

# SAM 2

## MECANIQUE DES FLUIDES

## THERMODYNAMIQUE 2

## MACHINES THERMIQUES

PROJET 2  
PROSIT 5

---

# Objectifs

---

- 1. Savoir ce qu'est une machine thermique*
- 2. Savoir comment fonctionne une pompe à chaleur/ réfrigérateur*
- 3. Connaître les différents types d'échangeur*

# Définitions

Une machine thermique est un système fonctionnant grâce à un fluide auquel on fait subir des transformations cycliques au cours desquelles il y a échange d'énergie avec le milieu extérieur.



Echange un travail avec l'extérieur :

$W > 0$  : la machine reçoit un travail

$W < 0$  : la machine fournit un travail

Echange les quantités de chaleur  $Q_i$  avec les milieux  $i$  de températures  $T_i$

Cycle : transformation dans laquelle l'état final du système coïncide avec l'état initial.

# Définitions

---

Bilan énergétique :

$$\Delta U = W + \sum_i Q_i$$

Avec  $\Delta U$ : variation d'énergie interne du système,  
 $Q_i$  et  $W$  : chaleur et travail échangés avec l'extérieur.

Dans le cas d'un cycle  $U_i = U_f$  donc :

$$W + \sum_i Q_i = 0$$

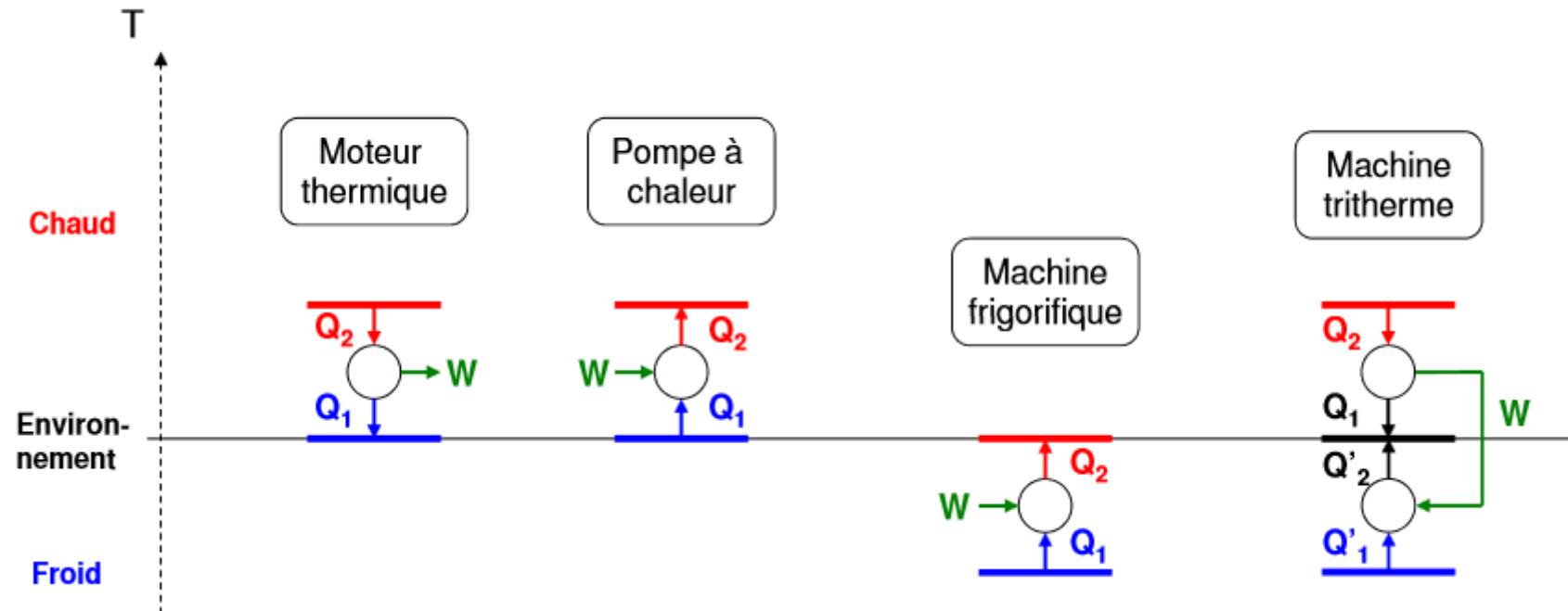
Inégalité de Clausius :  $\Delta S \geq \sum_i \frac{Q_i}{T_i}$

