

## 1. Introduction.

### 1.1. Généralités.

Une machine thermique est un système où un fluide subit un cycle composé de plusieurs transformations. Au cours de ce cycle, le fluide reçoit de l'énergie thermique et/ou du travail de l'extérieur. Les échanges thermiques se font avec des sources de chaleur (par exemple l'air ambiant et l'intérieur d'un réfrigérateur pour le fluide de ce dernier, ...). Les moteurs thermiques, les réfrigérateurs, les pompes à chaleur, ... sont des machines thermiques que l'on va étudier.

On va s'attacher dans ce chapitre à modéliser d'un point de vu thermodynamique ces systèmes en utilisant le 1<sup>er</sup> principe et le 2<sup>nd</sup> principe de la thermodynamique. La théorie des machines thermiques a été posée au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle.

### 1.2. Principe de fonctionnement d'un réfrigérateur.

On va dans ce paragraphe étudier le fonctionnement d'un réfrigérateur fonctionnant dans une atmosphère à 20°C et ayant une température intérieure de 0°C. Ce réfrigérateur comprend grossièrement un compresseur, un détendeur et deux échangeurs thermiques :

- Le compresseur : permet de comprimer le fluide, c'est-à-dire d'augmenter sa pression. Le compresseur est alimenté par le secteur. C'est la pièce qui permet de donner du travail au fluide. On le trouve en général en bas au dos des réfrigérateurs domestiques :

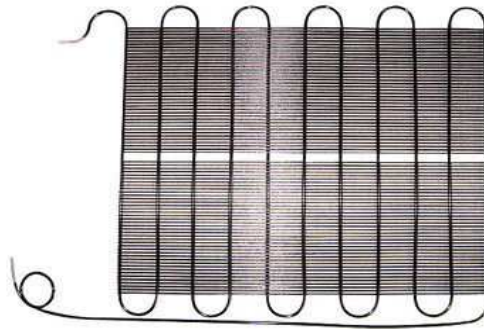


- Le détendeur : permet de détendre le fluide, c'est à dire d'abaisser sa pression. Il n'y a pas de pièce mobile dans ce système. En voici une image :



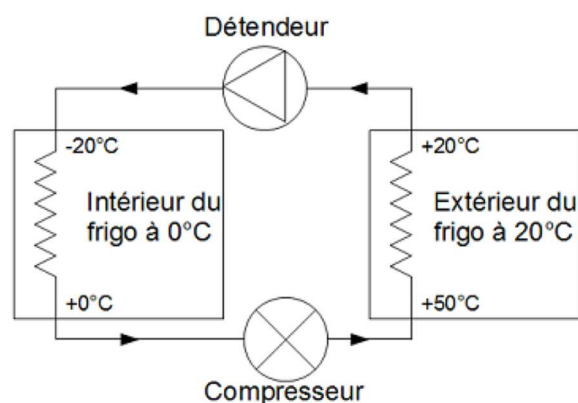
### Chap.4 : Etude des machines thermiques

- Les échangeurs thermiques situés au dos du réfrigérateur et à l'intérieur de ce dernier. Ils permettent les échanges thermiques entre le fluide et l'extérieur.  
 Pour l'échangeur intérieur appelé évaporateur, l'échange thermique se fait entre le fluide et l'intérieur du réfrigérateur.  
 Pour l'échangeur extérieur appelé condenseur, l'échange thermique se fait entre le fluide et l'air ambiant de la pièce où se trouve le réfrigérateur.  
 Voici une photo d'un échangeur extérieur que l'on trouve au dos des réfrigérateurs :



Dans un réfrigérateur, l'intérieur est plus froid que l'extérieur, l'énergie thermique va donc naturellement de l'extérieur vers l'intérieur du réfrigérateur. Le fluide en circulant va donc ''prendre'' de l'énergie à l'intérieur du réfrigérateur pour ''l'apporter'' à l'extérieur.

