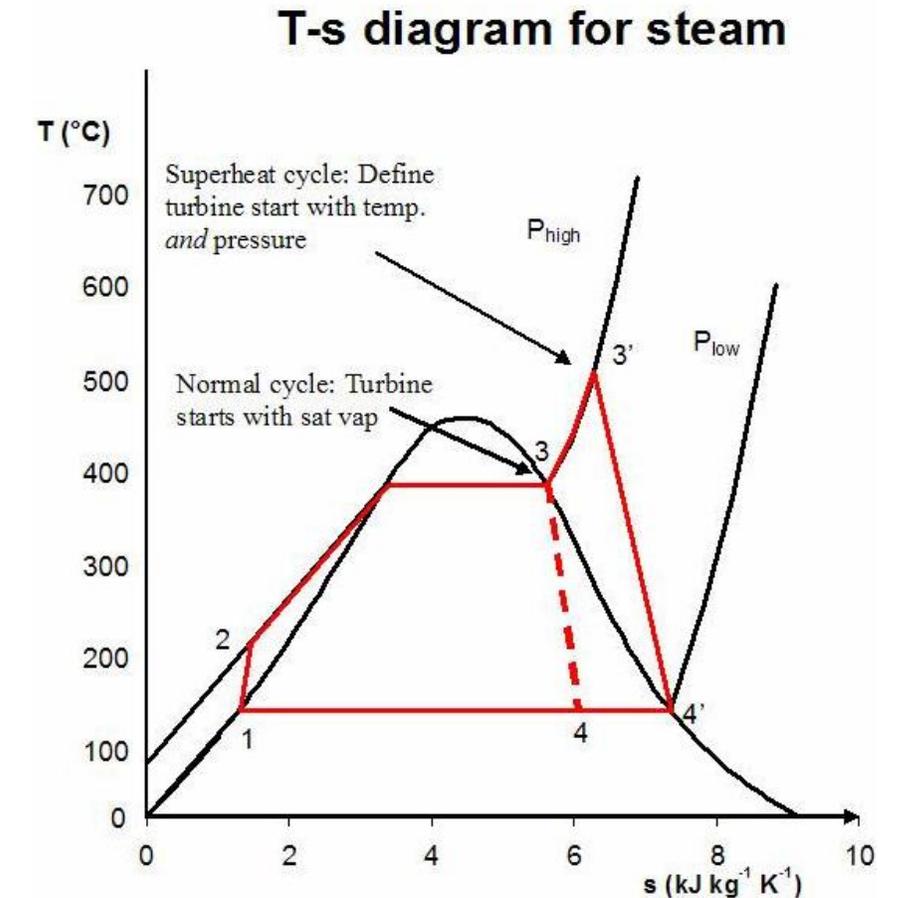
- Dans un cycle réel de centrale électrique (le nom de cycle «Rankine» n'est utilisé que pour le cycle idéal), la compression par la pompe et la détente dans la turbine ne sont pas isentropiques.
- En d'autres termes, ces processus sont irréversibles et l'entropie est augmentée au cours des deux processus.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

