

# CHAPITRE ECT5

## Machines thermiques

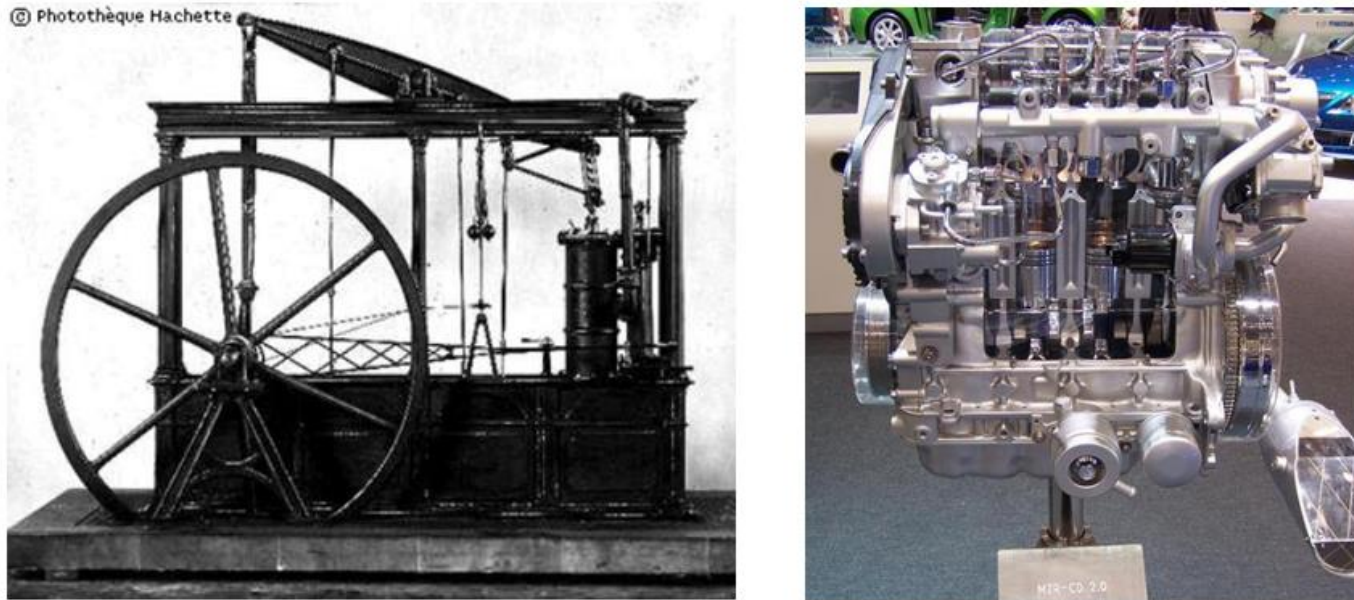


FIGURE 1 : Machine à vapeur de Watt et moteur à explosion Diesel

### ➤ Machine à vapeur :

Produire un travail mécanique : moteur thermique

### ➤ Autres machines thermiques

Déplacer de la chaleur :  
réfrigérateur, pompe à chaleur

# 1 Machines thermiques

## 1.1 Qu'est-ce qu'une machine thermique ?

- Définition : **Machine thermique**
- Agent thermique
- Sens des transferts énergétiques
- Sens de la conversion d'énergie
  - **moteur thermique** : conversion **d'énergie thermique** en **travail mécanique**
  - **récepteur thermique** : conversion du **travail mécanique** en **énergie thermique**



## 1.2 Application des deux principes de la thermodynamique

### ➤ Système et échanges énergétiques

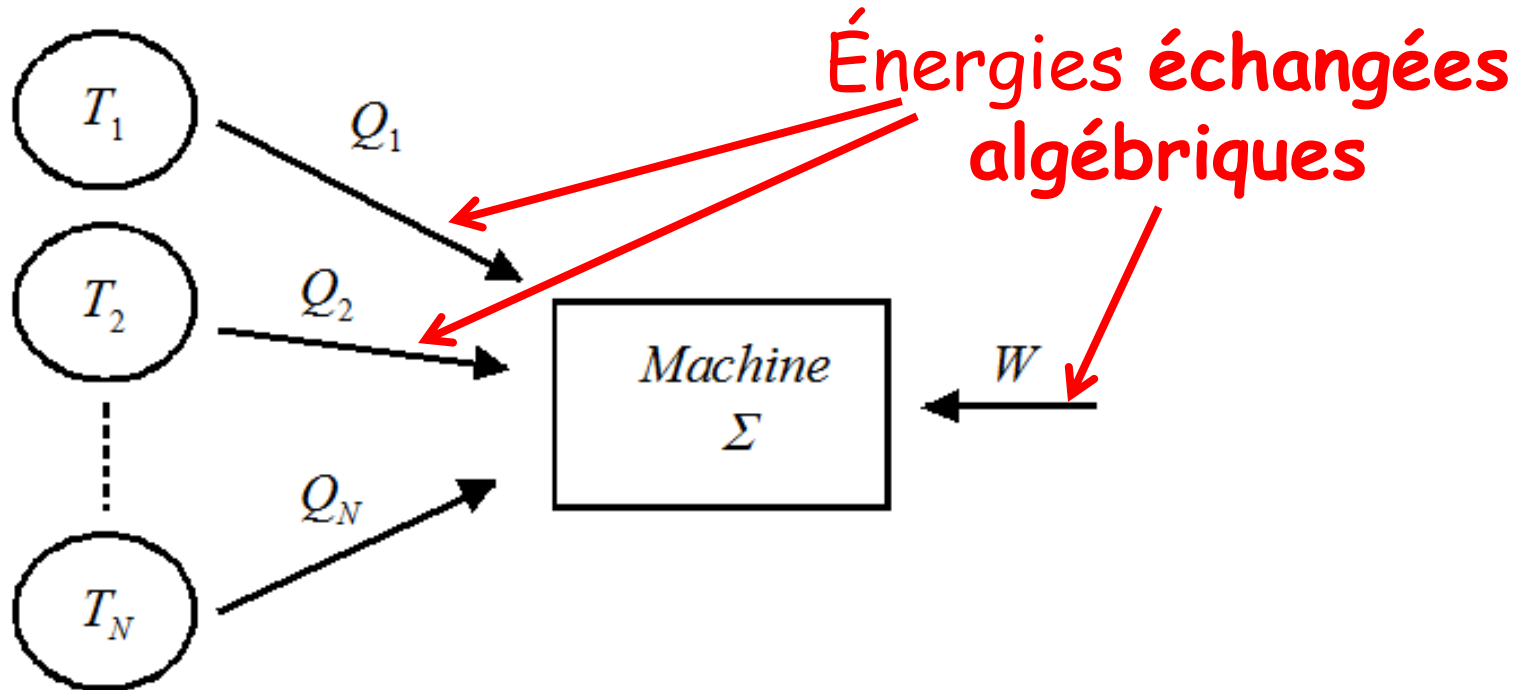


FIGURE 2 : Échanges énergétiques d'une machine thermique

➤ Premier principe : bilan énergétique

$$\Delta U = W + \sum_{i=1}^N Q_i = 0$$

où  $W$  et  $Q_i$  sont les grandeurs **algébriques échangées** par le système sur **1 cycle** de fct<sup>†</sup>