$$\sum_i \frac{Q_i}{T_i} \leq 0$$

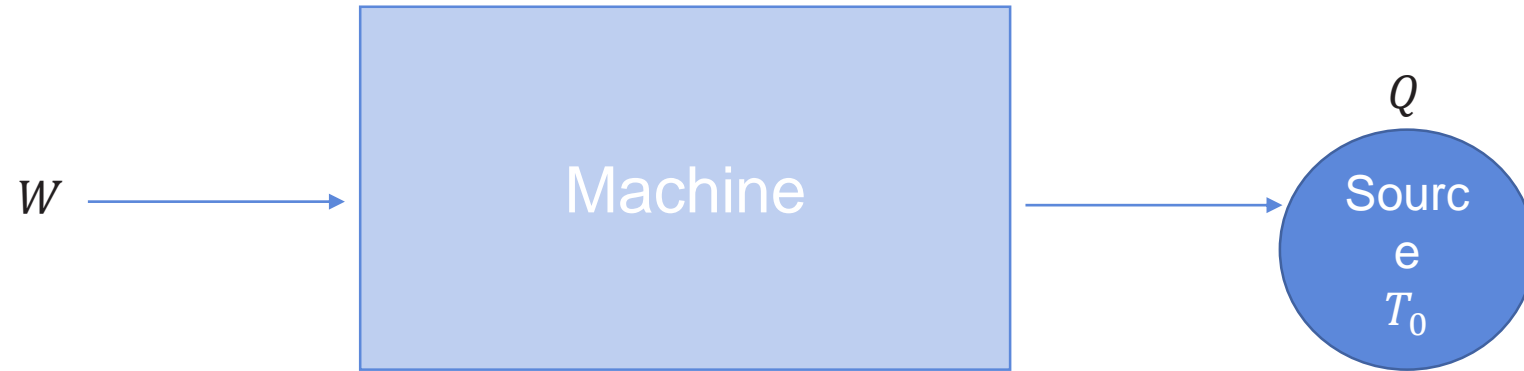
# Définitions

Il existe 3 types de machines thermiques :

- Les machines monothermes (une seule source de chaleur)
- Les machines dithermes (2 sources de chaleur)
- Les machines trithermes (3 sources de chaleur)



# Machines Monothermes



La machine est dite monotherme car elle est en contact avec une seule source de chaleur de température  $T_0$ .

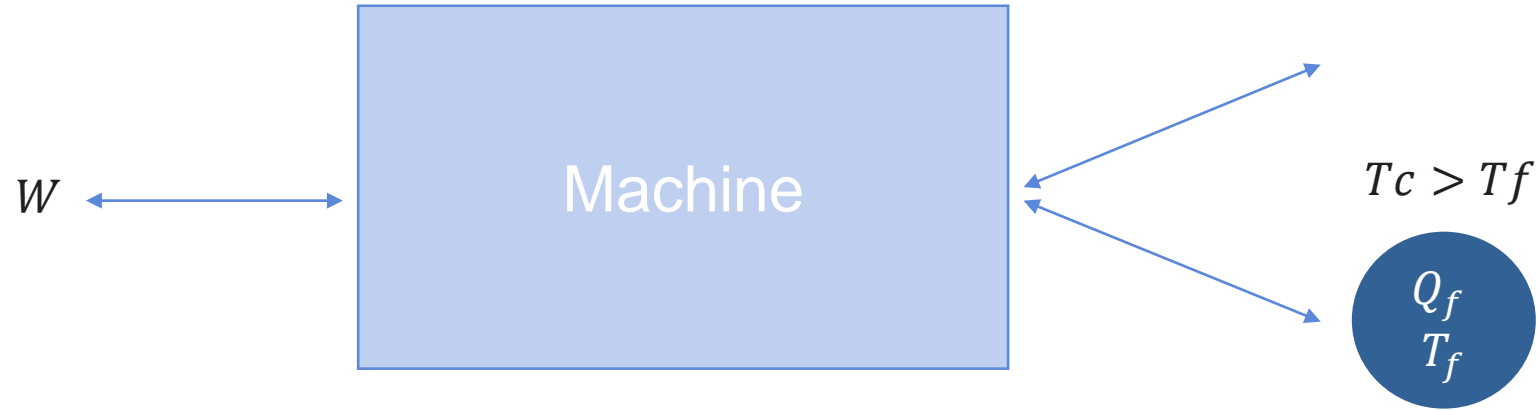
$$\frac{Q}{T_0} \leq 0 \text{ donc } Q \leq 0$$

$$Q + W = 0 \text{ donc } W = -Q \geq 0$$

Une machine monotherme reçoit du travail et fournit de la chaleur.