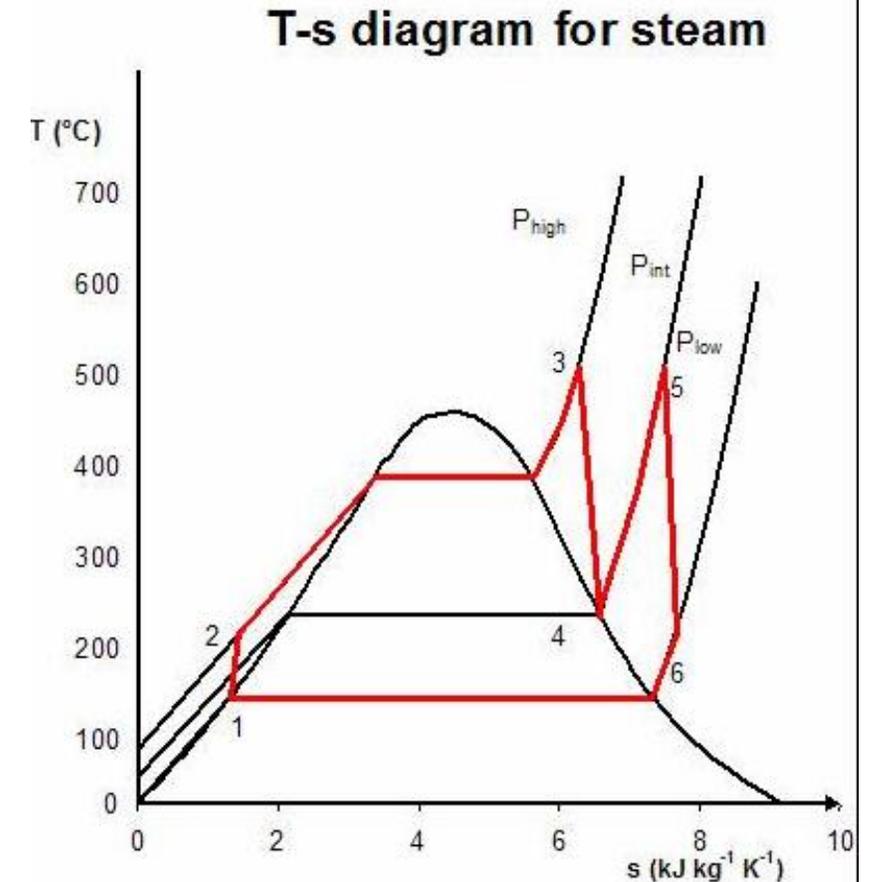
- En particulier, l'efficacité de la turbine à vapeur sera limitée par la formation de gouttelettes d'eau. Au fur et à mesure que l'eau se condense, des gouttelettes d'eau frappent les aubes de turbine à grande vitesse, provoquant des piqûres et de l'érosion, diminuant progressivement la durée de vie 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

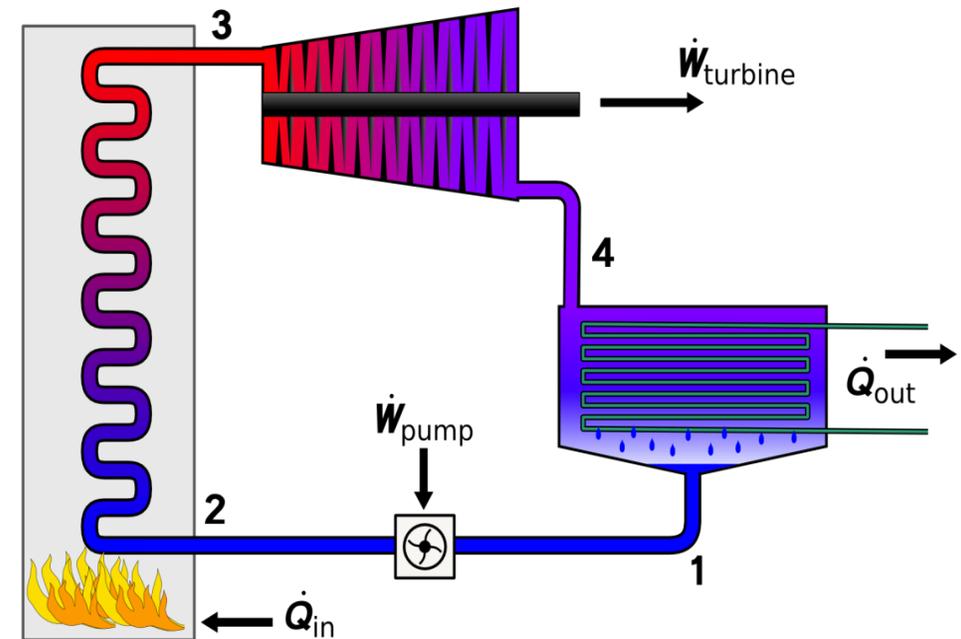
## Cycle de Rankine (Réchauffage de la vapeur)

- 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.