➤ Deuxième principe : bilan entropique

Inégalité de Clausius :

$$\sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{T_i} \stackrel{\text{irr}}{\underset{\text{rév}}{\leq}} 0$$

où  $Q_i$  sont les quantités de chaleur **algébriques échangées** par le système sur **1 cycle** de fct<sup>†</sup>

## 1.3 Machine monotherme

➤ Définition : machine monotherme

➤ Signe des échanges énergétiques

Inégalité de Clausius :  $Q_1 \leq 0$

1<sup>er</sup> principe :  $W + Q_1 = 0$  donc  $W \geq 0$

### Conclusion

machine monotherme = récepteur thermique

## 2 Machines thermiques dithermes

### 2.1 Présentation

➤ Définition : **Machine ditherme**

➤ Échanges énergétiques

Le système  $\Sigma$  échange sur 1 cycle de fct<sup>†</sup> :

- le **travail**  $W$  avec le milieu extérieur
- la **quantité de chaleur**  $Q_F$  avec une source froide à la température  $T_F$
- la **quantité de chaleur**  $Q_C$  avec une source chaude à la température  $T_C$  ( $T_C > T_F$ )

## 2.2 Expressions des deux principes pour une machine ditherme

- 1<sup>er</sup> ppe appliqué au syst fermé  $\Sigma$  sur un cycle de fct<sup>†</sup>

$$\Delta U = W + Q_C + Q_F = 0$$



- 2<sup>ème</sup> ppe appliqué au syst fermé  $\Sigma$  sur un cycle de fct<sup>†</sup>

Inégalité de Clausius :

$$\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \stackrel{\text{irr}}{\underset{\text{rév}}{\leq}} 0$$





## 2.3 Les deux types de machines thermiques

### ➤ 1<sup>er</sup> type

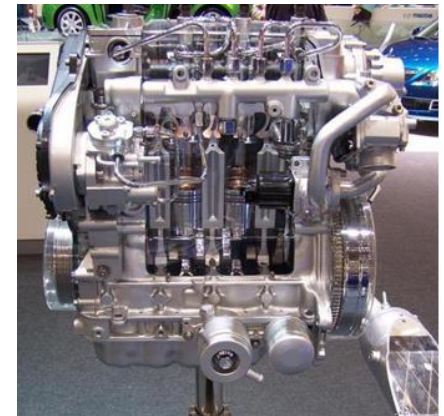
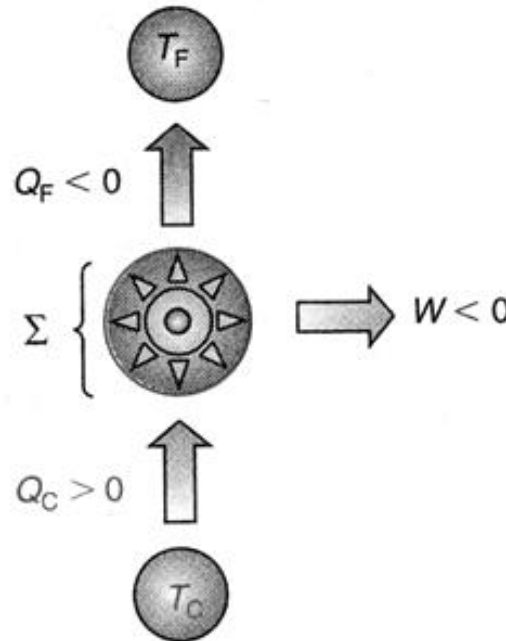


FIGURE 3 : Sens des transferts thermiques pour un moteur

Définition : **Moteur**

➤ 2ème type

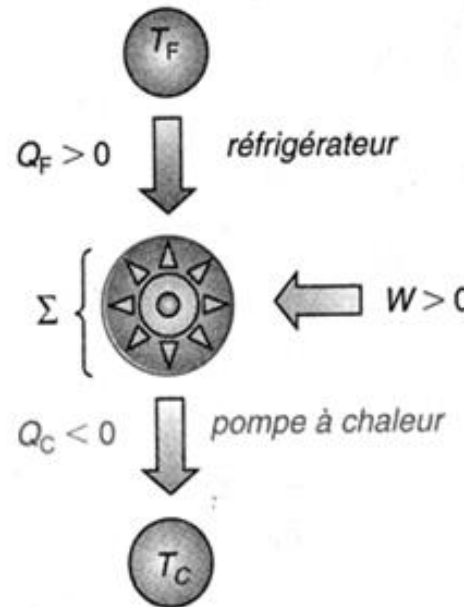


FIGURE 4 : Sens des transferts thermiques pour un récepteur thermique

Définition : Récepteur thermique

## 2.4 Efficacité thermodynamique ou rendement

### ➤ Définition :

$$e = \eta = \frac{\text{transfert énergétique utile}}{\text{énergie fournie à la machine (coûteuse)}} > 0$$

### ➤ Remarque :

rendement pour les moteurs  $(\eta \leq 1)$

efficacité pour les récepteurs  $(e \leq 1 \text{ ou } e \geq 1)$

## 2.5 Représentations graphiques

### ➤ Diagrammes

- Diagramme de Clapeyron
- Diagramme de Watt

### ➤ Sens de parcours des cycles

sens horaire pour les moteurs ( $W < 0$  et  $Q_{\text{tot}} > 0$ )

sens trigonométrique pour les récepteurs  
( $W > 0$  et  $Q_{\text{tot}} < 0$ )



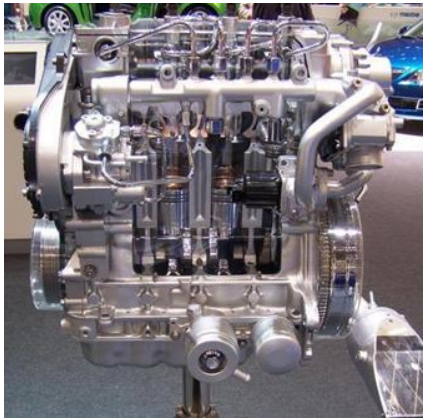
## 2.6 Moteur thermique ditherme

### 2.6.1 Principe de fonctionnement

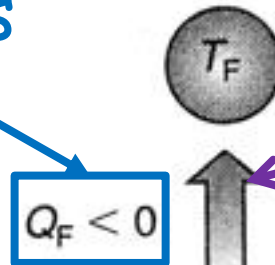
➤ Exercice d'application 1

1. Expliquer le principe de fonctionnement du moteur en indiquant la nature et le signe des énergies échangées par la machine.
2. Définir le rendement  $\eta$  en fonction des grandeurs énergétiques.
3. À l'aide des deux principes de la thermodynamique appliqués sur un cycle, montrer que le rendement  $\eta$  vérifie  $\eta \leq \eta_{\max}$  et exprimer  $\eta_{\max}$  en fonction des températures  $T_C$  et  $T_F$  des sources chaude et froide.

