Thermodynamique

CHAPITRE 5

Machines Thermiques

Dr N'CHO Janvier Sylvestre

Introduction (1)

Notre société de la technologie repose sur sa capacité à utiliser les sources d'énergie. Parfois l'énergie mécanique est directement disponible (chutes d'eau, moulins à vent). Mais la plupart de l'énergie utilisée provient de la combustion des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), ressources limitées comme nous le savons tous, et de l'énergie nucléaire. Ces énergies sont très souvent converties en énergie thermique pour chauffer les bâtiments, pour la combustion des aliments, pour les processus chimique. Mais très souvent, nous devons transformer ces énergies en énergie mécanique pour faire fonctionner nos machines, propulser nos véhicules etc…Il est fondamental de savoir comment convertir une forme d'énergie en une autre forme et ceci de la façon la plus efficace.

Introduction (2)

La conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique est au cœur du fonctionnement des machines qui font « tourner » notre société. On appelle **machine thermique** tout dispositif capable de **convertir de l'énergie thermique en énergie mécanique** (et inversement) et subissant une **transformation cyclique**. Cela suppose que le système revient, après divers transformations, dans son état initial. Nous allons restreindre notre étude aux cas particuliers mais fondamental des machines thermiques **dithermes**. Il s'agit de machines thermiques qui au cours d'un cycle vont être en contact successivement avec deux sources thermiques parfaites, une source dite froide à T_F et une source dite chaude à T_C.

Généralités sur les machines dithermes

Définitions (1)

Une **machine thermique** est un mécanisme plus ou moins complexe dans lequel un système thermodynamique noté Σ généralement constitué d'un fluide, échange du travail W et de la chaleur Q avec le milieu extérieur.

On se limitera ici à des machines utilisant un fluide, la plupart du temps un gaz parfait.

Propriétés

- Une machine thermique fonctionne pendant une durée indéfinie, pour cela le système thermodynamique doit réaliser **des cycles**, c'est-à-dire qu'il revient périodiquement à son état initial. L'énergie interne U et l'entropie S d'un système étant des fonctions d'état, on a:

$$\Delta \boldsymbol{U}_{\boldsymbol{cycle}} = \mathbf{0} \quad \text{et} \quad \Delta S_{cycle} = 0$$

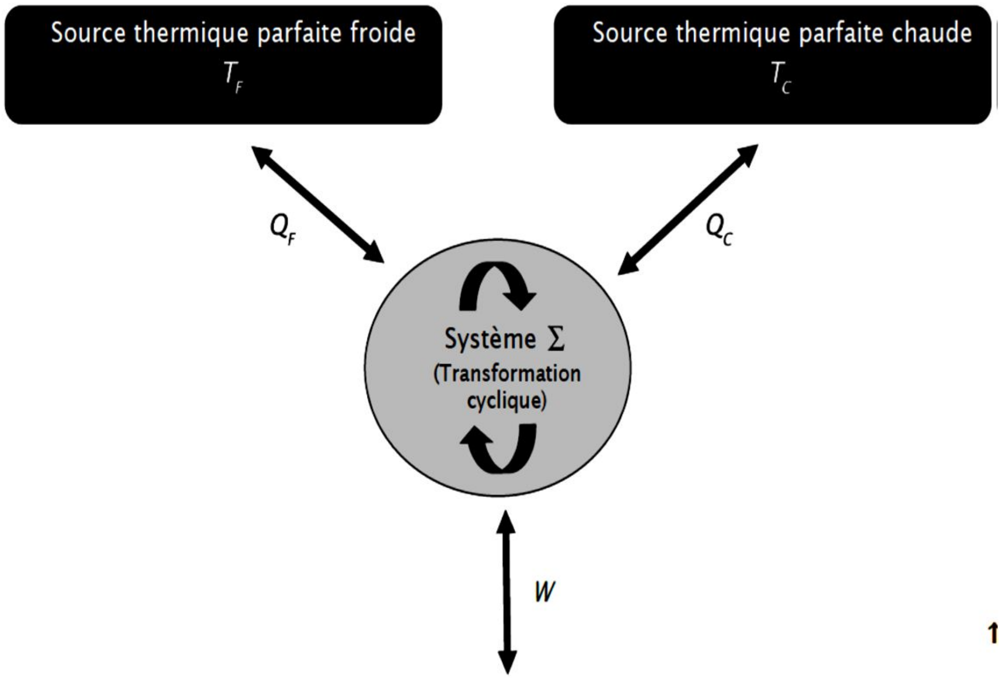
- Les échanges thermiques se font avec une ou plusieurs zones distinctes du milieu extérieur, dont les températures sont en général différentes et variables. On modélisera ici chacune de ces zones par un **thermostat parfait** (appelé aussi **source**), c'est-à-dire dont la température est fixe et ne varie pas au cours des échanges
- Les transformations successives du fluide dans la machine seront modélisées par des transformations simples entre des états clairement identifiés

Définitions (2)

- On construit **un schéma de principe** d'une machine thermique en représentant le système au centre d'échanges avec l'extérieur et en identifiant les différents thermostats. Les échanges sont représentés par des flèches entre d'une par le système thermodynamique et d'autre part, l'extérieur (le travail) et les thermostats (chaleurs).

- Une grandeur d'échange W ou Q est toujours exprimée **du point de vue du système**, elle est positive s'il reçoit, négative s'il fournit.

Inégalité de Clausius (1)



Le système Σ subit une transformation cyclique. Il reçoit au cours du cycle algébriquement Q_F (échange avec la source froide), Q_C (échange avec la source chaude) et W .

On suppose que $T_C > T_F$.

Nous allons, comme à chaque fois, appliquer le premier et le deuxième principe à Σ ce qui va nous fournir des résultats très généraux sur le fonctionnement des machines thermiques.

Inégalité de Clausius (2)

1^er principe : $\underbrace{\Delta U = 0}_{car\ cyclique} = W + Q_C + Q_F$

2^ème principe : $\underbrace{\Delta S = 0}_{car\ cyclique} = \underbrace{S_{créée}}_{>0} + S_{échange}$ avec

$$S_{échange} = \frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} < 0$$

On obtient l'inégalité de Clausius :

$$\boxed{\frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} < 0}$$

Dans le cas où **le nombre de sources est supérieur à deux**, la relation de Clausius s'exprime sous la forme généralisée :

$$\boxed{\sum_i \frac{Q_i}{T_i} \leq 0}$$

Inégalité de Clausius (3)

C'est sous cette forme que nous allons utiliser le second principe dans ce chapitre.

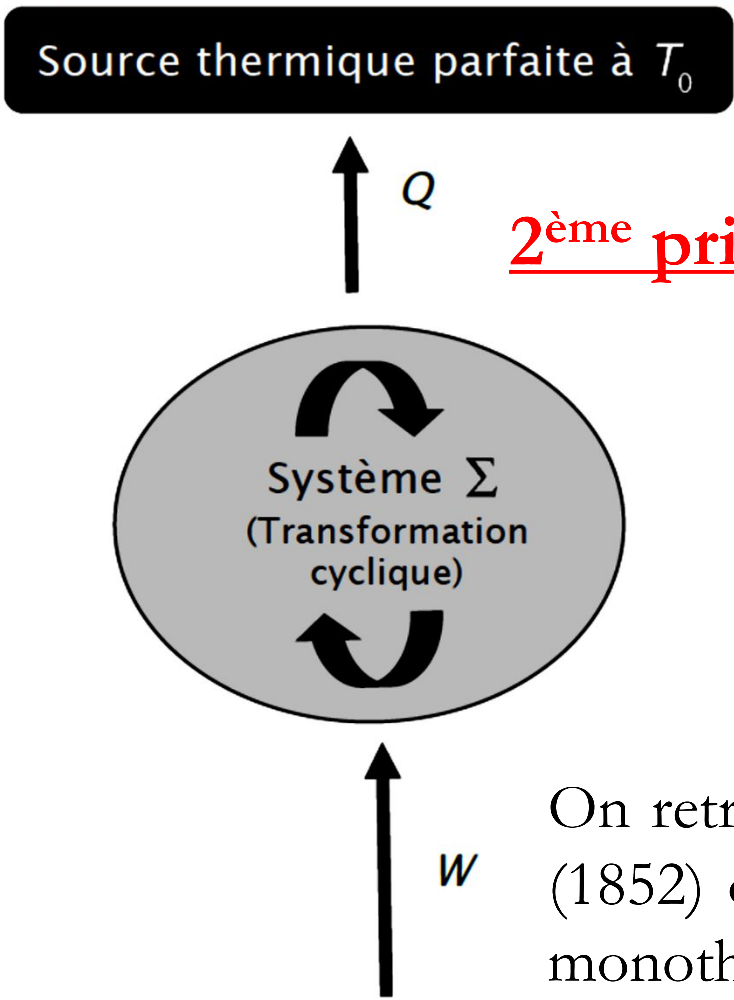
$\frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} = 0$ **uniquement pour le cas limite des transformations réversibles.**

Dans le cas particulier où $W = 0$, $Q_C = -Q_F$ (1er principe) donc

$$Q_C\left(\frac{1}{T_C} - \frac{1}{T_F}\right) < 0$$ (2ème principe).

Comme $T_C > T_F$, $Q_F < 0$ et $Q_C > 0$. On retrouve (et on justifie) l'énoncé historique de Clausius (1850) qui dit que la chaleur passe spontanément du corps chaud (qui cède de la chaleur à Σ car $Q_C > 0$) au corps froid (qui reçoit de la chaleur de Σ car $Q_F < 0$).

Machine thermique monotherme (1)



1^er principe : $\underbrace{\Delta U = 0}_{car\ cyclique} = W + Q$

2^ème principe : $\underbrace{\Delta S = 0}_{car\ cyclique} = \underbrace{S_{créée}}_{>0} + S_{échange}$ avec

$$S_{échange} = \frac{Q}{T_0} < 0$$

On obtient $\boxed{W > 0 \text{ et } Q < 0}$

On retrouve (et on justifie) l'énoncé historique de Clausius (1852) qui dit que qu'il n'existe pas de machine thermique monotherme motrice. Cette machine ne peut que recevoir du travail $(W > 0)$ et céder de la chaleur $(Q < 0)$.

Machine thermique monotherme (2)

Ainsi une machine monotherme ne peut que recevoir du travail et céder de la chaleur, c'est nécessairement un récepteur. C'est le cas par exemple des radiateurs électriques. On ne peut donc pas concevoir une machine cyclique qui délivrerait du travail (moteur) à partir d'une unique source de chaleur.

Principe de Carnot : Pour qu'un système cyclique fournisse du travail, il doit obligatoirement échanger du transfert thermique avec, au minimum, deux sources de chaleur possédant des températures différentes, le moteur monotherme n'existe donc pas.