Exemple : un radiateur électrique.

# Machines dithermes



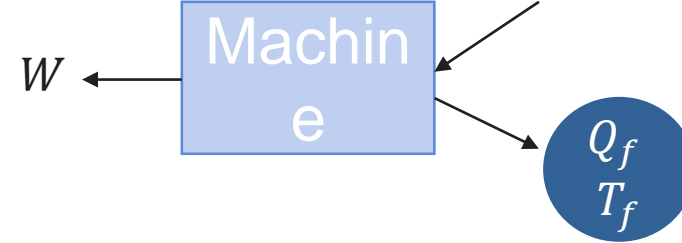
La machine est dite ditherme car elle est en contact avec 2 sources de chaleur.

$$Q_c + Q_f + W = 0$$

$$\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0$$

# Machines dithermes

## I. Moteur ditherme



Le cycle moteur produit du travail :  $W < 0$  donc  $Q = q_c + q_f \geq 0$

$$\frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} \leq 0 \Leftrightarrow \frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q - Q_f}{T_c} \leq 0 \Leftrightarrow Q_f \left( \frac{1}{T_f} - \frac{1}{T_c} \right) + \frac{Q}{T_c} \leq 0$$

Donc  $Q_f < 0$  et  $Q_c > 0$

Le transfert de chaleur  $Q_c$  se fait de la source chaude vers le système. Celui-ci en redonne une partie  $-Q_f$  à la source froide et une autre partie en travail.

Rendement de la machine :

$$r = \frac{|W|}{Q_c} = \frac{-W}{Q_c} = 1 + \frac{Q_f}{Q_c}$$

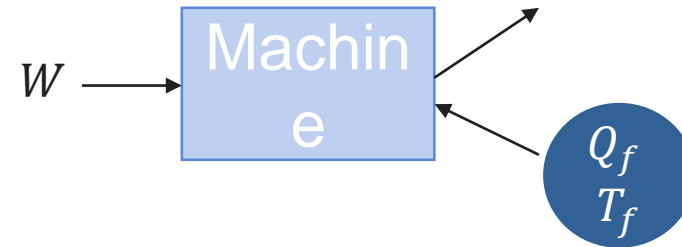
Le rendement maximum est réalisé quand le cycle est réversible :

$$r_{rev} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$



# Machines dithermes

## II. Récepteur ditherme



Le cycle récepteur reçoit du travail :  $W > 0$  donc  $Q_c + Q_f < 0$

On peut distinguer 3 cas :

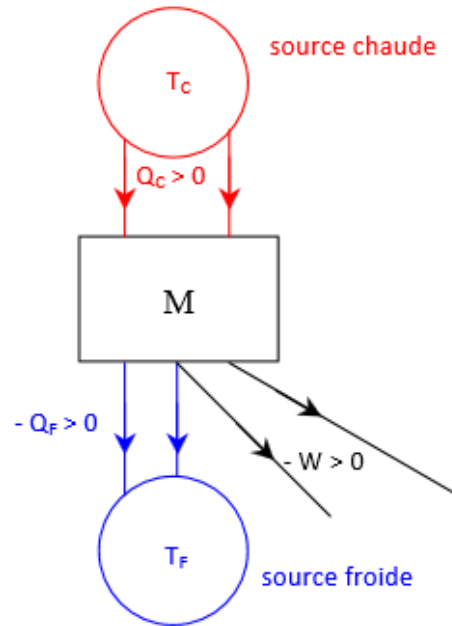
- $Q_c < 0$  et  $Q_f < 0$  : le système chauffe les 2 sources (pas d'intérêt industriel).
- $Q_c > 0$  et  $Q_f < 0$  : transfert de chaleur de la source chaude vers la source froide (pas d'intérêt industriel).
- $Q_c < 0$  et  $Q_f > 0$  : le système refroidit la source froide pour réchauffer la source chaude. C'est le principe de fonctionnement d'un réfrigérateur ou d'une pompe à chaleur.

