



# Thermodynamique et mécanique des fluides appliquées aux machines thermiques

## Chapitre 5 : Thermodynamique industrielle

### Sommaire

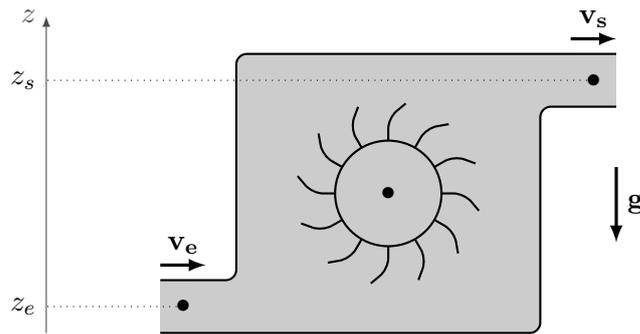
	Page
<b>1 Thermodynamique des fluides en écoulement permanent</b>	<b>1</b>
1.1 Premier principe industriel . . . . .	1
1.2 Deuxième principe industriel . . . . .	3
<b>2 Etude de quelques dispositifs élémentaires</b>	<b>4</b>
2.1 Compresseur calorifugé . . . . .	4
2.2 Turbine calorifugée . . . . .	5
2.3 Détendeur calorifugé à laminage . . . . .	5
2.4 Tuyère calorifugée . . . . .	6
2.5 Mélangeur et séparateur calorifugés . . . . .	6
2.6 Echangeur thermique globalement calorifugé . . . . .	7
<b>3 Machines thermiques (rappel)</b>	<b>7</b>
3.1 Machines thermiques cycliques . . . . .	7
3.2 Distinction moteur / récepteur . . . . .	8
3.3 Inégalité de Clausius . . . . .	8
3.4 Impossibilité d'un moteur cyclique monotherme - énoncé de Kelvin . . . . .	9
<b>4 Machines thermiques cycliques dithermes (rappel)</b>	<b>10</b>
4.1 Source froide et source chaude . . . . .	10
4.2 Classification des machines cycliques dithermes : diagramme de Raveau . . . . .	10
4.3 Efficacité d'une machine thermique . . . . .	11
4.3.1 Définition . . . . .	11
4.3.2 Efficacité (ou rendement) d'un moteur ditherme . . . . .	11
4.3.3 Efficacité d'un réfrigérateur ditherme . . . . .	12
4.3.4 Efficacité d'une pompe à chaleur . . . . .	12
4.4 Machine ditherme réversible - Cycle de Carnot . . . . .	13

## 1 Thermodynamique des fluides en écoulement permanent

### 1.1 Premier principe industriel

On considère un fluide, éventuellement compressible, en écoulement permanent avec le débit massique  $D_m$  à travers une machine lui fournissant algébriquement une puissance mécanique  $\mathcal{P}_i$  et thermique  $\mathcal{P}_Q$ . Il entre dans la machine avec la vitesse débitante  $\mathbf{v}_e$  (vitesse moyenne sur la section du tuyau) à l'altitude  $z_e$

et en sort avec la vitesse  $\mathbf{v}_s$  à l'altitude  $z_s$  :



▷

Par construction, la variation d'enthalpie massique  $h_s - h_e$  tient déjà compte des travaux de pression exercés en amont et en aval. La variation d'énergie potentielle tient déjà compte des travaux des actions conservatives. La puissance  $\mathcal{P}_i$  représente donc les seuls travaux n'entrant pas dans les deux premières catégories.

**Puissance indiquée  $\mathcal{P}_i$  :**

La puissance  $\mathcal{P}_i$  tient compte des travaux des forces non conservatives autres que ceux des forces de pression. Il s'agit des travaux fournis par les parties mobiles de la machine au fluide (action d'une pompe, d'une hélice, d'une roue à augets, etc.), regroupés sous le nom de travail indiqué, noté  $W_i$  :

$$\mathcal{P}_i = \frac{\delta W_i}{dt} \quad (1)$$

On appelle  $\mathcal{P}_i$  **puissance indiquée**, car c'est celle qui serait indiquée par un puissance-mètre sur la machine.

**Premier principe industriel :**

L'application du premier principe de la thermodynamique à un fluide en écoulement permanent à travers une machine lui fournissant une puissance indiquée  $\mathcal{P}_i$  et une puissance thermique  $\mathcal{P}_Q$  conduit à la relation suivante, appelée *premier principe industriel* :

$$\mathcal{D}_m [(h_s + e_{ps} + e_{cs}) - (h_e + e_{pe} + e_{ce})] = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_Q \quad (2)$$

où  $h$ ,  $e_{pe}$  et  $e_{ce}$  représentent respectivement l'enthalpie massique, l'énergie potentielle massique et l'énergie cinétique massique et  $\mathcal{D}_m$  le débit massique de l'écoulement.