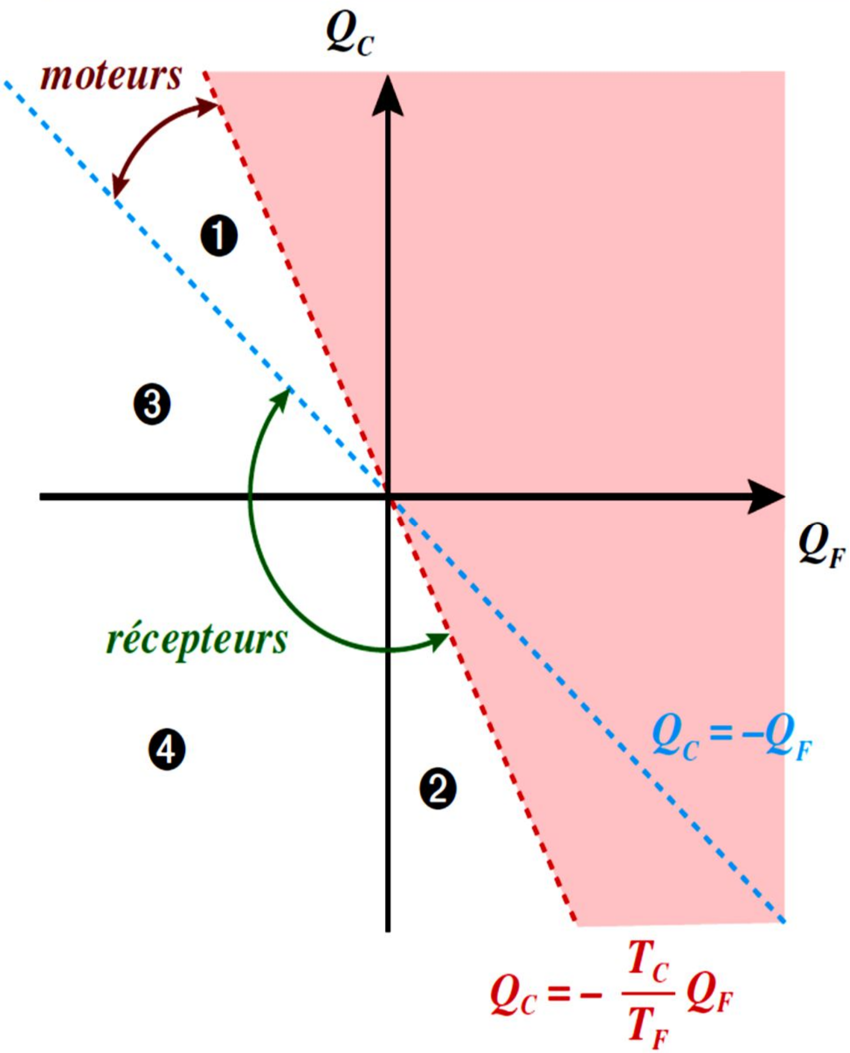
Diagramme de Raveau (1)

Il est possible d'identifier les différents fonctionnements des machines dithermes en traçant un **diagramme de Raveau** qui consiste à porter sur l'axe des abscisses Q_F, le transfert thermique reçu par le système de la part de la source froide, et sur l'axe des ordonnées Q_C celui reçu de la part de la source chaude. On utilise à nouveau les deux principes pour identifier diverses zones dans ce diagramme.

➡ **2$^{\text{ème}}$ principe**: d'après l'inégalité de Clausius, tous les points de fonctionnement d'une machine doivent vérifier :

$$\boxed{\frac{Q_C}{T_C}+\frac{Q_F}{T_F}\leq 0}$$

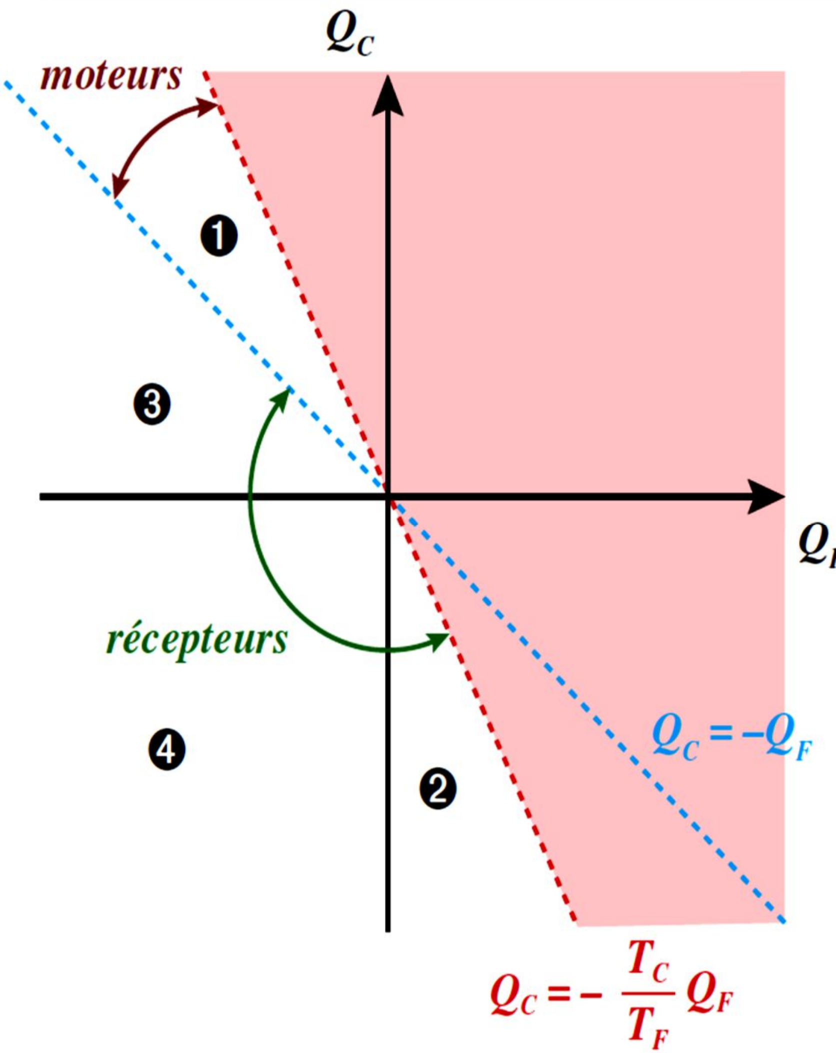
Diagramme de Raveau (2)



Seuls les points de coordonnées (Q_F, Q_C) se situant au-dessous de la droite d'équation (en pointillés rouges) $: Q_C = -Q_F \frac{T_C}{T_F}$ sont possibles, tous ceux situés au-dessus sont impossibles, car contraires au second principe (zone rose).

➡**1er principe**: d'après la relation $W = -(Q_C + Q_F)$ qui en découle, on détermine le signe du transfert thermique total selon la nature de la machine :

Diagramme de Raveau (3)



moteur : $W < 0 \Rightarrow Q_C + Q_F > 0$

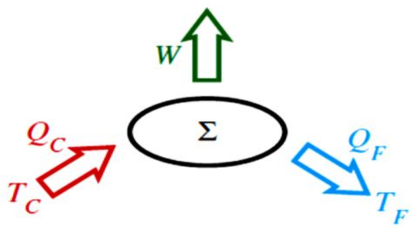
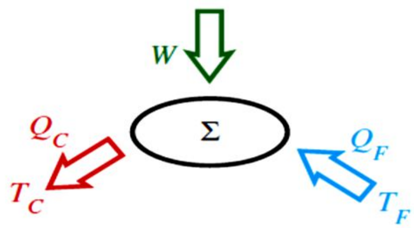
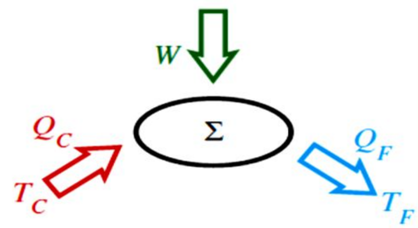
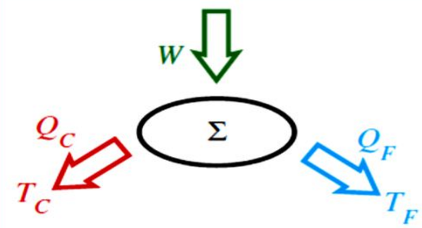
récepteur : $W > 0 \Rightarrow Q_C + Q_F < 0$

La limite entre ces deux situations est la droite d'équation $Q_C + Q_F = 0$, soit $Q_C = -Q_F$ en pointillés bleus sur le diagramme (moins inclinée que la précédente compte tenu de leurs coefficients directeurs respectifs).

Le moteur est au-dessus de la droite, le récepteur en dessous. Ces conditions font apparaître quatre zones distinctes (notées ❶❷❸❹) caractérisant le fonctionnement des machines dithermes.

Diagramme de Raveau (4)

Le tableau suivant montre que seules les zones ❶ et ❷ du diagramme de Raveau correspondent à des machines dithermes utiles.

Zone	❶	❷	❸	❹
Signe des échanges	$W < 0 ; Q_C > 0 ; Q_F < 0$	$W > 0 ; Q_C < 0 ; Q_F > 0$	$W > 0 ; Q_C > 0 ; Q_F < 0$	$W > 0 ; Q_C < 0 ; Q_F < 0$
Schéma de principe				
Cycle	**Moteur**	**Récepteur**	Récepteur	Récepteur
Conséquence	L'énergie thermique circule de la source chaude vers la source froide (mouvement naturel) en produisant de l'énergie mécanique.	Le travail reçu fait circuler l'énergie thermique en sens inverse du sens spontané, de la source froide vers la source chaude.	Le travail reçu fait circuler la chaleur de la source chaude vers la source froide, ce qui se passe spontanément, c'est du travail gaspillé !	Le travail reçu produit de la chaleur à la fois vers la source froide et la source chaude, ce qui n'a pas de sens.
Machine	Moteur à essence, moteur Diesel	Réfrigérateur, climatiseur, pompe à chaleur	***Ce système n'a aucun intérêt.***	***Ce système n'a aucun intérêt.***

Classification des machines dithermes

Parmi les machines thermiques on distingue :

- les moteurs thermiques qui fournissent effectivement du travail, c'est à dire que le travail reçu est tel que $\boldsymbol{W_{moteur} < 0}$.
- les réfrigérateurs et les pompes à chaleur qui reçoivent effectivement du travail, c'est à dire que le travail reçu est tel que $\boldsymbol{W_{récepteur} > 0}$.

W	Q_C	Q_f	Commentaires
Machine motrice ($W < 0$)	+	+	Interdit (Second principe)
	+	−	**Moteur thermique**
	−	+	Interdit (Second Principe)
	−	−	Interdit (Premier Principe)
Machine réceptrice ($W > 0$)	+	+	Interdit (Premier Principe)
	+	−	Sans intérêt
	−	+	**Pompe à chaleur - Réfrigérateur**
	−	−	Sans intérêt

Rentabilité d'une machine ditherme

La rentabilité d'une machine ditherme sur un cycle s'exprime par son **rendement**, noté ***r***, ou son **efficacité énergétique**, noté ***e*** qui traduit le bénéfice pour l'utilisateur de la machine, et qui est égal au rapport entre l'énergie utile récupérée par l'utilisateur sur l'énergie que cela à couté à cet utilisateur (grandeurs comptées positivement). **Ils sont positifs et sans dimension.**

- ❑ Le terme rendement s'utilise plutôt pour les moteurs, $r < 1$
- ❑ Le terme efficacité s'utilise plutôt pour les récepteurs, $e > 1$

Point Méthode (1)

❑ Pour calculer un rendement ou une efficacité, on procèdera dans cet ordre:

✓ Ecrire l’expression de r ou de e en fonction du travail et de la chaleur pertinente, dont on vérifiera les signes, pour les modifier si besoin, et utiliser des grandeurs positives: par exemple si l’utilisateur s’ intéresse à la chaleur chaude et qu’elle est perdue par le système, l’énergie utile pour l’utilisateur est $-Q_C$.

✓ Ecrire l’expression de r ou de e en fonction uniquement des chaleurs à l’aide du premier principe: $\boldsymbol{W = -(Q_C + Q_F)}$

Point Méthode (2)

On déterminera ensuite, les chaleurs en fonctions des grandeurs d'état pertinentes, en s'appuyant sur les transformations réellement effectuées par le fluide dans la situation étudiée

✓ Ecrire l'expression de r ou de e maximale, en fonction uniquement des températures des sources, en utilisant le second principe à travers l'inégalité de Clausius.

✓ L'utilisation de l'inégalité de Clausius doit se faire avec vigilance en raison d'une inégalité et de grandeurs algébriques, que l'on multiplie membre à membre, pour obtenir les rapports de chaleurs nécessaires

Point Méthode (3)

✓ Si $Q_C > 0$ on pourra écrire (utile pour un moteur):

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

✓ Si $Q_F > 0$ on pourra écrire (utile pour un récepteur frigorifique):

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

✓ Si $Q_C < 0$ on pourra écrire (utile pour un récepteur pompe à chaleur):

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

Moteur ditherme

$$\Rightarrow W < 0$$

Signe des transferts thermiques (chaleur échangée) (1)

On souhaite que la machine thermique cède du travail c'est-à-dire $W < 0$. Cela va imposer des conditions sur le signe de Q_C et de Q_F que nous allons déterminer. L'exemple type de cette machine est le moteur à explosion qui sert à propulser les voitures.