Rendement d'une pompe à chaleur :  $e = \frac{-Q_c}{W} \leq e_{rev} = \frac{T_c}{T_c - T_f}$

Rendement d'un réfrigérateur :  $e = \frac{Q_f}{W} \leq e_{rev} = \frac{T_f}{T_c - T_f}$

# Machines dithermes

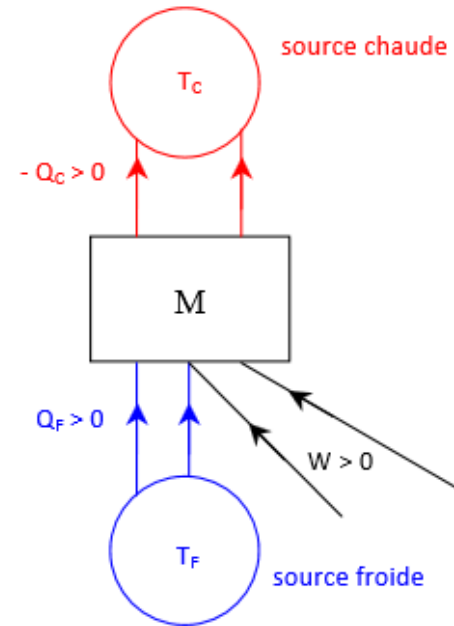
on se sert du transfert naturel de la chaleur pour récupérer un peu de travail



$$\eta \leq 1 - \frac{T_F}{T_C} < 1$$

$\eta$  : rendement  
(travail fourni)

on fournit du travail pour inverser le transfert naturel de chaleur



La source utile est la source froide :  $e \leq \frac{1}{\frac{T_C}{T_F} - 1}$

$e$  : efficacité  
(chaleur fournie)

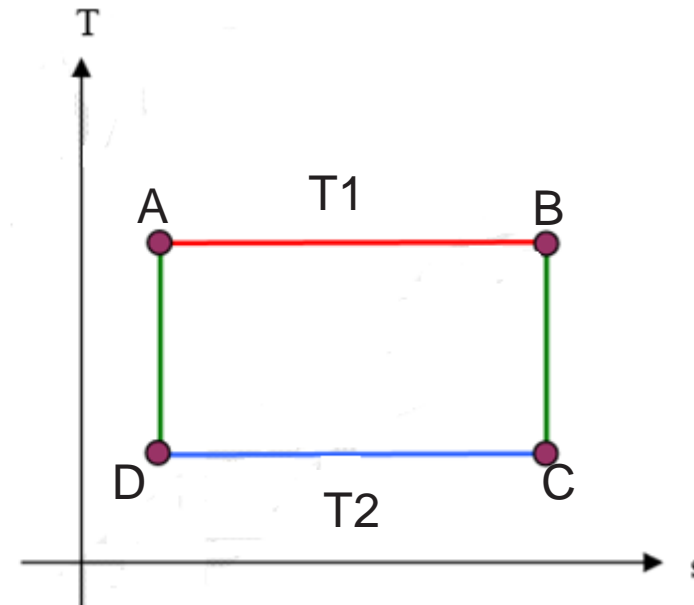
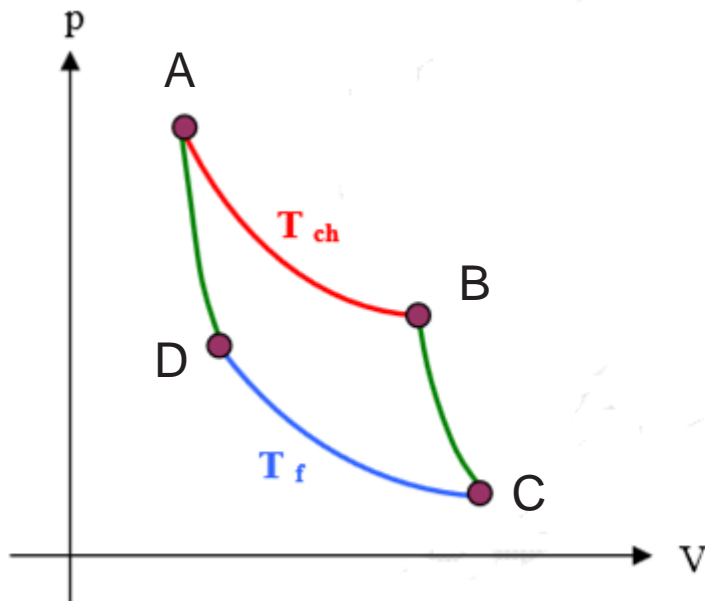
La source utile est la source chaude :  $e \leq \frac{1}{1 - \frac{T_F}{T_C}} > 1$

# Cycle ditherme réversible

Il existe un seul cycle ditherme réversible appelé cycle de Carnot.