Voici un schéma global d'un réfrigérateur :



Le fluide se refroidit à l'extérieur du réfrigérateur, on le ressent en passant sa main derrière le réfrigérateur en fonctionnement. On admet que le refroidissement se passe très bien et que sa température en sortie de l'échangeur extérieur est égale à la température de l'air ambiant, c'est-à-dire 20°C.

Le fluide doit refroidir l'intérieur du réfrigérateur, il doit donc en entrant à l'intérieur avoir une température plus basse que l'intérieur du réfrigérateur. On supposera que sa température d'entrée est de -20°C, il a fallu abaisser la température du fluide entre la sortie de l'échangeur extérieur et l'entrée de l'échangeur intérieur. Cela est réalisé par le détendeur.

En circulant à l'intérieur du réfrigérateur, le fluide est réchauffé. On suppose que ce réchauffement se passe très bien et que sa température en sortie de cet échangeur est égale à la température de l'intérieur du réfrigérateur, c'est-à-dire 0°C.

**Chap.4 : Etude des machines thermiques**

Afin de pouvoir donner à l'air ambiant l'énergie accumulée lors du passage dans l'échangeur intérieur, il faut élever la température du fluide entre la sortie de l'échangeur intérieur et l'entrée de l'échangeur extérieur. C'est le compresseur qui réalise cette augmentation de température. On admet que la température en sortie du compresseur et en entrée de l'échangeur extérieur est 50°C. Le fluide circule alors dans l'échangeur extérieur et perd de l'énergie. A la sortie de cet échangeur, le cycle recommence.

Si on fait un résumé :

- Le fluide reçoit du travail mécanique de la part du compresseur afin d'élever sa température.
- Le fluide ''perd'' de l'énergie thermique en circulant à l'extérieur du réfrigérateur.
- Le fluide se détend dans le détendeur afin d'abaisser sa température,
- Le fluide ''gagne'' de l'énergie thermique en circulant à l'intérieur du réfrigérateur.

Tout au long du cycle le fluide échange de l'énergie thermique avec deux sources de chaleur, l'air extérieur et l'intérieur du frigo. Nous allons maintenant formaliser d'un point de vue thermodynamique les échanges d'énergie entre le fluide et l'extérieur en utilisant les 1<sup>er</sup> et 2<sup>nd</sup> principes de la thermodynamique.

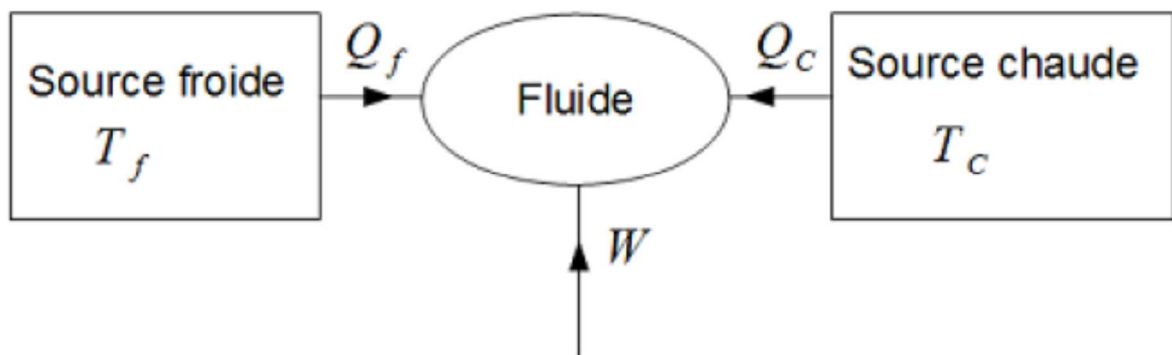
## 2. Application des deux principes de la thermodynamique.

### 2.1. Présentation.

On se place ici du point de vue du fluide, les énergies mises en jeu sont les énergies reçues par le fluide au cours d'un cycle. On présentera une étude de machines dithermes c'est-à-dire que le fluide échange de l'énergie avec seulement deux sources de chaleur, c'est par exemple le cas pour les réfrigérateurs, les pompes à chaleur ou les moteurs thermiques. Les principes et les raisonnements proposés pour les machines dithermes sont facilement transposables à des machines comportant plus de deux sources de chaleur.