1er principe : $\underbrace{\Delta U = 0}_{car\ cyclique} = W + Q_C + Q_F \Longrightarrow Q_F = -Q_C - W$

2ème principe : $\underbrace{\Delta S = 0}_{car\ cyclique} = \underbrace{S_{créée}}_{>0} + S_{échange}$ avec

$$S_{échange} = \frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} < 0$$

Signe des transferts thermiques (2) (chaleur échangée)

$$\frac{Q_F}{T_F}+\frac{Q_C}{T_C}<0 \Leftrightarrow \frac{-Q_C-W}{T_F}+\frac{Q_C}{T_C}<0 \Leftrightarrow \underbrace{\frac{-W}{T_F}}_{>0}<\underbrace{Q_C\left(\frac{1}{T_F}-\frac{1}{T_C}\right)}_{>0} \Rightarrow Q_C>0$$

$$W=-Q_C-Q_F \Rightarrow \frac{Q_C+Q_F}{T_F}<Q_C\left(\frac{1}{T_F}-\frac{1}{T_C}\right) \Leftrightarrow \frac{Q_F}{T_F}<\frac{-Q_C}{T_C} \Leftrightarrow Q_F<-Q_C\frac{T_F}{T_C}<0$$

On retiendra les résultats suivants : $\boxed{W<0 \Rightarrow Q_F<0 \text{ et } Q_C>0}$

Pour que la machine cède du travail, elle doit recevoir de la chaleur de la source chaude et céder de la chaleur à la source froide. Pour un moteur à explosion, le système Σ est l'air admis dans les cylindres par les soupapes d'admission, la source chaude est créée in situ par injection et combustion d'un carburant et la source froide est l'atmosphère ambiante.

L'efficacité thermodynamique (1)

L'efficacité thermodynamique (grandeur définie toujours positive et notée) est le rapport de ce que l'expérimentateur gagne sur ce qu'il perd. Dans le cas présent, elle vaut, par définition :

L'expérimentateur récupère du travail

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

L'expérimentateur doit fournir la « source chaude »

Signe négatif pour avoir $e>0$

Cherchons à trouver une valeur maximale de e en fonction des seules températures des sources thermiques.

$$-W = Q_C + Q_F \Rightarrow \frac{-W}{Q_C} = \frac{Q_F}{Q_C} + 1 \qquad \text{et} \qquad \frac{Q_F}{Q_C} < \frac{-T_F}{T_C} \Rightarrow \frac{-W}{Q_C} < 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

L'efficacité thermodynamique (2)

Ce qui donne: $$\boxed{e < 1 - \frac{T_F}{T_C} \quad et \quad e_c = 1 - \frac{T_F}{T_C}}$$

L'égalité est obtenue **quand la machine est réversible ce qui correspond à l'efficacité maximale théorique que l'on peut atteindre**. On appelle cette efficacité l'efficacité de Carnot, physicien et ingénieur (polytechnicien) Français (1796-1832). Le résultat obtenu par Carnot est fondamental et d'une portée universelle. En effet, quelle que soit la technologie utilisée, on ne peut pas obtenir une efficacité plus grande que celle de Carnot. Ce résultat connu comme le **théorème de Carnot** (1824) peut être résumé ainsi :

L'efficacité d'un moteur ditherme cyclique réel est inférieure à l'efficacité de Carnot correspondant au cycle réversible. L'efficacité de Carnot est indépendante du système thermodynamique qui évolue, elle ne dépend que de la température des sources.

Comment obtenir un cycle réversible ? Le cycle de Carnot (1)

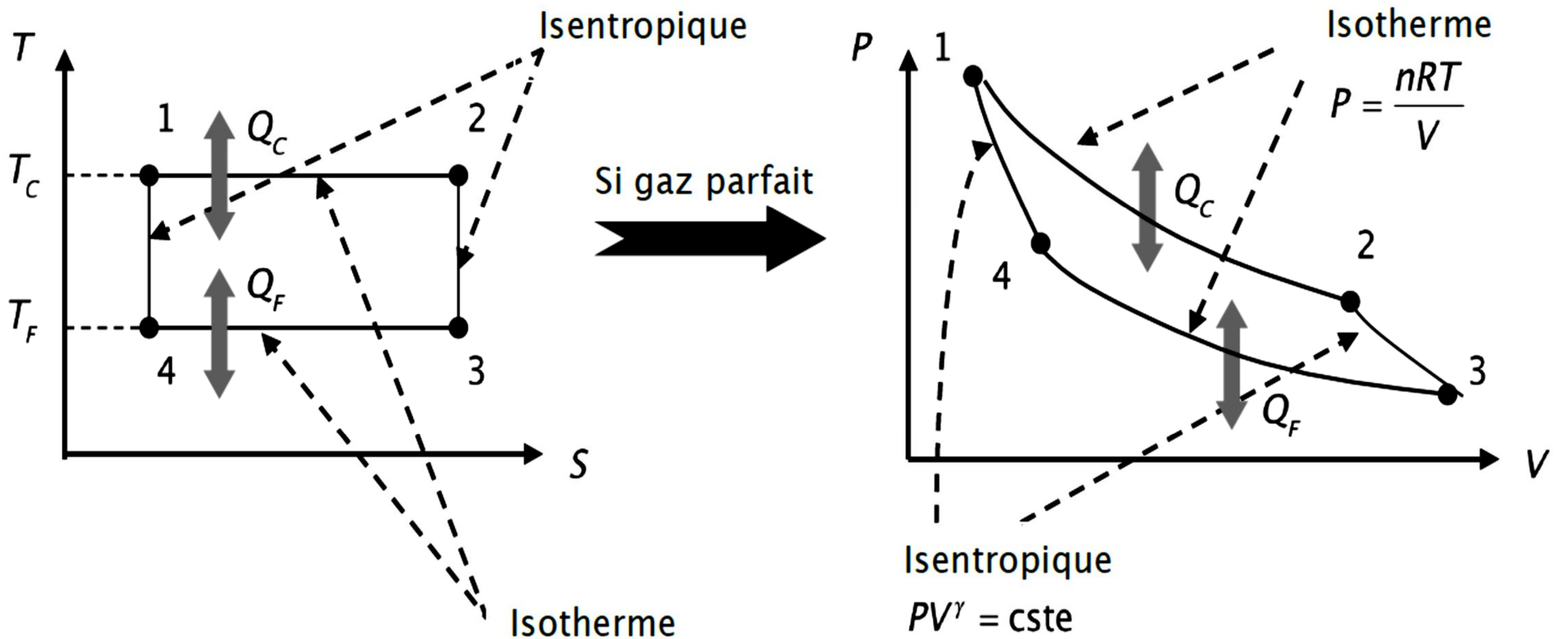
⇒ Au cours de l'échange de Q_C entre Σ et la source chaude à T_C , l'évolution de Σ doit être **isotherme** et **réversible** à T_C .

⇒ Au cours de l'échange de Q_F entre Σ et la source froide à T_F , l'évolution de Σ doit être **isotherme** et **réversible** à T_F .

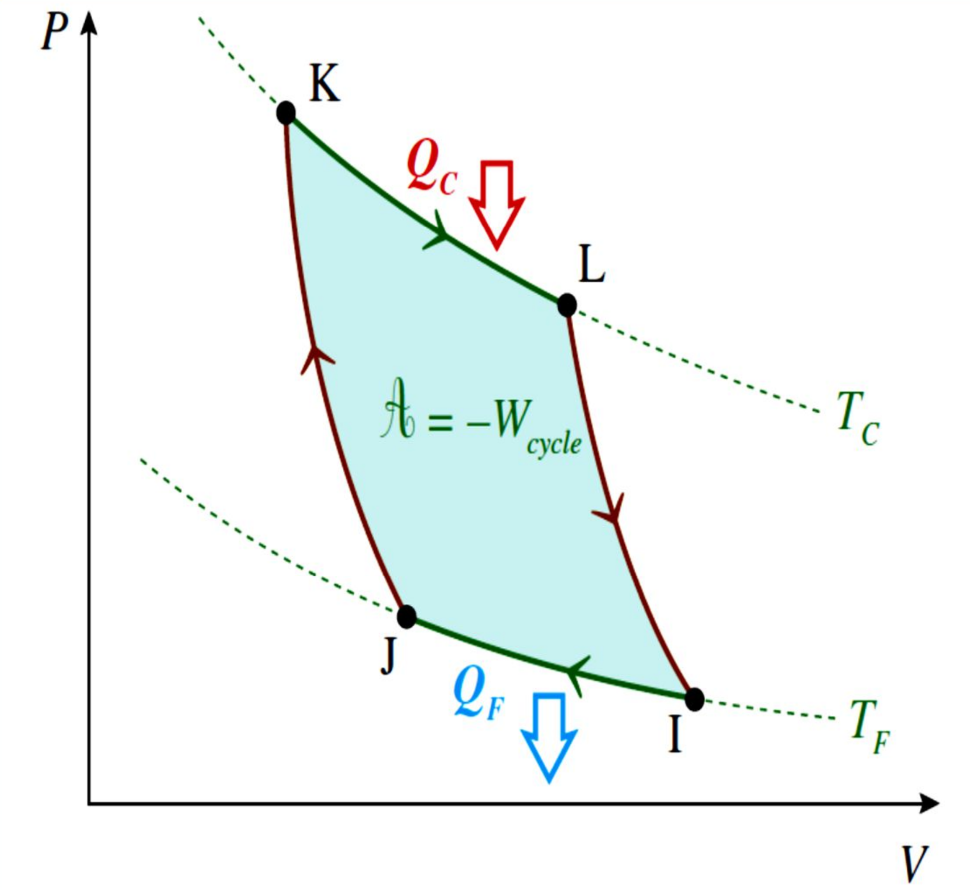
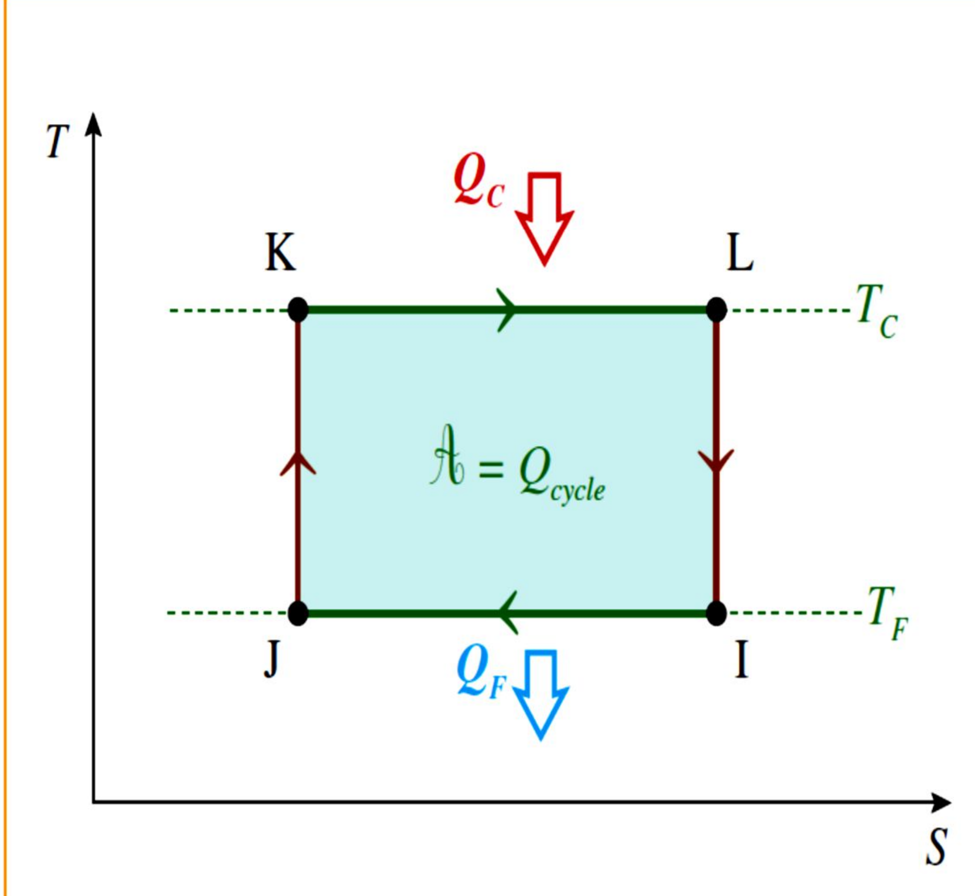
⇒ En dehors de ces échanges, le système Σ ne subit aucun n'échange thermique, l'évolution est **adiabatique** et **réversible** c'est-à-dire **isentropique**.