Les chaleurs et les travaux sont reçus par le fluide qui décrit un cycle réversible constitué par **deux isothermes** et **deux adiabatiques**.

On peut le représenter par différents diagrammes. Le diagramme  $P = f(V)$  est appelé **diagramme de Clapeyron**.



# Cycle de Carnot, cas d'un gaz parfait

Chaleur échangée :

$$Q_{AB} = nRT \ln \frac{V_B}{V_A} \quad \text{et} \quad Q_{CD} = nRT \ln \frac{V_D}{V_C}$$

Les transformations  $BC$  et  $DA$  sont adiabatiques donc on peut appliquer les **lois de Laplace** :

$$V_C^{\gamma-1} T_2 = V_B^{\gamma-1} T_1 \quad \text{et} \quad V_D^{\gamma-1} T_2 = V_A^{\gamma-1} T_1$$

$$\frac{V_C}{V_D} = \frac{V_B}{V_A}$$

Rendement du cycle :

$$r = \frac{Q_{AB} + Q_{CD}}{Q_{AB}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Travail reçu au cours du cycle :

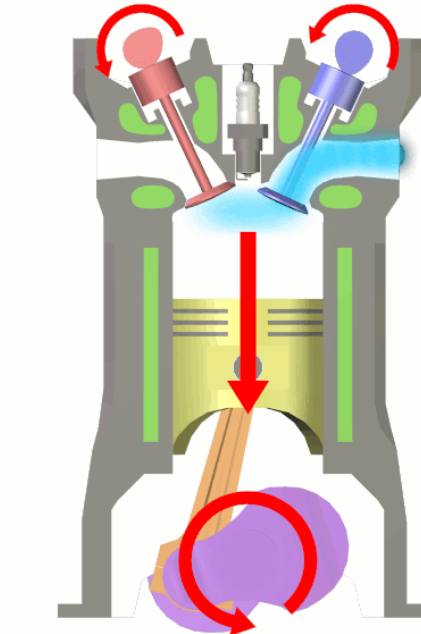
$$W = -Q_{AB} - Q_{CD} = -nR(T_1 - T_2) \ln \frac{V_B}{V_A}$$

# Le cycle essence (Beau de Rochas)

---

## Phase d'admission :

- La soupape d'admission s'ouvre.
- Le piston descend jusqu'au point mort bas en créant un phénomène de dépression qui attire le mélange air/carburant dans le cylindre.
- La soupape d'échappement est fermée

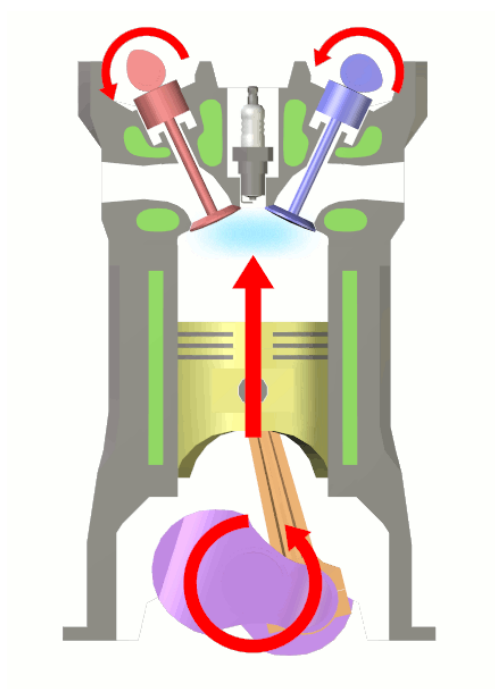


# Le cycle essence (Beau de Rochas)

---

## Phase de compression :

- Les soupapes d'admission et d'échappement sont fermées.
- Le piston remonte.
- Le mélange air/carburant est comprimé.

