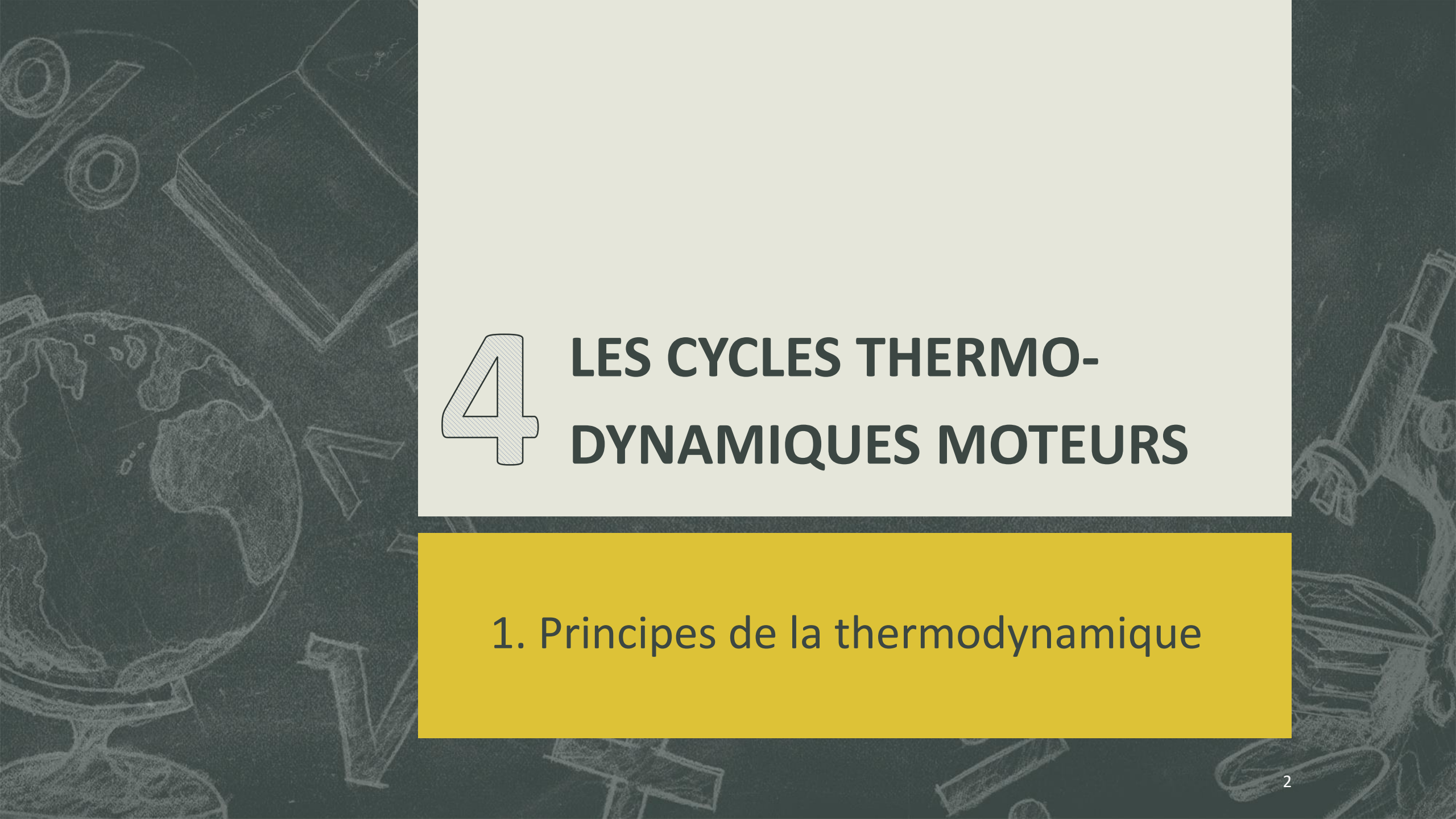


PHYSIQUE INDUSTRIELLE

C. Voyant

2023/2024



4 LES CYCLES THERMO- DYNAMIQUES MOTEURS

1. Principes de la thermodynamique

Introduction

LES PRINCIPES DE LA THERMODYNAMIQUE

DÉTERMINATION DES GRANDEURS PHYSIQUES FONDAMENTALES DE LA THERMODYNAMIQUE

0

La température est une
grandeur repérable T

2

Création de l'entropie S
Principe d'évolution

1

Introduction de la fonction
énergie interne U

3

L'entropie d'un corps
pur est nulle à $T = 0 \text{ K}$

1. Principes de la thermodynamiques

1^{ER} PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE : Principe de conservation

“ Lors d’une transformation dans un système fermé, la variation d’énergie interne du système est égale à la quantité d’énergie échangée avec le milieu extérieur sous forme de **chaleur** et de **travail** ”

$$dU = \delta W + \delta Q$$

“ Cette énergie ne dépend que de l’état initial et de l’état final ”



- Sens d'évolution des systèmes, sens des réactions chimiques
- Transfert spontané de la chaleur du chaud vers le froid
- Irréversibilité de certaines transformations spontanées ou naturelles

1. Principes de la thermodynamiques

2^{ÈME} PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE : Principe d'évolution (Carnot)

“ Toute transformation thermodynamique génère de l'entropie ”

- ✓ Déduit de faits expérimentaux,
- ✓ Prévoir l'évolution des systèmes,
- ✓ Transformations irréversibles.



Sadi Carnot
Physicien et ingénieur
1796 - 1832

- Émile CLAPEYRON
- Rudolf CLAUSIUS
- Lord KELVIN
- Ludwig BOLTZMANN
- Max PLANCK

1. Principes de la thermodynamiques

2^{ÈME} PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE : Principe d'évolution (Carnot)

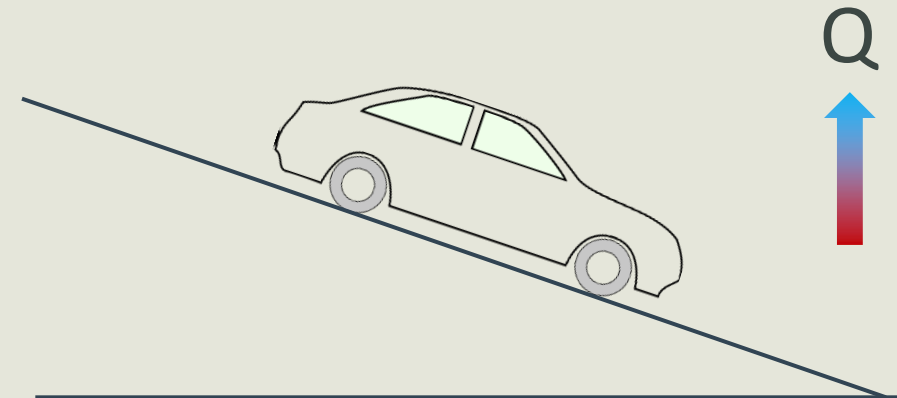
Exemple 1 : Voiture en mouvement

Roue de voiture en mouvement freinée progressivement jusqu'à son arrêt

➡ Échauffement des freins et de la jante

Jamais, on ne voit cette roue se mettre seule en mouvement :

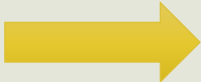
- En absorbant la chaleur dégagée par le freinage
- En remontant la pente dans le sens inverse



1. Principes de la thermodynamiques

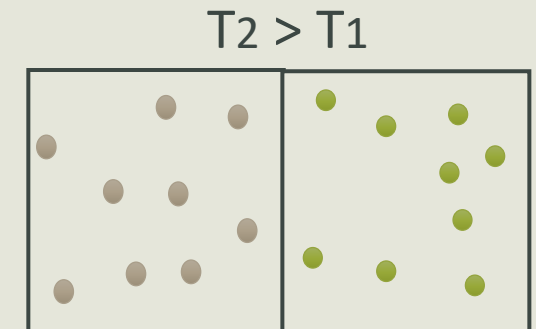
2^{ÈME} PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE : Principe d'évolution (Carnot)

Exemple 2 : Transfert spontané de la chaleur

Écoulement de la chaleur des HT $\rightarrow$ BT  Transfert spontané et irréversible

Etat initial (1)

- Cloison en place
- Les molécules les plus agitées à gauche
- Les molécules moins agitées à droite
- Ordre où les molécules sont séparées $\rightarrow$ un état hors-équilibre



Transfert de chaleur

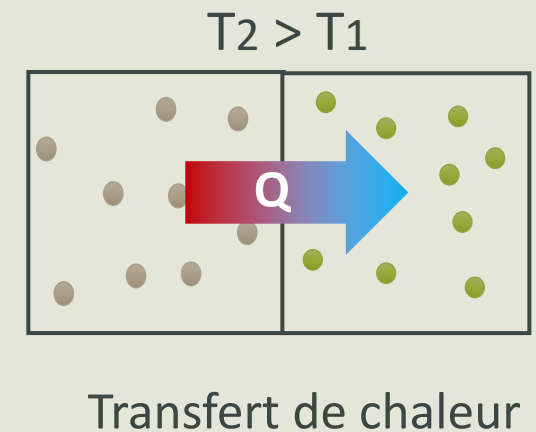
1. Principes de la thermodynamiques

2^{ÈME} PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE : Principe d'évolution (Carnot)

Exemple 2 : Transfert spontané de la chaleur

Etat final (2) : Cloison enlevée

- Les molécules plus chaudes diffusent vers la droite
- Elles communiquent par chocs une partie de leur énergie aux molécules plus froides
- Atteinte d'un état d'équilibre, les deux régions sont à la même T^e
- Les molécules ont en moyenne même énergie cinétique
- Le système est caractérisé par un plus grand désordre.



1. Principes de la thermodynamiques

2^{ÈME} PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE : Principe d'évolution (Carnot)

Exemple 3 : Détente d'un gaz

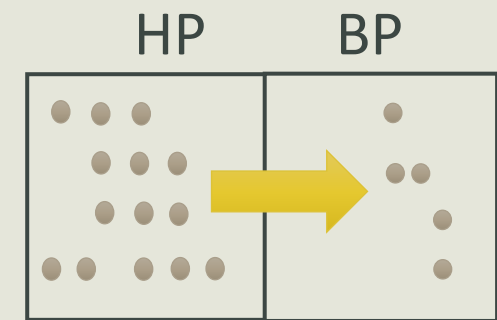
Écoulement brusque du gaz d'une HP → BP ➡ Détente spontanée et irréversible

Etat initial (1)

- Hautement instable
- Etat hors équilibre
- Ordonné

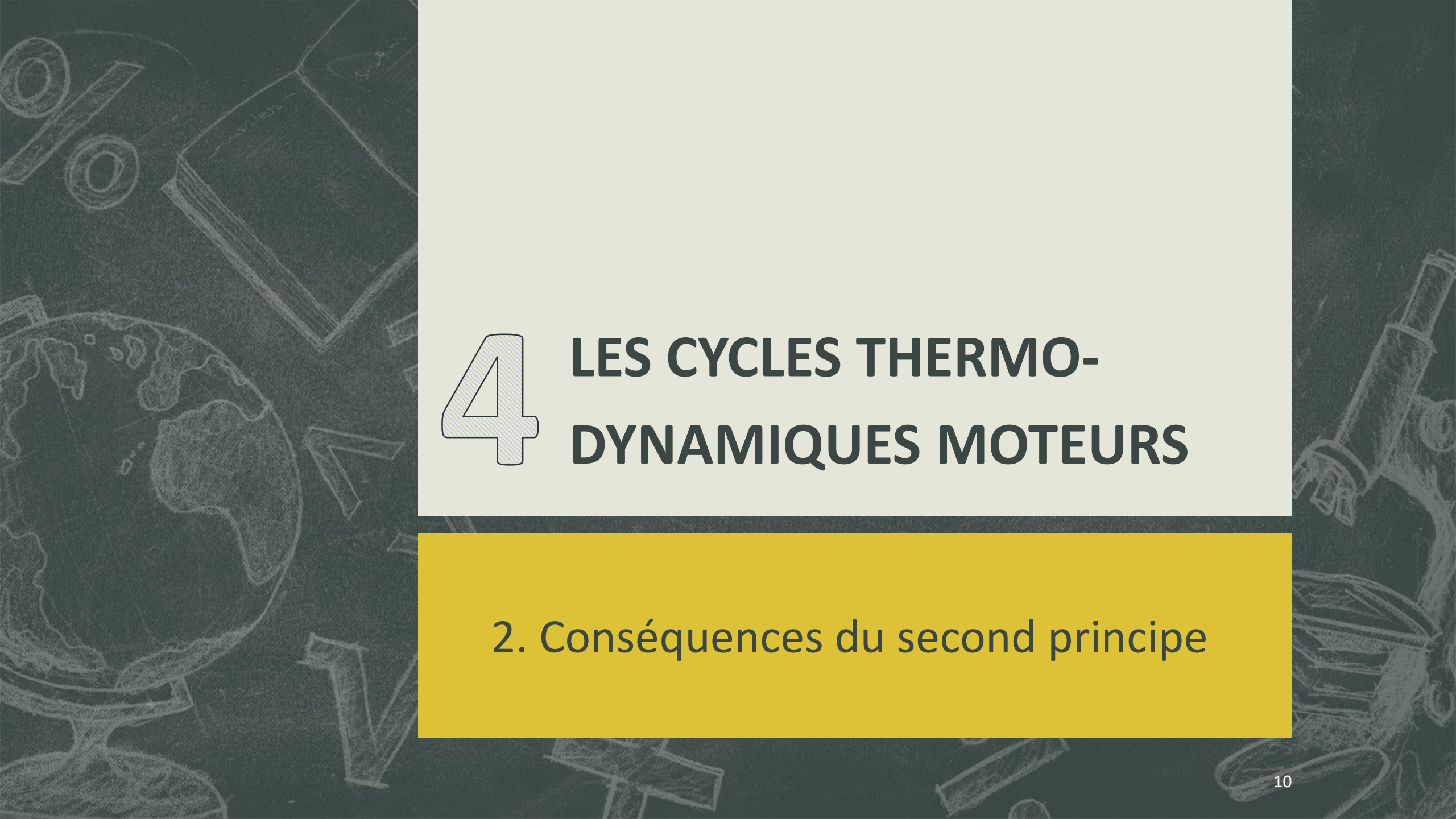
Etat final (2)

