

## Machines thermiques



Notions et contenu	Capacités exigibles
<b>Machines thermiques</b>	
<p>Application du premier principe et du deuxième principe aux machines thermiques cycliques dithermes: rendement, efficacité, théorème de Carnot.</p>	<p>Donner le sens réel des échanges énergétiques pour un moteur ou un récepteur thermique ditherme.</p> <p>Définir un rendement – ou une efficacité – et le relier aux énergies échangées au cours d’un cycle.</p> <p><b>Démontrer et utiliser le théorème de Carnot.</b></p> <p>Analyser un dispositif concret et le modéliser par une machine cyclique ditherme.</p> <p>Citer quelques ordres de grandeur des rendements des machines thermiques réelles actuelles.</p> <p><b>Mettre en œuvre une machine thermique cyclique ditherme.</b></p>

Une machine thermique est un dispositif destiné à réaliser une **conversion entre travail et chaleur**. Historiquement, les premiers principes de la thermodynamique proviennent d'une volonté d'**amélioration des performances de ces machines thermiques**.

## I PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

### I-1. Principe général

Cherchant à réaliser des échanges énergétiques de diverses natures, on emploie un **fluide** (air, réfrigérant ...) qui circule dans des tuyaux et peut :

- être mis en contact avec des milieux de température plus ou moins élevée (modélisés par des **thermostats**)

- **recevoir du travail** par le biais d'un compresseur (pour augmenter la pression) ou au contraire **en donner** en entraînant une hélice ou une turbine.

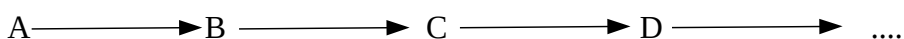
Ces machines sont en général **cycliques** : après un régime transitoire, le fluide d'une machine revient exactement dans le même état : ceci est très bien vérifié pour un réfrigérateur (une fuite du réfrigérant entraînant une efficacité moindre, voire un arrêt définitif).

Cependant, de nombreux moteurs admettent de l'air "frais" : ce sont des systèmes ouverts, étudiés en deuxième année.

On considère par la suite des systèmes cycliques fermés en contact avec différents thermostats.

### Etude d'un cycle :

le cycle **AVANT** de démarrer le problème



- Repérer dans le texte les **paramètres d'état P, V, T connus**, noter les sous chaque état ou dans un tableau .

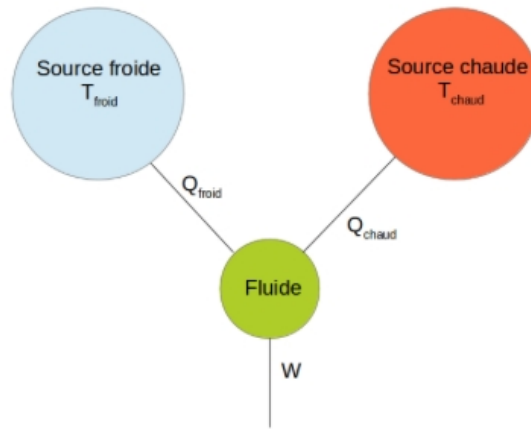
- Repérer dans le texte les **caractéristiques connues des transformations**, noter-les au-dessus des flèches.

Cycle décrit dans le sens des aiguilles d'une **montre** = cycle **moteur**  $W < 0$ . Sens inverse, cycle récepteur.

$$\text{Efficacité ou rendement} = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie coûteuse}}$$

## I-2. Principes de la thermodynamique (bilan énergétique et entropique)

On peut modéliser les différents échanges d'énergie au cours du cycle d'un fluide de la manière suivante :



Selon le signe de  $W$ , on distingue deux types de machines :

- les machines **réceptrices** ( $W > 0$ ) telles que les machines frigorifiques ou pompes à chaleur.
- les **moteurs** thermiques ( $W < 0$ ) ayant pour but de fournir un travail mécanique.

Mais de manière générale, on peut appliquer les deux premiers principes de la thermodynamique :

**Premier principe** :  $\Delta U = W + Q_1 + Q_2 + \dots$  et  $\Delta U = 0$  (**transformation cyclique**)

$$W + Q_1 + Q_2 + \dots = 0$$

$U$  est une fonction d'état, ne dépendant que de l'état du fluide, et non du type des transformations effectuées.

Cette relation traduit la **conservation des énergies apportées ou cédées au fluide au cours d'un cycle**.

**Second principe**:  $\Delta S = S_{ech} + S_{créée} = \sum \frac{Q_i}{T_i} + S_{créée}$  et  $\Delta S = 0$  (**transformation cyclique**)

$$\sum \frac{Q_i}{T_i} + S_{créée} = 0 \quad \text{or} \quad S_{créée} \geq 0 \quad \text{d'où pour que la somme des deux termes soit nulle, on doit avoir}$$

$$\sum \frac{Q_i}{T_i} \leq 0 \quad . \quad \sum \frac{Q_i}{T_i} \leq 0 \quad \text{Inégalité de Clausius}$$

C'est  $S_{créée}$  (notée aussi  $S_{création}$ ) en particulier qui va limiter les rendements des machines.

Il y aura égalité:  $\sum \frac{Q_i}{T_i} = 0$  dans le cas d'un fonctionnement réversible.

### I-3. Cas de la machine monotherme

Le cas le plus simple serait de considérer un **unique** thermostat.

Les deux principes donnent :  $W + Q_1 = 0$  (1) et  $\frac{Q_1}{T_1} \leq 0$  (2).

La relation (2) implique  $Q_1 \leq 0$  et par conséquent, comme  $W + Q_1 = 0$ ,  $W \geq 0$ .