Comment obtenir un cycle réversible ? Le cycle de Carnot (2)

On peut traduire ces résultats sur un diagramme (T, S) et (P, V).



Comment obtenir un cycle réversible ?
Le cycle de Carnot (3)

Diagramme (P, V) du moteur de Carnot	Diagramme (T, S) du moteur de Carnot
	

Comment obtenir un cycle réversible ? Le cycle de Carnot (4)

Dans le diagramme (P,V), le cycle est en réalité très plat, l'aire du cycle est faible.

$$\underbrace{\Delta U = 0}_{car\ cyclique} = W + Q_C + Q_F \Longrightarrow W = -(Q_C + Q_F)$$

$$Q_C = \int_1^2 TdS = T_C(S_2 - S_1) \quad et \quad Q_F = \int_3^4 TdS = T_F(S_4 - S_3)$$

$$W = -(Q_C + Q_F) = -\underbrace{[T_C(S_2 - S_1) + T_F(S_4 - S_3)]}_{\text{aire sous la courbe}}$$

$$\Rightarrow \boxed{|W| = \text{aire sous la courbe}}$$

Les aires sous les courbes, pour les deux diagrammes, sont identiques.

Exercice d'application

Un moteur ditherme réversible fonctionne entre 2 thermostats source chaude t source froide de températures respectives $T_C = 740\ K$ et $T_f = 300\ K$.

1. Calculer l'efficacité de ce moteur
2. Le moteur étudié fournit un travail de $1600\ J$ par seconde. Quelle est la puissance thermique prélevée à la source chaude de température T_C ?

Solution

1) L'efficacité d'un moteur thermique réversible est l'efficacité de Carnot $e_C = 1 - T_F/T_C = 1 - 300/740 = 0{,}595$

2) $e = -W/Q$ quelque soit la nature du moteur thermique

L' énergie reçue par seconde sous forme de travail est $-1600\ J$. D'où l'énergie thermique reçue par seconde de la part de la source chaude est: $Q_C = -W/e = 1600/0{,}595 = 2691\ W$

Réfrigérateur ditherme

$$\Longrightarrow Q_F > 0$$

Signe des transferts thermiques (chaleur échangée) et du travail (1)

On souhaite que le réfrigérateur capte de la chaleur à la source froide (le compartiment du réfrigérateur) pour que sa température reste « froide ». Cela va imposer des conditions sur le signe de Q_C et de W que nous allons déterminer.

1er principe : $\underbrace{\Delta U = 0}_{car\ cyclique} = W + Q_C + Q_F \Rightarrow Q_C = -Q_F - W$

2ème principe : $\underbrace{\Delta S = 0}_{car\ cyclique} = \underbrace{S_{créée}}_{>0} + S_{échange}$ avec

$$S_{échange} = \frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} < 0$$

Signe des transferts thermiques (chaleur échangée) (2)

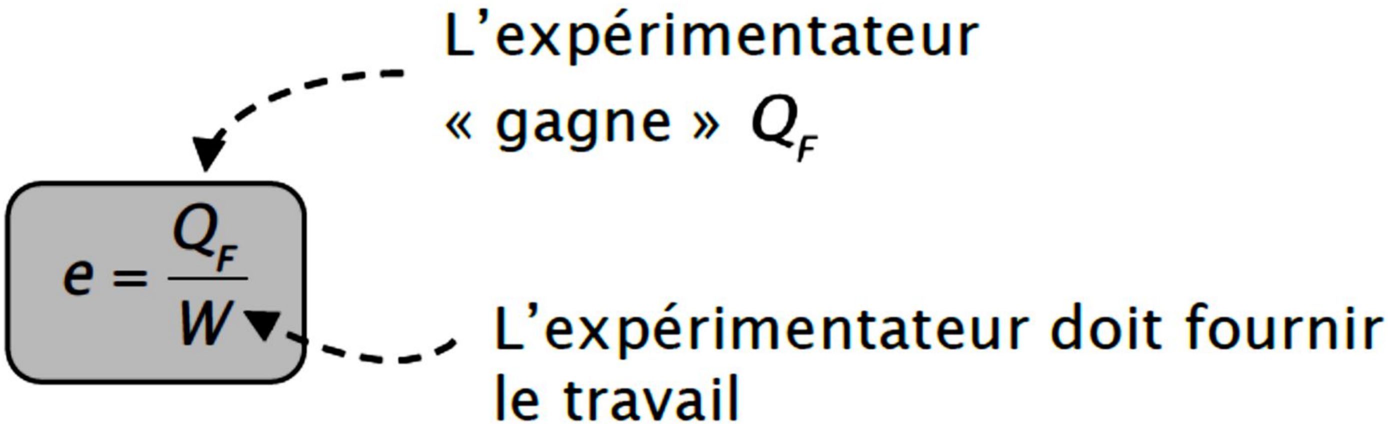
$$\underbrace{Q_F\left(\frac{1}{T_F}-\frac{1}{T_C}\right)}_{>0}<\frac{W}{T_C}\Rightarrow W>0. \qquad Q_C=-Q_F-W\Rightarrow Q_C<0$$

On retiendra les résultats suivants : $\boxed{Q_F>0 \;\Rightarrow Q_C<0 \text{ et } W>0}$

La machine reçoit du travail ce qui lui permet de recevoir de la chaleur de la source froide et de céder de la chaleur à la source chaude. On constate que la chaleur passe de la source froide à la source chaude ce qui n'est pas spontané. Cela est possible grâce au travail reçu par le système. Dans un réfrigérateur, le système Σ est le fluide réfrigérant, la source chaude est la pièce dans laquelle se trouve le réfrigérateur et la source froide le compartiment intérieur du réfrigérateur dans lequel on entrepose les aliments.

L'efficacité thermodynamique (1)

L'efficacité thermodynamique (grandeur définie toujours positive et notée) est le rapport de ce que l'expérimentateur gagne sur ce qu'il perd. Dans le cas présent, elle vaut, par définition :

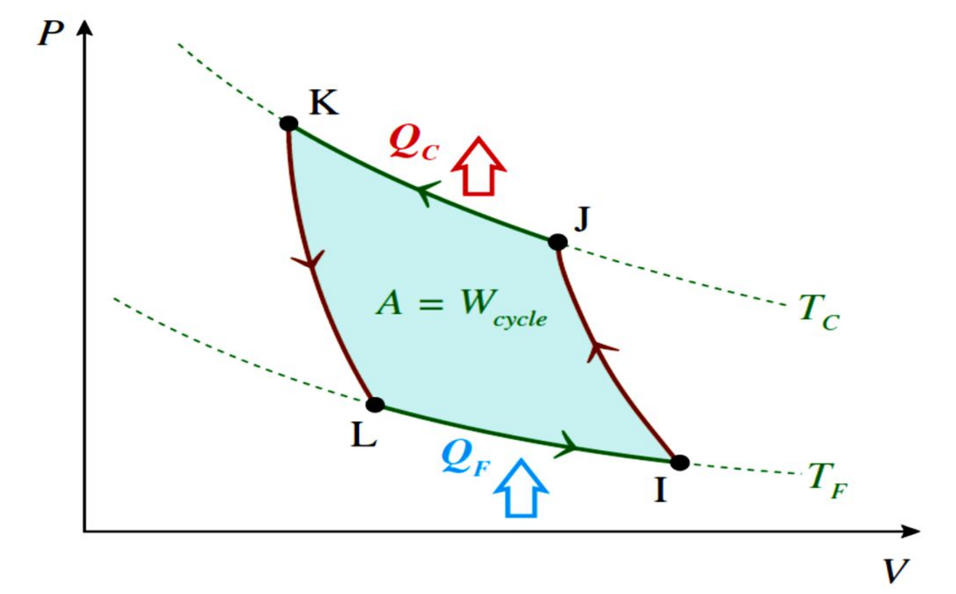
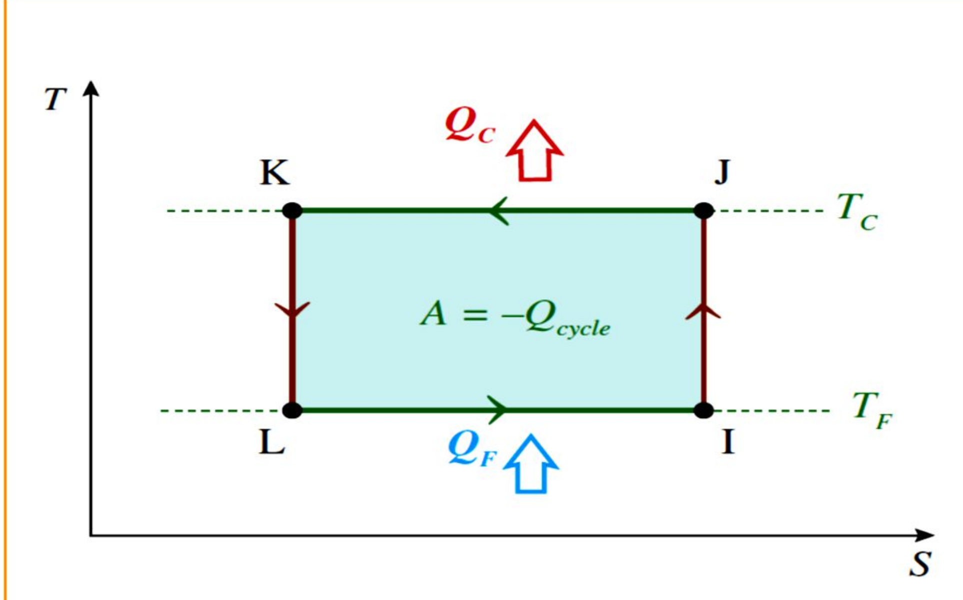


Cherchons à trouver une valeur maximale de e en fonction des seules températures des sources thermiques.

$$Q_F\left(\frac{1}{T_F}-\frac{1}{T_C}\right) < \frac{W}{T_C} \Rightarrow \frac{Q_F}{W} < \frac{1}{T_C}\left(\frac{T_F T_C}{T_C - T_F}\right)$$

L'efficacité thermodynamique (2)

On construit un cycle récepteur $(IJKL)$ de Carnot selon la même logique que le moteur. Il est décrit dans un diagramme (P,V) ou (T,S), et doit être parcouru dans le sens trigonométrique. Les calculs des efficacités de Carnot se mènent comme ceux du rendement du moteur de Carnot, à l'aide du diagramme (T,S) ou du diagramme (P,V).

Diagramme (P, V)	**Diagramme (T, S)**
	

L'efficacité thermodynamique (3)

Ce qui donne: $$\boxed{e < \frac{T_F}{T_C - T_F} \quad \text{et} \quad e_c = \frac{T_F}{T_C - T_F}}$$

Par exemple si $T_F = -5°C$ et $T_C = 20°C$ (il faut convertir en Kelvin), $e_C = 10{,}7 > 1$. Il ne faut pas s'étonner du fait que $e_C > 1$ car la chaleur cédée par la source froide au système est ensuite cédée par le système à la source chaude. **Elle est d'autant plus grande (et le réfrigérateur d'autant moins utile) que les températures des sources sont proches**. Le cycle de Carnot est le même que celui d'un moteur ditherme mais il est décrit à l'envers, cela a pour effet de transformer un système moteur, $W < 0$, en un système récepteur, $W > 0$.

Exercice d'application

La température à l'intérieur d'un réfrigérateur réversible est maintenue à $5°C$, l'atmosphère extérieure étant à $20°C$. Calculer l'efficacité de ce réfrigérateur ? Quelle serait son efficacité si la température de la pièce dans laquelle il est placé était à $14°C$? Conclure.