- Stable
- Etat d'équilibre
- Désordonné (Mélange homogène)



Détente irréversible d'un gaz
(1) → (2)

Transformation irréversible ➡ Désordre moléculaire (S) ↗ Entropie max (Etat d'équilibre)



4 LES CYCLES THERMO- DYNAMIQUES MOTEURS

2. Conséquences du second principe

2. Conséquences du second principe

2^{ÈME} PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE : Principe d'évolution (Carnot)

Le principe de Carnot peut également s'exprimer par :

1

Si l'agent d'un moteur thermique n'est en relation qu'avec une seule source d'énergie calorifique, il ne peut pas fournir de travail.

2

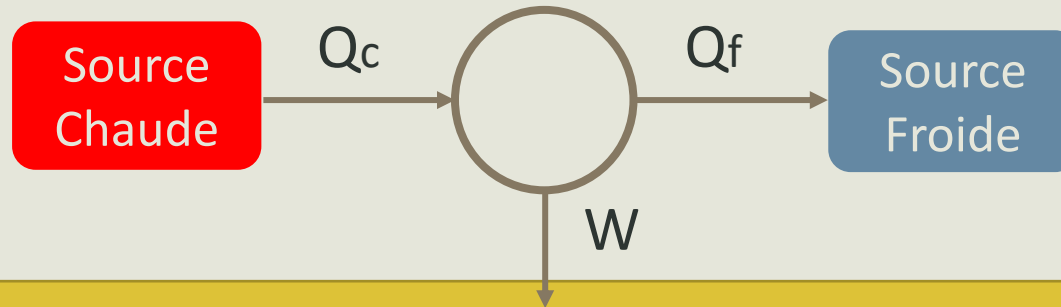
Pour transformer de l'énergie calorifique en travail, l'agent d'un moteur thermique doit être en relation avec 2 sources à des températures différentes.

3

L'agent ne fournit du travail que s'il prend de l'énergie calorifique à la source "chaude" et s'il en rend à la source "froide".

2. Conséquences du second principe

2^{ÈME} PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE : Principe d'évolution (Carnot)



1

Dans la turbine à vapeur, la chaudière est la source chaude et le condenseur la source froide.

2

Une transformation intégrale de chaleur en travail est impossible car l'agent du moteur thermique rend obligatoirement à la source froide une partie de l'énergie calorifique reçue de la source chaude (rendement).

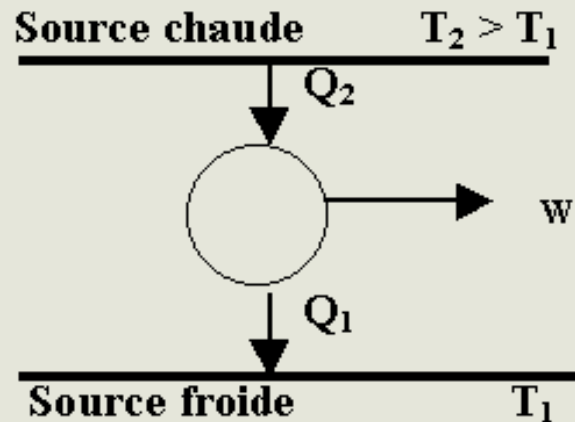
3

L'énergie calorifique apparaît comme une énergie de qualité inférieure à l'énergie mécanique.

2. Conséquences du second principe

Machines thermo - dynamiques

Transformant de la chaleur en travail ($Q \rightarrow W$)

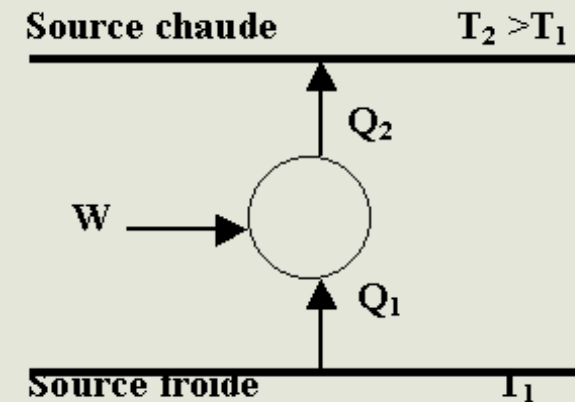


- 1^{er} principe : $Q_2 = W + Q_1$
- 2^{ème} principe : notion de rendement

$$\eta = \frac{W_{\text{fourni}}}{Q_{\text{prélevée}}} = \frac{W}{Q_2} = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{Q_1}{Q_2} < 1$$

Machines dynamo - thermiques

Transformant du travail en chaleur ($W \rightarrow Q$)



- 1^{er} principe : $Q_2 = W + Q_1$
- 2^{ème} principe : notion de coefficient de performance

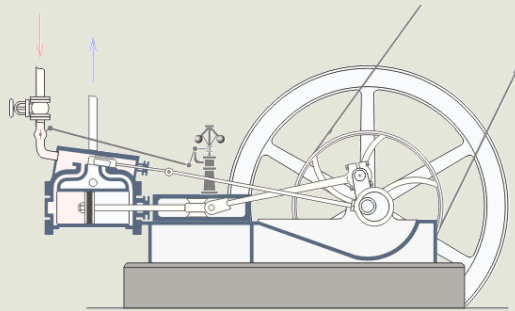
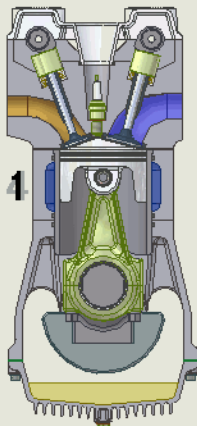
$$\eta = COP = \frac{Q_{1/2}}{W} = \frac{Q_{1/2}}{Q_2 - Q_1} \in [1, 7]$$

$$\eta = \frac{\text{Energie produite}}{\text{Energie consommée}}$$

2. Conséquences du second principe

Machines thermo - dynamiques

- Machines à vapeur
- Moteurs à combustion à essence ou diesel
- Centrales thermiques ou nucléaires



Machines dynamo - thermiques

- Machines frigorifiques
- Pompes à chaleur
- Liquéfacteurs de gaz



2. Conséquences du second principe

2^{ÈME} PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE : Inégalité de Clausius - Carnot

L'**entropie S**, grandeur extensive [J/K] = “ Mesure du degré de désordre d'un système ”

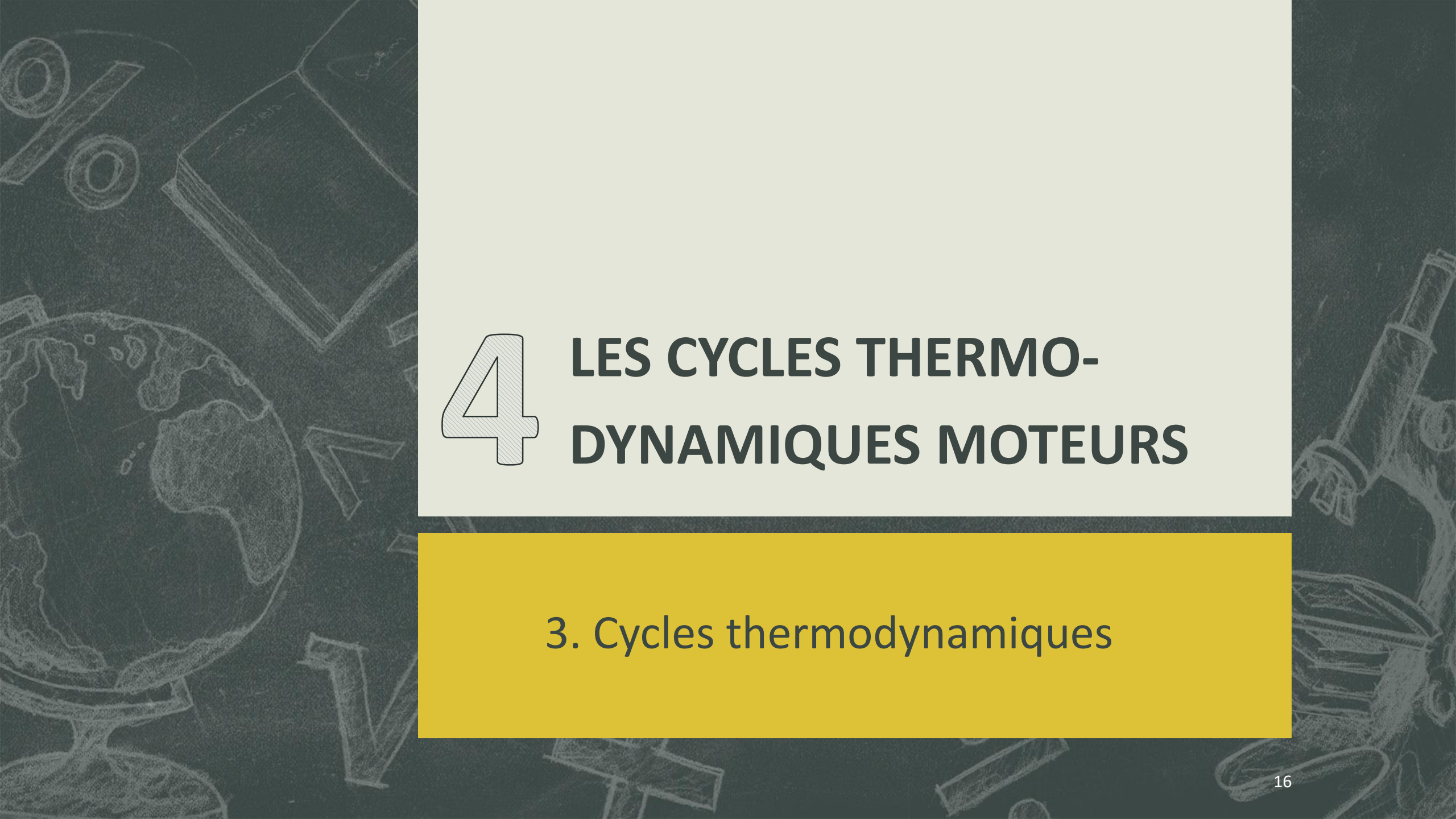
- (1) Sa variation lors d'une *transformation réversible* est égale à la quantité de chaleur apportée au système divisée par la température de ce même système. $\Delta S = \frac{Q_{rev}}{T}$ (1)
- (2) Si la transformation est *irréversible*, alors il y a une création d'entropie positive à cause des phénomènes dissipatifs (friction, diffusion, etc.). $\Delta S = \frac{Q_{irr}}{T} + S_{new}$ (2)
- (3) On déduit la fameuse inégalité de Clausius qui résume le 2nd principe. $\Delta S > \frac{Q_{irr}}{T}$ (3)

Transformation
adiabatique réversible

$$\sum_i \Delta S_i = 0$$

$$\begin{cases} \Delta S_1 = \frac{Q_1}{T_1} < 0 & (1) \\ \Delta S_2 = \frac{Q_2}{T_2} > 0 & (2) \end{cases}$$

$$\Delta S_2 = -\Delta S_1 \Rightarrow \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0 \quad (3)$$