**Une machine monotherme est forcément réceptrice ( $W \geq 0$ ).**

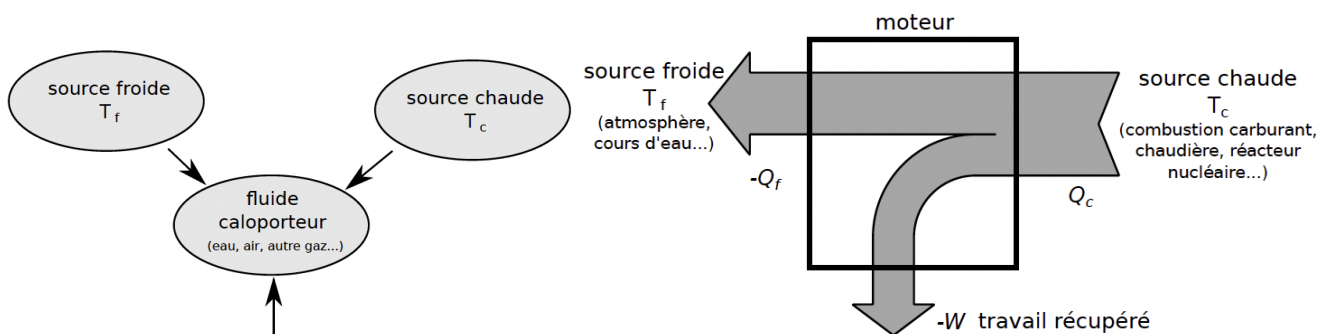
Par exemple un radiateur électrique convertit intégralement la puissance électrique en pertes par effet Joule. Mais le contraire est impossible.

Par la suite, on va donc s'intéresser à des **machines dithermes**, c'est-à-dire dont le fluide peut être en contact avec **deux thermostats**, l'un appelé "**source chaude**" de température  $T_C$  et l'autre "**source froide**" de température  $T_F$ .

## II LES MOTEURS DITHERMES

### II-1. Construction du moteur "parfait"

#### a) Echanges d'énergie



► Compléter le diagramme avec  $W$ ,  $Q_f$ ,  $Q_c$  et leurs signes.

Un moteur ditherme reçoit un transfert thermique de la source chaude  $Q_C > 0$  et cède un transfert thermique à la source froide  $Q_F < 0$ . Le sens des échanges de chaleur est le sens naturel.

Moteur implique :  $W \leq 0$

Démonstration (pas à savoir):

Les deux principes de la thermodynamique nous donnent:

$W + Q_C + Q_F = 0$  (1) et  $Q_C / T_C + Q_F / T_F \leq 0$  (2).

Or  $W \leq 0$  (moteur) d'où  $Q_C + Q_F \geq 0$  pour pouvoir avoir (1) vérifiée et  $Q_F = -W - Q_C$

$Q_C / T_C + Q_F / T_F \leq 0$  implique :  $Q_C / T_C \leq - Q_F / T_F$  et avec  $Q_F = - W - Q_C$ , on obtient :

$$Q_C / T_C \leq - (-W - Q_C) / T_F \text{ d'où } - Q_C / T_C + Q_C / T_F \geq - W / T_F \quad Q_C (1/T_F - 1/T_C) \geq - W / T_F$$

$W \leq 0$  et comme  $T_C > T_F$  alors  $(1/T_F - 1/T_C) \geq 0$  et donc  $Q_C \geq 0$  (chaleur reçue de la source chaude)

b) Exemples



**cycle de Beau de Rochas**

On cherche à construire le cycle d'un moteur optimisé, à partir d'un fluide simple qu'est un gaz parfait. Pour échanger du travail avec la machine, il paraît naturel d'employer des **transformations adiabatiques réversibles**, soit **isentropiques** : on échange uniquement du travail et on s'assure de ne pas avoir de pertes du fait d'une irréversibilité mécanique.

On effectue donc :

une compression isentropique au cours de laquelle le fluide reçoit du travail (A-B).

une détente isentropique au cours de laquelle il en cède (C-D).

Pour que le travail global soit moteur, **la détente doit se faire à plus haute température que la compression**. On peut refermer le cycle de plusieurs façons, la plus naturelle étant une évolution **isochore** : on aboutit au cycle dit de Beau de Rochas, où chaque étape correspond un échange bien précis d'énergie.