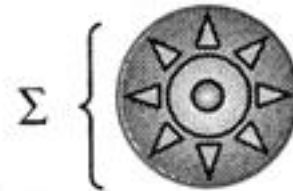
# 1. Principe de fonctionnement



Pertes

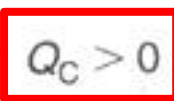


Sens RÉEL  
des transferts



Énergie utile

Énergie coûteuse



## 2. Rendement



$$\eta = -\frac{W}{Q_C}$$

## 3. Détermination du rendement



## 2.6.2 Efficacité de Carnot et rendements réels

### ➤ Efficacité de Carnot

Propriété :

Rendement maximal  $\Leftrightarrow$  cycle réversible

$$e_{C,moteur} = \eta_{\max} = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

👁 Animation 1 : Figures animées pour la physique / Thermodynamique /  
Machines thermiques / Diagramme de Raveau  
<http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/Thermo/Machines/Raveau.php>

### ➤ Rendement maximal

### ➤ Rendements des moteurs thermiques réels

- Centrale électrique nucléaire
- Moteur de voiture

## 2.6.3 Cogénération

### ➤ Principe de la cogénération

Couplage de la production d'énergie électrique (travail) avec une production d'énergie thermique

### ➤ Grandeurs énergétiques (positives)

- transfert thermique libéré par la combustion :  $Q$
- transfert thermique utile :  $Q_u$
- travail mécanique ou électrique produit :  $W_u$

### ➤ Rendement global

$$\rho_g = \frac{W_u + Q_u}{Q}$$

### ➤ Rapport chaleur-force

$$CF = \frac{Q_u}{W_u}$$

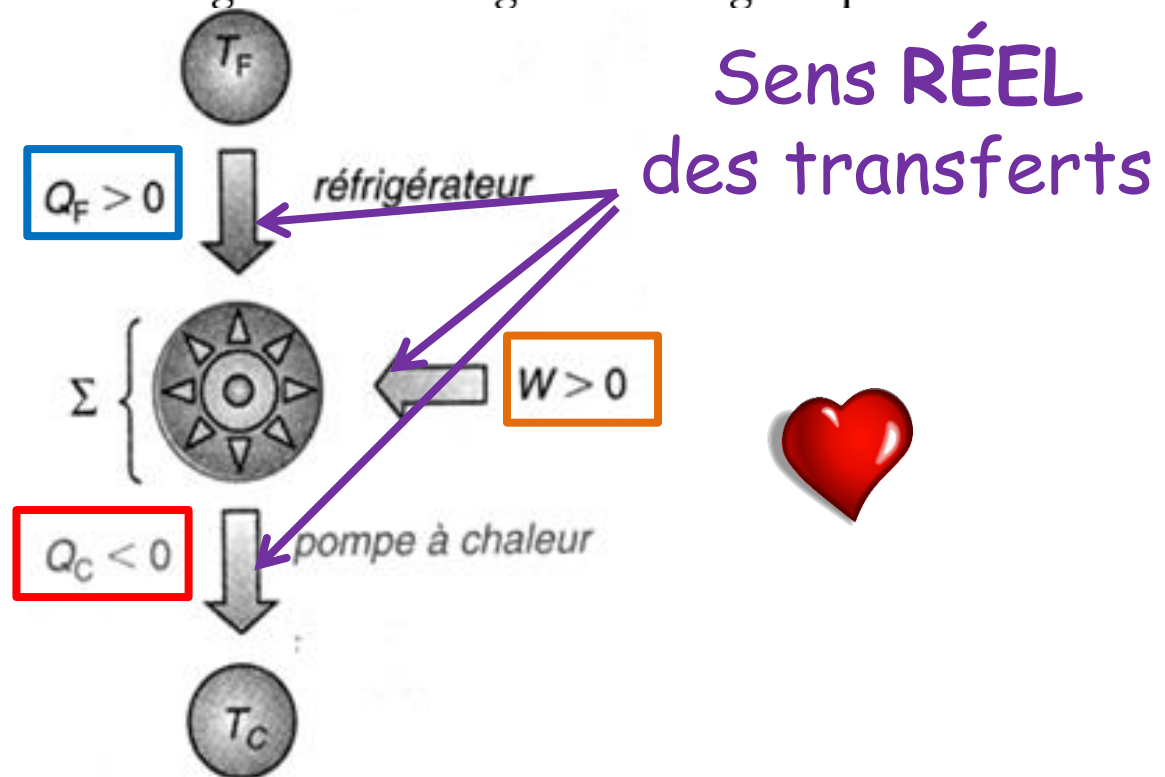


## 2.7 Récepteurs thermiques dithermes

### 2.7.1 Principe de fonctionnement

➤ Exercice d'application 2

Expliquer le principe de fonctionnement d'un récepteur thermique ditherme en indiquant la nature et le signe des énergies échangées par la machine.



## 2.7.2 Réfrigérateur

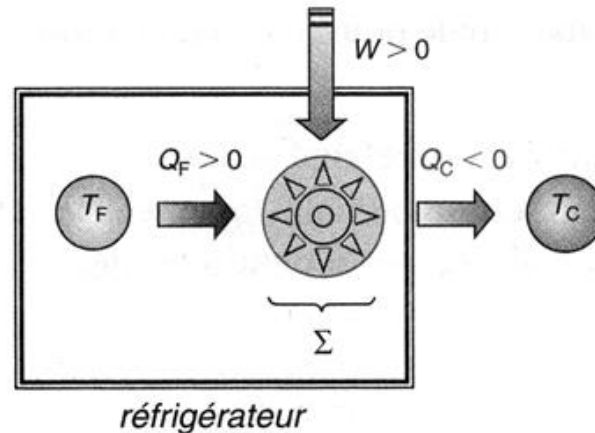


FIGURE 5 : Principe de fonctionnement d'un réfrigérateur



### ➤ Exercice d'application 3

1. Indiquer quels éléments jouent le rôle des deux sources de chaleur d'un réfrigérateur.
2. Définir l'efficacité frigorifique  $e_{frigo}$  en fonction des grandeurs énergétiques.
3. Montrer que l'efficacité frigorifique  $e_{frigo}$  vérifie  $e_{frigo} \leq e_{C,frigo}$  et exprimer  $e_{C,frigo}$  en fonction des températures  $T_C$  et  $T_F$  des sources chaude et froide.