4 **LES CYCLES THERMO- DYNAMIQUES MOTEURS**

3. Cycles thermodynamiques

Equipements thermodynamiques

Condenseur

Pompe

Turbine

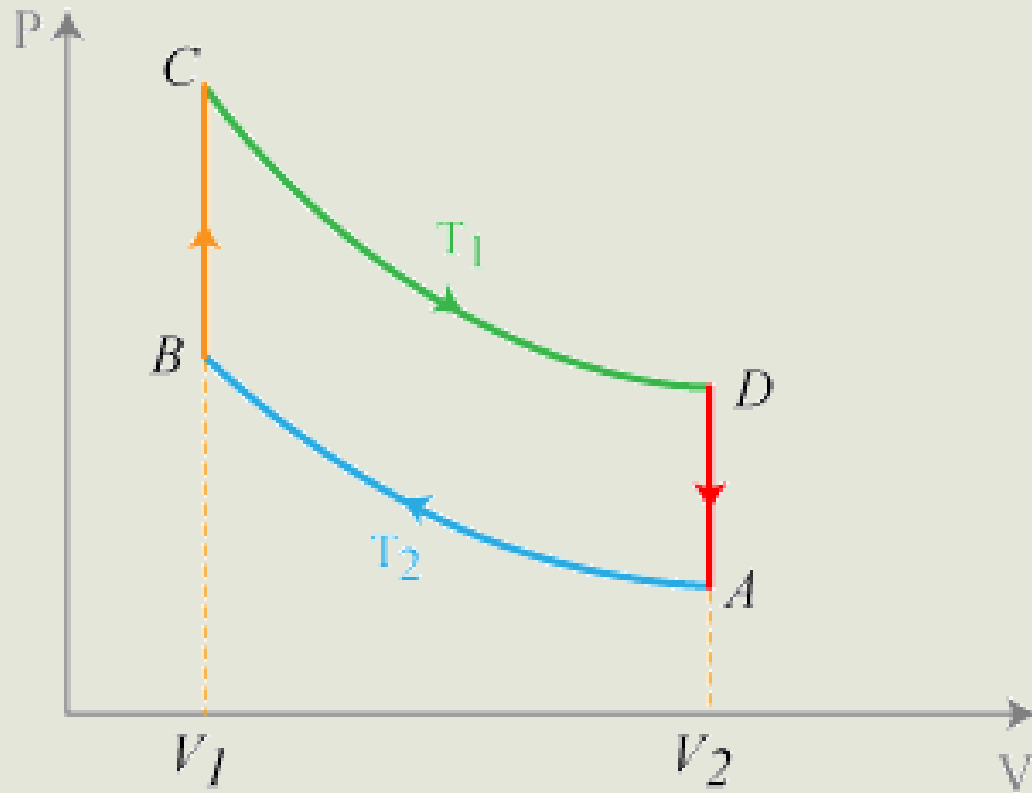
Evaporateur

Compresseur

Echangeur
de chaleur



3. Cycles thermodynamiques



- Suite de transformations successives,
- Départ d'un état initial donné,
- Retour à l'état initial (Cycle),
- Variation des paramètres d'état,
- Échange du travail avec l'extérieur,
- Transfert thermique avec l'extérieur.

3. Cycles thermodynamiques

Hypothèses

- Moteurs utilisant comme fluide un **gaz** (air, vapeur d'eau, fluide frigorigère).
- Cycle de transformations supposées **réversibles**.
- Cycles **théoriques** avec transformations **élémentaires**.
- On assimile le système à de l'air tout au long du cycle, et l'air à un **gaz parfait**.
- Pour une étude plus fine, on utilise les **propriétés réelles** des gaz.
- Dans les moteurs à combustion, la **nature du système change** au cours du cycle (air, mélange, gaz brûlés).

3. Cycles thermodynamiques

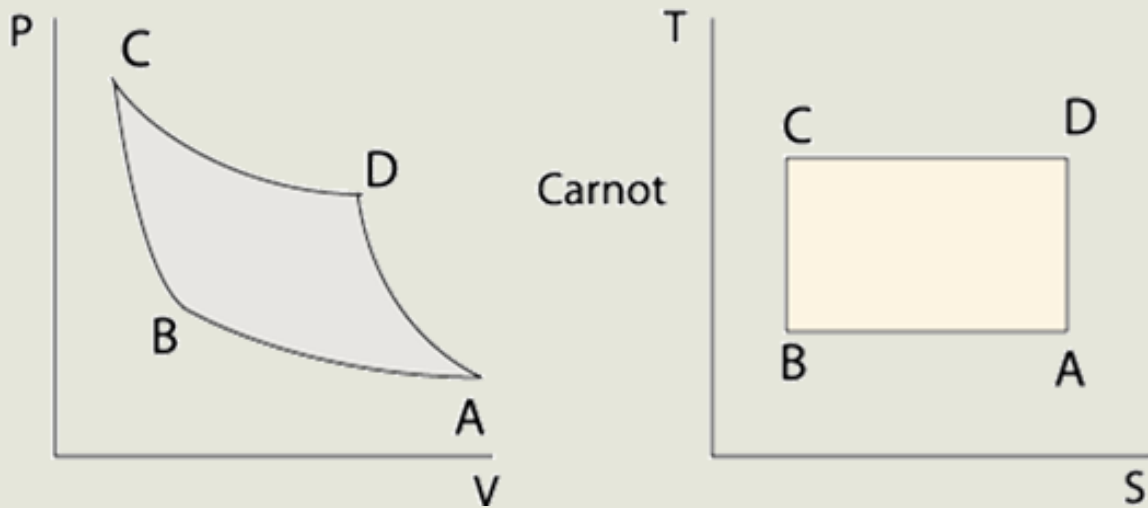
On rencontre essentiellement 2 types de moteurs :

- **Les moteurs à combustion interne** : la source d'énergie est un mélange combustible et les produits de combustion sont les fluides de travail : cycle de **Beau de Rochas** ou de **Otto** (moteur à allumage commandé), cycle **Diesel**, cycle de **Joule** (turbines à gaz).
- **Les moteurs à combustion externe** : les produits de combustion sont utilisés pour chauffer un second fluide qui agit comme fluide de travail : cycle de **Stirling** (moteur à air chaud), cycle d'**Ericsson**, cycle de **Joule** ou de **Brayton**. Pour les turbines à vapeur, on étudiera alors le cycle de **Hirn** et celui de **Rankine**.

3. Cycles thermodynamiques

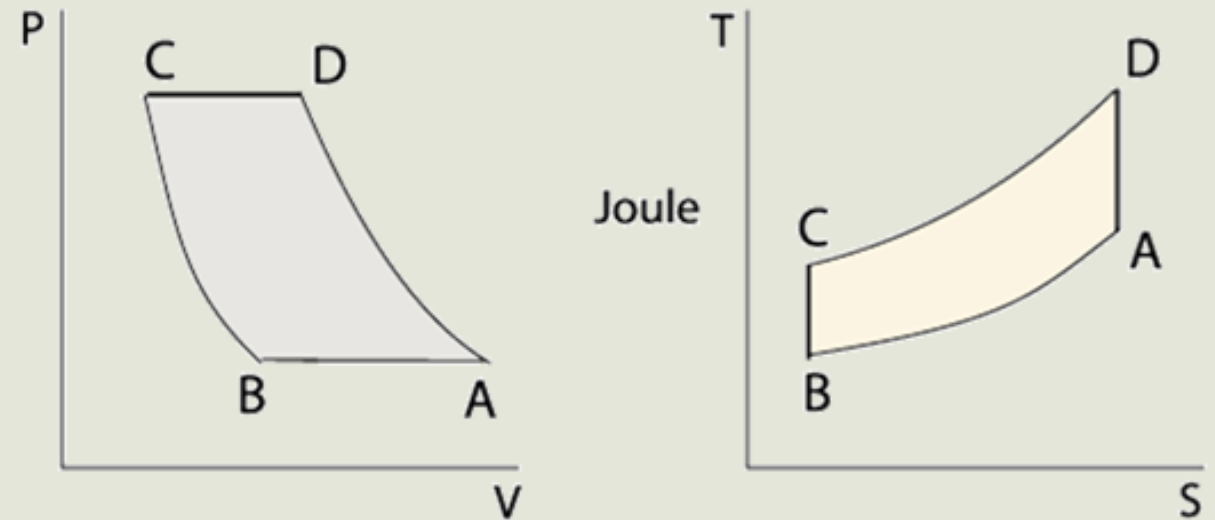
1. Cycle Carnot

- 2 isothermes, 2 isentropiques



2. Cycle de Joule (Brayton)

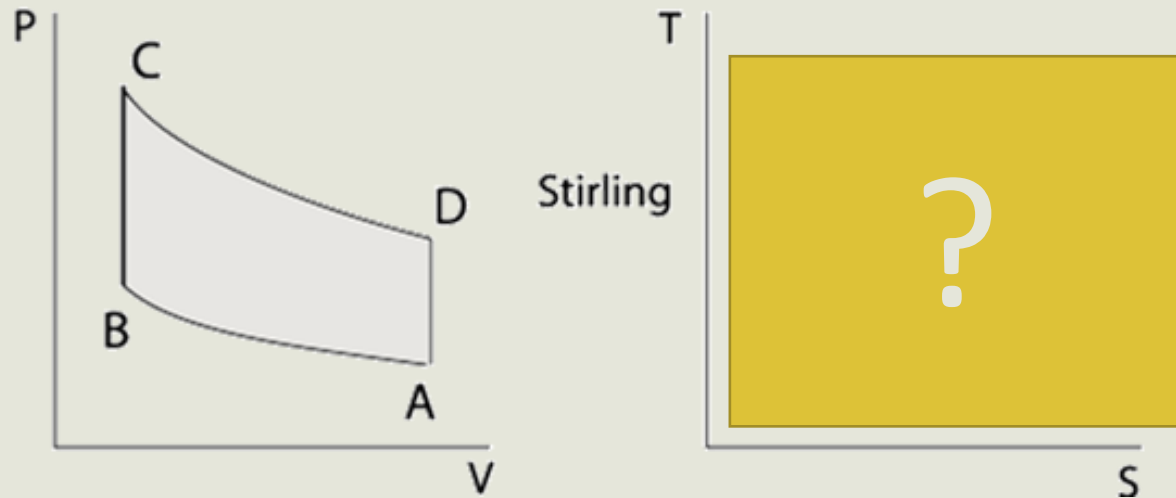
- 2 isobares, 2 isentropiques



3. Cycles thermodynamiques

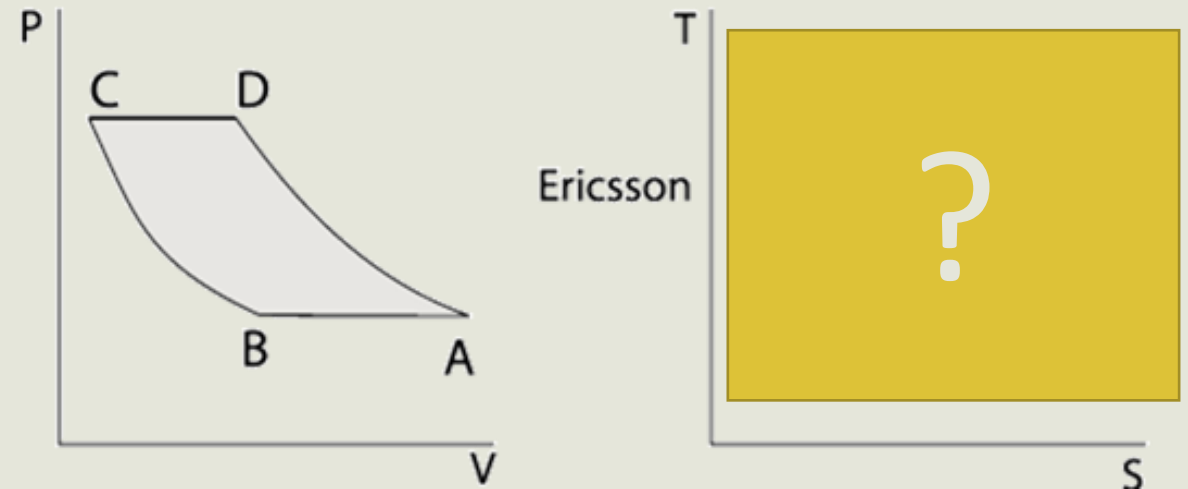
3. Cycle de Stirling

- 2 isochores et de 2 isothermes.