Pour une machine thermique à plusieurs entrées (notées « e ») et plusieurs sorties (notées « s »), la relation devient :

$$\sum_{(s)} \mathcal{D}_{ms} (h_s + e_{ps} + e_{cs}) - \sum_{(e)} \mathcal{D}_{me} (h_e + e_{pe} + e_{ce}) = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_Q \quad (3)$$

**1.2 Deuxième principe industriel**

Reprenons le même système que celui de la section précédente en considérons que le carter est maintenu à la température constante  $T_0$ . Effectuons un bilan entropique :

▷

**Deuxième principe industriel :**

L'application du deuxième principe de la thermodynamique à un fluide en écoulement permanent à travers un organe maintenu à la température constante  $T_0$  et fournissant au fluide la puissance thermique  $\mathcal{P}_Q$  conduit à :

$$\mathcal{D}_m(s_s - s_e) = \sigma_{ech} + \sigma_c \quad \text{avec} \quad \underbrace{\sigma_c = \frac{\delta S_{ech}}{dt} = \frac{\mathcal{P}_Q}{T_0}}_{\text{quantité d'entropie échangée par unité de temps}} \quad \text{et} \quad \underbrace{\sigma_c = \frac{\delta S_c}{dt}}_{\text{quantité d'entropie créée par unité de temps}}$$

où  $s_e$  et  $s_s$  représentent l'entropie massique en entrée et en sortie, respectivement.

Pour une machine thermique à plusieurs entrées (notées « e ») et plusieurs sorties (notées « s »), la relation devient :

$$\sum_{(s)} \mathcal{D}_{ms} s_s - \sum_{(e)} \mathcal{D}_{me} s_e = \sigma_{ech} + \sigma_c \quad (4)$$

## 2 Etude de quelques dispositifs élémentaires

### 2.1 Compresseur calorifugé

Un compresseur est un organe permettant de comprimer un fluide, c'est-à-dire d'augmenter sa pression en diminuant éventuellement son volume. Deux dispositifs peuvent être utilisés :

- soit une roue à aubages tournant autour d'un arbre impose au fluide un écoulement axial qui le comprime ;
- soit le fluide est admis dans un cylindre afin d'être comprimé par un piston.

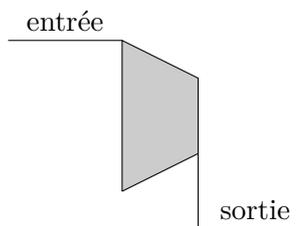


FIGURE 1 – Schéma d'un compresseur



FIGURE 2 – Roue à aubages à l'entrée d'un réacteur. La forme des aubages impose à l'air un mouvement axial, entraînant ainsi sa compression.

On fera en général les approximations suivantes :

- le fluide séjourne peu de temps dans le compresseur (fonctionnement adiabatique, on parle alors de compresseur calorifugé) ;
- on néglige les variations d'énergies potentielle et cinétique du fluide :  $\Delta e_p \sim 0$ ,  $\Delta e_c \sim 0$ .

Le premier principe industriel appliqué entre l'entrée et la sortie du compresseur calorifugé donne donc :

▷

Remarque : une compression optimale serait isotherme, on l'approche par une succession de compressions adiabatiques séparées par des refroidissements : compression étagée.

## 2.2 Turbine calorifugée

Il s'agit, à l'inverse du compresseur à roue, d'utiliser l'énergie du fluide en écoulement pour mettre en rotation la roue à aubages, solidaire d'un arbre et de récupérer ainsi un travail mécanique.

On distingue les turbines suivantes :

- turbine à gaz : détente du gaz à haute température et haute pression ;
- turbine hydraulique (type Kaplan, Pelton, ...) : température ordinaire, l'entraînement se fait par le flux d'eau.