On définit la source chaude comme la source de chaleur ayant la température la plus élevée et la source froide comme celle ayant la température la plus basse. On notera  $T_C$  et  $T_f$  leur température respective,  $Q_C$  et  $Q_f$  les **transferts thermiques reçus** par le fluide de la part de ces deux sources.

On a donc :



Ici  $T_C > T_f$  !!!

Pour l'exemple du réfrigérateur :

- La source chaude est l'air ambiant et on a  $Q_C < 0$
- La source froide est l'intérieur du réfrigérateur et on a  $Q_f > 0$
- Le travail reçu est positif car il faut alimenter par le secteur le réfrigérateur, on a  $W > 0$ .

On suppose de plus que sur un cycle les sources de chaleur qui interagissent avec le fluide (pour l'exemple précédent l'air ambiant et l'intérieur du réfrigérateur) se comportent comme des thermostats. On a en particulier :

$$\Delta S_{source} = \frac{Q_{source}}{T_{source}} \text{ avec } S_{source}^c = 0$$

## Chap.4 : Etude des machines thermiques

## 2.2. Bilan énergétiques et bilan entropique pour une machine ditherme.

1<sup>er</sup> principe :

$$\Delta U_{cycle} = W + Q_C + Q_f$$

Or  $U$  est une fonction d'état, on a donc  $\Delta U_{cycle} = 0$

On a donc

$$\boxed{W + Q_C + Q_f = 0}$$

2<sup>nd</sup> principe :

$$\Delta S_{cycle} = S^e + S^c$$

Avec  $S^e = \frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_f}{T_f}$  et  $S^c \geq 0$

Or  $S$  est une fonction d'état, on a donc  $\Delta S_{cycle} = 0$

Donc  $S^e + S^c = 0$  or  $S^c \geq 0$  donc  $S^e \leq 0$

On a donc

$$\boxed{\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0}$$

N.B.

- Cette inégalité est connue sous le nom d'**inégalité de Clausius**.
- Le moteur monotherme n'existe pas.  
En effet si on considère une machine monotherme de température  $T$ , les relations précédentes deviendraient :

$$\circ \quad W + Q = 0$$

$$\circ \quad \frac{Q}{T} \leq 0$$

Donc nécessairement  $Q \leq 0$  et donc  $W = -Q \geq 0$ , cette machine ne peut donc être un moteur ( $W \leq 0$ ) car dans un moteur le fluide globalement fourni du travail mécanique à l'extérieur.

## Chap.4 : Etude des machines thermiques

## 2.3. Classification des machines dithermes

**Moteur thermique :**  $W < 0$ , le système fournit à l'extérieur du travail mécanique. Pour ce faire, il faut avoir  $Q_C > 0$  et  $Q_f < 0$ , cela signifie que la différence entre l'énergie thermique reçue de la part de la source chaude et l'énergie thermique reçue de la part de la source froide est convertie en travail.

**Les réfrigérateurs et les pompes à chaleur :**  $W > 0$ ,  $Q_C < 0$  et  $Q_f > 0$ . Le travail sert à inverser le sens naturel des échanges thermiques, grâce à lui on prélève de l'énergie à la source froide pour en donner à la source chaude. Un réfrigérateur a pour fonction de refroidir la source froide et la pompe à chaleur a pour fonction de chauffer la source chaude.

**Equilibreur thermique :**  $W > 0$ , le travail reçu sert à accélérer l'échange naturel d'énergie thermique entre la source chaude ( $Q_C > 0$ ) et la source froide ( $Q_f > 0$ ). La machine thermique ici est un comme par exemple un ventilateur de véhicule automobile.