4. Cycle de Ericsson

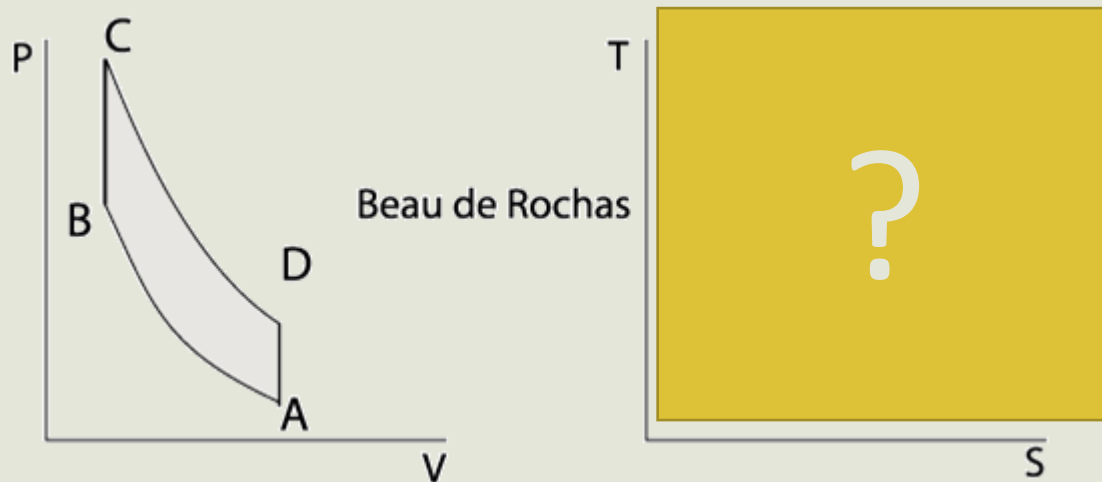
- 2 isobares et de 2 isothermes



3. Cycles thermodynamiques

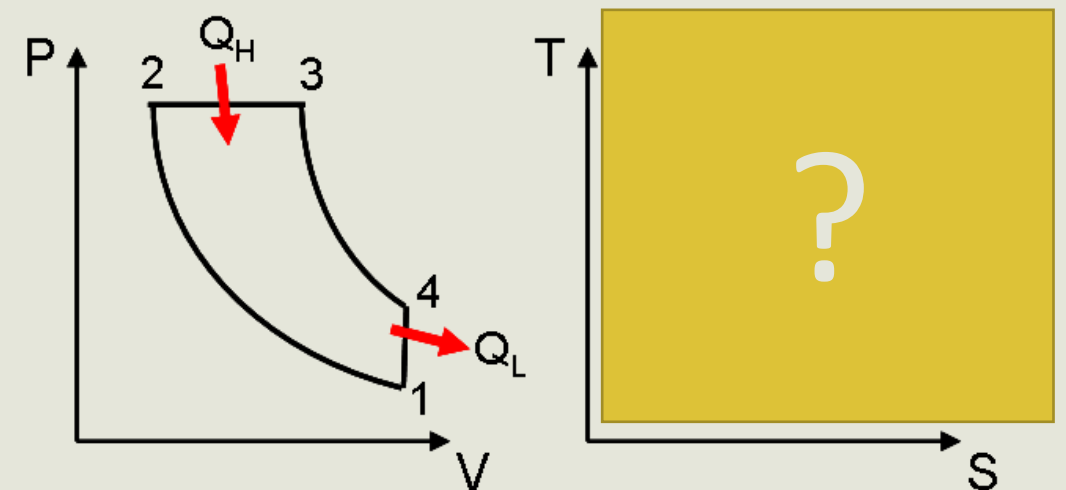
5. Cycle de Beau de Rochas (Otto)

- 2 isentropiques, 2 isochores
- Le fluide est l'essence



6. Cycle de Diesel

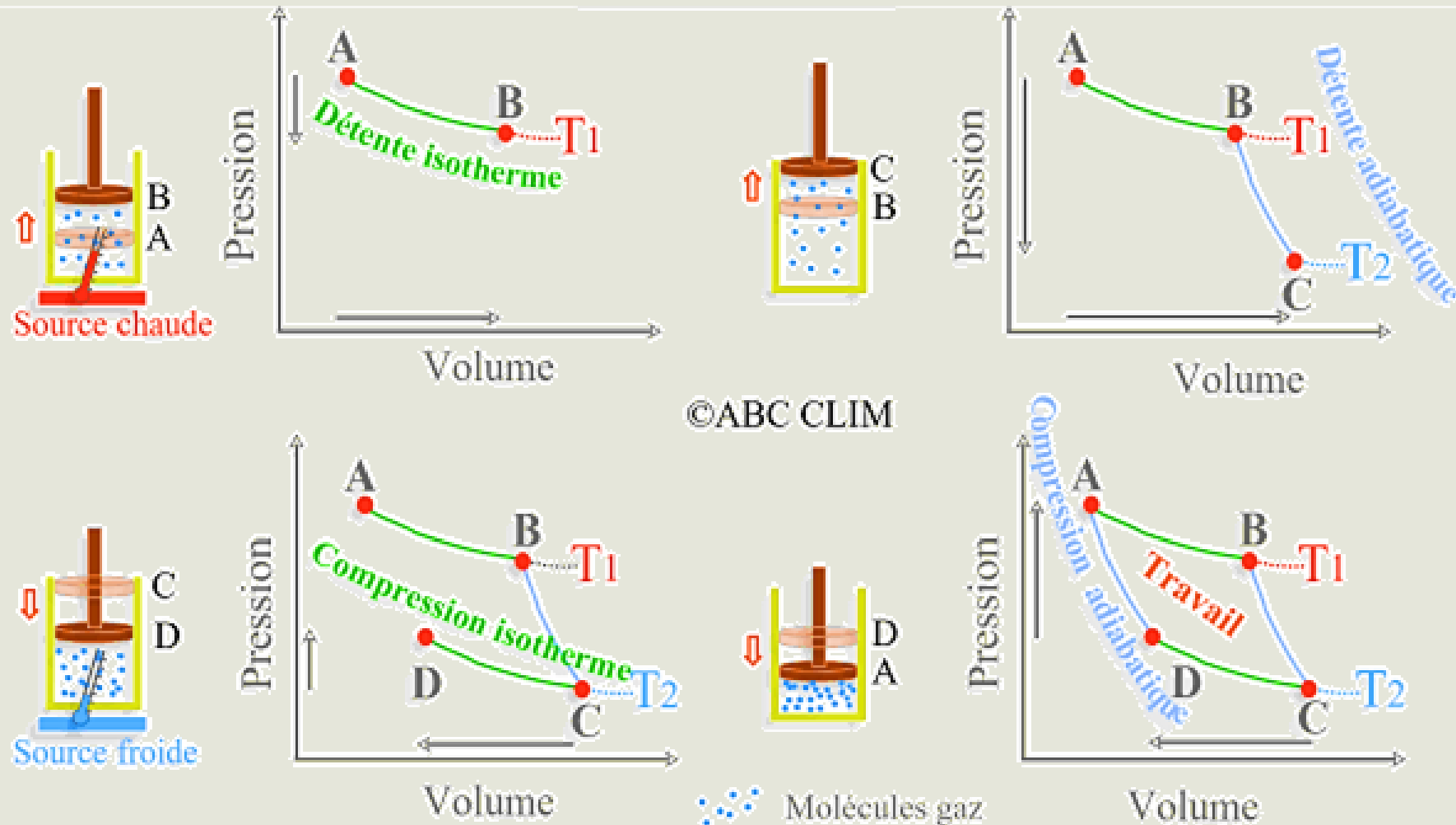
- 2 isentropiques, 1 isobare, 1 isochore
- Le fluide est le gazole



3. Cycles thermodynamiques

1. Cycle de Carnot

- Cycle ditherme (T_1 et T_2)
- 2 transformations isothermes
- 2 transformations isentropes
- Q_1 reçu à la température T_1
- Q_2 fourni à la température T_2
- W total dans le système



3. Cycles thermodynamiques

1. Cycle de Carnot

L'énergie interne ne changeant pas au cours d'un cycle $\Delta U = U_A - U_A = 0$
On a d'après le premier principe $\Delta U = Q_2 + Q_1 + W = 0$ avec $|W| = Q_2 + |Q_1|$

Le **rendement** η du cycle de Carnot est alors défini par :

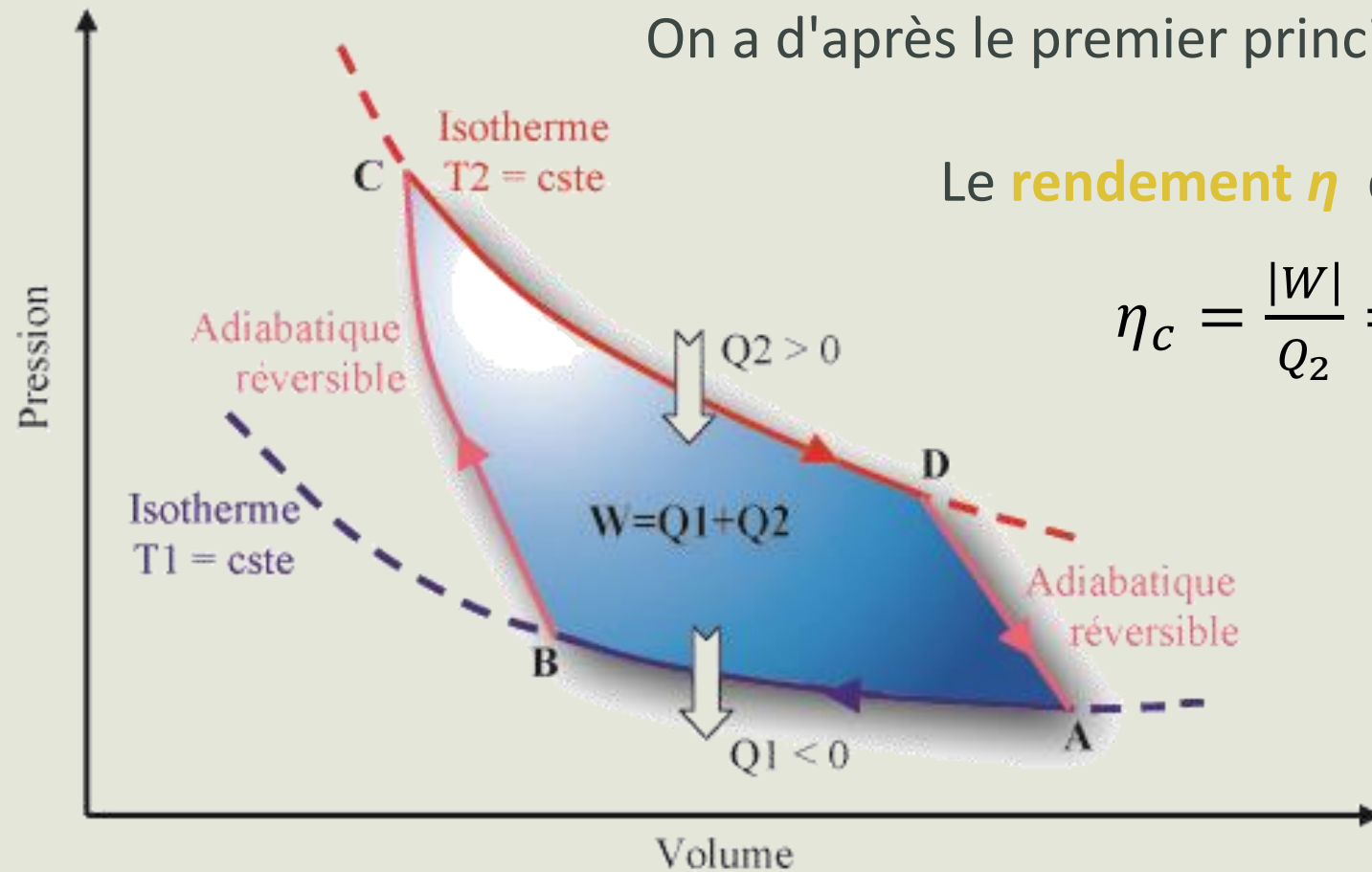
$$\eta_c = \frac{|W|}{Q_2} = \frac{Q_2 + Q_1}{Q_2} = \frac{Q_2 - |Q_1|}{Q_2} = 1 - \frac{|Q_1|}{Q_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