**Cycle de Beau de Rochas**

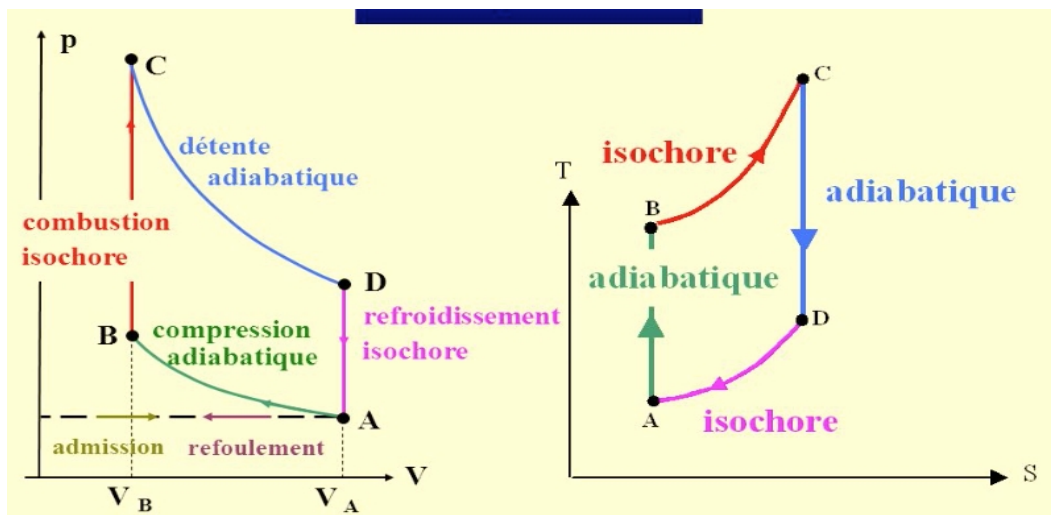
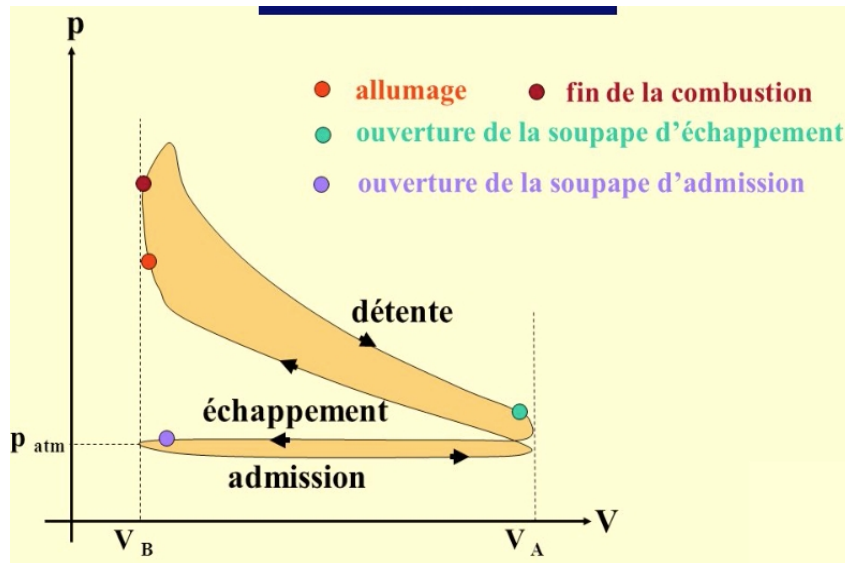


Diagramme de Clapeyron

Diagramme entropique

## Diagramme réel



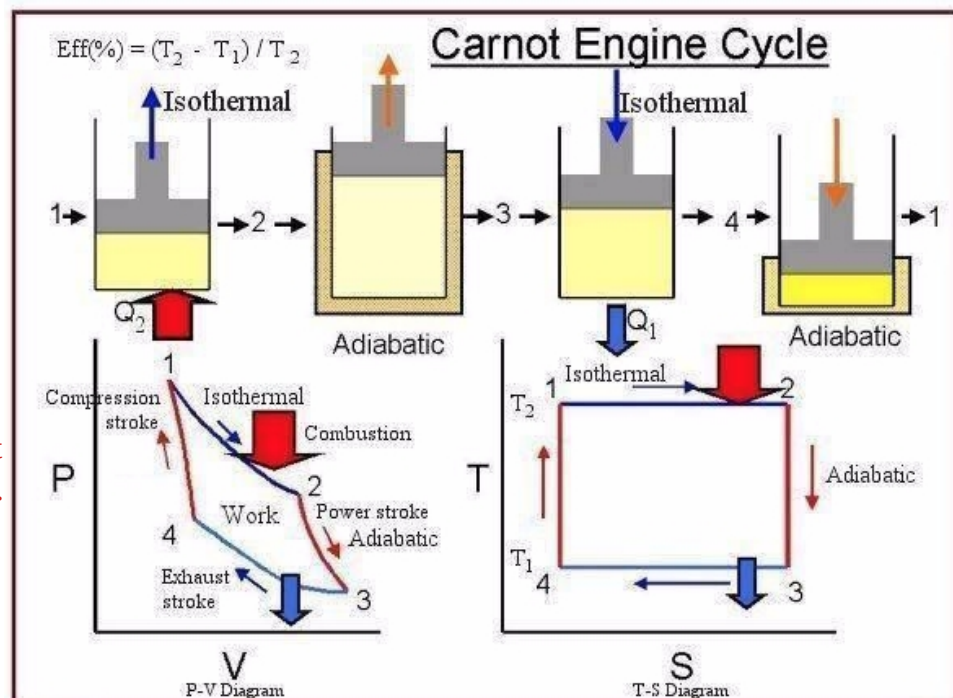
**Rappel:** le travail fourni par le moteur durant un cycle correspond à l'aire du cycle dans un diagramme en coordonnées P-V.

Cependant le rendement n'est pas le meilleur car les évolutions isochores ne sont pas réversibles, vu qu'il y a à chaque fois **déséquilibre thermique entre le fluide et les thermostats**. On peut alors chercher à optimiser les pertes vers la source froide avec le **cycle de Carnot**.

L'idée est de rendre les transferts thermiques réversibles. La solution la plus simple consiste alors à considérer des évolutions **isothermes** lors du contact avec les thermostats, et fermer le cycle à l'aide de transformations **adiabatiques réversibles**.



Il s'agit d'un cycle idéal, c'est celui ayant le meilleur rendement.