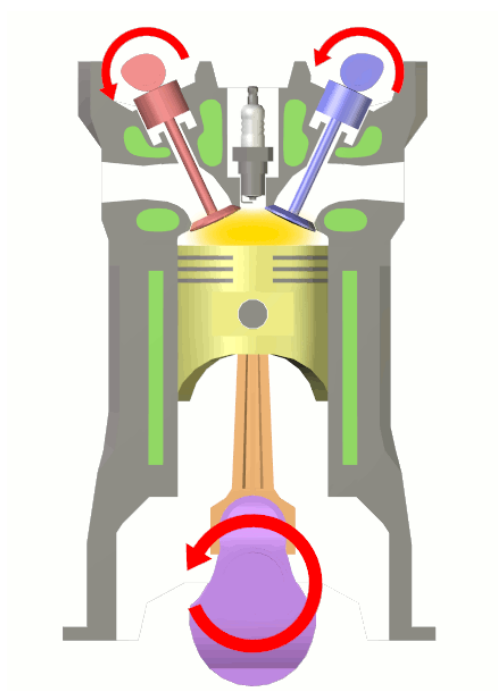


# Le cycle essence (Beau de Rochas)

---

## Phase d'explosion / temps moteur :

- Le piston atteint son point mort haut.
- La bougie fournit une étincelle ce qui provoque une explosion.

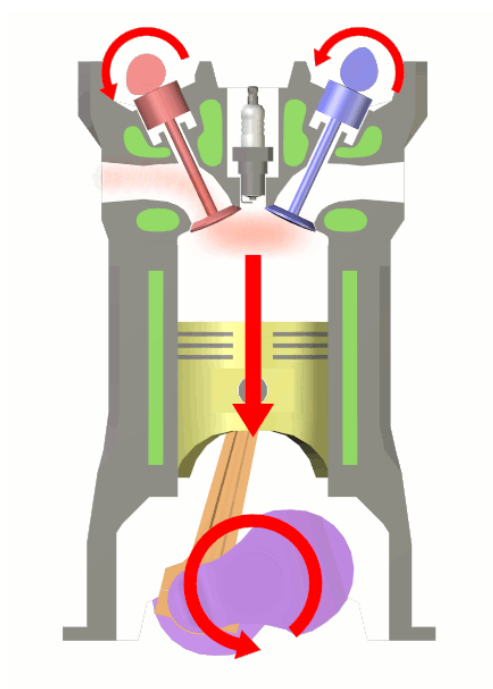


# Le cycle essence (Beau de Rochas)

---

## Phase d'explosion / temps moteur :

- Le piston atteint son point mort haut.
- La bougie fournit une étincelle ce qui provoque une explosion.
- Cela repousse le piston vers le bas en créant une force motrice.



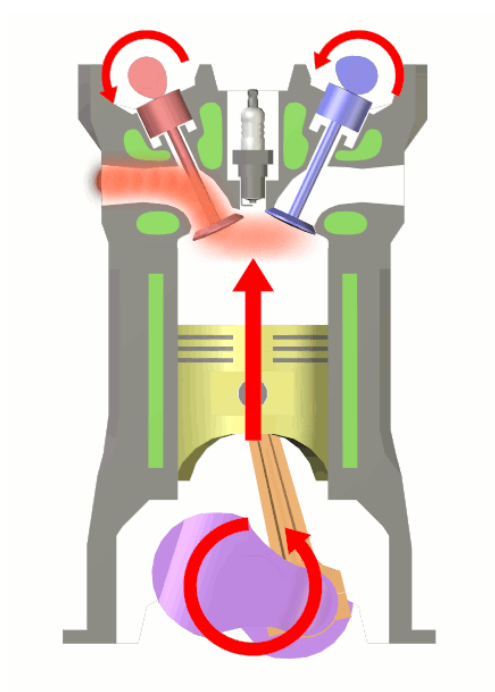


# Le cycle essence (Beau de Rochas)

---

## Phase d'échappement :

- La soupape d'échappement s'ouvre.
- Le piston remonte de son point mort bas.
- Les gaz brûlés sont poussés en dehors du cylindre.