Le cycle de Carnot est un cycle idéal avec **le rendement maximum**

$$\sum \Delta S = 0 \text{ et } \Delta S = \frac{Q}{T}$$

Efficacité d'un cycle

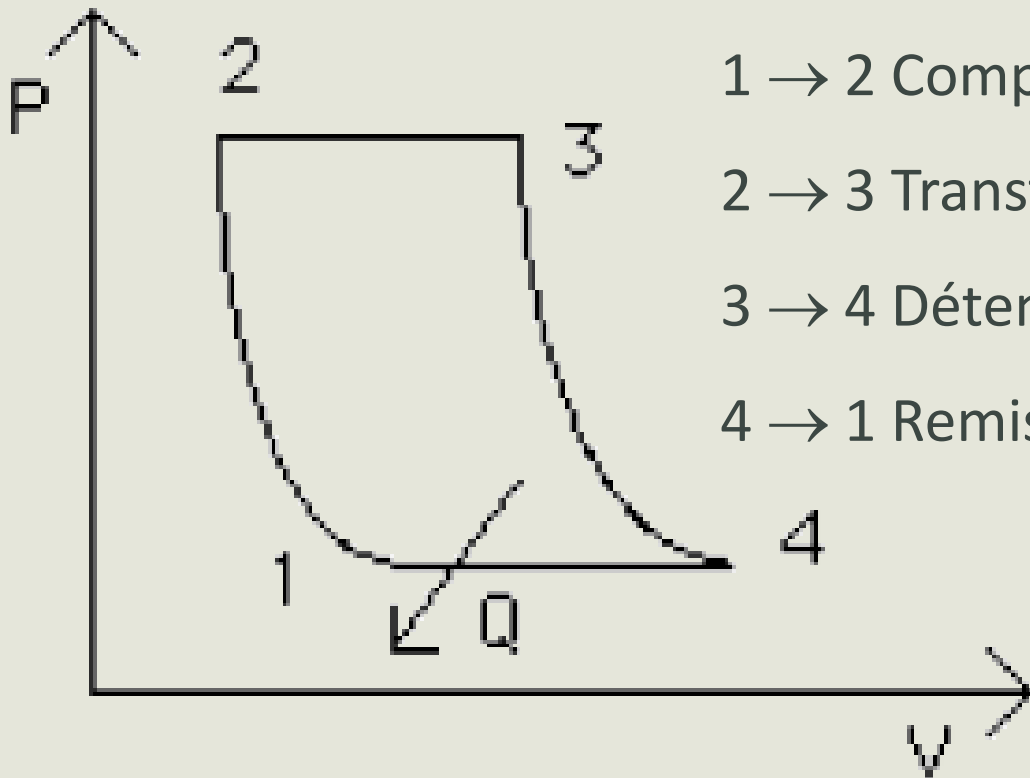
$$\varepsilon = \frac{\eta}{\eta_c} \text{ (avec } 0 < \varepsilon < 1)$$



3. Cycles thermodynamiques

2. Cycle de Joule (des turbines à gaz)

Un compresseur + chambre de combustion + turbine.

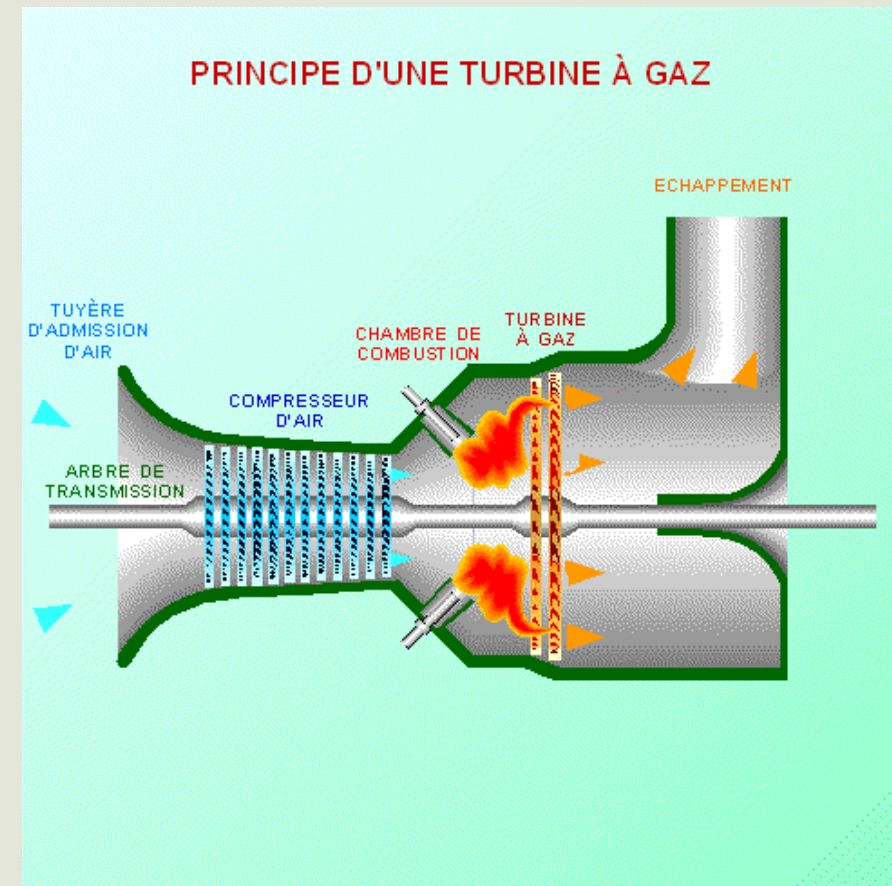


1 → 2 Compression isentropique

2 → 3 Transformation isobare

3 → 4 Détente isentropique

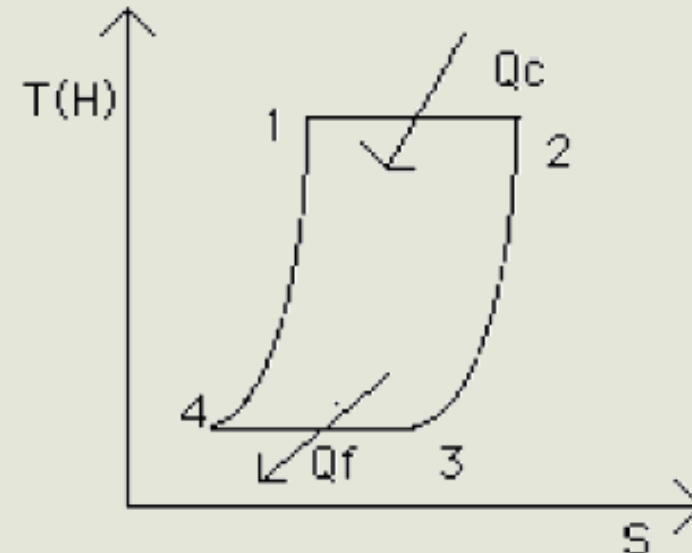
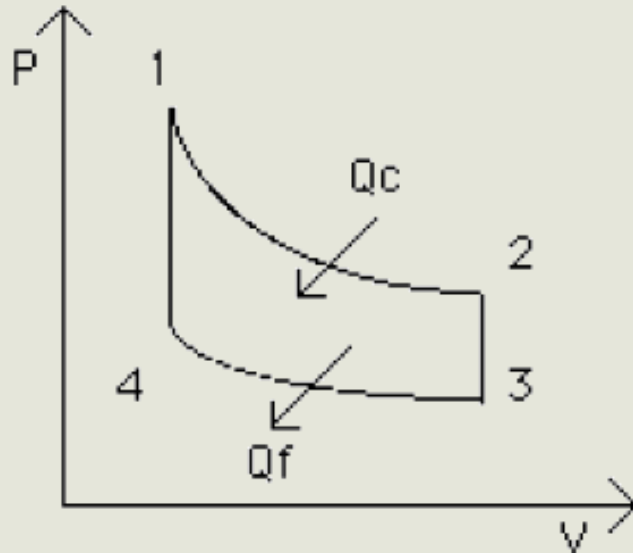
4 → 1 Remise à l'équilibre



3. Cycles thermodynamiques

3. Cycle de Stirling

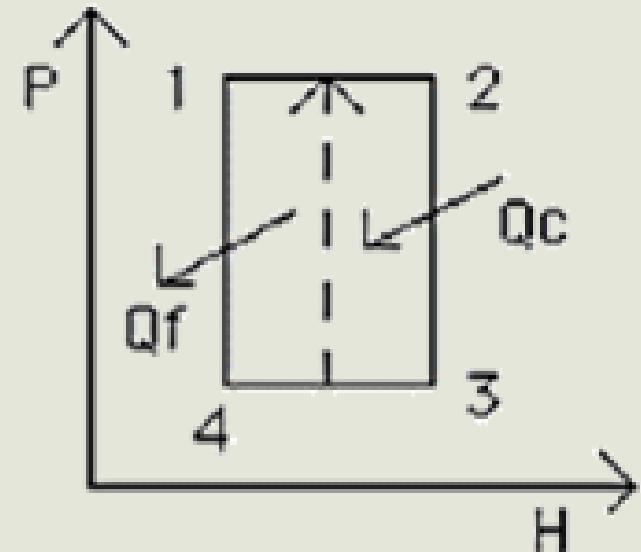
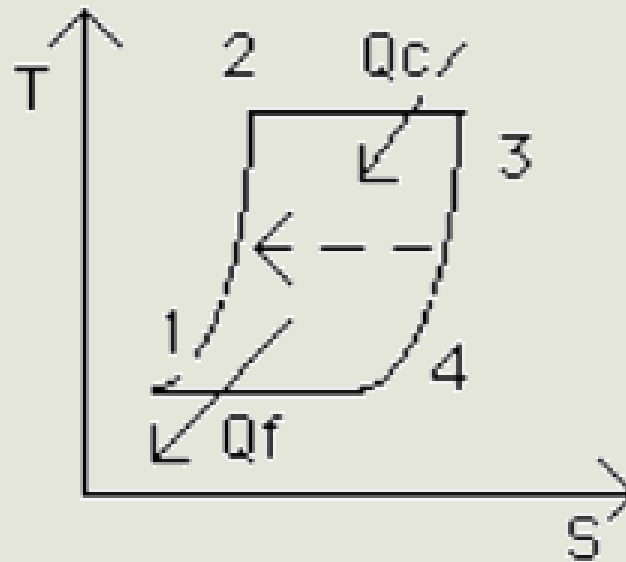
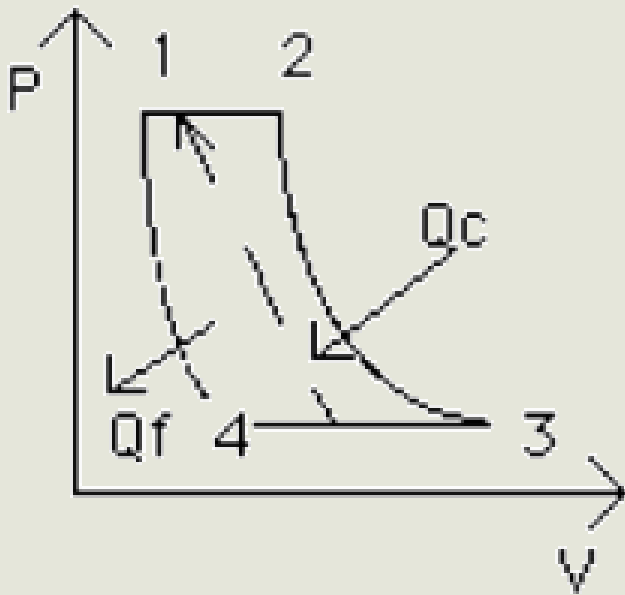
- Moteur à combustion externe fonctionnant avec 2 sources de chaleur (ditherme),
- Le fluide du système est en général de l'air,
- Constitué de 2 isochores et de 2 isothermes.