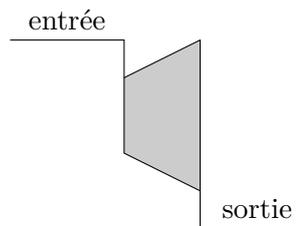


FIGURE 3 – Schéma d'une turbine

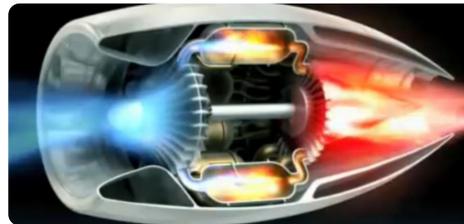


FIGURE 4 – Schéma d'un turboréacteur. Entre les deux roues à aubages (compresseur à gauche et turbine à droite), on peut visualiser l'arbre de couplage.

On fera en général les approximations suivantes :

- le fluide séjourne peu de temps dans la turbine (fonctionnement adiabatique, on parle alors de turbine calorifugée) ;
- on néglige les variations d'énergies potentielle et cinétique du fluide :  $\Delta e_p \sim 0$ ,  $\Delta e_c \sim 0$ .

Le premier principe industriel appliqué entre l'entrée et la sortie de la turbine calorifugée donne donc le même résultat que dans le cas du compresseur calorifugé :

$$\Delta h = w_i < 0 \quad (5)$$

$w_i$  est négatif car le fluide fournit du travail à la roue à aubages.

Remarque : Souvent, le travail nécessaire au fonctionnement d'un compresseur à roue peut être fourni par une turbine, l'ensemble étant alors couplé par un arbre commun. On parle alors de *turbocompresseur*, association qui est notamment utilisée dans les turboréacteurs, comme on peut le voir sur la figure (??).

## 2.3 Détendeur calorifugé à laminage

Contrairement à la turbine, le détendeur calorifugé à laminage ne contient aucune pièce mobile. La détente du fluide est imposée par un rétrécissement de l'écoulement, via un bouchon poreux, un tube capillaire ou encore une soupape ajustable. Ce type de dispositif étant bien moins complexes et bien moins chers qu'une turbine, ils sont très souvent utilisés, dans les réfrigérateurs par exemple.

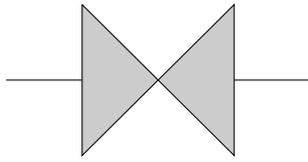


FIGURE 5 – Schéma d'un détendeur à laminage

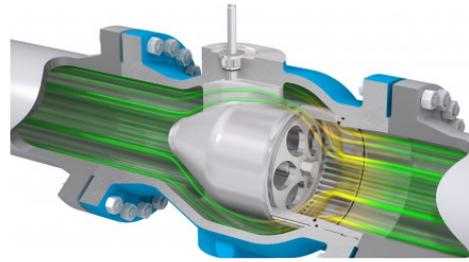


FIGURE 6 – Exemple de vanne de régulation. Le rétrécissement de l'écoulement conduit à une baisse de pression du fluide.

Ici encore, on considérera le dispositif calorifugé et on négligera les variations d'énergie cinétique et potentielle. L'application du premier principe industriel donne :

▷

La détente est isenthalpique. Une telle détente s'appelle une détente de JOULE-THOMSON. Dans le cas d'un gaz parfait, d'après la deuxième loi de JOULE ( $\Delta h = c_p \Delta T$ ), on a  $\Delta T = 0$ . Au contraire, un gaz réel est refroidi lors d'une telle détente.

## 2.4 Tuyère calorifugée

Une tuyère est un conduit profilé (convergent ou divergent suivant la vitesse d'écoulement, cf ex. « Tuyère supersonique ») permettant d'augmenter la vitesse en sortie d'un écoulement en diminuant sa pression ou sa température.



Dans ce type d'organe, les vitesses sont suffisamment élevées pour que le fluide n'ait pas le temps de réaliser d'échanges thermiques avec l'extérieur. Les tuyères peuvent donc être considérées comme calorifugées. En négligeant la variation d'énergie potentielle, appliquons le premier principe industriel :

▷

## 2.5 Mélangeur et séparateur calorifugés

Un *mélangeur* est un dispositif à plusieurs entrées et une sortie qui mélange les fluides d'entrée. Il ne possède pas de pièce mécanique mobile et il est le plus souvent calorifugé.

En négligeant les variations d'énergie cinétique et potentielle entre les entrées et la sortie, le premier principe industriel conduit permet d'écrire :

▷

A l'inverse, un *séparateur* est un dispositif comportant une entrée et plusieurs sorties. Il est utilisé pour séparer les différentes phases d'un fluide.

## 2.6 Echangeur thermique globalement calorifugé

Un *échangeur thermique* est un dispositif sans parties mobiles ( $w_i = 0$ ), permettant un échange thermique entre deux fluides circulant à contre-courant par diffusion thermique, sans qu'il y ait échange de matière, l'ensemble du dispositif étant considéré comme globalement calorifugé. Lorsque de plus, le fonctionnement est réversible, le fonctionnement est isobare (pas de pertes de charge).