Solution

1) $e_C = \dfrac{T_F}{T_C - T_F} = \dfrac{278}{293 - 278} = 18,3$

2) $e_C = \dfrac{T_F}{T_C - T_F} = \dfrac{278}{287 - 278} = 30,9$

L'efficacité est plus grande lorsque les températures des sources sont proches.

Pompe à chaleur ditherme

$$\Rightarrow Q_C < 0$$

Signe des transferts thermiques (chaleur échangée) et du travail (1)

On souhaite que la pompe à chaleur cède de la chaleur à la source chaude (la pièce que l'on souhaite chauffer). Cela va imposer des conditions sur le signe de Q_F et de W que nous allons déterminer.

1er principe : $$\underbrace{\Delta U = 0}_{car\ cyclique} = W + Q_C + Q_F \Longrightarrow Q_F = -Q_C - W$$

2ème principe : $$\underbrace{\Delta S = 0}_{car\ cyclique} = \underbrace{S_{créée}}_{>0} + S_{échange}$$ avec

$$S_{échange} = \frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} < 0$$

$$\underbrace{-Q_C\left(\frac{1}{T_F} - \frac{1}{T_C}\right)}_{>0} < \frac{W}{T_F} \Longrightarrow W > 0.$$

Signe des transferts thermiques (chaleur échangée) (2)

On conçoit la pompe à chaleur pour que $|-Q_C| > W \Rightarrow Q_F > 0$

On retiendra les résultats suivants : $\boxed{Q_C < 0 \Rightarrow Q_F > 0 \text{ et } W > 0}$

On retrouve les mêmes résultats que pour le réfrigérateur. **D'un point de vue thermodynamique, il s'agit de la même machine ditherme. C'est le point de vue de l'utilisateur qui distingue la pompe à chaleur du réfrigérateur.**

Dans la pompe à chaleur, le système Σ est le fluide réfrigérant, la source chaude est la pièce que l'on désire chauffer et la source froide est l'atmosphère extérieure à laquelle on prélève de l'énergie thermique de façon « gratuite » (pas pour l'environnement..).

L'efficacité thermodynamique (1)

L'efficacité thermodynamique (grandeur définie toujours positive et notée) est le rapport de ce que l'expérimentateur gagne sur ce qu'il perd. Dans le cas présent, elle vaut, par définition :

L'expérimentateur « gagne » Q_c

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

L'expérimentateur doit fournir le travail

Cherchons à trouver une valeur maximale de e en fonction des seules températures des sources thermiques.

$$-Q_C\left(\frac{1}{T_F} - \frac{1}{T_C}\right) < \frac{W}{T_F} \Rightarrow W > 0 \Rightarrow \frac{-Q_C}{W} < \frac{1}{T_F}\left(\frac{T_F T_C}{T_C - T_F}\right)$$

L'efficacité thermodynamique (2)

Ce qui donne: $$\boxed{e < \frac{T_C}{T_C - T_F} \quad \text{et} \quad e_c = \frac{T_C}{T_C - T_F}}$$

Par exemple si $T_F = 5°C$ et $T_C = 17°C$ (il faut convertir en Kelvin), $e_C = 24{,}2 > 1$. Il ne faut pas s'étonner du fait que $e_C > 1$ car la chaleur reçue par la pièce à chauffer est prélevée sur l'atmosphère extérieure. Le cycle de Carnot est le même que celui du réfrigérateur.

On peut comparer (de façon sommaire) l'efficacité de la pompe à chaleur à celle d'un radiateur monotherme (radiateur électrique, chauffage au fioul, au gaz…) pour chauffer un bâtiment. Pour un radiateur monotherme $Q < 0$, $W > 0$ et $Q + W = 0$. L'efficacité vaut $e = -Q/W = 1$. Ainsi une pompe à chaleur est environ 20 fois plus efficace qu'un radiateur monotherme. C'est donc plus économique (sauf à l'installation) et plus écologique…

Exercice d'application

Une pompe à chaleur réversible fonctionne entre l'atmosphère extérieure et un local d'habitation. Elle maintient la température du local à 20°C. La température extérieure est 12°C .Calculer son efficacité ? Quelle serait l'efficacité de cette pompe à chaleur si on voulait seulement atteindre la température de 18°C dans le local ?

Solution

1) $e_C = \dfrac{T_C}{T_C - T_F} = \dfrac{293}{293 - 285} = 36{,}6$

2) $e_C = \dfrac{T_C}{T_C - T_F} = \dfrac{291}{291 - 285} = 48{,}5$

L'efficacité est plus grande lorsque les températures des sources sont proches.

Système diphasé

Cycle de Carnot (1)

Le système Σ considéré sera un échantillon de corps pur sous forme liquide et gaz. La figure suivante montre dans un diagramme de Clapeyron, un cycle de Carnot $ABCD$ pour ce système :

- AB : transformation adiabatique et réversible
- BC : Vaporisation partielle isotherme à T_{fr} sous la pression $P_{sat}(T_{fr})$
- CD : transformation adiabatique et réversible
- DA : liquéfaction totale isotherme à T_{ch} sous la pression $P_{sat}(T_{ch})$

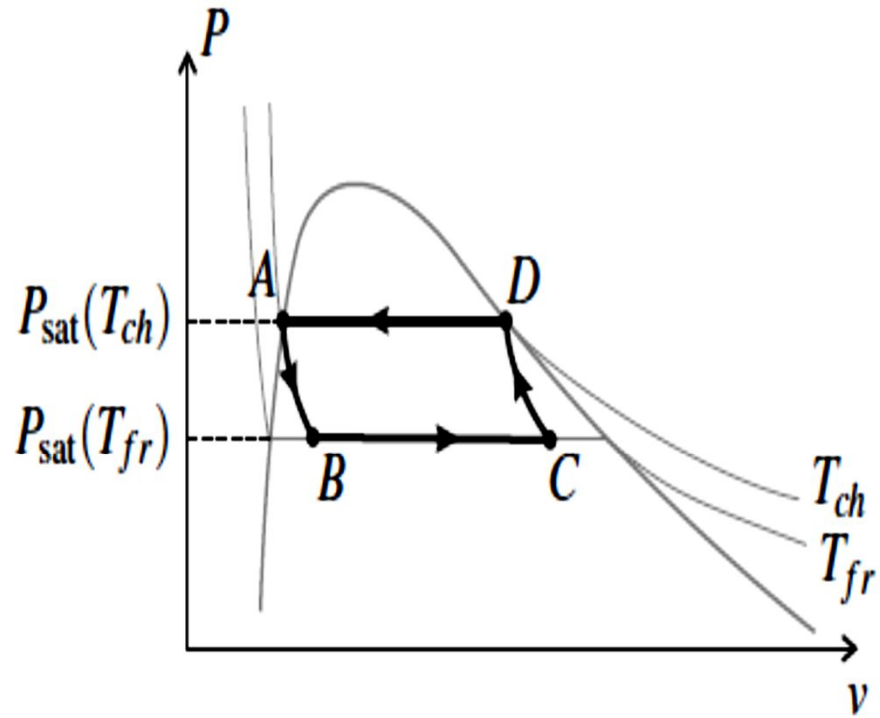


Figure 25.4 – Un cycle de Carnot pour un corps pur diphasé.

Cycle de Carnot (2)

En *A* on a du liquide saturant seul et *D* de la vapeur sèche.

Le cycle est décrit dans le sens trigonométrique dans ce cas, le fluide reçoit du travail. Il s'agit donc du cycle d'une machine frigorifique ou d'une pompe à chaleur. On va exprimer les transferts d'énergie Q_{ch}, Q_{fr} et W de Σ sur le cycle en fonction de la masse de fluide de gaz m, des températures T_{ch},T_{fr} et de grandeurs caractéristiques du fluide (capacités thermiques massiques, enthalpie ou entropie de vaporisation). On va commencer par déterminer les fractions massiques en gaz $x_{G,B}$ et $x_{G,C}$ aux points B et C. la transformation AB est adiabatique et réversible, donc isentropique. Ainsi :

$$S = n\left(S_{m,I} + x_{II}\left(S_{m,II} - S_{m,I}\right)\right) = m(s_I + x_{II}(s_{II} - s_I))$$

$$\Rightarrow S_A = S_B \Rightarrow m s_L(T_{ch}) = m\left(s_L\left(T_{fr}\right) + x_{G,B}\Delta_{vap}s\left(T_{fr}\right)\right)$$

Cycle de Carnot (3)

$$\Longrightarrow \boxed{x_{G,B} = \frac{s_L(T_{ch}) - s_L(T_{fr})}{\Delta_{vap}s(T_{fr})} = \frac{c_L}{\Delta_{vap}s(T_{fr})}\ln\left(\frac{T_{ch}}{T_{fr}}\right)}$$

c_L est la capacité thermique du liquide. De la même manière on obtient $x_{G,C}$ par l'équation :

$$S_C = S_D \Longrightarrow m\left(s_L(T_{fr}) + x_{G,C}\Delta_{vap}s(T_{fr})\right) = m\left(s_L(T_{ch}) + \Delta_{vap}s(T_{ch})\right)$$

$$\Longrightarrow \boxed{x_{G,C} = \frac{c_L \ln\left(\frac{T_{ch}}{T_{fr}}\right) + \Delta_{vap}s(T_{ch})}{\Delta_{vap}s(T_{fr})}}$$

Ainsi : $$x_{G,C} - x_{G,B} = \frac{\Delta_{vap}s(T_{ch})}{\Delta_{vap}s(T_{fr})}$$

Cycle de Carnot (4)

Le fluide échange du transfert thermique avec la source froide au cours de la transformation isobare BC donc $Q_{fr} = Q_{BC} = \Delta H_{BC} = m\left(x_{G,C} - x_{G,B}\right)\Delta_{vap}h\left(T_{fr}\right)$.

Ainsi donc :

$$\boldsymbol{Q_{fr} = m\Delta_{vap}h\left(T_{fr}\right)\frac{\Delta_{vap}s\left(T_{ch}\right)}{\Delta_{vap}s\left(T_{fr}\right)} = m\Delta_{vap}h\left(T_{ch}\right)\frac{T_{fr}}{T_{ch}}}$$

Le fluide échange du transfert thermique avec la source chaude au cours de la transformation isobare DA et de même $Q_{ch} = Q_{DA} = \Delta H_{DA}$ soit :

$$\boldsymbol{Q_{ch} = -m\Delta_{vap}h\left(T_{ch}\right)}$$

Cycle de Carnot (5)

On obtient le travail échangé par le fluide au cours du cycle en appliquant le premier principe :

$$\boldsymbol{W = -Q_{fr} - Q_{ch} = m\Delta_{vap}h(T_{ch})\left(1 - \frac{T_{fr}}{T_{ch}}\right)}$$

Pour conclure, on peut le rendement de ce système en tant que machine frigorifique :

$$e_{frigo} = \frac{Q_{fr}}{W} = \frac{T_{fr}}{T_{ch} - T_{fr}}$$

Récapitulatif sur l'efficacité des machines thermiques

Récapitulatif

Récapitulatif	Moteur	Machine frigorifique	Pompe à chaleur
Signe des échanges Utile – payée	$W<0\,;Q_C>0\,;Q_F<0$	$W>0\,;Q_C<0\,;Q_F>0$	$W>0\,;Q_C<0\,;Q_F>0$
Rendement et Efficacité	$r=\dfrac{-W}{Q_C}=1+\dfrac{Q_F}{Q_C}$	$e_{Frig}=\dfrac{Q_F}{W}=-\dfrac{1}{1+\dfrac{Q_C}{Q_F}}$	$e_{PAC}=\dfrac{-Q_C}{W}=\dfrac{1}{1+\dfrac{Q_F}{Q_C}}$
Rendement et Efficacité de Carnot (max)	$r_{Carnot}=1-\dfrac{T_F}{T_C}$	$e_{Frig.Carnot}=\dfrac{T_F}{T_C-T_F}$	$e_{PAC.Carnot}=\dfrac{T_C}{T_C-T_F}$

Sources de températures variables

Sources de températures variables

La température d'une (ou des 2) sources peut varier au cours du fonctionnement de la machine thermique ditherme. Il faut alors raisonner sur un cycle infinitésimal.

$$dU_{cycle} = \delta W + \delta Q_F + \delta Q_C = 0$$

$$2^{ème} \text{ principe} \Longrightarrow \frac{\delta Q_C}{T_C} + \frac{\delta Q_F}{T_F} \leq 0$$

T_F et T_C ne sont plus constants. Pour l'ensemble du cycle, la relation de Clausius s'écrit :

$$\int_{T_{C_{initiale}}}^{T_{C_{finale}}} \frac{\delta Q_C}{T_C} + \int_{T_{F_{initiale}}}^{T_{F_{finale}}} \frac{\delta Q_F}{T_F} \leq 0$$

L'égalité correspond à une succession de cycles réversibles élémentaires.