3. Cycles thermodynamiques

4. Cycle de Ericsson

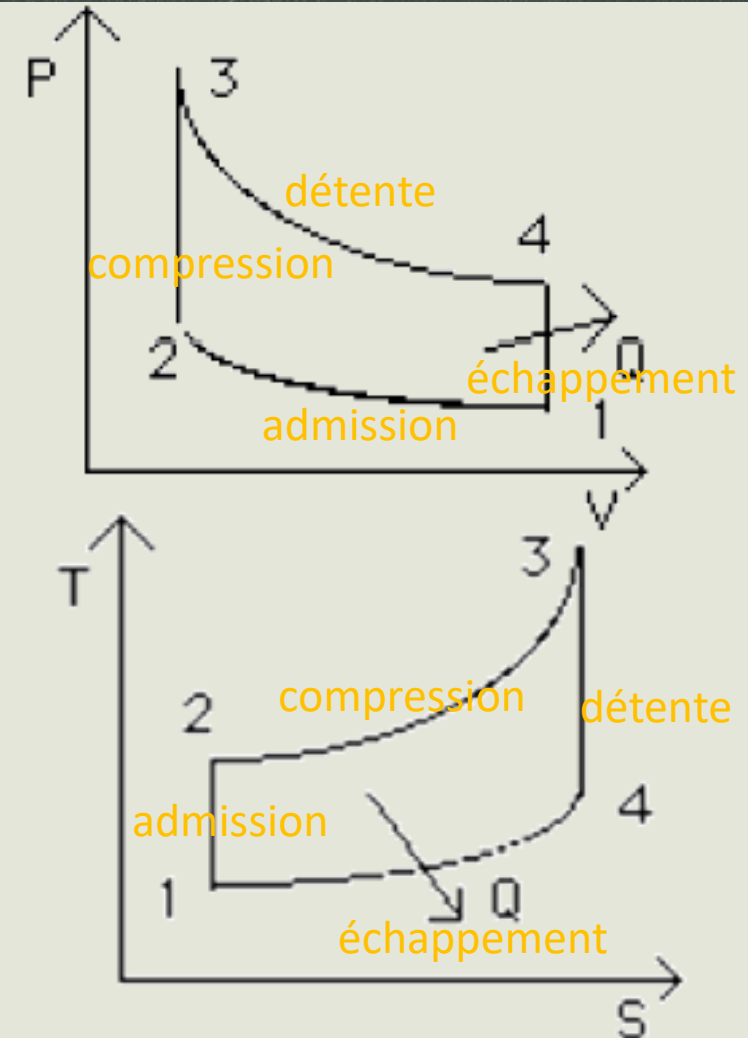
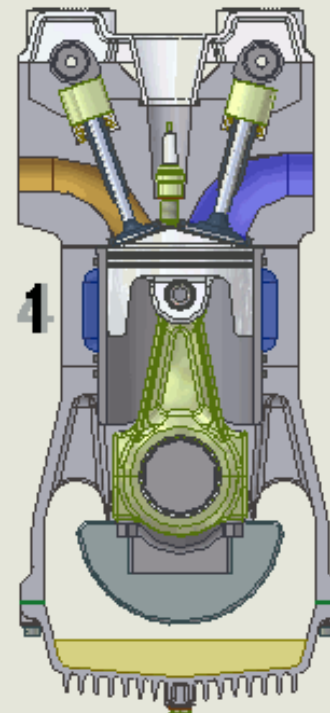
- Constitué de 2 transformations isobares et de 2 transformations isothermes au cours desquelles ont lieu les échanges de chaleur.



3. Cycles thermodynamiques

5. Cycle de Beau de Rochas ou de Otto

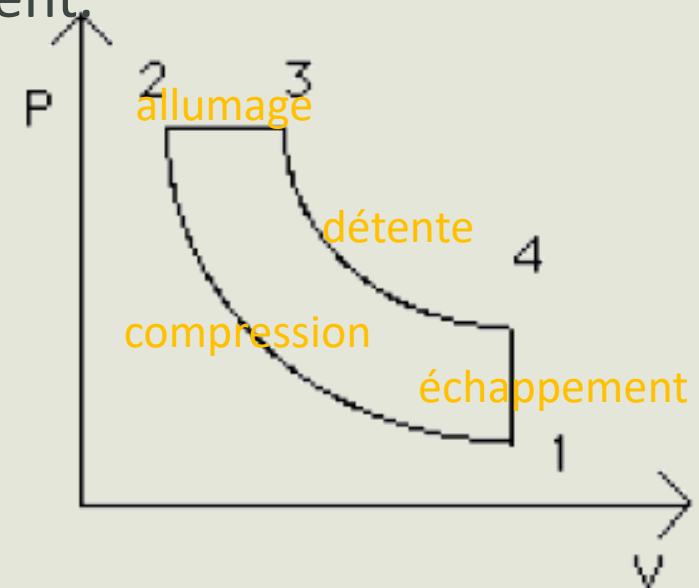
- Cycle des moteurs à allumage commandé,
- La combustion de l'essence provoque l'augmentation de T ,
- Le seul échange de chaleur Q a lieu avec l'atmosphère,
- Dans le cycle théorique, leurs effets s'annulent.



3. Cycles thermodynamiques

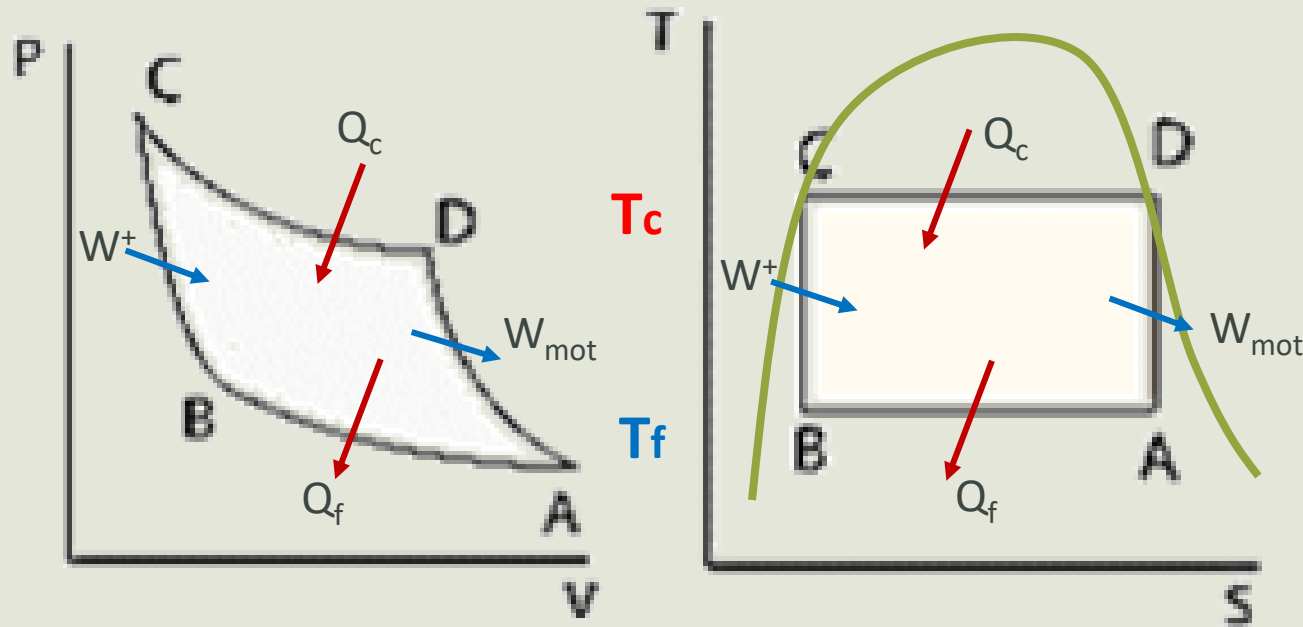
6. Cycle de Diesel

- La compression $1 \rightarrow 2$ et la détente $3 \rightarrow 4$ sont isentropiques.
- Le rapport volumétrique de compression $>$ moteur à allumage commandé
- Atteinte de la températures où le gazole s'enflamme spontanément.
- $T_{\text{inflammabilité}} \text{ du gazole} < T_{\text{inflammabilité}} \text{ de l'essence.}$
- Le carburant est injecté progressivement de telle façon que la combustion soit isobare.



3. Cycles thermodynamiques

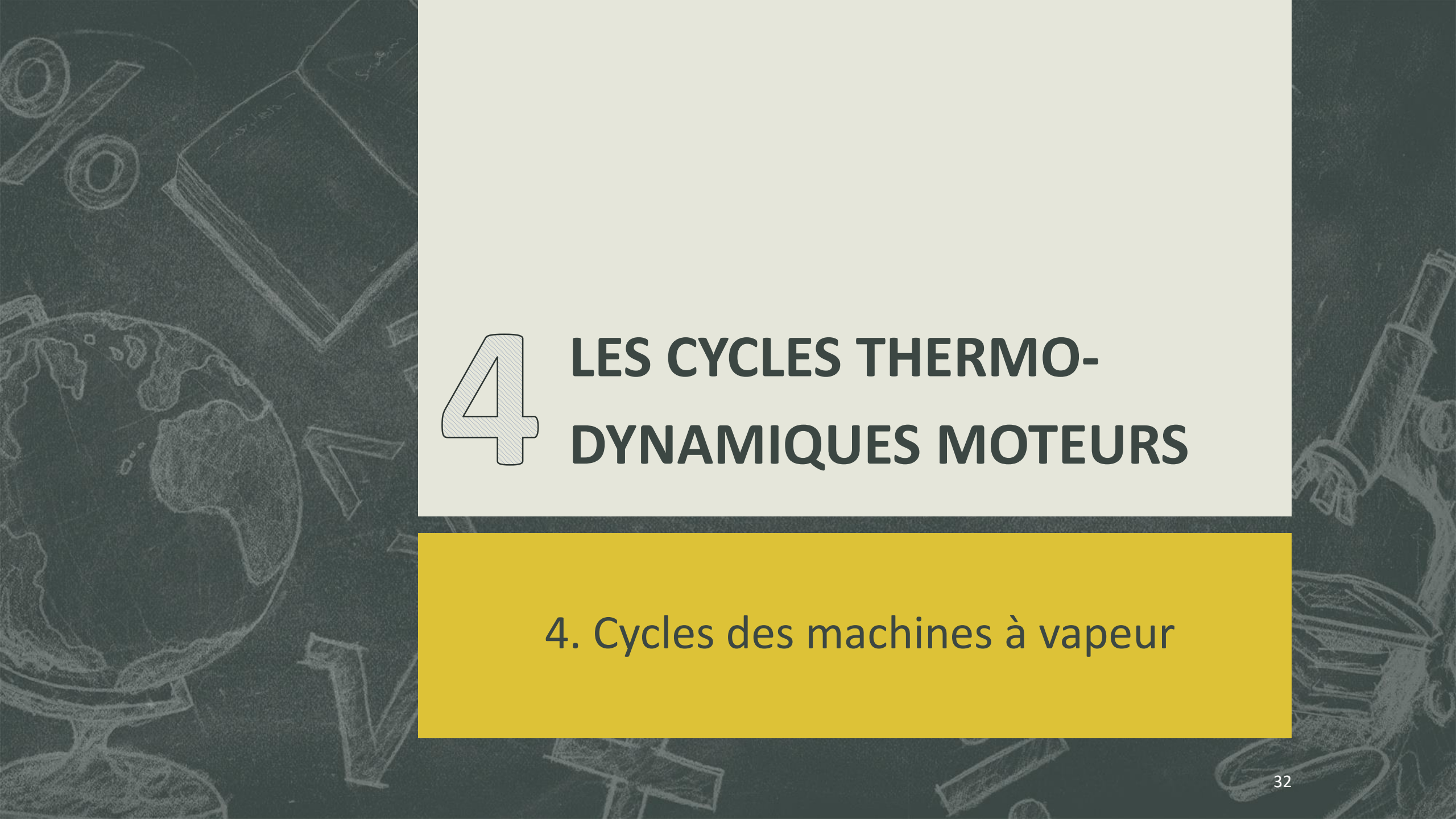
3. Bilan énergétique



Diagrammes P-V et T-S du cycle de Carnot

Calcul des puissances à partir de la connaissance des valeurs de l'enthalpie **H** du fluide

Grandeur	Cycle de Carnot
Q_f	$H_A - H_B$
Q_c	$H_D - H_C$
W^+	$H_C - H_B$
W_{mot}	$H_D - H_A$