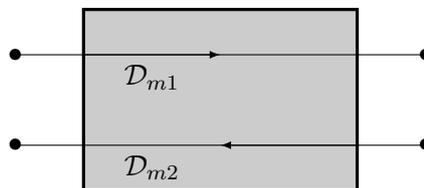


FIGURE 7 – Schéma d'un échangeur

Le premier principe industriel, en négligeant  $\Delta e_c$  et  $\Delta e_p$ , permet de lier les quantités de chaleur reçues par chaque fluide aux débits massiques respectifs :

▷

## 3 Machines thermiques (rappel)

### 3.1 Machines thermiques cycliques

Les machines thermiques ont été inventées dans le but d'effectuer des échanges énergétiques ciblés :

- un moteur doit fournir du travail à l'utilisateur ;
- un réfrigérateur ou un climatiseur doit prélever de l'énergie thermique à ce qu'il contient ;
- une pompe à chaleur doit puiser de l'énergie thermique à l'air extérieur pour chauffer l'intérieur d'une maison.

Les machines thermiques courantes (moteurs d'automobiles, réfrigérateurs, ...) fonctionnent de manière cyclique : le mécanisme revient périodiquement dans son état initial. On va donc se concentrer sur l'étude des évolutions cycliques.

Le fonctionnement d'une machine thermique peut généralement être schématisé par une succession de transformations d'un fluide, au cours desquelles celui-ci échange de l'énergie avec l'extérieur, sous forme

de travail et de transfert thermique avec des thermostats. Dans toute la suite du chapitre, les échanges d'énergie sont toujours orientés en convention récepteur : de l'extérieur vers le système (le fluide). Le signe de chacun des échanges d'énergie permet d'en déduire le sens réel :

diagramme  $\Sigma$  + sources de chaleurs

### 3.2 Distinction moteur / récepteur

On peut classer les machines thermiques en deux catégories, selon qu'elles fournissent ou reçoivent du travail (réellement, pas conventionnellement). Un moteur fournit effectivement du travail à l'extérieur. Un récepteur reçoit effectivement du travail de l'extérieur :

- moteur :  $W < 0$
- récepteur :  $W > 0$

Dans le diagramme de Watt, un cycle moteur correspond à un cycle parcouru dans le sens horaire. L'aire du cycle correspond au bilan du travail effectivement fourni lors d'un cycle :

On dessine un cycle parcouru dans le sens horaire.

transformation G->D ( $dV > 0$ ) :

$$\text{Aire sous la courbe} = \int P dV = \text{travail fourni}$$

transformation D->G ( $dV < 0$ ) :

$$\text{Aire sous la courbe} = - \int P dV = \text{travail reçu}$$

2 observations à faire :

- si le cycle est parcouru dans le sens horaire, le travail fourni est plus important : c'est un moteur ;
- l'aire du cycle est égale au travail effectivement fourni par la machine.

Dessiner aussi cycle anti-horaire (machine réceptrice)

De même, remarquons que dans le diagramme  $(T, S)$ , le cycle est décrit dans le sens horaire s'il est moteur et inversement :

On dessine un cycle parcouru dans le sens horaire.

transformation G->D ( $dS > 0$ ) :

$$\text{Aire sous la courbe} = \int T dS = \text{chaleur reçue de manière réversible}$$

transformation D->G ( $dS < 0$ ) :

$$\text{Aire sous la courbe} = - \int T dS = \text{chaleur fournie de manière réversible}$$

2 observations à faire :

- si le cycle est parcouru dans le sens horaire, la chaleur reçue est plus importante :  $Q < 0$ . Or  $W = -Q$ . C'est un moteur ;
- dans le cas d'un cycle réversible, l'aire du cycle est égale à la chaleur reçue par le système.

Dessiner aussi cycle anti-horaire (machine réceptrice)

### 3.3 Inégalité de Clausius

Une machine thermique est dite *polytherme* si le fluide circulant échange de l'énergie par transfert thermique avec plusieurs sources de chaleur. Elle est dite *monotherme* sinon. Elle est dite *ditherme* dans le cas d'échanges avec deux sources de chaleur.