## II-2. Rendement de Carnot

Le rendement d'un moteur:

il correspond au rapport entre l'énergie utile, ici  $W$  et l'énergie coûteuse, ici l'apport énergétique de la source chaude  $Q_C$

soit, avec un signe - car  $W < 0$  ( et le rendement est positif) :  $\eta = \frac{-W}{Q_C}$

Démonstration à connaître (rendement du cycle de Carnot)

D'après le premier principe,  $W = - (Q_C + Q_F)$  d'où :  $\eta = \frac{Q_C + Q_F}{Q_C} = 1 + \frac{Q_F}{Q_C}$

puis à l'aide du second principe, comme  $\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0$  alors  $\frac{Q_F}{T_F} \leq -\frac{Q_C}{T_C}$

et donc  $\frac{Q_F}{Q_C} \leq -\frac{T_F}{T_C}$  soit finalement :  $\eta \leq 1 - \frac{T_F}{T_C}$  ou encore  $\eta \leq \eta_C$  avec  $\eta_C = 1 - \frac{T_F}{T_C}$

où l'on peut montrer que  $\eta_C$  est le rendement du cycle réversible, donc du cycle de Carnot. Ce rendement ne dépend juste que des températures des sources, on a donc intérêt à **augmenter le plus possible l'écart de température** entre les deux sources.

Un moteur ditherme fonctionnant entre une source chaude de température  $T_C$  et une source froide de température  $T_F$  possède un rendement inférieur ou égal à celui d'une machine réversible.

$$\eta_C = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

Le résultat obtenu par Carnot est fondamental.

Quelle que soit la technologie utilisée, on ne peut obtenir une efficacité plus grande que celle de Carnot. Théorème de Carnot (1824).

**Exemple :**

Prenons le cas d'une turbine de centrale nucléaire :  $T_C = 325^\circ\text{C}$  est la température de la vapeur d'eau tandis que la source froide est l'eau d'une rivière à  $T_F = 25^\circ\text{C}$ .

**Attention, il faut mettre les températures en Kelvin lors d'une application numérique**

On trouve  $\eta_C = 0,5$ .

En pratique il est plutôt de l'ordre de 30 à 40% en raison des irréversibilités et de diverses pertes.

## II-3. Exemple du moteur à essence (4 temps)

### a) Principe

Il s'agit du moteur à essence, encore appelé moteur à explosion (car nécessitant une bougie pour provoquer l'inflammation du mélange air-carburant). Conçu pour la première fois par l'ingénieur français Alphonse Eugène Beau de Rochas, il fut présenté pour la première fois lors de l'exposition universelle à Paris (1890) par l'ingénieur allemand N. Otto qui réalise ce moteur.

La source chaude est ici la réaction chimique interne de la combustion d'hydrocarbures (prévus pour supporter une forte compression sans s'enflammer de manière spontanée). Il se forme majoritairement du  $\text{CO}_2$  et de l'eau (mais également des résidus de combustion incomplète).

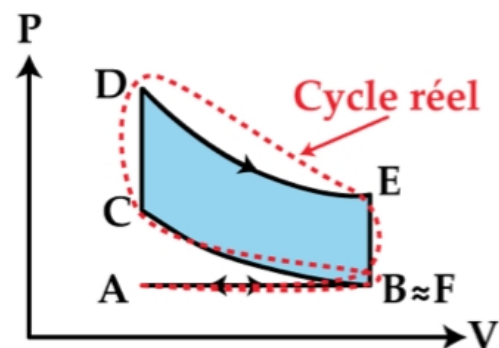
La source froide est l'atmosphère extérieure.

D'un point de vue mécanique, la chambre est constituée d'un **piston** qui se déplace suite à l'explosion du mélange, la différence de volume entre la position la plus basse et la plus haute constitue la **cylindrée** du moteur. Pour convertir ce mouvement de translation en un mouvement de rotation, le piston est relié à une bielle et une manivelle (voir cours de S.I.).

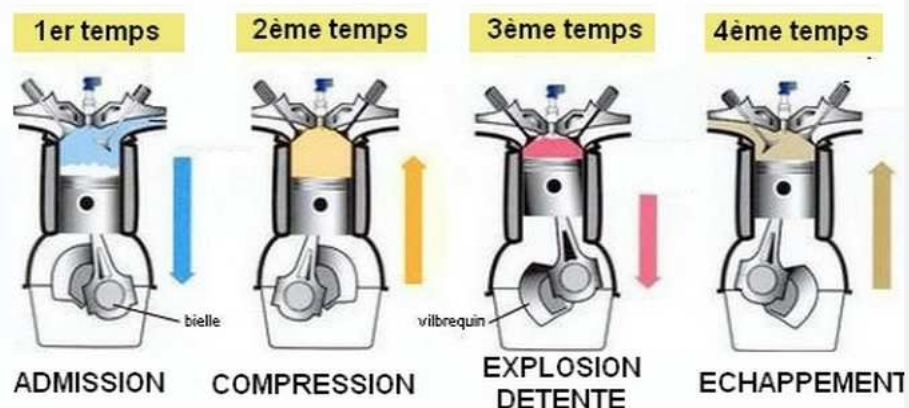
D'un point de vue thermodynamique, on distingue plusieurs transformations (qui ne coïncident pas complètement avec les 4 temps).

Vidéo: <https://youtu.be/X0J-wCZXj0w>

- **Premier temps** : Admission du mélange air/essence (AB)
- **Deuxième temps** : Compression, modélisée par une adiabatique réversible (BC)
- **Troisième temps** : Combustion (isochore CD), suivi d'une détente (adiabatique réversible DE)
- **Quatrième temps** : Ejection des gaz (ouverture d'une soupape EF) très rapide (donc isochore), suivi d'un refoulement du gaz chaud (FA)



**Remarque** : A noter qu'une partie du cycle se déroule avec un système ouvert, que l'on ne peut pas modéliser cette année.