Exercice d'application (1)

Un moteur thermique réversible fonctionne entre une masse d'eau initialement à 60°C et l'atmosphère, à la température à 20°C. La masse d'eau m à une capacité thermique $C = 4185 J.K^{-1}$. Le moteur s'arrête de fonctionner lorsque la température de l'eau atteint 20°C. Calculer le transfert thermique reçu par le fluide thermique circulant dans le moteur de la part de l'eau ? Calculer le transfert thermique fourni par ce fluide à l'atmosphère ?

Solution

Le moteur fonctionne de façon réversible

$$\frac{\delta Q_C}{T_C} + \frac{\delta Q_F}{T_F} = 0$$

En intégrant:

$$\int_{333}^{293} \frac{\delta Q_C}{T_C} + \int \frac{\delta Q_F}{T_F} = 0 \Longrightarrow \int_{333}^{293} -\frac{C dT_C}{T_C} + \frac{1}{T_F} \int \delta Q_F = 0$$

Exercice d’application (2)

$$\Longrightarrow -C[\ln T_C]_{333}^{293} + \frac{Q_F}{T_F} = 0 \Longrightarrow \boxed{Q_F = T_F C \ln\frac{293}{333}}$$

$$Q_F = 293 \times 4185\ \ln\frac{293}{333} \Longrightarrow \boxed{Q_F = -156{,}9\ J}$$

Lorsque la température de l’eau varie de dT, la source reçoit un transfert thermique $\delta Q = CdT$ et le fluide reçoit $\delta Q_C = -CdT$

$$Q_C = \int_{333}^{293} -CdT_C = -4185(293 - 333) \Longrightarrow \boxed{\mathrm{Q_C = 167{,}4\ KJ}}$$

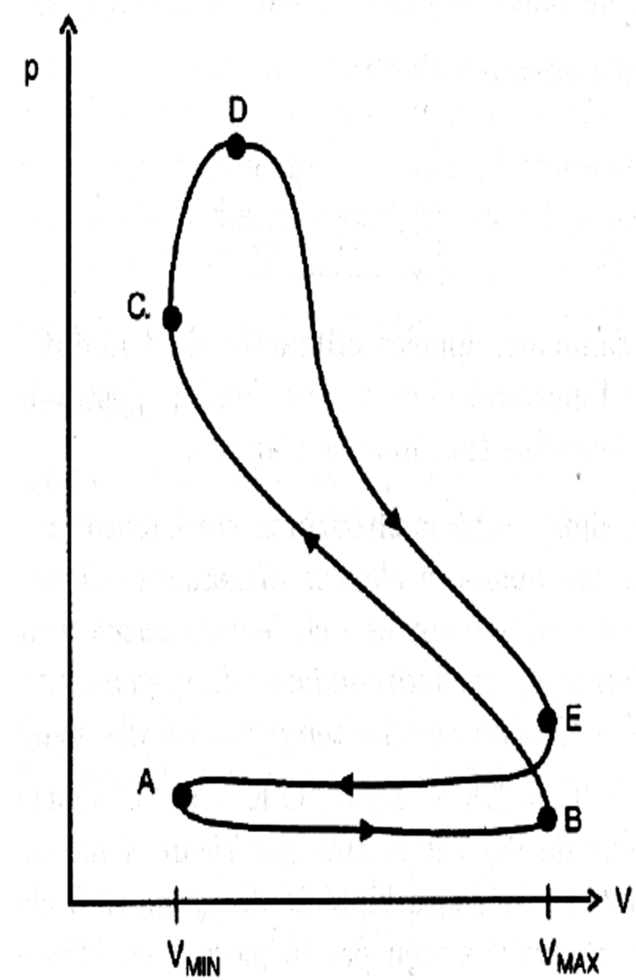
On voit bien que $Q_C > 0$ et $Q_F < 0$

Etude de machines thermiques réelles

A- Moteur à explosion (ME)

Description du ME (1)

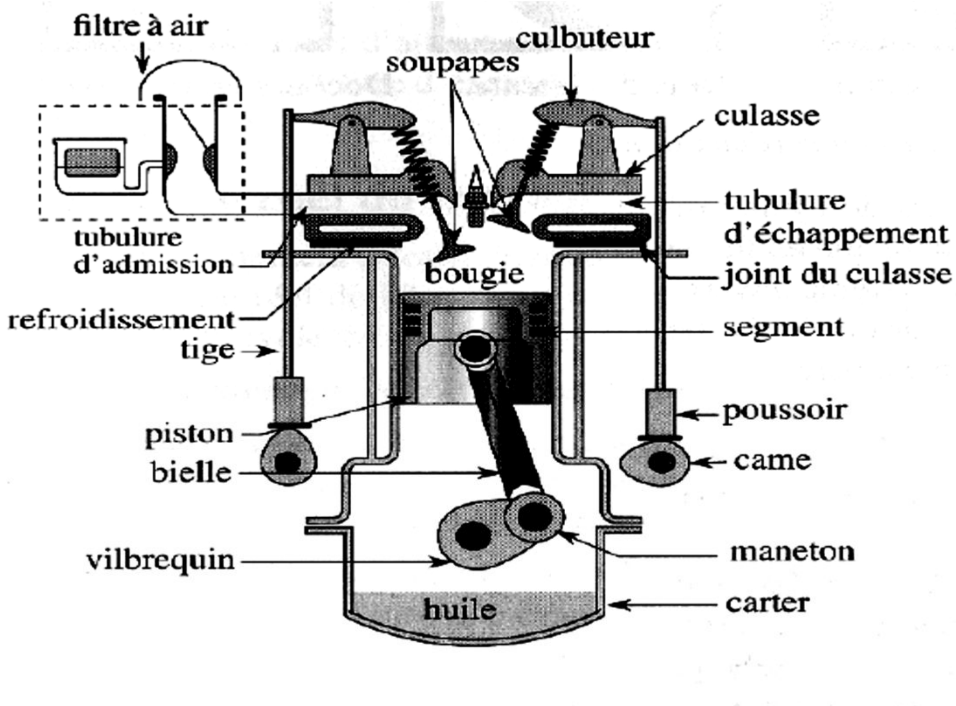
Le moteur à explosions est constitué d'un piston mobile dans un cylindre muni de soupapes d'admission et d'échappement. L'allure de son diagramme de Watt (P,V) est présenté ci-dessous. Les points A, B, C, D, E correspondent aux extrema de la pression et du volume.



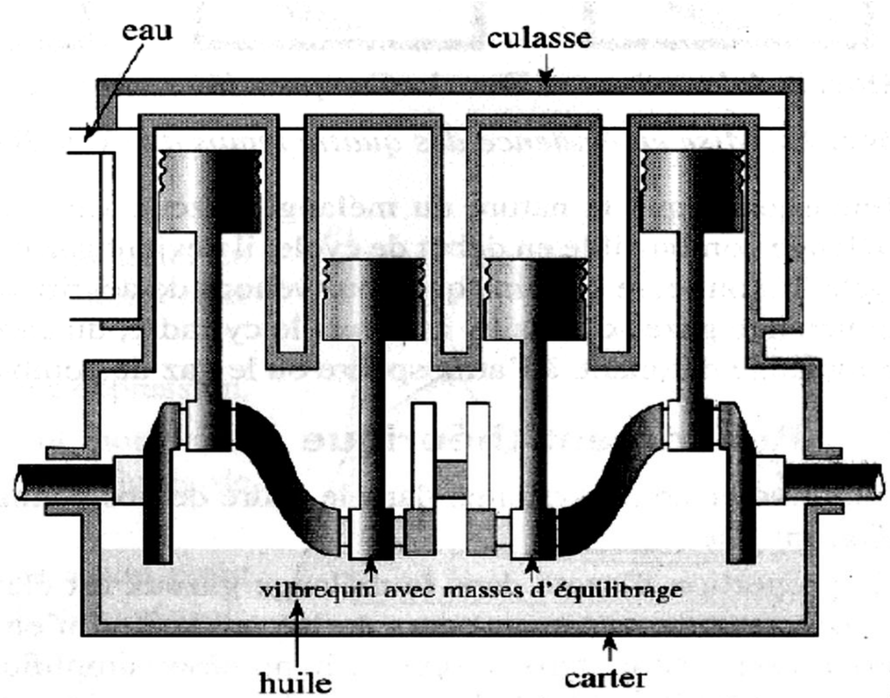
On peut décomposer le cycle du ME en quatre phases successives correspondant chacune à un aller simple du piston, deux des quatre phases correspondant à un volume croissant et les deux autres à un volume décroissant, on parle couramment des **quatre temps** du ME.

Description du ME (2)

Sur les quatre temps du moteur à explosion, deux temps sont moteurs (évolution AB et CDE) et deux sont récepteurs (évolutions BC et EA). En couplant quatre cylindres dont les temps sont décalés, on obtient globalement un système qui est moteur à tout instant.

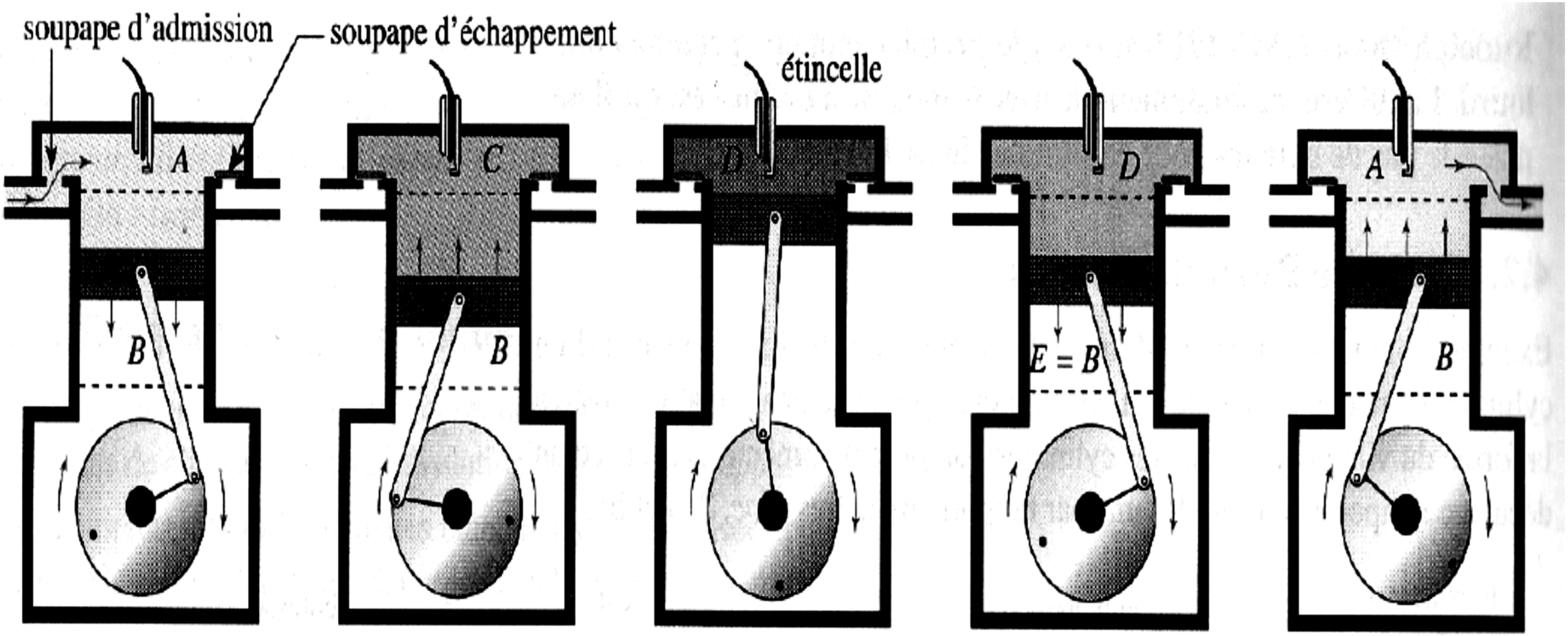


Doc. 20a. *Cylindre d'un moteur à essence.*



Doc. 20b. *Coupe d'un moteur à essence à quatre cylindres.*

Description du ME (3)



Doc. a. *Admission.* **Doc. b.** *Compression.* **Doc. c.** *Combustion.* **Doc. d.** *Détente.* **Doc. e.** *Échappement.*

Modélisation du ME (1)

Le diagramme de Watt précédent est remplacé par le diagramme modèle ci-après. Plus précisément :

⇒L'admission est supposée **isotherme** et **isobare** à la pression atmosphère.

