

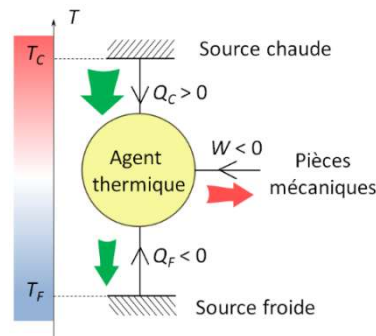
### 3. MACHINES THERMIQUES DITHERMES

Un **machine thermique ditherme** fonctionne à partir d'un fluide appelé **agent thermique**, qui subit des **transformations cycliques** en vase clos ou en écoulement, au cours desquelles il reçoit **algébriquement** un **travail  $W$**  (via un piston qui modifie son volume, ou via un écoulement à travers un compresseur ou une turbine), un **transfert thermique  $Q_c$**  de la part d'une **source « chaude »** de température  $T_c$ , réelle (contact via un échangeur) ou virtuelle (combustion interne), et un **transfert thermique  $Q_f$**  de la part d'une **source « froide »** de température  $T_f$ , réelle (contact via un échangeur) ou virtuelle (renouvellement de l'agent thermique).

#### Machines Motrices ( $W < 0$ ) :

- Principe de fonctionnement en 4 étapes minimum (vase clos ou écoulement) :

- ✓ **Compression à froid** :  $W_{comp} > 0$
- ✓ **Echauffement** :  $Q_c > 0$
- ✓ **Détente à chaud** :  $W_{det} < 0$  &  $|W_{det}| > W_{comp}$
- ✓ **Refroidissement** :  $Q_f < 0$



- Travail total reçu au cours du cycle :

$$W = W_{comp} + W_{det} < 0$$

Travail récupéré sur l'arbre moteur :  $-W$

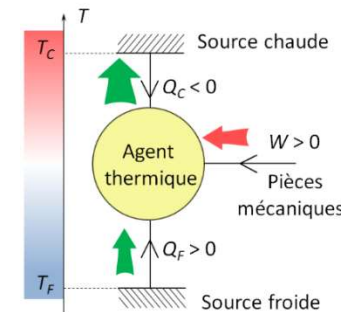
car le travail  $W_{comp}$  nécessaire pour comprimer l'agent thermique est directement prélevé au travail ( $-W_{det}$ ) libéré lors de la phase motrice.

- Machines usuelles** : Moteur à 4 temps, circuit secondaire d'une centrale nucléaire, turbine à gaz, turboréacteur d'avion  
+ moteur de Stirling (particularité : compressions et détente sont isothermes)

#### Machine réceptrices ( $W > 0$ ) :

- Principe de fonctionnement en 4 étapes minimum (quasi toujours écoulement) :

- ✓ **Compression** et montée en température :  
 $W = W_{comp} > 0$
- ✓ **Refroidissement, voire liquéfaction, en contact avec la source chaude** :  $Q_c < 0$
- ✓ **Détente** (sans travail, dans un détendeur) et chute de la température.
- ✓ **Echauffement, voire vaporisation, en contact avec la source froide** :  $Q_f < 0$



- Machines frigorifique / réfrigérateur** : Le but est de refroidir la source froide (intérieur du réfrigérateur) ; effet collatéral : on chauffe la source chaude (la pièce où se trouve le réfrigérateur).
- Pompe à chaleur** : Le but est de chauffer la source chaude (intérieur de l'habitation) ; effet collatéral : on refroidit la source froide (atmosphère).