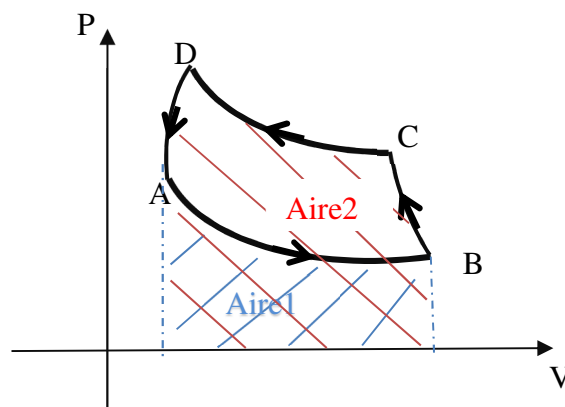
Si  $W > 0$ ,  $Q_C < 0$  et  $Q_f < 0$ . Le travail sert à chauffer simultanément la source froide et la source chaude. Ce type de fonctionnement ne présente pas d'intérêt pratique.

3. Cycle de Carnot

Par définition un cycle de Carnot est un cycle thermodynamique théorique composé de 2 isothermes et de 2 adiabatiques (Ce cycle est réversible).

## 3.1. Représentation dans un diagramme de Clapeyron

La représentation du cycle de Carnot dans un diagramme de Clapeyron ( $V$  en abscisse,  $P$  en ordonnée), permet de "visualiser" le travail reçu par le système au cours d'un cycle réversible.



- La courbe AB représente une détente isotherme réversible, le travail correspond à l'aire 1, il est négatif  $\rightarrow W_{AB} = -\text{Aire 1}$

**Chap.4 : Etude des machines thermiques**

- La courbe BC représente une compression adiabatique réversible
- La courbe CD représente une compression isotherme réversible, le travail correspond à l'aire 2, il est positif  $\rightarrow W_{CD} = \text{Aire 2}$
- La courbe DA représente une compression adiabatique réversible

Le travail du cycle correspond alors à l'aire interne du cycle :

$$W_{\text{cycle}} = W_{AB} + W_{CD} = -\text{Aire 1} + \text{Aire 2}$$

$$W_{\text{cycle}} > 0$$

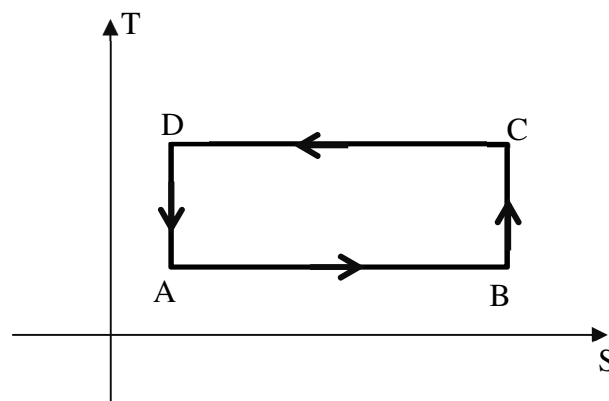
Le travail du cycle étant positif, on parle de cycle récepteur, c'est le cas d'une pompe à chaleur ou d'un réfrigérateur.

Remarque :

Le cycle orienté dans le sens BADC correspond à un moteur ( $W_{\text{cycle}} < 0$ )

**3.2. Représentation dans un diagramme entropique**

La représentation du cycle de Carnot dans un diagramme entropique (S en abscisse, T en ordonnée) permet de "visualiser" la quantité de chaleur reçue par le système au cours d'un cycle réversible.



- La courbe AB représente une détente isotherme réversible, la chaleur correspond à l'aire 1 sous la courbe AB,  $\rightarrow Q_{AB} = \text{Aire 1} > 0$
- La courbe BC représente une compression adiabatique réversible, à entropie constante
- La courbe CD représente une compression isotherme réversible, la chaleur correspond à l'aire 2,  $\rightarrow Q_{CD} = -\text{Aire 2} < 0$
- La courbe DA représente une compression adiabatique réversible, à entropie constante

On a alors  $Q_{\text{cycle}} < 0$ .