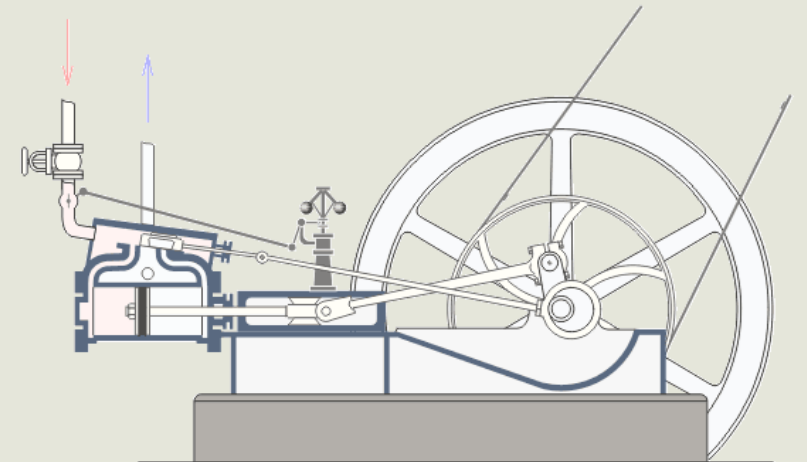
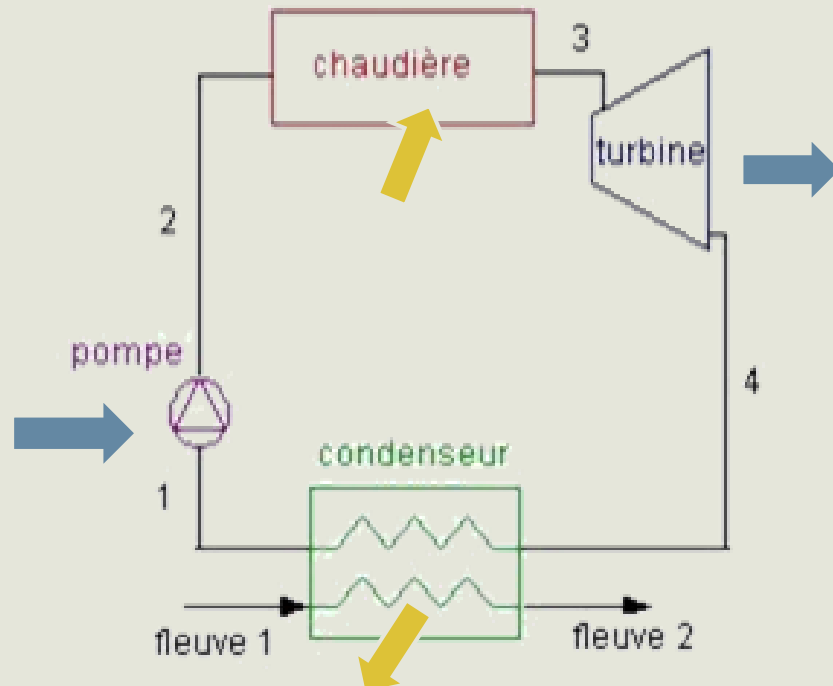
4 LES CYCLES THERMO- DYNAMIQUES MOTEURS

4. Cycles des machines à vapeur

4. Cycles des machines à vapeur

- On passe d'un fluide gazeux à un **fluide diphasique** (chaleur latente)
- Le dispositif **les plus utilisé** pour convertir la chaleur en énergie mécanique
- On choisit souvent **l'eau** pour les nombreux avantages qu'elle présente

Principe de fonctionnement



4. Cycles des machines à vapeur

(1) Etat initial à p_1 , T_1 et H_1

(1)→(2) Compression adiabatique (pompe)

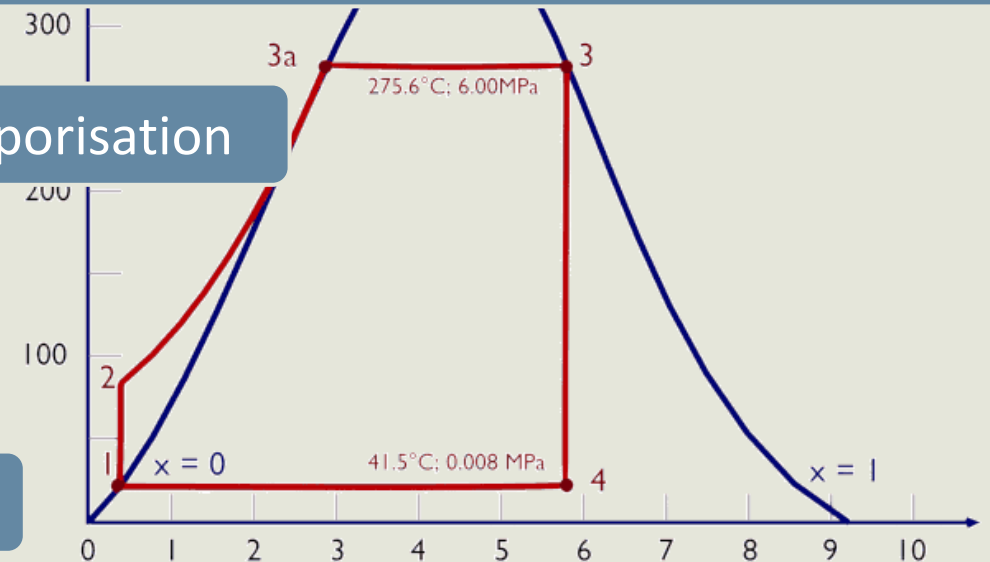
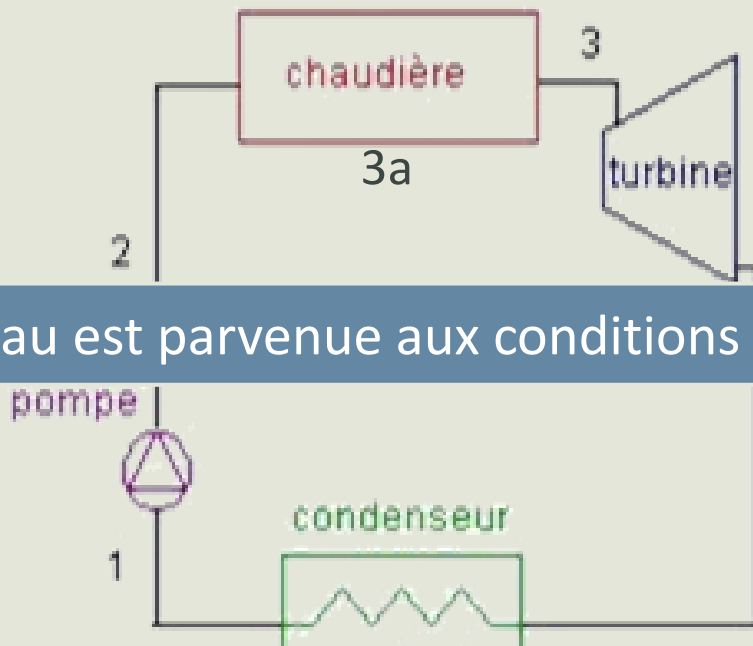
(2) L'eau est injectée dans le générateur de vapeur

(2)→(3a) Réchauffement isobare dans le générateur à p_2

(3a) L'eau est parvenue aux conditions fixées pour la vaporisation

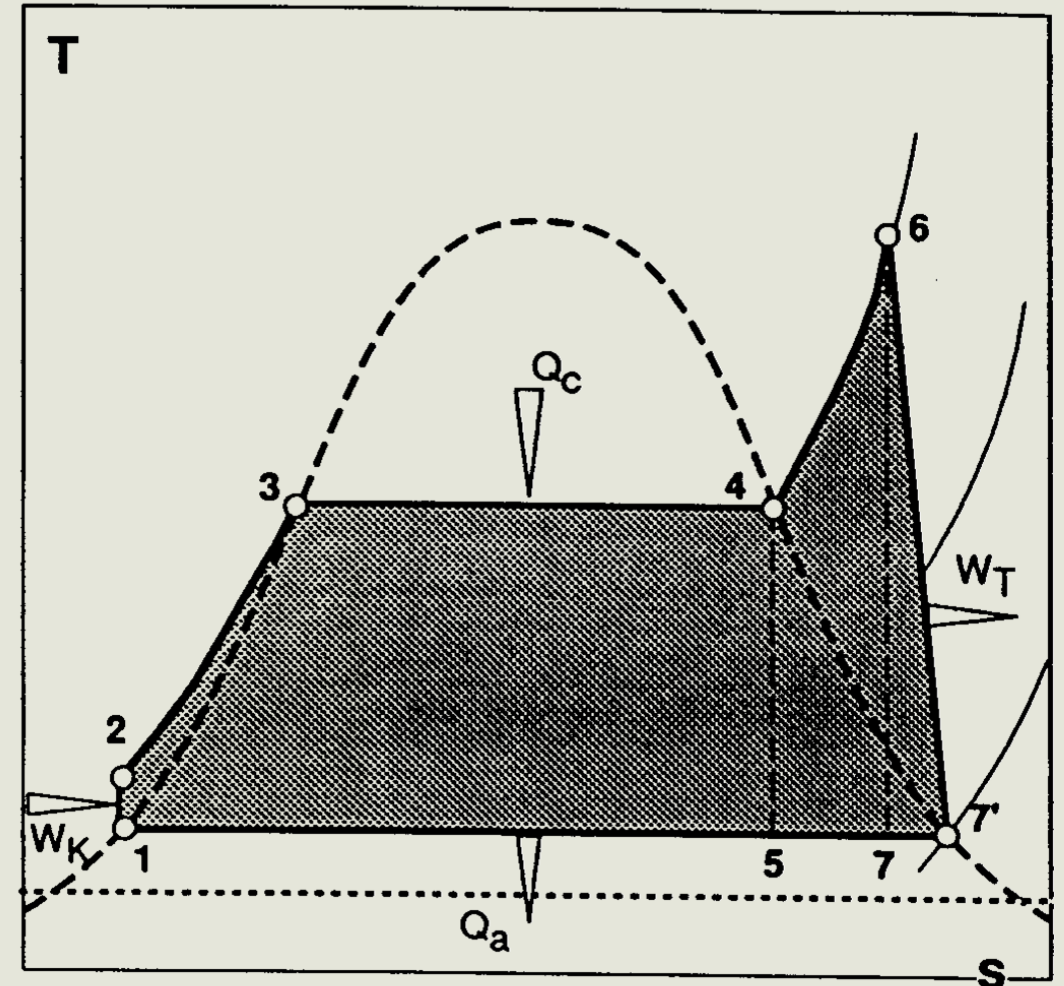
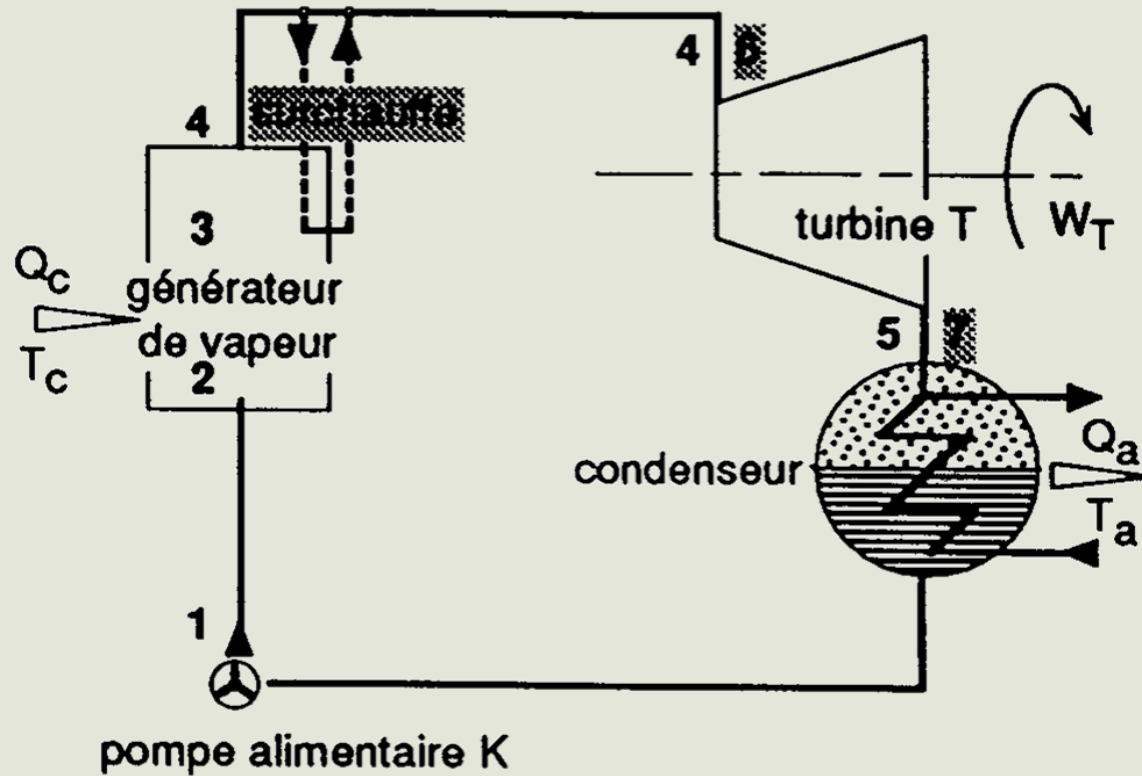
(3a)→(3) Vaporisation dans le générateur, à P et T cstes