#### Rendement thermique / Efficacité d'une machine

- Rendement thermique** ( $r$  ou  $\rho$ ) ou **Efficacité** ( $e$  ou  $\eta$ ) =  $\frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie coûteuse}}$

↙ Terme utilisé pour les moteurs      ↘ Terme utilisé pour les récepteurs

- Rendement réel de la machine < Rendement calculé avec le cycle modèle < « Rendement de Carnot »
- dont le fonctionnement est **irréversible mécaniquement et thermiquement**      dont le fonctionnement est **réversible mécaniquement** (sauf détendeur)      rendement maximal possible, associé à un fonctionnement **entièrement réversible mécaniquement et thermiquement**, donc à un **cycle de Carnot réversible**

	Moteur	Réfrigérateur	Pompe à chaleur
Signe de $W$	$< 0$	$> 0$	$> 0$
Signe de $Q_c$	$> 0$	$< 0$	$< 0$
Signe de $Q_f$	$< 0$	$> 0$	$> 0$
Energie utile	$ W $	$Q_f$	$ Q_c $
Energie coûteuse	$Q_c$	$W$	$W$
Rendement / Efficacité	$r =  W /Q_c$	$e = Q_f/W$	$e =  Q_c /W$
Valeur maximale (fonctionnement réversible)	$1 - T_f/T_c$ ( $< 1$ ) $\uparrow$ si $T_c \uparrow$	$T_f/(T_c - T_f)$ ( $> 1$ ou $< 1$ ) $\uparrow$ si $(T_c - T_f) \downarrow$	$T_c/(T_c - T_f)$ ( $> 1$ ) $\uparrow$ si $(T_c - T_f) \downarrow$

# RESOLUTION D'UN EXERCICE DE MACHINES THERMIQUES

## S'agit-il d'une étude directe ou d'une étude formelle ?

Si le fonctionnement de la machine est détaillé (nature de l'agent thermique connue, étapes du cycle décrites...) : **Etude directe**

Si le fonctionnement de la machine n'est pas précisé (quel agent thermique ? quel cycle ? fonctionnement en vase clos ou écoulement ?) : **Etude formelle**

### L'agent thermique évolue-t-il en vase clos ou est-il en écoulement ?

#### • Cas d'une évolution en VASE CLOS :

- ✓ Pour chaque étape du cycle :  $\Delta U = W + Q$  &  $\Delta S = S_e + S_c$
- ✓ Pour l'ensemble du cycle :  $W_{cycle} + Q_{cycle} = 0$  &  $S_{e,cycle} + S_{c,cycle} = 0$
- ✓  $W$  est un **travail de forces pressantes** dues à un piston qui comprime l'agent thermique ; il peut être visualisé sur un diagramme de Clapeyron.



#### • Cas d'un ECOULEMENT à travers une succession de parties actives :

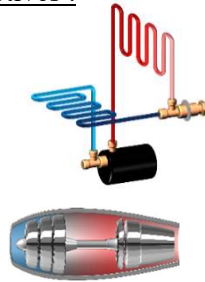
- ✓ Pour chaque étape du cycle :

$$h_2 - h_1 + (c_2^2 - c_1^2)/2 + g(z_2 - z_1) = w + q$$

$$\text{ou } D_m (h_2 - h_1 + (c_2^2 - c_1^2)/2 + g(z_2 - z_1)) = \mathcal{P}_W + \mathcal{P}_Q$$

$$\& \quad s_2 - s_1 = \delta S_e / \delta m + \delta S_c / \delta m$$

$$\text{ou } D_m (s_2 - s_1) = \delta S_e / dt + \delta S_c / dt$$



- ✓ Pour l'ensemble du cycle :  $\mathcal{P}_{W,cycle} + \mathcal{P}_{Q,cycle} = 0$  &  $\frac{\delta S_{e,cycle}}{dt} + \frac{\delta S_{c,cycle}}{dt} = 0$

- ✓  $w$  est un travail **massique** échangé avec les pièces mobiles de la machine, non un travail de forces pressantes (n'inclut pas le travail de transvasement) ; il ne peut pas être visualisé sur un diagramme de Clapeyron.
- ✓ Si les variations de  $e_c$  et  $e_p$  sont négligeables (hyp. usuelle),  $w + q = h_2 - h_1$  et la somme  $w + q$  peut donc être visualisé sur un diagramme des frigoristes.