Etablissons l'inégalité de Clausius qui correspond à l'expression du deuxième principe appliqué au cas d'une machine cyclique polytherme :

machine cyclique :

$$\begin{aligned}\Delta S &= 0 \\ S_e &= \sum_k \frac{Q_k}{T_k} \\ S_c &\geq 0 \\ \boxed{0 &\geq \sum_k \frac{Q_k}{T_k}}\end{aligned}$$

### Inégalité de Clausius :

L'inégalité de Clausius caractérise un système subissant une évolution cyclique polytherme :

$$0 \geq \sum_{k=1}^N \frac{Q_k}{T_k} \quad (6)$$

où  $Q_k$  représente le transfert thermique fourni au système par le  $k$ -ème thermostat à la température  $T_k$ . L'égalité correspond au cas limite de la transformation réversible.

## 3.4 Impossibilité d'un moteur cyclique monotherme - énoncé de Kelvin

Kelvin a énoncé le deuxième principe sous la forme suivante :

### Énoncé de Kelvin du deuxième principe :

Il n'existe pas de cycle moteur construit à partir d'une seule source d'énergie thermique.

Vérifions cette assertion en appliquant les deux premiers principes :

$$\begin{aligned}0 &= Q + W \\ 0 &\geq \frac{Q}{T} \\ \Rightarrow Q &\leq 0 \Rightarrow W \geq 0\end{aligned}$$

(nécessairement une machine réceptrice)

L'énoncé de Kelvin traduit la dissymétrie entre l'énergie thermique et l'énergie mécanique : il est impossible de convertir intégralement de l'énergie thermique en énergie mécanique de façon cyclique, c'est-à-dire selon une transformation dont le seul résultat serait cette conversion d'énergie.

Par exemple, on ne peut pas envisager de faire avancer un bateau uniquement en prélevant de l'énergie par transfert thermique à l'eau. Le premier principe ne l'interdit pas, le second l'interdit.

## 4 Machines thermiques cycliques dithermes (rappel)

### 4.1 Source froide et source chaude

La plupart des machines thermiques usuelles fonctionnent en utilisant deux thermostats à deux températures différentes. On appelle source chaude le thermostat de température la plus élevée ( $T_C$ ), et source froide le thermostat de température la plus basse ( $T_F$ ).

On notera  $Q_C$  le transfert thermique reçu par le système depuis la source chaude (orientation conventionnelle), et  $Q_F$  celui reçu depuis la source froide.

### 4.2 Classification des machines cycliques dithermes : diagramme de Raveau

A l'aide du premier principe appliqué à un cycle, montrons que pour une valeur donnée du travail on peut considérer  $Q_C$  comme une fonction de  $Q_F$  :

$$0 = Q_F + Q_C + W$$

$$Q_C = -(W + Q_F)$$

On peut représenter graphiquement les différentes machines cycliques dithermes envisageables : c'est le diagramme de Raveau ( $Q_C, Q_F$ ) :

En invoquant l'inégalité de Clausius, repérons la partie du diagramme correspondant à un fonctionnement possible :

$$0 \geq \frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C}$$

$$\frac{Q_C}{T_C} \leq -\frac{Q_F}{T_F}$$

$$\boxed{Q_C \leq -\frac{T_C}{T_F} Q_F}$$

(Rq : la droite  $-\frac{T_C}{T_F} Q_F$  est plus pentue que  $Q_C = -Q_F$ ).

En invoquant le premier principe, distinguer les deux parties du diagramme correspondant respectivement à un fonctionnement moteur ou récepteur :

$$W + Q_F + Q_C = 0$$

$$W > 0 \Rightarrow Q_F + Q_C < 0 \Rightarrow \boxed{Q_C < -Q_F}$$

récepteur : zones II, III et IV

$$W < 0 \Rightarrow \boxed{Q_C > -Q_F}$$

moteur : zone I; ( $Q_C < 0, Q_F > 0$ ) : le sens des transferts thermiques est spontané.

Pour un fonctionnement récepteur possible, repérons la partie du diagramme correspondant aux récepteurs utiles, i.e. qui inversent le sens spontané des transferts thermiques entre sources chaude et froide :

zone II :

$$Q_F < 0$$

$$Q_C > 0$$

même sens que le transfert spontané (inutile)

zone III :

$$Q_F < 0$$

$$Q_C < 0$$

Les deux sources jouent le même rôle (inutile)

zone IV :

$$Q_F > 0$$

$$Q_C < 0$$

Le sens des transferts thermiques n'est pas spontané (récepteur utile)