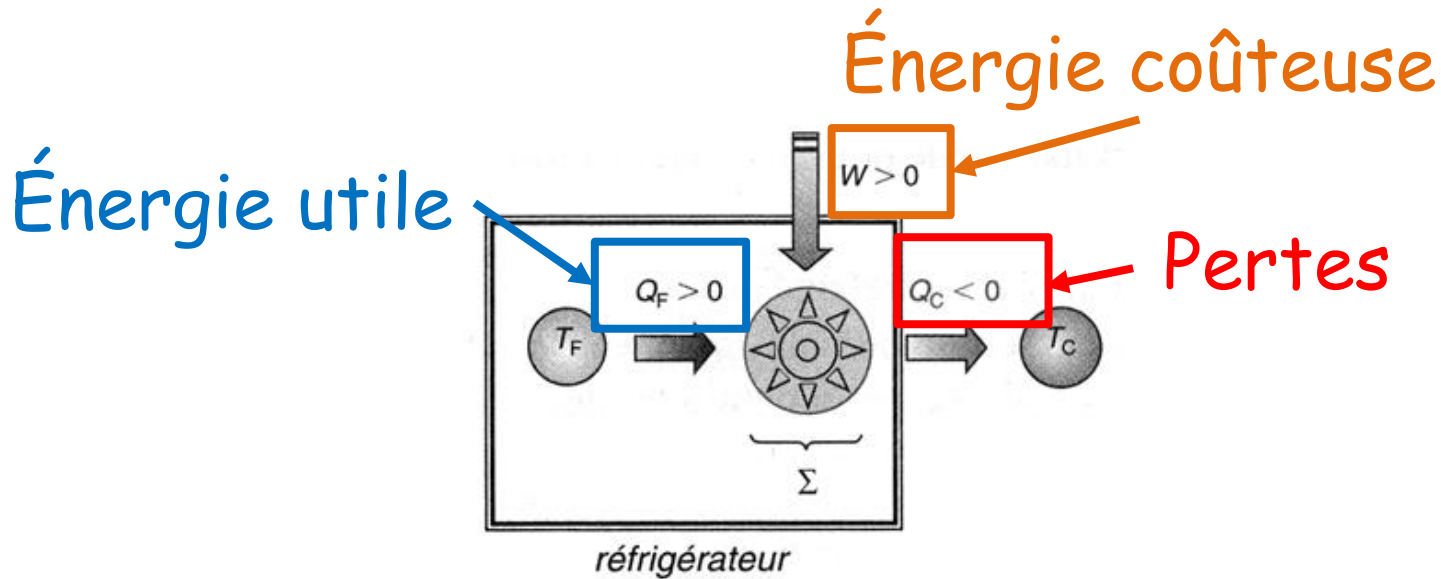


FIGURE 5 : Principe de fonctionnement d'un réfrigérateur

### 1. Sources de chaleur

### 2. Efficacité frigorifique

$$e_{frigo} = \frac{Q_F}{W}$$



### 3. Détermination de l'efficacité



➤ Efficacité de Carnot relative à un réfrigérateur

Propriété :

Efficacité frigo. maximale  $\Leftrightarrow$  cycle réversible

$$e_{C,frigo} = \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

➤ Efficacités de Carnot extrémales

➤ Efficacités pour des réfrigérateurs réels

- Partie congélateur
- Réfrigérateur

## 2.7.3 Pompe à chaleur

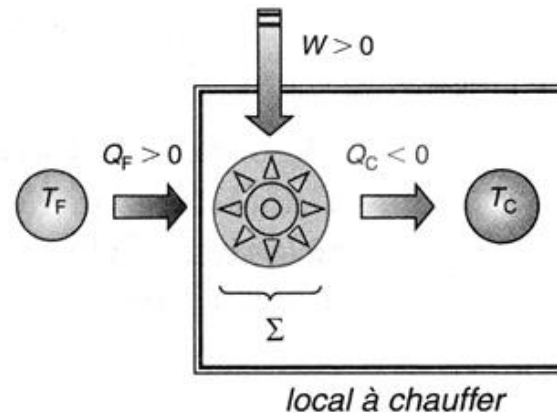


FIGURE 6 : Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur

### ➤ Exercice d'application 4

1. Indiquer quels éléments jouent le rôle des deux sources de chaleur d'une PAC.
2. Définir l'efficacité thermique de la pompe à chaleur  $e_{PAC}$  en fonction des grandeurs énergétiques.
3. Montrer que l'efficacité  $e_{PAC}$  vérifie  $e_{PAC} \leq e_{C,PAC}$  et exprimer  $e_{C,PAC}$  en fonction des températures  $T_C$  et  $T_F$  des sources chaude et froide.

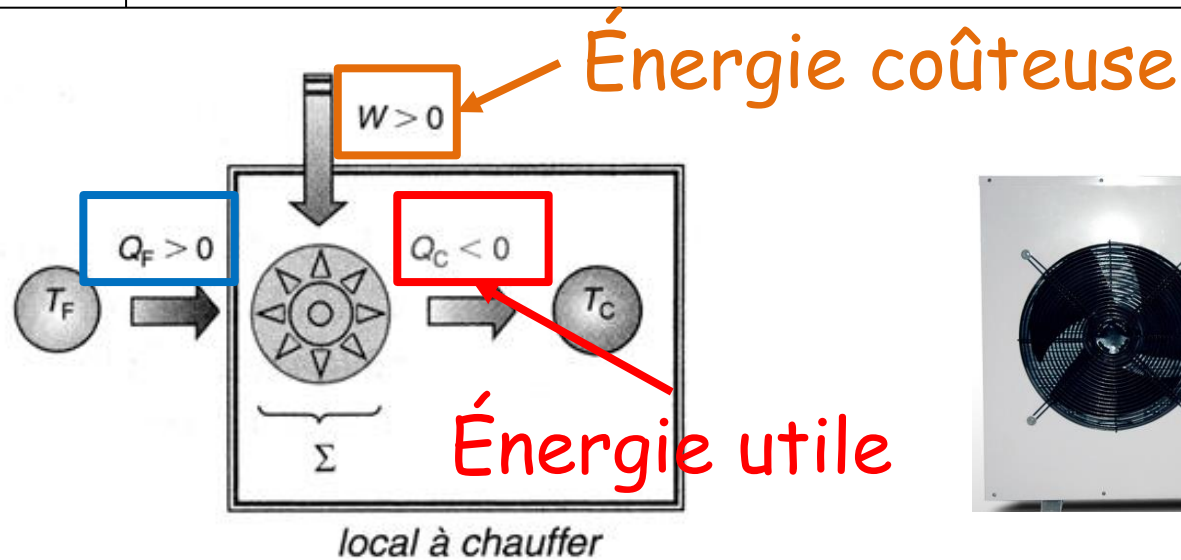


FIGURE 6 : Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur

### 1. Sources de chaleur

### 2. Efficacité thermique

$$e_{PAC} = -\frac{Q_C}{W}$$



### 3. Détermination de l'efficacité



➤ Efficacité de Carnot relative à une PAC

Propriété :