#### • Hypothèses usuelles de modélisation du cycle :

- ✓ **Compressions et détente**s adiabatiques (pertes thermiques négligées) et mécaniquement réversibles (**sauf détendeur !**) donc **isentropiques**.  
→ Si hypothèse **gaz parfait** : loi de Laplace.
- ✓ Echangeurs isobares ; détendeur isenthalpique ; chambre de combustion : isobare ; combustion interne en vase clos : isochore ou isobare.

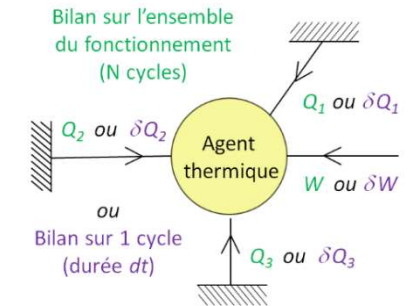
#### • L'approche directe permet de calculer le **rendement du cycle modèle**.

**Attention à bien identifier les étapes du cycle associées à  $W$ ,  $Q_c$  et  $Q_f$  !**

### Les sources sont-elles des thermostats ou des pseudo sources ?

#### • Cas où les sources sont des THERMOSTATS :

- ✓ On mène l'étude sur **l'ensemble de l'évolution** assimilée à un **nombre entier  $N \gg 1$  de cycles** thermodynamiques et on effectue un **schéma formel** :
- ✓ On introduit le travail  $W$  et les transferts thermiques  $\{Q_i\}$  reçus des différentes sources pendant l'évolution.



- ✓ Les 2 principes appliqués à l'agent thermique de la machine, sur les  $N$  cycles de fonctionnement, donnent :

$$W + \sum_i Q_i = 0 \quad \& \quad \sum_i Q_i / T_i \leq 0$$

**Inégalité de Carnot-Clausius** (égalité à la limite d'un fonctionnement réversible)

- ✓ On applique le 1<sup>er</sup> principe à chaque source qui subit une évolution (changement d'état par exemple)

#### • Cas où il y a une ou des PSEUDO SOURCES :

- ✓ On mène l'étude sur **un unique cycle de durée  $dt$**  infinitésimale à l'échelle du fonctionnement global et on effectue un **schéma formel**.
- ✓ On introduit le travail  $\delta W$  et les transferts thermiques  $\{\delta Q_i\}$  reçus des différentes sources sur un cycle.

- ✓ Les 2 principes appliqués à l'agent thermique sur 1 cycle donnent :

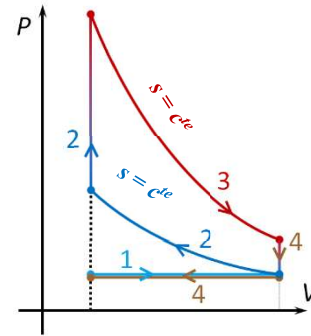
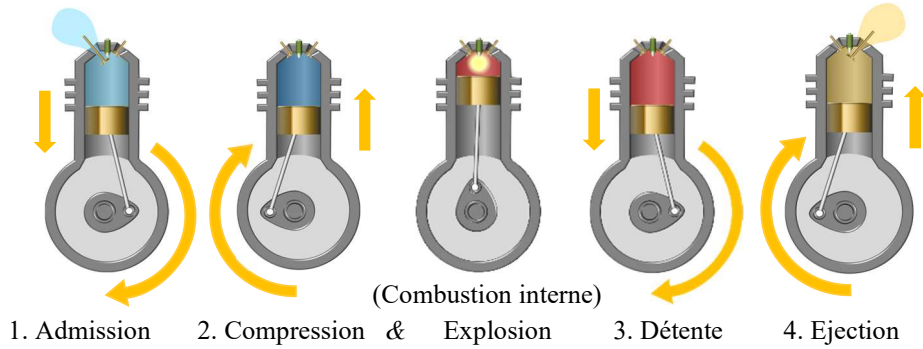
$$\delta W + \sum_i \delta Q_i = 0 \quad \& \quad \sum_i \delta Q_i / T_i \leq 0$$