## b) Le rendement

On trouve par le calcul:  $\eta = 1 - (V_B/V_C)^{1-\gamma}$

A.N.:  $V_B/V_C = 10$  et  $\gamma = 1,4$  donnent  $\eta = 60 \%$

Les rendements réels sont moins importants plutôt 30 ou 40%.



**Siegfried Marcus, un Allemand d'origine juive, vivant en Autriche.**



Entre 1864 et 1870, il travaille sur au moins quatre véhicules différents.

Il conçoit ses propres moteurs deux-temps à combustion interne et ses propres châssis. À l'époque, la communauté scientifique le reconnaît comme **le père de l'automobile moderne**. Marcus a découvert le benzène, premier carburant détonnant à grande efficacité dans les moteurs à explosion. Il a aussi déposé plusieurs brevets.

## III MACHINES RECEPTRICES

### III-1. Principe de fonctionnement

#### a) Généralités

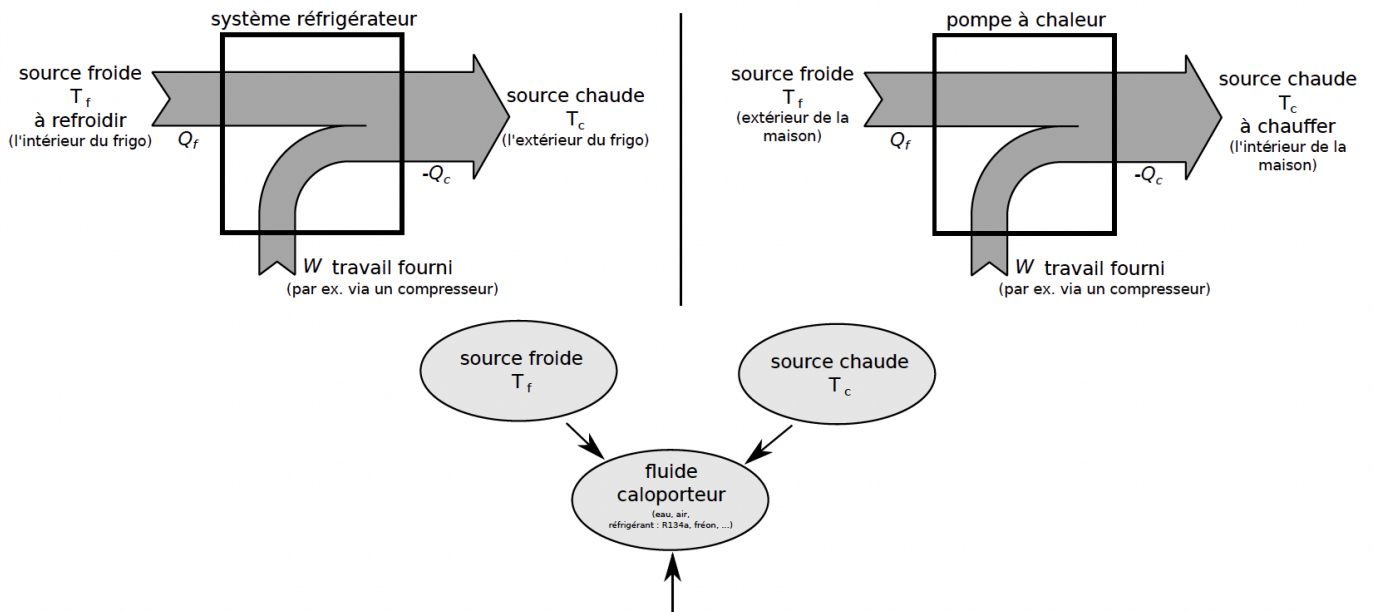
Les systèmes frigorifiques et les pompes à chaleur sont en général des systèmes à condensation, comportant un fluide caloporteur (typiquement le tétrafluoroéthane R-134a) subissant des changements d'états (évaporation et liquéfaction). Si on reprend les deux principes de la thermodynamique, avec  $W \geq 0$  trois cas se posent pour les transferts de chaleur, mais seul le cas où on prélève de la chaleur à la source froide pour en donner à la source chaude ( $Q_c > 0$  et  $Q_f < 0$ ) est utile (les autres cas étant réalisés naturellement).

Le schéma général est donc celui dessiné ci-dessous. On notera que que le sens des échanges thermiques est le même pour réfrigérateur ou pompe à chaleur.

Mais :

- Un réfrigérateur est optimisé pour refroidir la source froide (son compartiment interne).
- Une pompe à chaleur est optimisée pour réchauffer la source chaude (la pièce à chauffer).

La définition des rendements n'est donc pas la même.



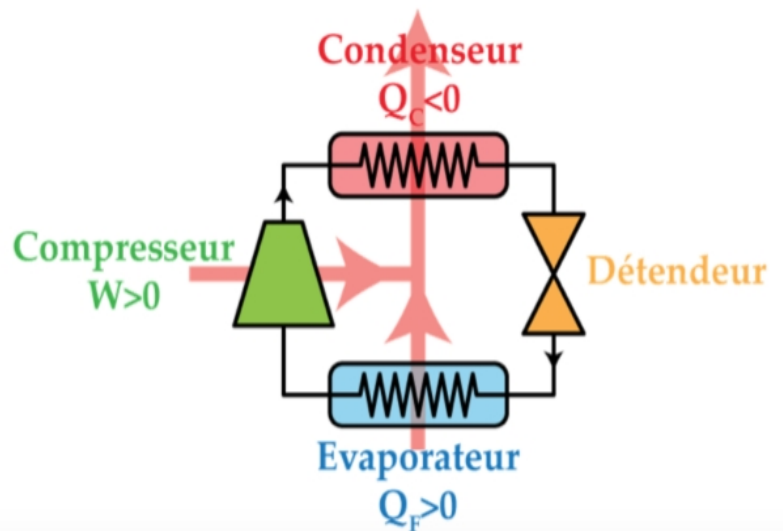
► Compléter le diagramme avec  $W$ ,  $Q_f$ ,  $Q_c$  et leurs signes

Un récepteur ditherme reçoit un travail permettant d'induire un transfert thermique de la source froide  $Q_f > 0$  vers la source chaude  $Q_c < 0$ , ce sens n'étant pas naturel.