Efficacité PAC maximale  $\Leftrightarrow$  cycle réversible

$$e_{C,PAC} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

➤ Efficacités de Carnot extrémales

➤ Ordres de grandeurs pour une PAC domestique

➤ Cas du climatiseur

## 3 Cycles théoriques réversibles

### 3.1 Cycle de Carnot pour un gaz parfait

#### ➤ Définition

#### ➤ Nature des transformations

Pour un GP, le cycle de Carnot est constitué de :

- 2 isothermes (une à  $T_C$ , l'autre à  $T_F$ )
- 2 adiabatiques **réversibles** (isentropiques)

#### ➤ Exercice d'application 5

Tracer le cycle de Carnot d'un gaz parfait dans le diagramme de Clapeyron.



## 3.2 Cycle de Carnot pour un système diphasé

➤ Système

➤ Description

du cycle de Carnot

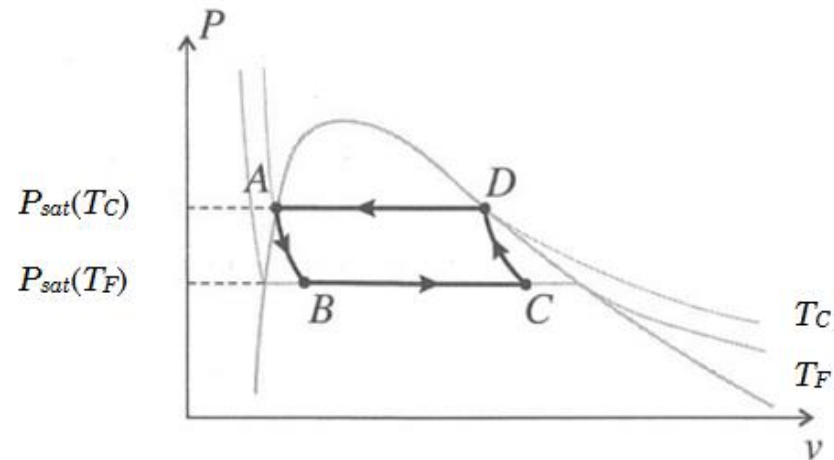


FIGURE 7 : Cycle de Carnot pour un corps pur diphasé

➤ Exercice d'application 6

1. Indiquer à quel type de machine correspond le cycle de la FIGURE 7.
2. Exprimer les transferts d'énergie  $Q_F$ ,  $Q_C$  et  $W$  pour  $\Sigma$  sur le cycle en fonction de  $m$ ,  $T_F$ ,  $T_C$  et des grandeurs caractéristiques du fluide (capacités thermiques massiques, enthalpie et entropie massiques de vaporisation).
3. Déterminer l'efficacité thermique de cette machine.



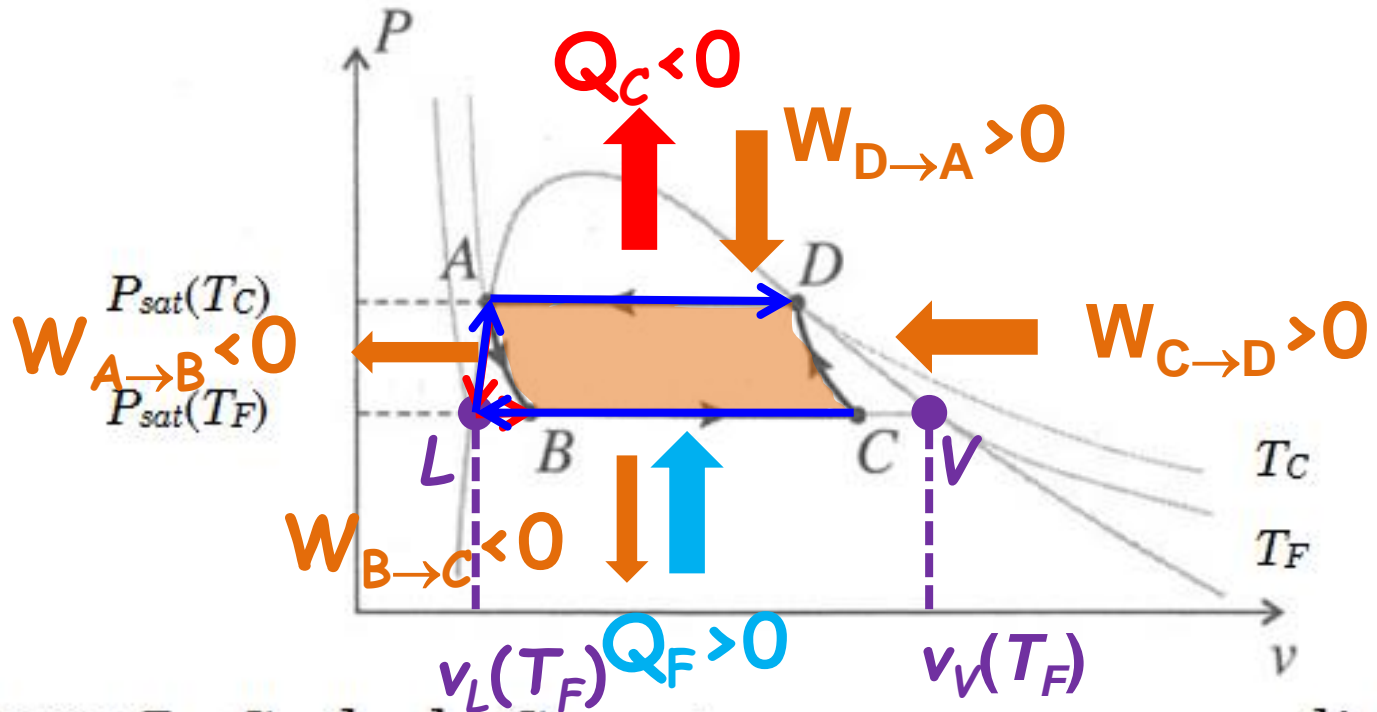


FIGURE 7 : Cycle de Carnot pour un corps pur diphasé

## 3.2 Cas des machines réelles

### Théorème de Carnot :

$\eta$  ou  $e$  d'1 machine therm. cyclique ditherme réelle  
tjrs inférieur(e)  
à celui ou celle d'une machine thermique cyclique  
ditherme réversible