# Les cycles thermodynamiques

## Cycle de Rankine Organique (ORC)

- 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

- 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 ( $\psi$ ) 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.

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

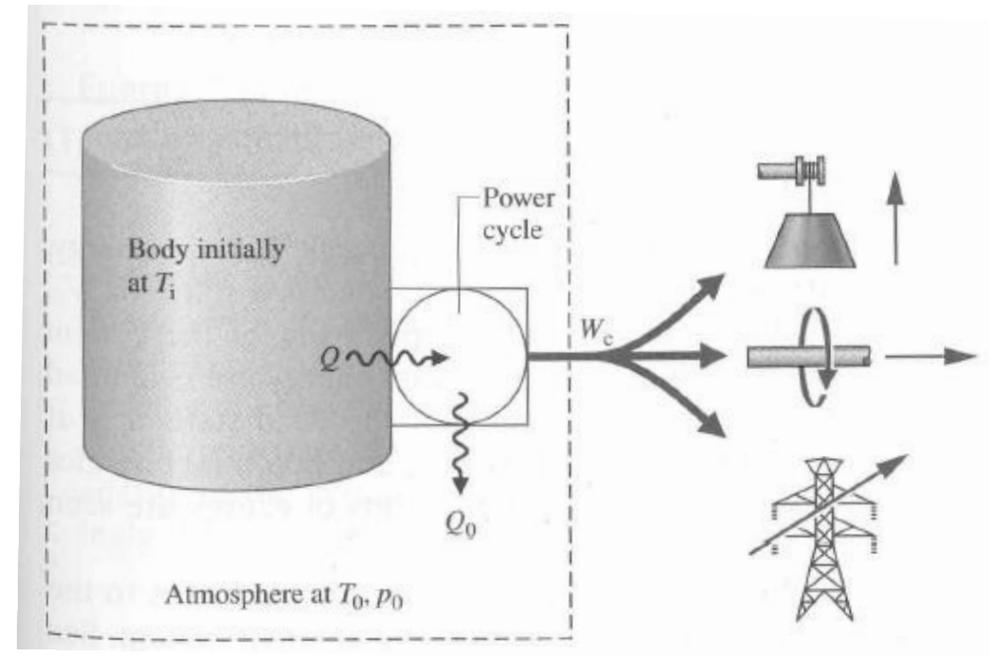
$h_o, s_o$ : état neutre du système «*dead state*»