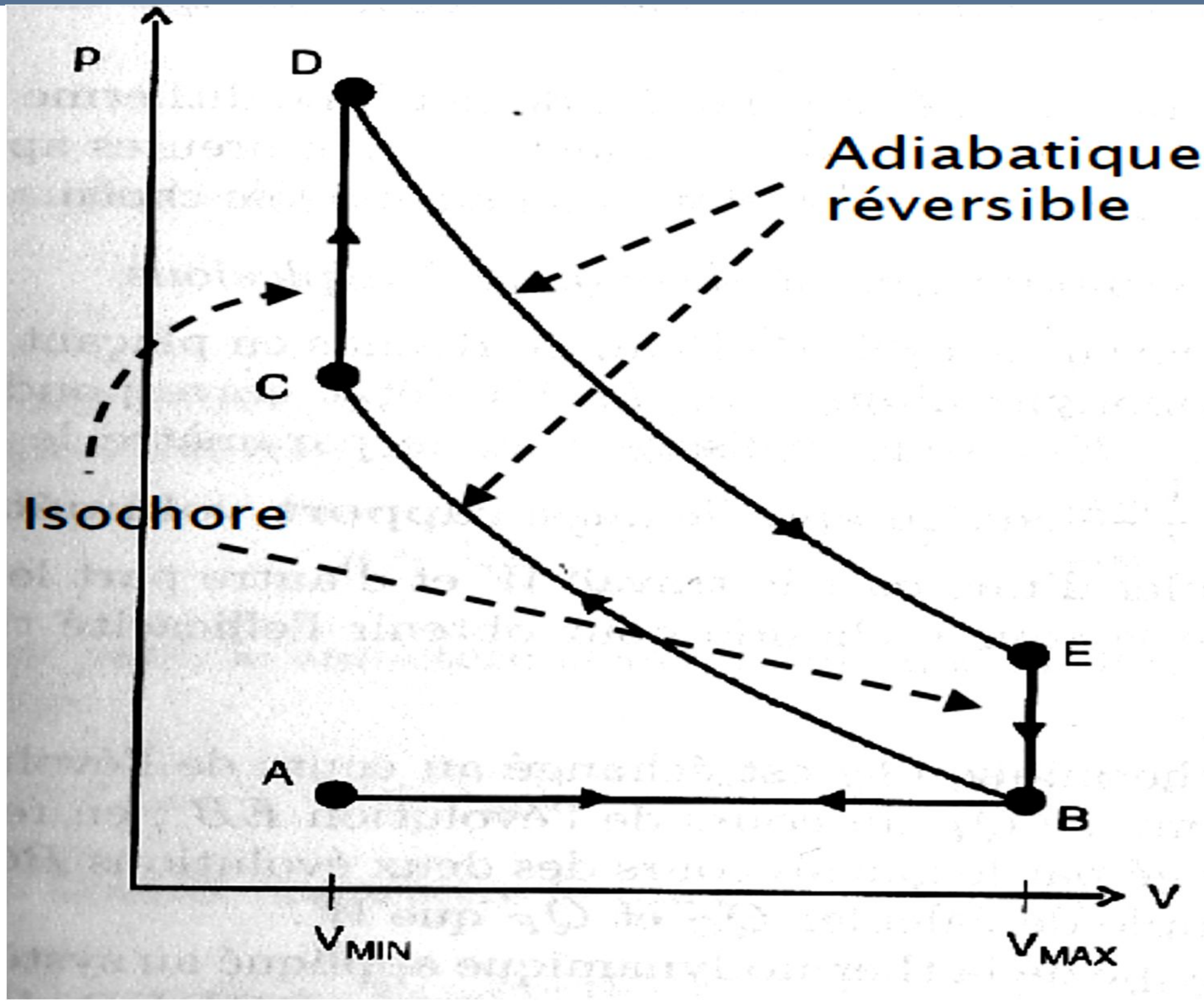
⇒La compression BC et la détente DE sont supposées **adiabatiques** (on néglige les pertes de chaleur à travers les parois du cylindre) et **réversibles** (on néglige notamment le frottements) : ces évolutions sont donc **isentropiques**.

⇒La combustion est assez rapide pour que le piston n'ait pas le temps de se déplacer, l'évolution CD est donc modélisée par une évolution **isochore**.

⇒L'ouverture de la soupape est rapide et ramène le gaz à pression atmosphérique sans que le piston ait le temps de se déplacer. L'évolution EB est donc **isochore**.

⇒Le gaz est enfin expulsé dans l'atmosphère à pression et température constantes.

Modélisation du ME (2)



Efficacité thermodynamique du ME (1)

Soit $a = (V_{max}/V_{min})$ le taux de compression ou rapport volumique. On cherche à calculer l'efficacité $e = -W/Q_C$ du ME.

Evolution CD⟶ transfert thermique Q_C

Evolution EB⟶ transfert thermique Q_F

Evolution BC et DE⟶ échange de W

Il est plus facile de calculer Q_C et Q_F que W .

⇒1er principe de la thermodynamique appliqué au système fermé Σ qui décrit un cycle BCDEB:

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

donc

$$e = 1 + \frac{Q_F}{Q_C}$$

Efficacité thermodynamique du ME (2)

Au cours de l'évolution isochore CD, le travail reçu est nul. On applique le 1er principe au système fermé Σ pour l'évolution CD :

$$\Delta U = U_D - U_C = 0 + Q_C$$

comme le gaz est parfait :

$$U_D - U_C = C_V(T_D - T_C) = \frac{nR(T_D - T_C)}{\gamma - 1}$$

Cela nous donne :

$$Q_C = \frac{nR(T_D - T_C)}{\gamma - 1} \quad \text{et} \quad Q_F = \frac{nR(T_B - T_E)}{\gamma - 1}$$

⇒En substituant, nous obtenons l'expression de l'efficacité en fonction des températures aux quatre sommets du cycle :

Efficacité thermodynamique du ME (3)

$$e = 1 + \frac{Q_F}{Q_C} = 1 - \frac{T_B - T_E}{T_D - T_C}$$

⇒On utilise le caractère isentropique des évolutions BC et DE, cela donne :

$$T_B V_{max}^{\gamma-1} = T_C V_{min}^{\gamma-1} \quad \text{et} \quad T_E V_{max}^{\gamma-1} = T_D V_{min}^{\gamma-1}$$

On fait apparaître le taux de compression ce qui donne :

$$T_C = T_B a^{\gamma-1} \quad \text{et} \quad T_D = T_E a^{\gamma-1}$$

On obtient finalement :

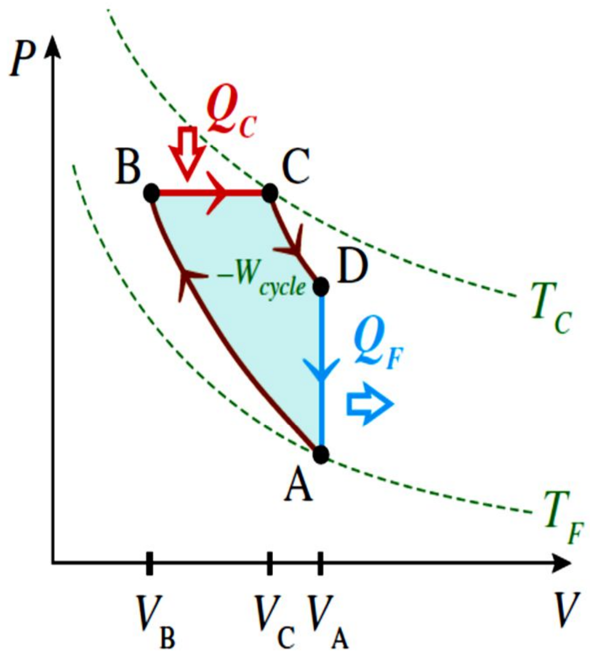
$$\boxed{e = 1 - \frac{1}{a^{\gamma-1}}}$$

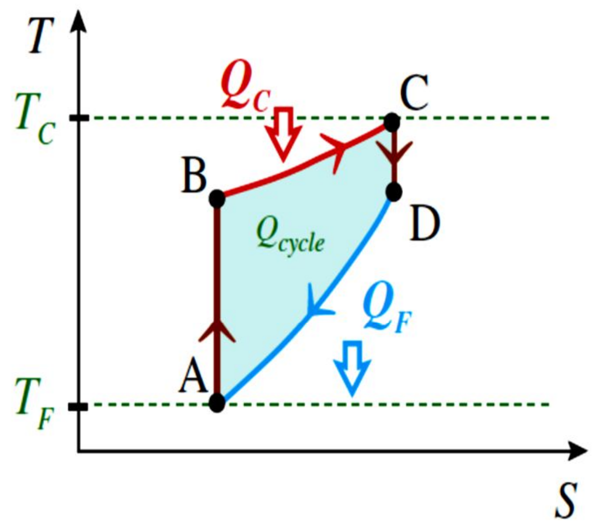
Efficacité thermodynamique du ME (4)

Il dépend du rapport V_{max}/V_{min}. Comme $1-\gamma<0$, l'expression précédente montre que e est d'autant plus grand que le taux de compression est important. Une valeur type de taux de compression est 10 et le rendement donné par la formule e (**avec** $\gamma=1{,}4$) est 0,60. **Les carburants sont conçus de manière à supporter un fort taux de compression sans exploser avant l'étincelle de la bougie.** L'augmentation à priori souhaitable du taux de compression est limitée par le phénomène d'auto-allumage ; le mélange s'enflamme spontanément avant la fin de la compression ; l'explosion violente du mélange provoque alors un choc préjudiciable sur les pièces mécaniques, on dit que le moteur cogne.