# Le cycle essence (Beau de Rochas)

$A \rightarrow B$  : admission

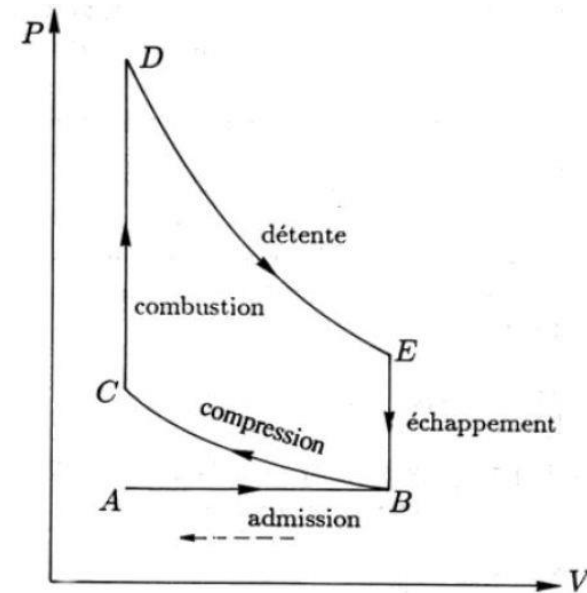
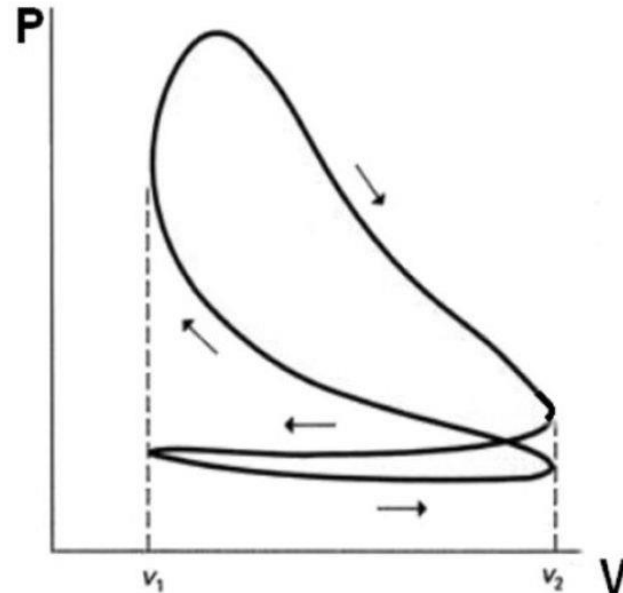
$B \rightarrow C$  : compression adiabatique réversible

$C \rightarrow D$  : explosion très rapide

$D \rightarrow E$  : détente adiabatique réversible (production de travail)