### 4.3 Efficacité d'une machine thermique

#### 4.3.1 Définition

##### Efficacité thermodynamique :

L'*efficacité thermodynamique*  $e$  d'une machine thermique (encore appelé *coefficient de performance* et noté C.O.P.) caractérise l'efficacité avec laquelle est réalisée la conversion d'énergie. Elle est définie par la relation :

$$e = \left| \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie coûteuse}} \right| \quad (7)$$

#### 4.3.2 Efficacité (ou rendement) d'un moteur ditherme

En appliquant le premier et le deuxième principe sur un cycle, montrons que l'efficacité d'un moteur ditherme est inférieure à une valeur que l'on précisera en fonction de  $T_F$  et  $T_C$  :

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

$$0 = Q_F + W + Q_C$$

Carnot-Clausius :

$$0 \geq \frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C}$$

$$0 \geq \frac{-W - Q_C}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C}$$

$$-\frac{W}{T_F} \leq Q_C \left( \frac{1}{T_F} - \frac{1}{T_C} \right)$$

$$e \leq e_{max} = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

Le cas de l'égalité n'est atteint que si l'évolution est réversible. Ce résultat est connu sous le nom de théorème de Carnot. Par ailleurs, l'efficacité d'un moteur ditherme étant toujours inférieure à 1, on l'appelle aussi rendement du moteur, noté  $\eta$ .

**Théorème de Carnot relatif au moteur :**

Le rendement d'un moteur cyclique ditherme est :

$$\eta \leq \eta_{max} = 1 - \frac{T_F}{T_C} \quad (8)$$

Le rendement maximal correspond à un moteur fonctionnant de manière réversible.

**4.3.3 Efficacité d'un réfrigérateur ditherme**

Un réfrigérateur a pour but de prélever de l'énergie thermique à une enceinte froide pour maintenir sa température à une valeur basse. Il rejette de l'énergie thermique dans une pièce déjà chaude. Ce transfert d'énergie d'une zone froide vers une zone chaude est contraire à ce qui se produirait spontanément. Il faut donc un apport d'énergie par un agent extérieur pour réaliser ce transfert. Cet apport d'énergie se fait sous forme mécanique : un compresseur fournit du travail au fluide qui circule dans la machine. C'est ce compresseur qui consomme de l'énergie électrique :

$$e = \frac{Q_F}{W}$$

Carnot-Clausius :

$$0 \geq \frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C}$$

premier principe :

$$\begin{aligned} 0 &= W + Q_F + Q_C \\ 0 &\geq \frac{Q_F}{T_F} - \frac{W + Q_F}{T_C} \\ Q_F \left( \frac{1}{T_F} - \frac{1}{T_C} \right) &\leq \frac{W}{T_C} \\ e &\leq \frac{T_F T_C}{(T_C - T_F) T_C} \end{aligned}$$

$$e \leq \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

$e$  peut être supérieur à 1.

**4.3.4 Efficacité d'une pompe à chaleur**

Une pompe à chaleur a pour but de prélever de l'énergie thermique à l'air extérieur à une maison (source froide) pour chauffer l'intérieur de la maison (source chaude). Ce transfert non spontané d'énergie thermique de la source froide vers la source chaude nécessite un travail.

efficacité :

$$e = \frac{Q_C}{W}$$

Carnot-Clausius :

$$\begin{aligned} 0 &\geq \frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} \\ 0 &\geq \frac{-W + Q_C}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} \\ Q_C \left( \frac{T_F - T_C}{T_F T_C} \right) &\leq -\frac{W}{T_F} \end{aligned}$$

$$e \leq \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

Rq : efficacité max si  $T_F = T_C$ .

#### 4.4 Machine ditherme réversible - Cycle de Carnot

Un cycle ditherme réversible est appelé *cycle de Carnot*.

Il faut que les échanges thermiques avec les thermostats se fassent de manière réversible :

- $T = T_C$  (isotherme) pendant échange avec  $S_C$
- $T = T_F$  (isotherme) pendant échange avec  $S_F$

En dehors de ces échanges :

$$Q_F = Q_C = 0$$

(évolutions adiabatiques et réversibles :  $S = cte$ )

Un cycle ditherme réversible doit être constitué de deux isothermes reliées par deux isentropiques (adiabatiques réversibles) :

Tracé  $p(V)$  : (rappel : pente adiabatique plus pentue)

Rq : aire du cycle faible.

Tracé  $TS$  : isothermes = droites horizontales et isentropiques = droites verticales. De plus, on a vu plus haut qu'un cycle moteur est aussi décrit par un parcours horaire dans le diagramme  $TS$ .