Etant donné que la variation d'énergie interne d'un cycle est nulle, on a alors  $W_{\text{cycle}} = -Q_{\text{cycle}}$ .

Ce résultat est cohérent avec ce qu'on a trouvé au paragraphe précédent ( $W_{\text{cycle}} > 0$ ).

#### 4. Etude du moteur thermique ditherme.

##### 4.1. Présentation.

Le moteur thermique ditherme permet de produire de l'énergie mécanique grâce à deux sources de chaleur. Il en existe une multitude de type (moteur diesel, moteur à explosion, ...), vous trouverez dans les vidéos suivantes le principe de fonctionnement :

- Du moteur diesel :  
<https://www.youtube.com/watch?v=zWV1OSzKkpk>
- Du moteur à explosion :  
<https://www.youtube.com/watch?v=qY-thJZAPeQ>

Pour ces moteurs à carburant, le fluide étudié est l'air ou le mélange air-carburant, on modélise le transfert reçu lors de la combustion par une source chaude fournissant de l'énergie thermique  $Q_C$  ( $Q_C > 0$ ), le fluide fournit du travail mécanique  $W$  à un arbre moteur ( $W < 0$ ) et doit être refroidi au contact de la source froide qui est l'atmosphère ( $Q_f < 0$ ).

On définit le **rendement du moteur** par :

$$\eta = \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie dépensée pour le fonctionnement}}$$

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

$W$  est précédé par un signe moins pour avoir une grandeur positive.

Plus ce rapport est grand meilleure est l'efficacité du moteur.

##### 4.2. Etude du rendement d'un moteur thermique

On a défini le rendement par  $\eta = -\frac{W}{Q_C}$

Or  $W = -Q_C - Q_f$

On a donc  $\eta = \frac{Q_C + Q_f}{Q_C} = 1 + \frac{Q_f}{Q_C}$

Or  $\frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} \leq 0$ , on a donc  $\frac{Q_f}{Q_C} \leq -\frac{T_f}{T_C}$

Donc

$$\boxed{\eta \leq 1 - \frac{T_f}{T_C} = \eta_{\max}}$$



## Chap.4 : Etude des machines thermiques

## N.B.

- Le rendement  $\eta$  est donc majoré par une valeur maximale  $\eta_{max}$  qui ne dépend que des températures de la source froide et de la source chaude. Cette limitation est indépendante du système thermodynamique en évolution cyclique et de ces détails de fonctionnement. Elle provient de l'inégalité de Clausius et donc du 2<sup>nd</sup> principe.
- L'efficacité maximale serait atteinte pour un cycle de transformations toutes réversibles.
- Le rendement est inférieur à 1, ce qui est normal car l'énergie sortant du système sous forme mécanique ne peut être supérieure à l'énergie qui y entre !!!
- Application numérique avec les valeurs de températures suivantes :

$$\begin{cases} T_f = 20^\circ C = 293 K \\ T_c = 500^\circ C = 773 K \end{cases}$$

On trouve  $\eta_{max} = 0,62$

- En pratique, on a pour les automobiles, dans des conditions bien particulières les rendements suivants :
  - Essence :  $35\% = 0,35$
  - Diesel :  $45\% = 0,45$

En utilisation courante, les moteurs ont des rendements compris entre 15 et 26%.

## 5. Etude du réfrigérateur.

### 5.1. Présentation.

Le réfrigérateur a pour fonction grâce à un travail reçu de prendre de l'énergie thermique à l'intérieur pour la rejeter à l'extérieur. La description du fonctionnement de ce type de système a été faite dans l'introduction de ce chapitre. Nous avons :

$$\begin{cases} W > 0 \\ Q_f > 0 \\ Q_c < 0 \end{cases}$$

Nous pouvons définir **l'efficacité du réfrigérateur** par :

$$e = \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie dépensée pour le fonctionnement}}$$

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

C'est comme pour le rendement du moteur thermique ditherme le rapport entre l'énergie liée à la fonction (ici refroidir la source froide) et l'énergie dépensée pour le fonctionnement (ici  $W$  car il faut alimenter le compresseur avec de l'énergie électrique). Plus ce rapport est grand, plus le réfrigérateur est performant.