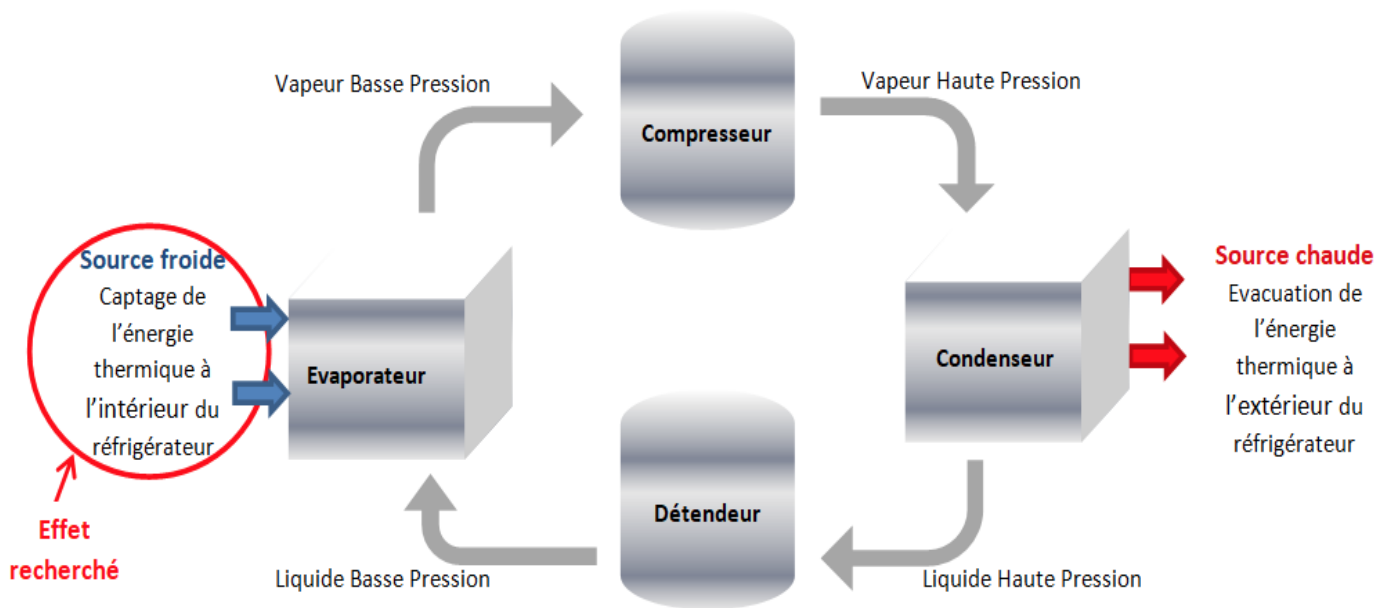
### b) Etapes de fonctionnement

4 étapes fondamentales dans ce type de machine :

la **compression** (en général modélisée par une adiabatique réversible) utilisant un piston pour augmenter la pression du fluide (état gazeux), s'accompagnant d'une augmentation de température (alors supérieure à celle de la source chaude); la **condensation**, changement d'état **libérant de l'énergie** à l'extérieur induisant une augmentation de température de la source chaude. A la sortie il n'y a que du liquide; la **détente** permettant de diminuer la pression comme la température du liquide, qui se vaporise partiellement; l'**évaporation**, changement d'état nécessitant de **l'énergie prélevée à la source froide**, qui se refroidit davantage.