# Exergie

## Définition

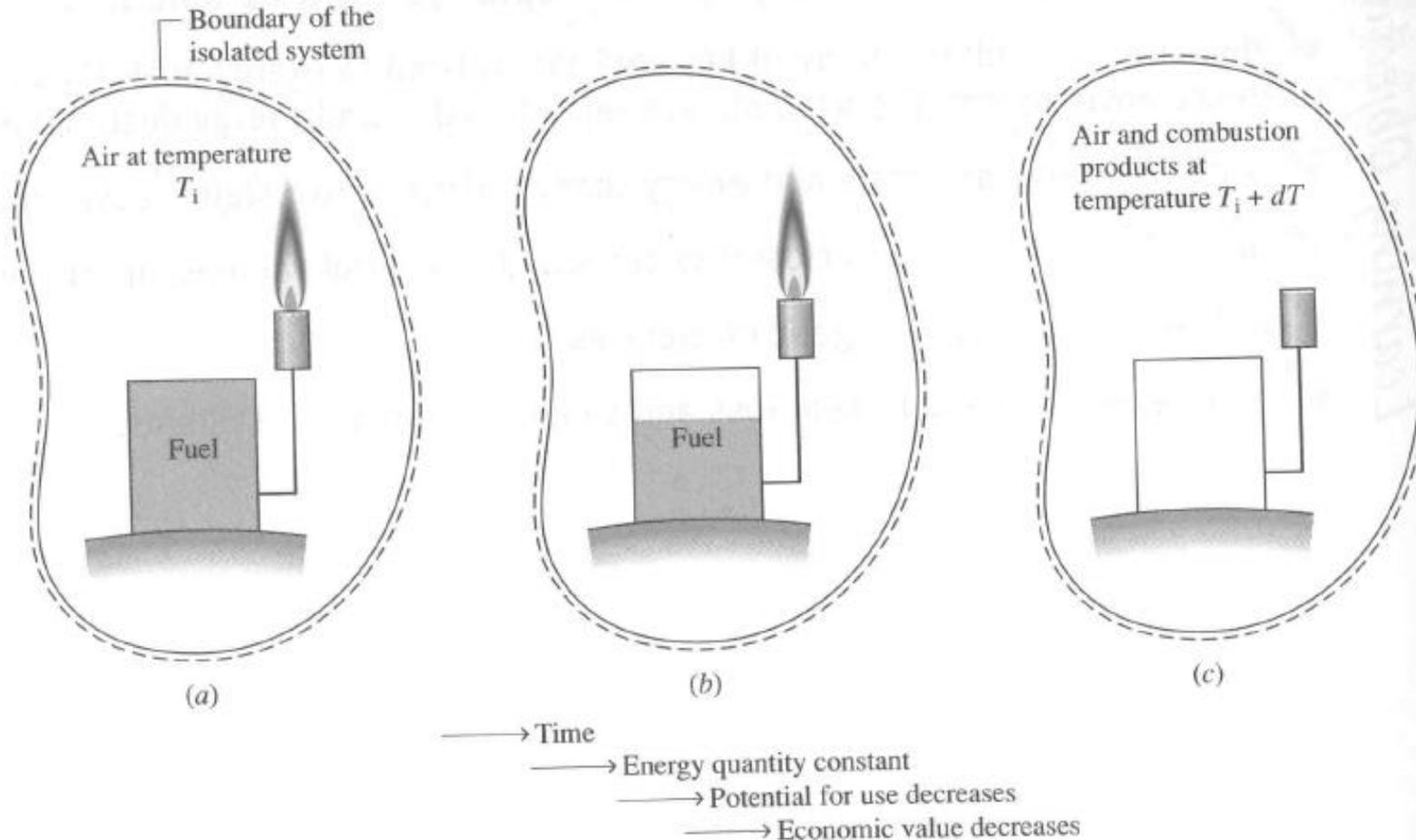
- L'exergie détruite est l'enthalpie créée

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



# 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 (environ, soit avec  $c_p = 4,2 \text{ kJ/kgK}$ ).
  - 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 était de 3, et enfin vous pourriez enfin faire passer cette énergie dans une résistance électrique pour fournir théoriquement 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 \$ (ou MAD, DA, DT, €, etc..) de 100kg (ça doit faire une petite fortune au Canada comme ailleurs!) et 100kg de papier journal. La même masse par analogie avec la même énergie.
  - Vous devez admettre que la « qualité » des billets 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 billets qu’avec le journal (litière ou feu de foyer). (on peut faire une litière au chat ou un feu avec des billets aussi...)
  - Par analogie, on dira que l’exergie de 100kg de billets de banque est plus élevée que l’exergie de 100kg 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

- 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 des centrales de production à énergies fossiles;
- Face aux enjeux climatiques, il devient nécessaire d'utiliser l'aboutissement de ces investissements pour développer des énergies plus durables;
- Et plus de 50% des procédés, systèmes et équipements impliqués dans la production d'énergie et d'énergie renouvelable font appel à la thermodynamique.

# 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. (**2019**). Thermodynamics : An Engineering Approach, 9<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill.



**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