### 5.2. Etude de l'efficacité d'un réfrigérateur.

On a  $e = \frac{Q_f}{W}$  avec  $W = -Q_c - Q_f$

$$\text{Soit } e = -\frac{Q_f}{Q_c + Q_f} = -\frac{1}{1 + \frac{Q_c}{Q_f}}$$

$$\text{Or } \frac{Q_c}{Q_f} \leq -\frac{T_c}{T_f}, \text{ donc } 1 + \frac{Q_c}{Q_f} \leq 1 - \frac{T_c}{T_f} = \frac{T_f - T_c}{T_f}$$

$$\text{Donc } \frac{1}{1 + \frac{Q_c}{Q_f}} \geq \frac{T_f}{T_f - T_c}$$

$$\text{Soit } e = -\frac{1}{1 + \frac{Q_c}{Q_f}} \leq -\frac{T_f}{T_f - T_c} = \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

Donc finalement :

## Chap.4 : Etude des machines thermiques

$$e \leq \frac{T_f}{T_c - T_f} = e_{\max}$$

**N.B.**

- Comme pour le moteur thermique ditherme, l'efficacité d'un réfrigérateur est limitée par une efficacité maximale qui ne dépend que des températures de la source froide et de la source chaude. Cette limitation est indépendante du système thermodynamique en évolution cyclique et de ces détails de fonctionnement. Elle provient de l'inégalité de Clausius et donc du 2<sup>nd</sup> principe.
- L'efficacité maximale serait atteinte pour un cycle de transformations toutes réversibles.
- L'efficacité d'un réfrigérateur peut être supérieure à 1, ce qui est possible car ici le travail sert à effectuer le transfert de l'énergie récupérée à la source froide vers la source chaude.
- Application numérique avec les valeurs de températures suivantes :

$$\begin{cases} T_f = 0^\circ\text{C} = 273\text{ K} \\ T_c = 20^\circ\text{C} = 293\text{ K} \end{cases}$$

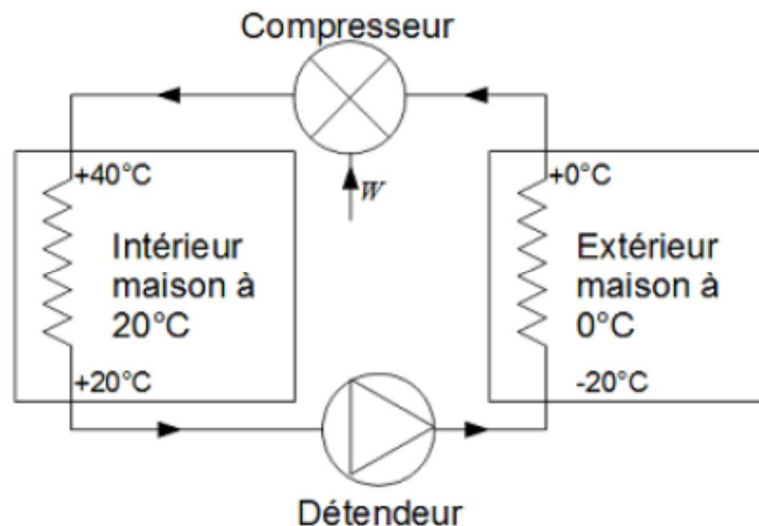
On trouve  $e_{\max} = 13,65$

- En pratique, on considère que l'efficacité réelle est environ 50% de l'efficacité théorique.