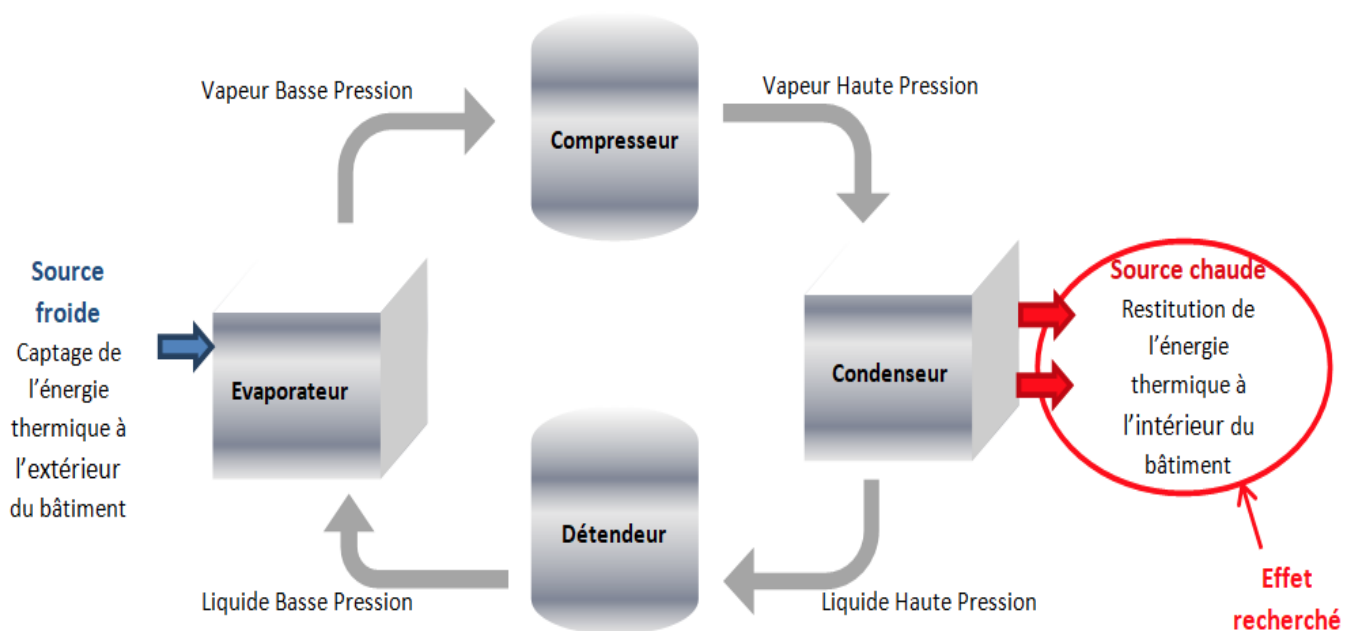


### Principe de fonctionnement de la machine frigorifique



Dans le cas du réfrigérateur, l'énergie thermique récupérée par le fluide frigorigène au niveau de l'évaporateur est captée à l'intérieur du réfrigérateur afin de créer du froid. Au niveau du condenseur, le fluide frigorigène cède de l'énergie à l'extérieur du réfrigérateur.

### Principe de fonctionnement de la pompe à chaleur



Dans le cas d'une pompe à chaleur, l'énergie cédée au condenseur est utilisée par le fluide frigorigène pour la production de chaleur à l'intérieur du bâtiment (pour le chauffage ou la production d'eau chaude sanitaire). Au niveau de l'évaporateur, l'énergie thermique est captée à l'extérieur du bâtiment (dans l'air, l'eau ou le sol).

## III-2. Efficacité énergétique et coefficient de performance (COP) d'une machine thermique réceptrice

### a) Coefficient de performance

La performance d'une machine thermique s'exprime par le coefficient de performance (COP). Le COP est défini comme étant le rapport entre la quantité d'énergie thermique utile transférée par la machine et l'énergie consommée sous forme de travail pour réaliser ce transfert (énergie utilisée pour faire fonctionner le compresseur).

Plus le COP est élevé, plus la machine thermique est performante.

### b) Machine frigorifique

On cherche ici à refroidir un espace ou une pièce (réfrigérateur, ou climatiseur), et il nous importe

d'extraire le maximum depuis la source froide. Alors:  $e = \frac{Q_F}{W}$

### **Démonstration**

D'après le premier principe :  $W + Q_C + Q_F = 0$  d'où  $W = - (Q_C + Q_F)$

$$e = \frac{Q_F}{W} \quad e = \frac{-Q_F}{Q_F + Q_C} \quad \text{Soit encore} \quad e = \frac{-1}{1 + \frac{Q_C}{Q_F}}$$

D'après le second principe :  $\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0$  d'où  $\frac{Q_C}{T_C} \leq -\frac{Q_F}{T_F}$  et donc  $\frac{Q_C}{Q_F} \leq -\frac{T_C}{T_F}$

$$1 + \frac{Q_C}{Q_F} \leq 1 - \frac{T_C}{T_F}$$

$$\frac{1}{1 + \frac{Q_C}{Q_F}} \geq \frac{1}{1 - \frac{T_C}{T_F}} \quad \frac{-1}{1 + \frac{Q_C}{Q_F}} \leq -\frac{1}{1 - \frac{T_C}{T_F}}$$

$$\frac{-1}{1 + \frac{Q_C}{Q_F}} \leq \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

$$e \leq \frac{T_F}{T_C - T_F} \quad e = \frac{Q_F}{W} \leq e_{\text{Cfrigo}} \quad \text{avec} \quad e_{\text{Cfrigo}} = \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

où  $e_{\text{Cfrigo}}$  est appelée efficacité de Carnot frigorifique correspondant à l'évolution réversible du système (efficacité maximale).

Dans le cas du réfrigérateur, avec  $T_F = 5^\circ\text{C}$  et  $T_C = 25^\circ\text{C}$ , on obtient  $e_{\text{Cfrigo}} = 14$ , ce qui est évidemment surévalué du fait des irréversibilités. Néanmoins on peut espérer atteindre une efficacité de l'ordre de 3 à 4, ce qui signifie concrètement qu'une puissance électrique de 1 kW permet d'extraire 3 à 4 kW d'énergie sous forme de chaleur.

### c) Pompe à chaleur

On souhaite maintenant chauffer un local, on cherche alors à maximiser le transfert vers la source chaude, et on définit alors l'efficacité pour une pompe à chaleur par  $e = -Q_C / W$

On peut effectuer le même raisonnement que précédemment, et l'on aboutit à

$$e = \frac{-Q_C}{W} \leq e_{\text{CPAP}} \quad \text{avec} \quad e_{\text{CPAP}} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

où  $e_{\text{C,PAC}}$  est appelée efficacité de Carnot pour la PAC correspondant à l'évolution réversible du système (efficacité maximale).