(3)→(4) Détente de la vapeur saturée en vapeur humide vers le condenseur



4. Cycles des machines à vapeur

2. Cycle de Hirn



4. Cycles des machines à vapeur

3. Bilan énergétique

Le rendement d'une machine sous ces cycles est le rapport entre l'énergie récupérée sous forme mécanique et l'énergie fournie pour la produire :

$$\eta = \frac{W^-}{Q_1}$$

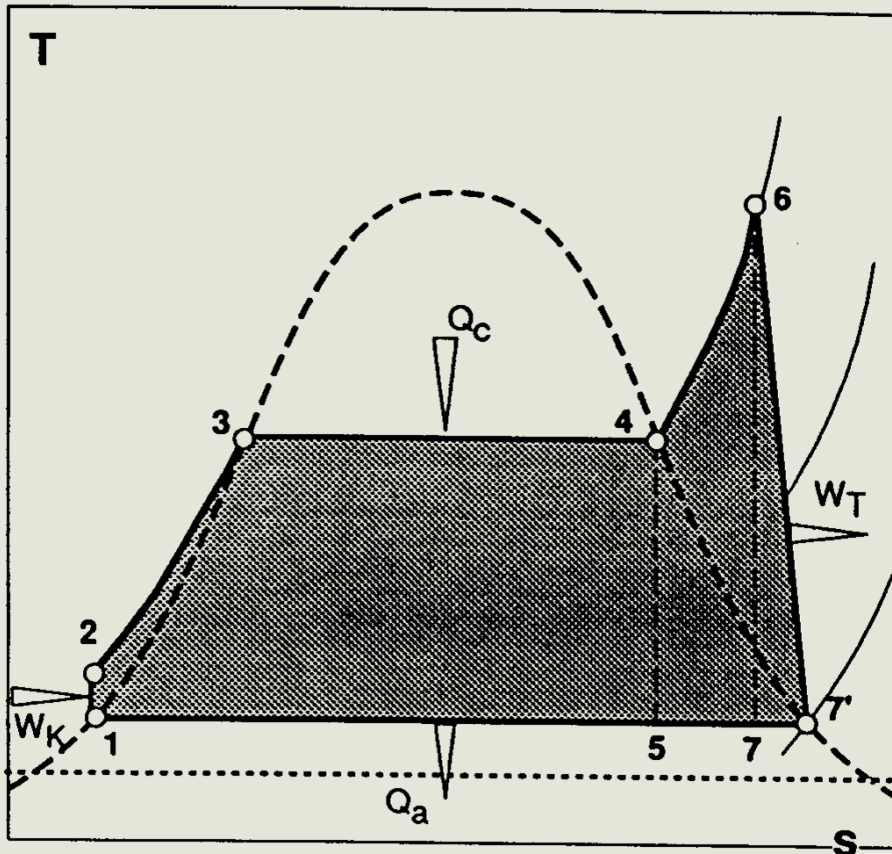
Le bilan d'opération en puissances est : $W^- = W^+ + Q_1 - Q_2 = W_{moteur}$

On néglige généralement la puissance fournie par la pompe d'alimentation dont la valeur est faible par rapport à la puissance mécanique produite.

On parvient ainsi à l'expression classique : $W_{moteur} = Q_1 - Q_2 \Rightarrow \eta = \frac{W_{moteur}}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$

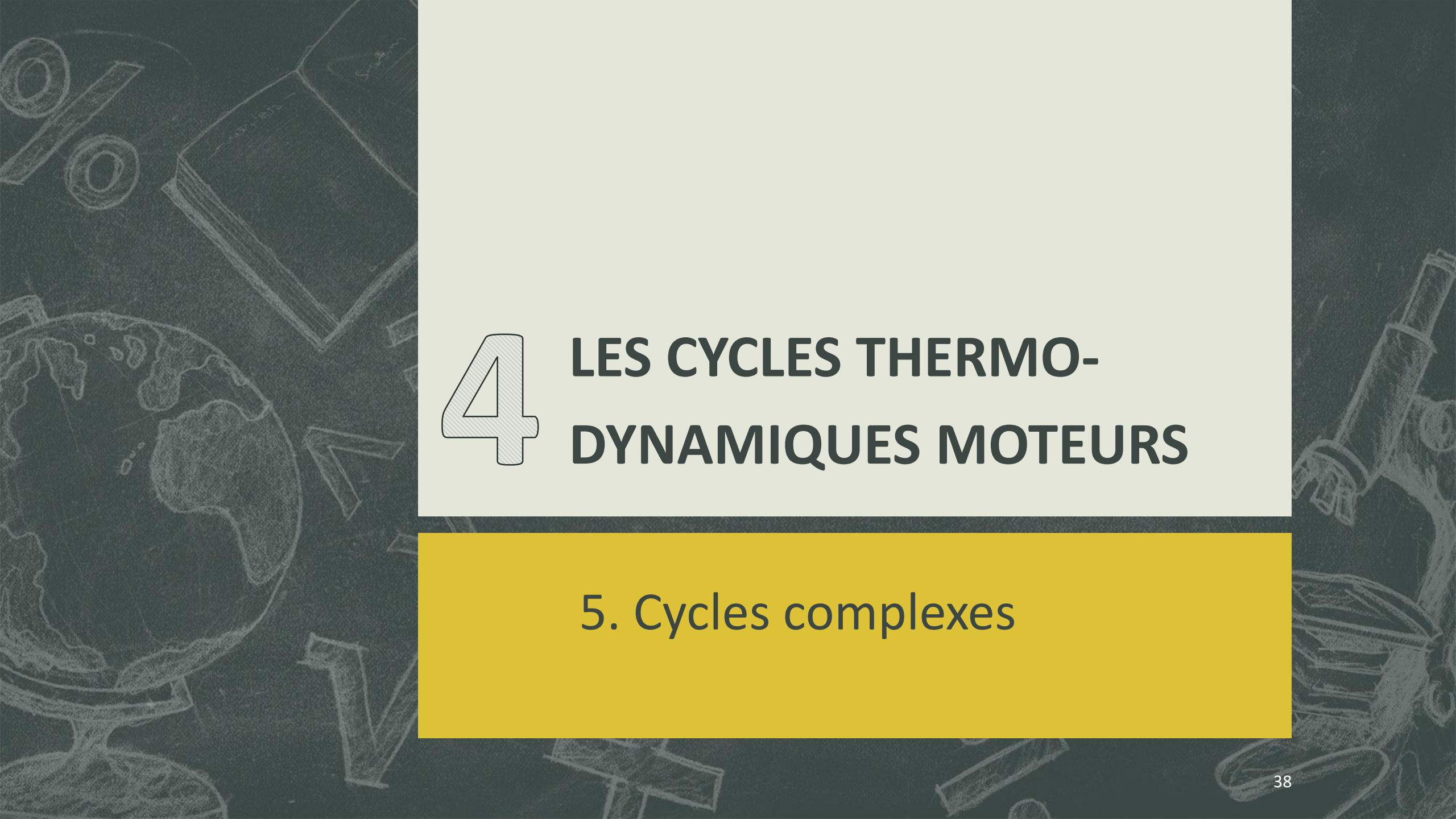
4. Cycles des machines à vapeur

3. Bilan énergétique



Calcul des puissances à partir de la connaissance des valeurs de l'enthalpie du fluide

Grandeur	Cycle de Hirn	Cycle de Rankine
W_{moteur}	$H_6 - H_7$	$H_4 - H_5$
W^+	$H_2 - H_1$	$H_2 - H_1$
Q_c	$H_6 - H_2$	$H_4 - H_2$
Q_a	$H_7 - H_1$	$H_5 - H_1$



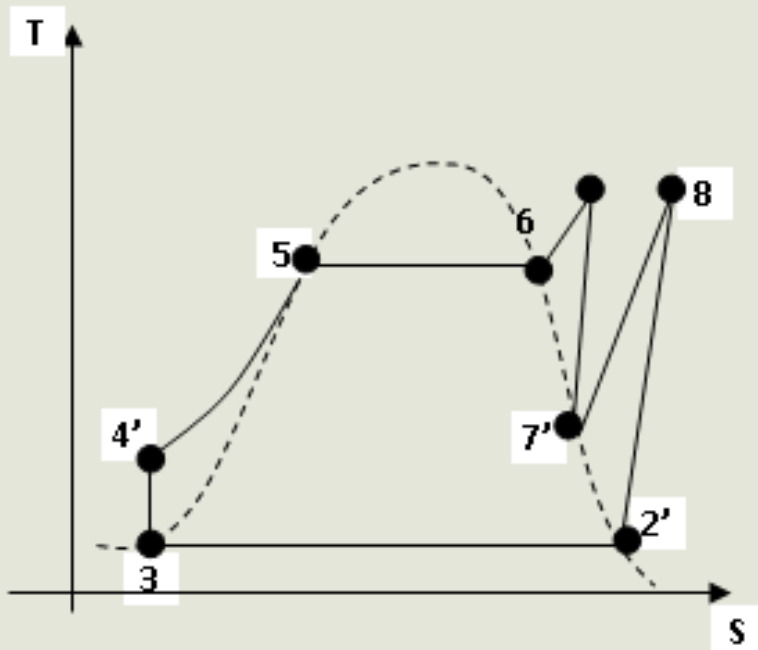
4

LES CYCLES THERMO- DYNAMIQUES MOTEURS

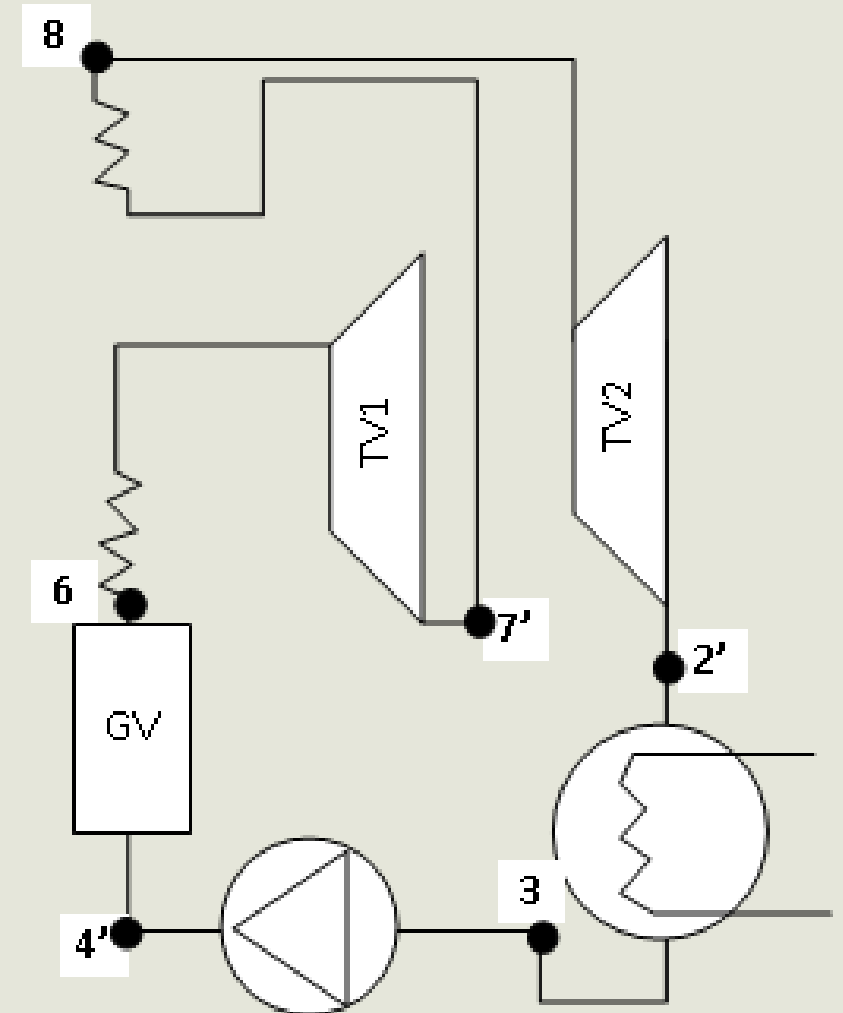
5. Cycles complexes

5. Cycles complexes

1. Cycles a resurchauffe



À partir d'une détente fractionnée : relever le niveau de température de la vapeur sèche avant de l'injecter à l'entrée de l'étage de détente suivante.



5. Cycles complexes

2. Cycles a régénération ou cycles a soutirages

- Le cycle à régénération consiste à prélever de la chaleur au fluide moteur au cours de la détente et à la transmettre à ce même fluide dans sa montée en pression.
- Il résulte de ce principe que le cycle de Rankine à régénération a un rendement thermodynamique proche de celui de Carnot.
- Le cycle de Hirn lui ne permet la régénération qu'à partir de la pression de saturation, lors de la détente de la vapeur. La vapeur se détendant selon $c \rightarrow d$, cède une quantité de chaleur au liquide selon $b \rightarrow a$.
- Aussi pratique-t-on couramment par soutirage de vapeur entre deux étages de détente. Il existe deux types principaux de soutirage :
 - les soutirages avec mélangeage,
 - les soutirages sans mélangeage.

5. Cycles complexes

2. Cycles a régénération ou cycles a soutirages