## 6. Etude de la pompe à chaleur.

### 6.1. Présentation.

La pompe à chaleur est un système de chauffage par exemple d'une habitation qui a pour fonction grâce à un travail reçu de prendre de l'énergie thermique à l'extérieur pour l'apporter à l'intérieur. Son nom "pompe à chaleur" vient du fait que le fluide va "pomper" l'énergie disponible à l'extérieur. De la même façon que pour le réfrigérateur, on peut proposer un schéma simplifié d'une pompe à chaleur :



Le fluide doit pomper l'énergie stockée par exemple dans l'air (à 0°C), pour cela il doit avant d'entrer en contact avec l'extérieur de l'habitation avoir une température inférieure à celle de l'air, il subit donc une détente après avoir chauffé la maison. Afin de pouvoir donner de l'énergie thermique à l'intérieur de l'habitation pour la chauffer, il doit avoir une température supérieure à celle de l'intérieur de l'habitation (+20°C), il doit donc être comprimé à l'aide d'un compresseur.

On retrouve exactement la même structure que pour un réfrigérateur, mais la fonction d'une pompe à chaleur n'est pas la même que celle de ce dernier. Nous avons alors comme pour le réfrigérateur :

$$\begin{cases} W > 0 \\ Q_f > 0 \\ Q_c < 0 \end{cases}$$

Nous pouvons définir **l'efficacité de la pompe à chaleur** par :

$$e = \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie dépensée pour le fonctionnement}}$$

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

Le signe – est là pour avoir une grandeur positive.

**Chap.4 : Etude des machines thermiques**

C'est comme pour le rendement du moteur thermique ditherme c'est le rapport entre l'énergie liée à la fonction (ici chauffer la source chaude) et l'énergie dépensée pour le fonctionnement (ici  $W$  car il faut alimenter le compresseur avec de l'énergie électrique).

Plus ce rapport est grand, plus la pompe à chaleur est performante.

Vous trouverez un lien décrivant le fonctionnement d'une pompe à chaleur ci-dessous :

<https://www.youtube.com/watch?v=n-1RCwkiUvo>

**6.2. Etude de l'efficacité d'une pompe à chaleur.**

On a  $e = -\frac{Q_c}{W}$  avec  $W = -Q_c - Q_f$

$$\text{Soit } e = +\frac{Q_c}{Q_c + Q_f} = \frac{1}{1 + \frac{Q_f}{Q_c}}$$

$$\text{Or } \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0 \text{ soit } \frac{Q_f}{Q_c} \geq -\frac{T_f}{T_c}, \text{ donc } 1 + \frac{Q_f}{Q_c} \geq 1 - \frac{T_f}{T_c} = \frac{T_c - T_f}{T_c}$$

$$\text{Donc } e = \frac{1}{1 + \frac{Q_f}{Q_c}} \leq \frac{T_c}{T_c - T_f}$$

Donc finalement :

$$e \leq \frac{T_c}{T_c - T_f} = e_{\max}$$

**N.B.**

- Comme pour le moteur thermique ditherme et le réfrigérateur, l'efficacité de la pompe à chaleur est limitée par une efficacité maximale qui ne dépend que des températures de la source froide et de la source chaude. Cette limitation est indépendante du système thermodynamique en évolution cyclique et de ces détails de fonctionnement. Elle provient de l'inégalité de Clausius et donc du 2<sup>nd</sup> principe.
- L'efficacité maximale serait atteinte pour un cycle de transformations toutes réversibles.
- L'efficacité d'une pompe à chaleur peut être supérieure à 1, ce qui est possible car ici le travail sert à effectuer le transfert de l'énergie récupérée à la source froide vers la source chaude.
- Application numérique avec les valeurs de températures suivantes :

$$\begin{cases} T_f = 0^\circ\text{C} = 273\text{ K} \\ T_c = 20^\circ\text{C} = 293\text{ K} \end{cases}$$

On trouve  $e_{\max} = 14,65$

- En pratique, l'efficacité réelle est comprise entre 3 et 5.
- En pratique la pompe à chaleur permet de faire des économies pour chauffer une habitation. En effet avec une efficacité de 3, on paie à EDF 33% de l'énergie qui est fournie à l'habitation pour la chauffer alors qu'avec un chauffage électrique classique on paie 100% de l'énergie de chauffage.