## 4 Modélisation de machines thermiques réelles

### 4.1 Moteur à explosion

#### 4.1.1 Principe de fonctionnement

- Historique
- Moteur à 4 temps

👁 Animation 2 : Figures animées pour la physique / Thermodynamique / Machines thermiques / Moteur à 4 temps

[http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve\\_tulloue/Thermo/Machines/4temps.php](http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Thermo/Machines/4temps.php)

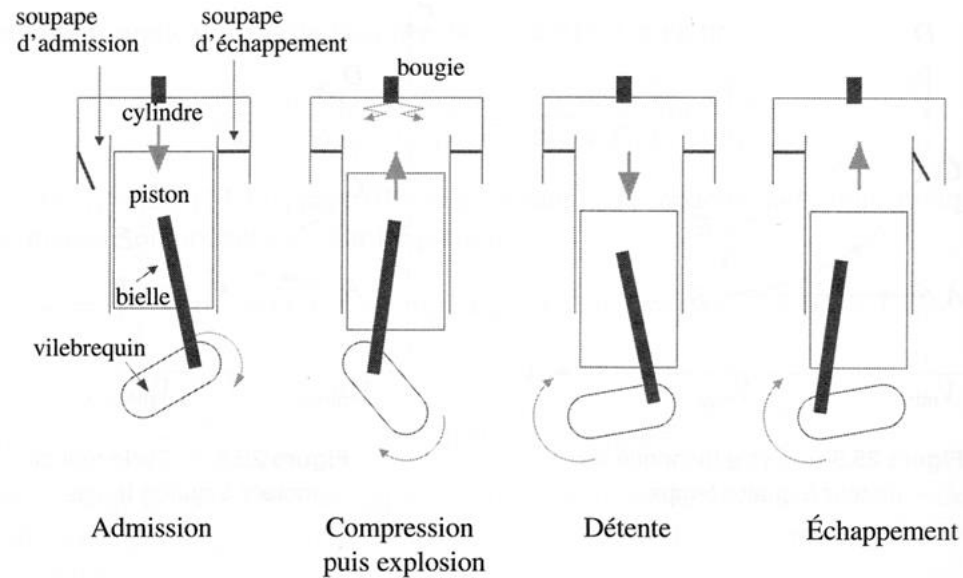


FIGURE 8 : Les quatre temps d'un moteur à combustion interne

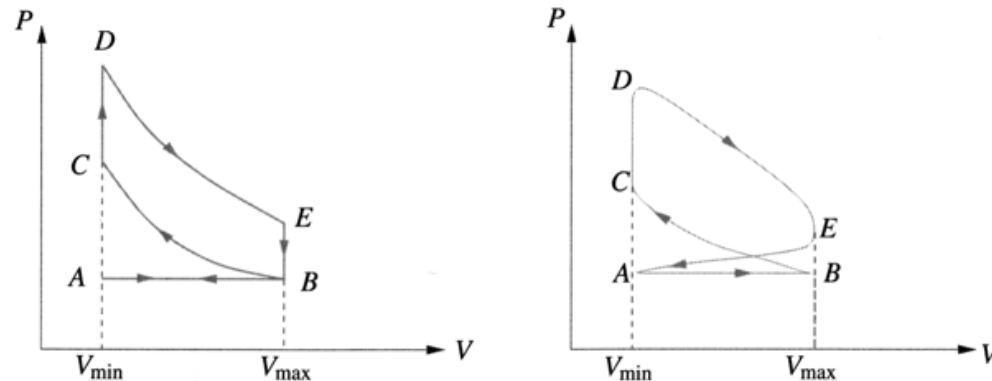


FIGURE 9 : Cycle de Beau de Rochas représenté dans un diagramme de Watt  
À gauche : cycle théorique ; à droite : cycle réel

## ➤ 4 temps et 4 cylindres

👁 Animation 3 : Figures animées pour la physique / Thermodynamique /  
Machines thermiques / 4 cylindres

[http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve\\_tulloue/Thermo/Machines/4cylindres.php](http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Thermo/Machines/4cylindres.php)

## 4.1.2 Modélisation

## 4.1.3 Cycle Beau de Rochas théorique

### ➤ Exercice d'application 7

On étudie un moteur à explosion dont le cycle théorique de Beau de Rochas subi par  $n$  mol d'un mélange carburant – air, assimilé à un gaz parfait de coefficient  $\gamma = 1,4$ , est représenté sur la FIGURE 9.

1. Exprimer les transferts thermiques  $Q_C$  et  $Q_F$  en fonction des températures.
2. Exprimer  $Q_C$  en fonction de  $Q_F$ , du taux de compression  $\alpha = \frac{V_{\max}}{V_{\min}}$  et de  $\gamma$ .
3. Déterminer l'expression du travail  $W$  en fonction de  $Q_C$ ,  $\alpha$  et  $\gamma$ .
4. En déduire le rendement  $\eta$  en fonction de  $\alpha$  et  $\gamma$ . Effectuer l'application numérique pour  $\alpha = 9$ .