## Tableau récapitulatif

(il faut savoir redémontrer l'expression des rendements ou efficacités dans chacun des trois cas)

	<b>Moteur</b>	<b>Climatiseur Réfrigérateur</b>	<b>Pompe à chaleur</b>
Source chaude			
Source froide			
Signe de $W$			
Signe de $Q_c$			
Signe de $Q_f$			
Energie utile			
Energie coûteuse			
Rendement ou efficacité			
Rendement ou efficacité (expression dans le cas réversible)			
Ordres de grandeur réels	<u>Moteur de voiture</u> : $\eta \sim 0,3$ Puissance: $P \sim 100 \text{ kW}$  <u>Moteur de train</u> : $P \sim 1 \text{ MW}$  <u>Turbine pour production d'électricité</u> : $\eta \sim 0,4$ $P \sim 100 \text{ kW}$ à $300 \text{ MW}$ .	<u>Réfrigérateur domestique</u> : $e \sim 1,5$  $P_{\text{elec}} \sim 200 \text{ W}$ ,	<u>Pompe à chaleur domestique</u> : $e \sim 3$

## Sens de parcours du cycle

Dans le diagramme ,  $p$ - $V$  :

– Pour un moteur : sens horaire .

– Pour une machine réceptrice (réfrigérateur ou pompe à chaleur) : sens antihoraire (trigo)

L'efficacité ou le rendement sont maximums lorsque le cycle est réversible, c'est à dire lorsque le fluide décrit un cycle de Carnot (deux adiabatiques réversibles et deux isothermes réversibles à  $T_c$  et  $T_f$ ).

## Causes d'irréversibilités

I. Frottements : les frottements sont en fait la dégradation d'une énergie mécanique, qui est transférée sous forme thermique vers le milieu ambiant. Cette énergie **ne peut plus être exploitée**.

II. Inhomogénéités de température : un transfert thermique d'une zone à  $T_1 > T_2$  directement vers une zone à  $T_2$  dégrade l'énergie.

En effet, on aurait pu faire fonctionner un moteur entre ces deux sources pour en extraire du travail. Si on laisse le transfert se faire directement, il y a gâchis d'énergie, donc baisse de rendement et création d'entropie.

Cas particulier : pour être réversibles, les transferts thermiques entre le fluide et les sources (chaude ou froide) doivent donc être tels que  $T_{\text{fluide}} = T_{\text{ext}}$ , avec  $T_{\text{ext}}$  la température de la source.

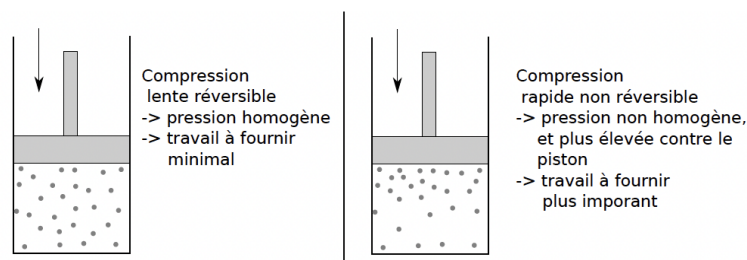
**Cas limite :  $T = T_{\text{ext}}$  pour une évolution réversible.**

En pratique, un transfert thermique avec  $T_{\text{fluide}} = T_{\text{ext}}$  est infiniment lent. Il y a donc des **différences de températures dans les machines réelles**.

III. Inhomogénéités de pression : la présence d'une différence de pression entre deux zones peut permettre de mettre en mouvement des parties mobiles et donc de récupérer du travail. Si on laisse cette différence de pression s'uniformiser sans l'exploiter, alors il y a gâchis d'énergie, baisse de rendement et création d'entropie.

En pratique, il y a inhomogénéité de pression lorsque la transformation est brusque. Une transformation trop rapide est donc synonyme d'énergie mal exploitée, de baisse de rendement et de création d'entropie.

**Exemple de l'incidence d'une compression rapide et de la pression non homogène :**



On voit qu'il faut fournir plus de travail pour comprimer. Ce travail ne sert pas à faire tourner l'axe moteur, il y a donc baisse de rendement (et donc création d'entropie). De même lors de la détente : une détente trop rapide implique une dépression au niveau du piston, donc le gaz "pousse moins" sur le piston et le travail récupéré est moindre. Il y a donc baisse de rendement (et donc création d'entropie).

**Cas limite:  $P = P_{\text{ext}}$  pour une évolution réversible.**

# PLAN

## I PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

### I-1.Principe général

### I-2. Principes de la thermodynamique (bilan énergétique et entropique)

### I-3. Cas de la machine monotherme

## II LES MOTEURS DITHERMES

### II-1.Construction du moteur "parfait"

### II-2. Rendement de Carnot

### II-3. Exemple du moteur à essence (4 temps)

## III MACHINES RECEPTRICES

### III-1. Principe de fonctionnement

### III-2. Efficacité énergétique et coefficient de performance (COP) d'une machine thermique réceptrice

## Vidéos

### Moteur

<https://youtu.be/CyIz7AfiF04>

<https://youtu.be/X0J-wCZXj0w>

<https://youtu.be/rcIcSADVUBs>

### Pompe à chaleur et réfrigérateur

<https://youtu.be/n-1RCwkiUvo>

<https://youtu.be/yNF15iaB4JQ>

<https://youtu.be/ZKBiaHroY-o>

<https://youtu.be/zw33M99Lrz8>

### Cours sur les machines thermiques

<https://youtu.be/RV0MIsrxzQY>

### Les shadoks et les machines thermiques

<https://youtu.be/xiCajZYCB1I?si=kfK9uAMxw8TkttUz>