- ✓ Le 1<sup>er</sup> principe à la pseudo source n<sup>o</sup>i, de température  $T_i(t)$  donne dans le cas usuel d'une évolution isochore :  $dU_i = \delta Q_i$

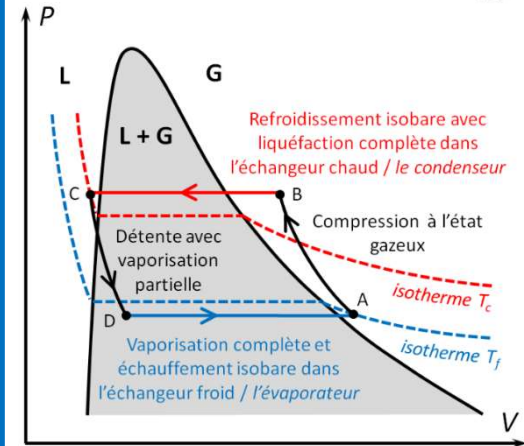
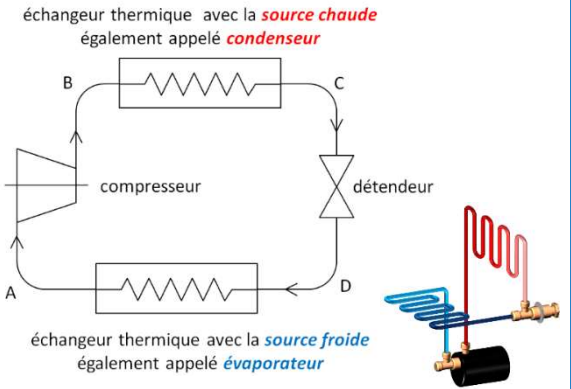
- L'approche formelle permet de calculer le **rendement de Carnot** (et peut être effectuée à cette fin au milieu d'une étude directe...)

# MACHINES THERMIQUES USUELLES ET CYCLES MODELES ASSOCIES

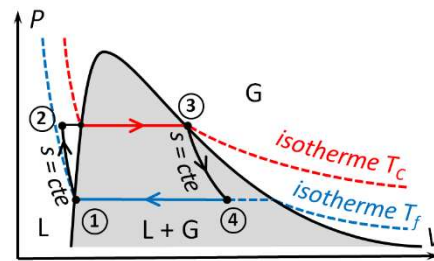
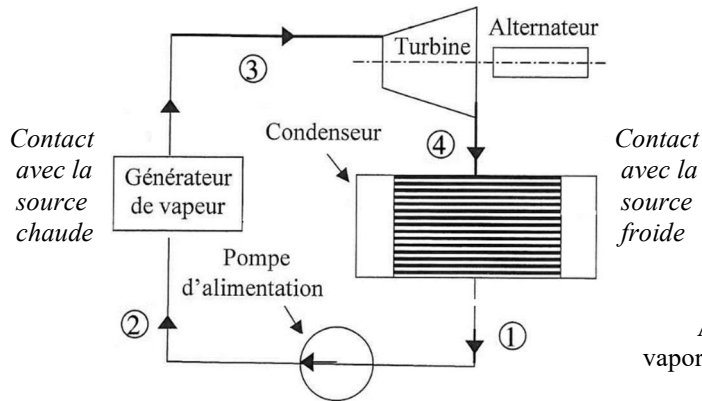
## Moteur à 4 temps à allumage commandé – Cycle de beau de Rochas (ou Otto)



## Réfrigérateur / Pompe à chaleur



## Circuit secondaire de centrale nucléaire – Cycle de Rankine.



Attention, cycle très simplifié : en réalité la température de vaporisation est inférieure à  $T_c$  et celle de liquéfaction supérieure à  $T_f$

## Turboréacteur d'avion (idem pour une turbine à gaz) – Cycle de Joule (ou Brayton)

Schéma de principe

Schéma équivalent avec échangeur froid virtuel