# 1. Expressions des transferts thermiques

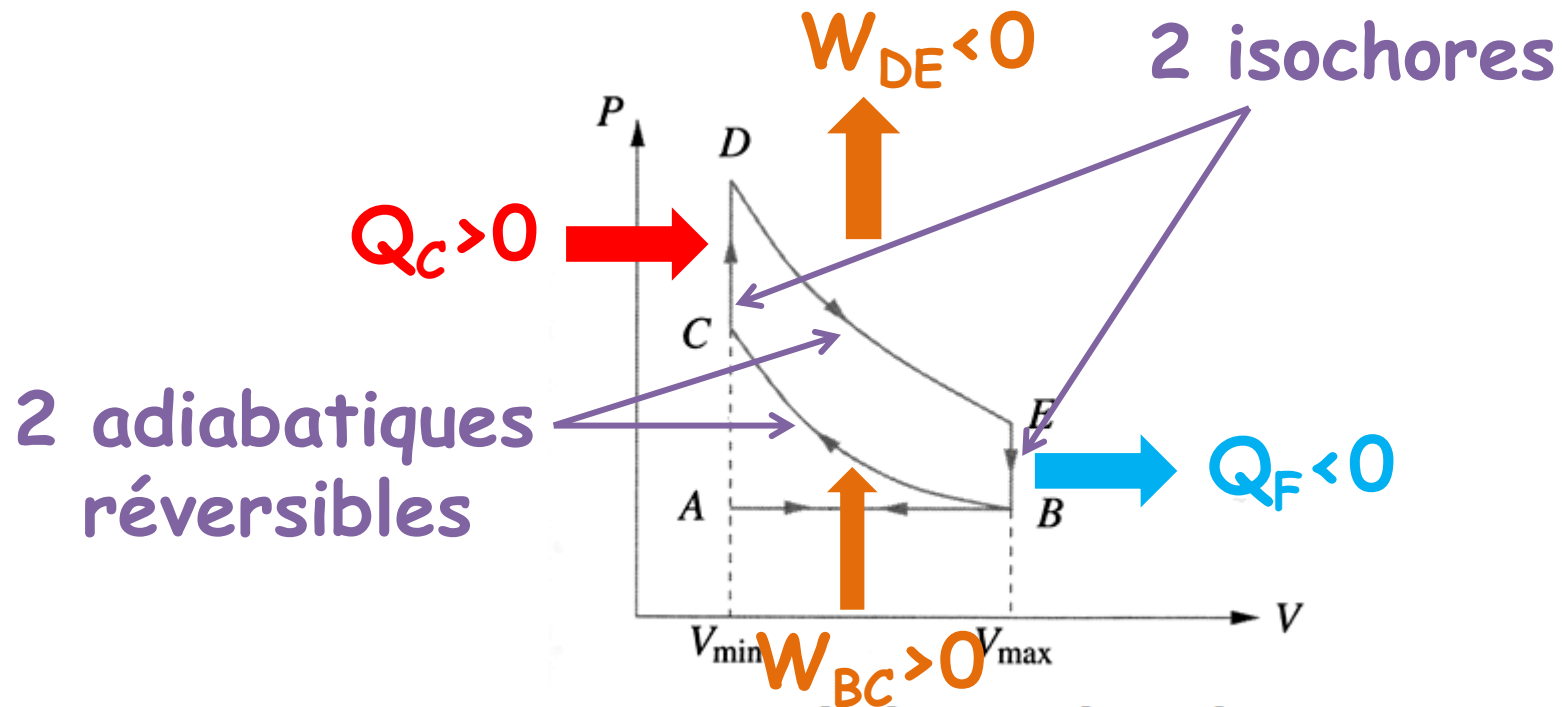


FIGURE 9 : Cycle de Beau de Rochas :



## 4.2 Machine frigorifique

### ➤ Schéma de principe

👁 Animation 4 : Figures animées pour la physique / Thermodynamique / Machines thermiques / Machine frigorifique

[http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve\\_tulloue/Thermo/Machines/Frigo.php](http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Thermo/Machines/Frigo.php)

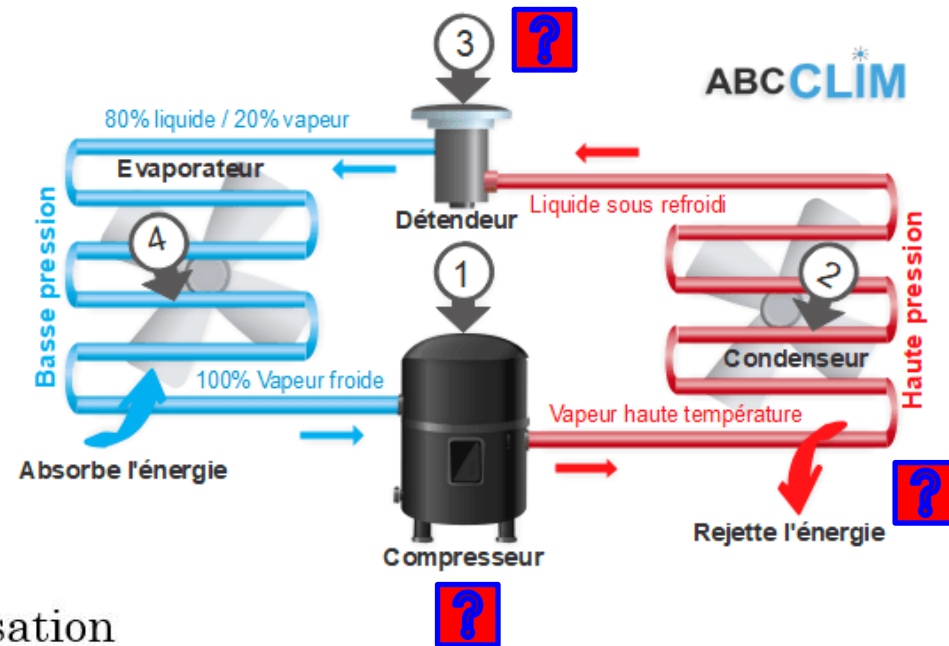
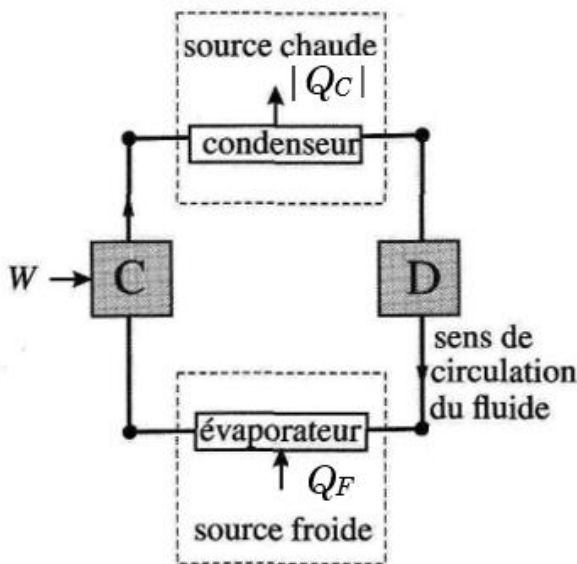


FIGURE 10 : Schéma d'un système à condensation

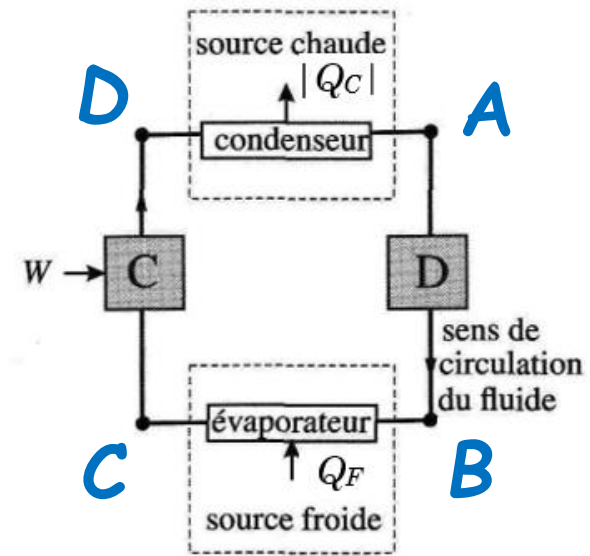
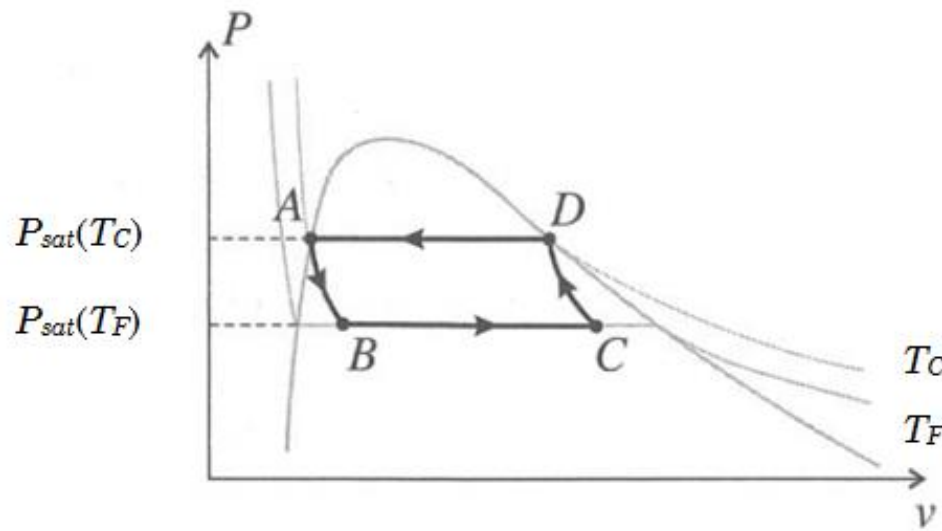
### ➤ Description du circuit