$E \rightarrow B$  : baisse de pression lors de l'ouverture de la soupape

$B \rightarrow A$  : échappement



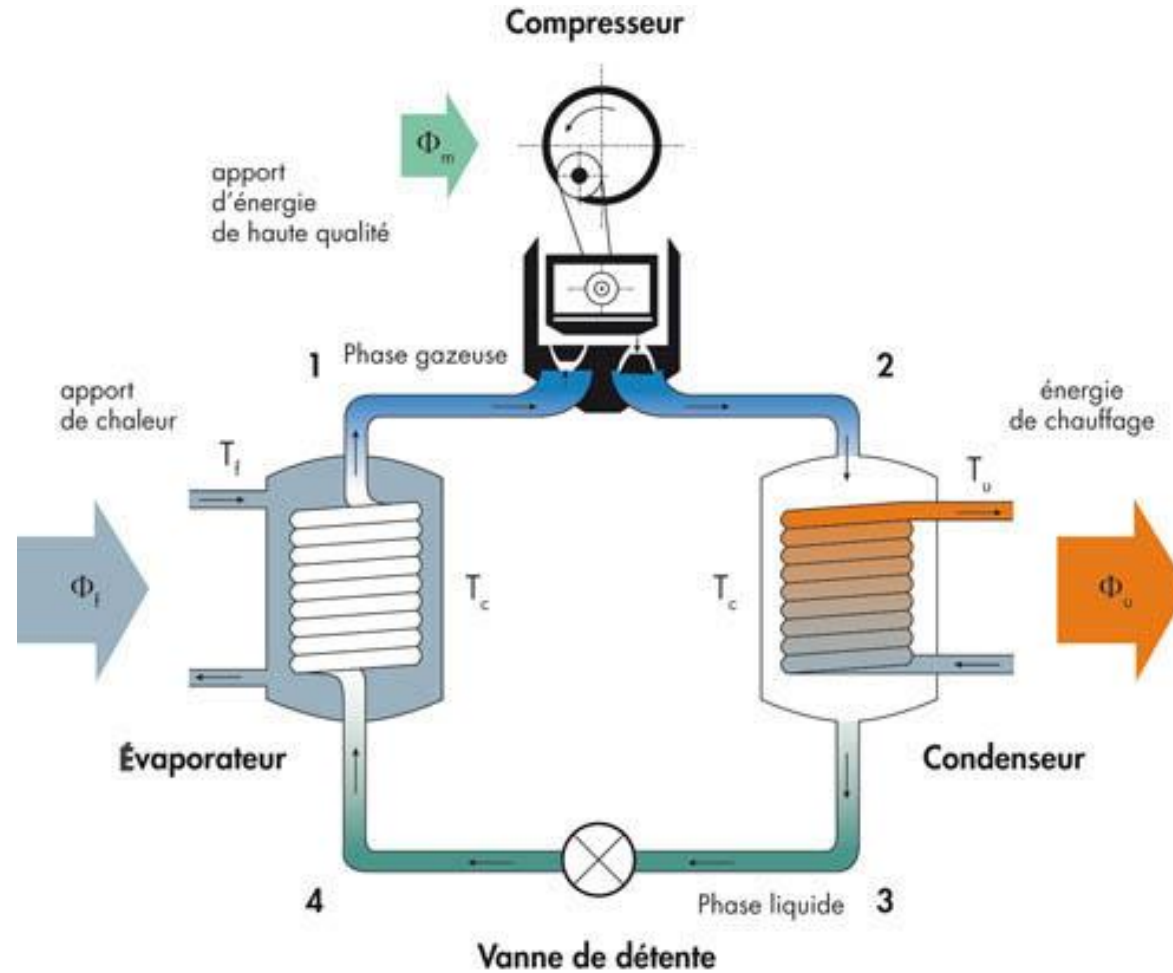
# Bilan

## Transformation de systèmes fermés : cas des gaz parfaits

Transformations	Relations importantes
Isotherme	$\Delta U = 0$ $Q = -W = \int P dV = nRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$
Isobare	$W = -P\Delta V$ $\Delta U = n C_V^{mol} \Delta T$ $Q = \Delta U - W$
Isochore	$W = 0$ $Q = \Delta U = n C_V^{mol} \Delta T$
Adiabatique	$Q = 0$ $\Delta U = W = n C_V^{mol} \Delta T$
Adiabatique réversible	Lois de Laplace : $PV^\gamma = C^{st}; V^{\gamma-1}T = C^{st}; P^{1-\gamma}T^\gamma = C^{st}$  Avec $\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{C_P^{mol}}{C_V^{mol}}$ et $C_P - C_V = nR$  avec $C_V^{mol}$ : capacité calorifique molaire à volume constant et $C_P^{mol}$ : capacité calorifique molaire à pression constante (J.K <sup>-1</sup> .mol <sup>-1</sup> )

# Pompe à chaleur/ réfrigérateur

## I. Principe de fonctionnement



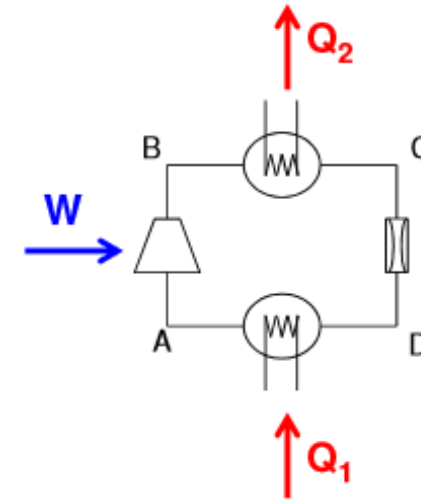
# Pompe à chaleur/ réfrigérateur

## I. Principe de fonctionnement

Un fluide sous forme de vapeur basse pression va subir :

- une compression adiabatique (  $AB$  ) dans le compresseur qui l'amène à l'état de vapeur haute pression,
- une condensation isobare (  $BC$  ) dans le condenseur qui l'amène à l'état de liquide saturant : il se liquéfie en fournissant de la chaleur à la source chaude (  $Q_2$  ),
- une détente isenthalpique (  $CD$  ) dans le détendeur qui l'amène à l'état de mélange liquide-vapeur,
- une évaporation isobare (  $DA$  ) dans l'évaporateur ce qui

Choix du fluide : Il doit être capable de faire le changement d'état liquide-vapeur pour des températures comprises entre une température  $T_2$  inférieure à la température du milieu que l'on refroidit et une température  $T_1$  supérieure à la température du milieu que l'on réchauffe. On utilise le dioxyde de carbone, l'ammoniac, les fréons.



# Pompe à chaleur/ réfrigérateur

## II. Cycle de Carnot