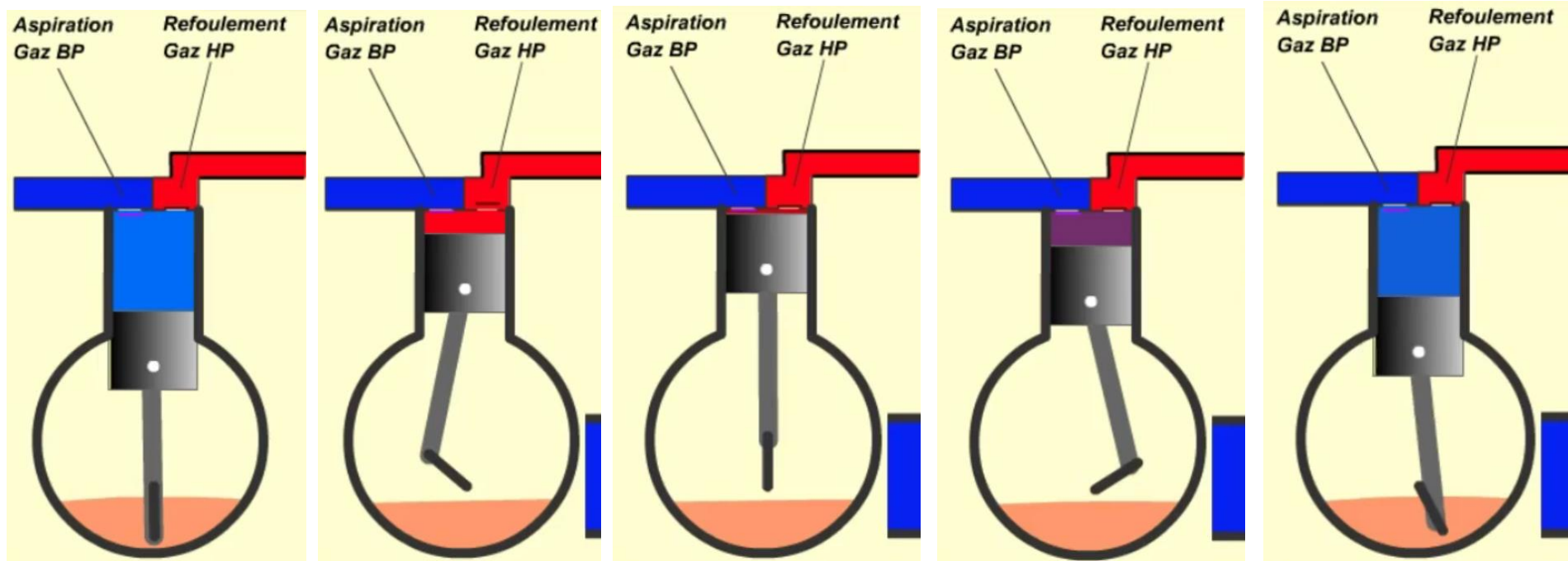
➤ Exercice d'application 8

On étudie un réfrigérateur dont le fluide décrit le cycle de Carnot représenté sur la FIGURE 7.

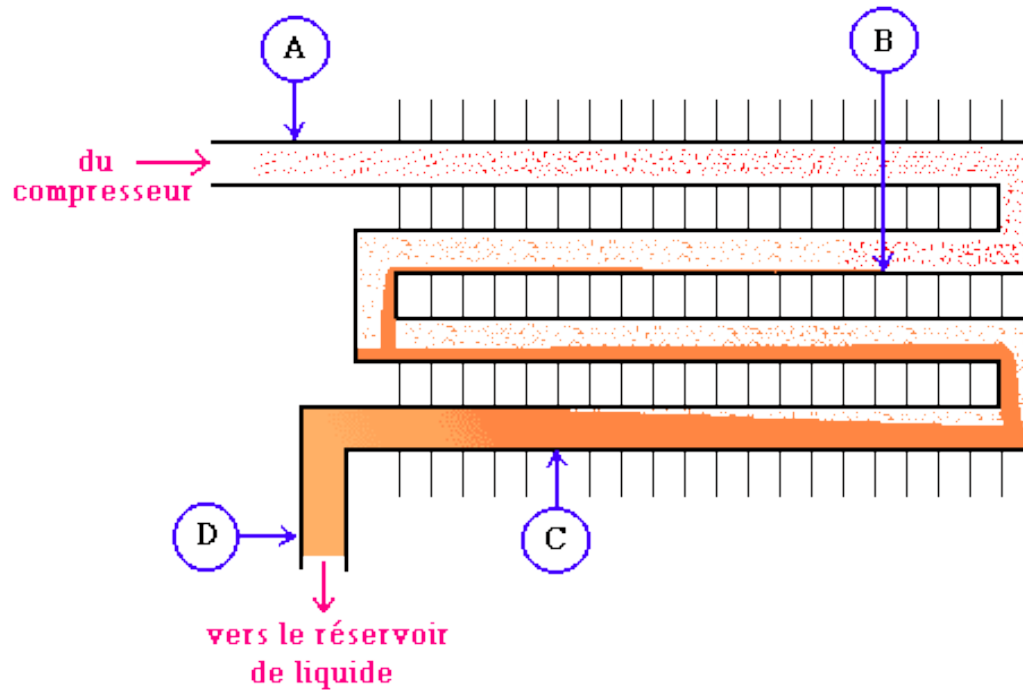
Identifier dans lequel des quatre éléments se produit chacune des quatre transformations et préciser, pour chacune d'entre elles, la nature et le signe du transfert énergétique.



## Compresseur



## Condenseur



## Détendeur