B- Exemples de Moteurs réels

Cycle Diesel (moteur à combustion interne)

<table>
<tr><th>Diagramme (P, V)</th><th>Diagramme (T, S)</th><th>Rendement</th></tr>
<tr><td>


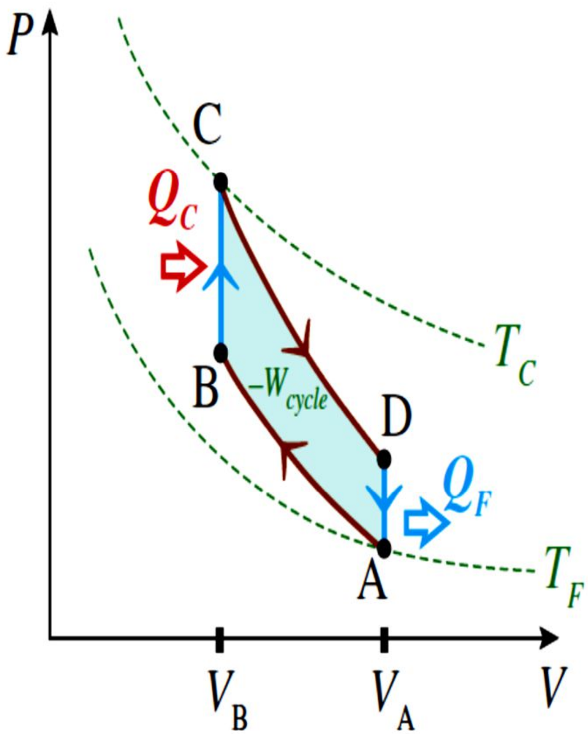
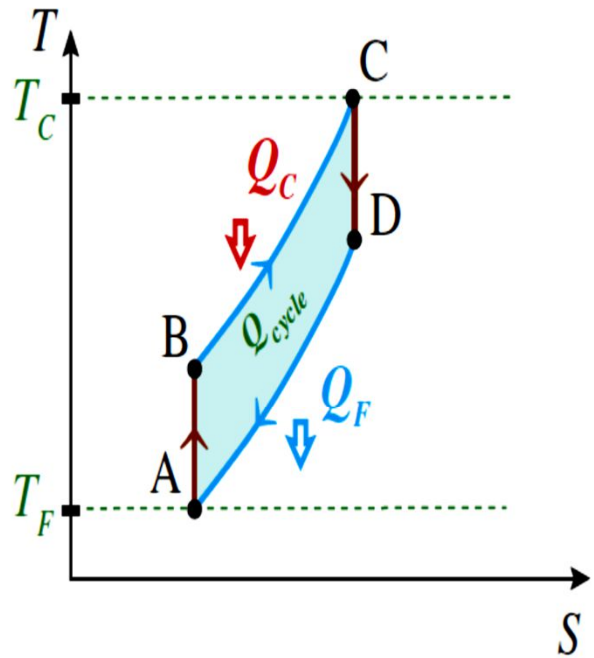
</td><td>


</td><td>

$$r = 1 - \frac{1}{\gamma}\left(\frac{\left(V_A/V_B\right)^{-\gamma} - \left(V_A/V_C\right)^{-\gamma}}{\left(V_A/V_B\right)^{-1} - \left(V_A/V_C\right)^{-1}}\right)$$

Pour $V_A/V_B = 20$ et $V_A/V_C = 10$;
$r = 65\%$
</td></tr>
</table>

Cycle de Beau de Rochas ou d'Otto (moteur à essence à 4 temps, combustion interne)

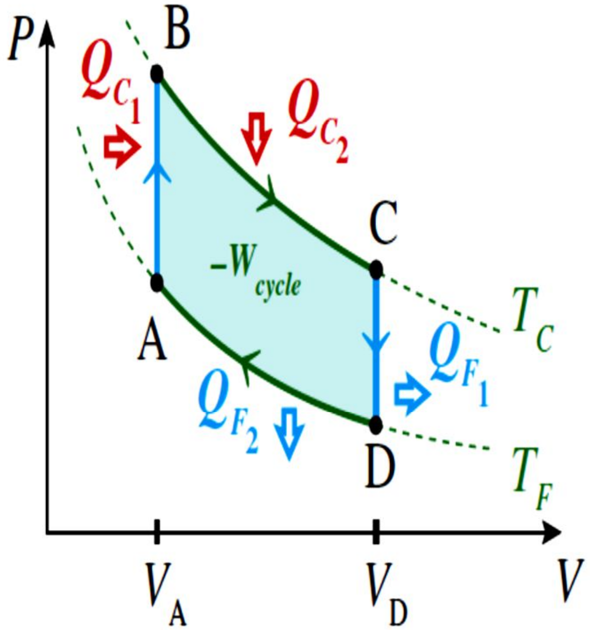
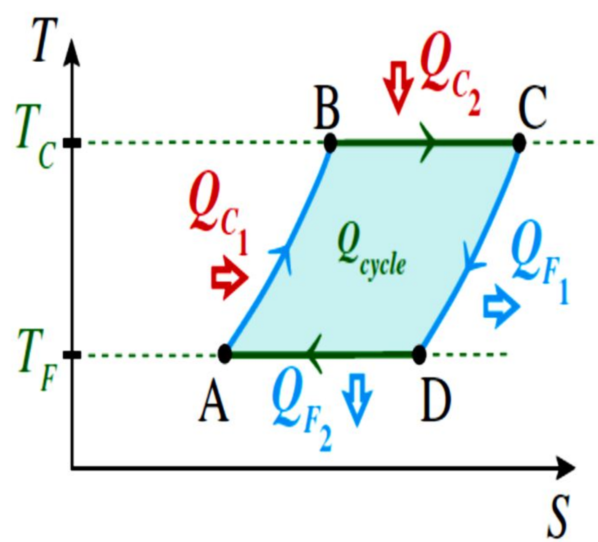
<table>
<tr><th>Diagramme (P, V)</th><th>Diagramme (T, S)</th><th>Rendement</th></tr>
<tr>
<td>
</td>
<td>
</td>
<td>

$$r = 1 - \left(\frac{V_A}{V_B}\right)^{1-\gamma}$$

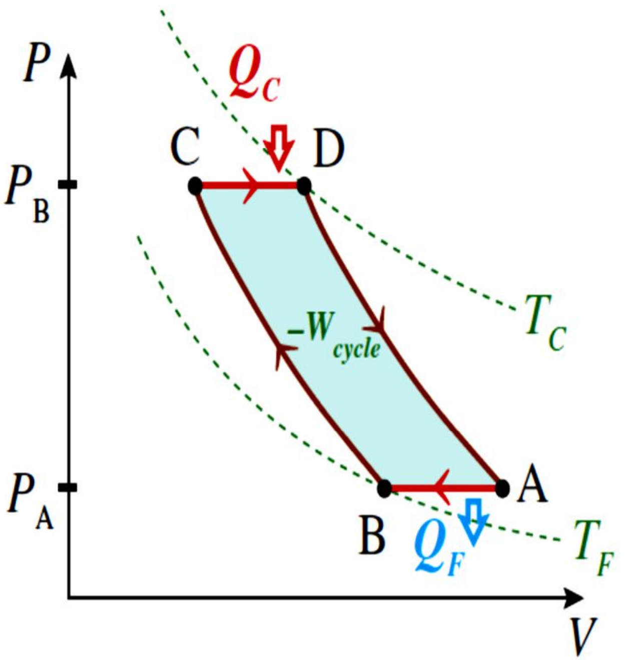
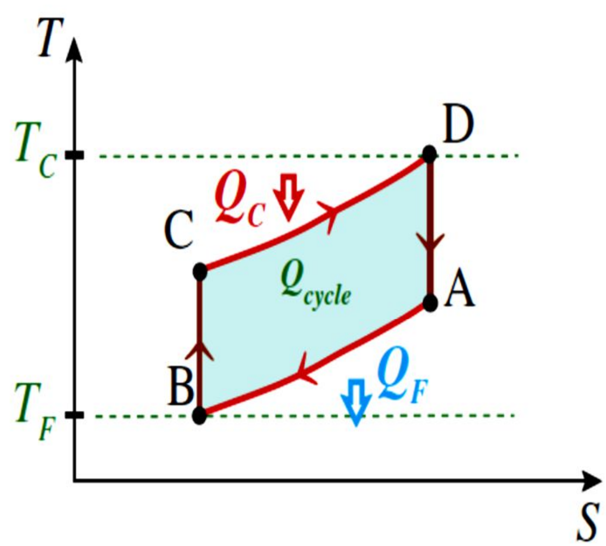
Pour $V_A / V_B = 10$; $r = 60\%$

</td>
</tr>
</table>

Cycle de Stirling (moteur à combustion externe)

Diagramme (P, V)	Diagramme (T, S)	Rendement
		$r = \dfrac{1}{\dfrac{1}{(\gamma - 1)\ln\left(\dfrac{V_D}{V_A}\right)} + \dfrac{T_C}{T_C - T_F}}$ Pour $V_D / V_A = 10$ $T_C = 1000$ K et $T_F = 300$ K, $r = 40\%$

Cycle de Brayton-Joule (moteur à réaction)

Diagramme (P, V)	Diagramme (T, S)	Rendement
		$r = 1 + \left(\dfrac{P_A}{P_B}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$ Pour $P_A / P_B = 5$; $r = 37\%$

C- Machine frigorifique

Principe de fonctionnement général (1)

Dans une machine frigorifique à écoulement fluide, ce dernier évolue généralement entre 4 dispositifs différents:

Le compresseur idéal fournit un travail au fluide $(w > 0)$ pour augmenter sa pression sans transfert de chaleur. Au contact du **condenseur**, le fluide se liquéfie et cède de l'énergie thermique à la source chaude $(q_C < 0)$. Par la suite le **détendeur** ramène le liquide frigorifique à une pression suffisamment basse pour que celui-ci puisse s'évaporer dans **l'évaporateur**, en captant de l'énergie thermique issue de la source froide $(q_F > 0)$. Le fluide ainsi vaporisé retourne dans le compresseur pour effectuer un nouveau cycle.

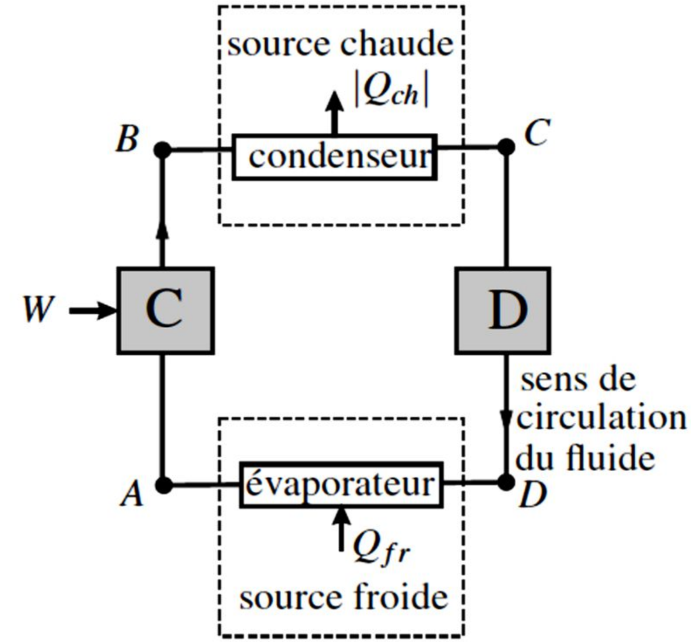


Figure 25.8 – Schéma d'un système à condensation.

Principe de fonctionnement général (2)

On retiendra que les transformations liées à chaque composant d'une machine thermique ont généralement les propriétés suivantes

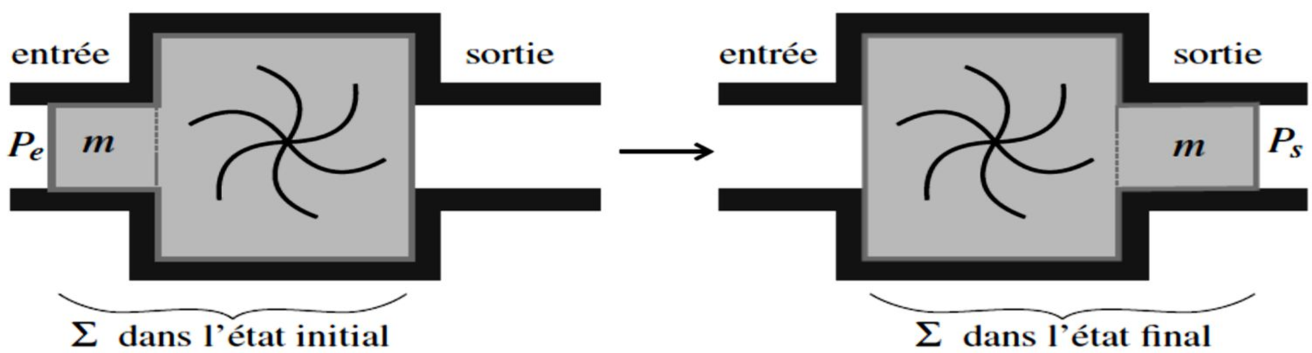
Dispositif	Détendeur	Echangeur de chaleur : évaporateur et condenseur	Compresseur idéal
Transformation	Isenthalpique $\Delta h = 0$	Isobare $\Delta P = 0$	Isentropique $\Delta s = 0$; $w \neq 0$ et $q = 0$

Premier principe pour un fluide en écoulement

Pour un fluide en écoulement stationnaire, traversant un élément actif à l'intérieur duquel il reçoit, de parties mobiles, un travail mécanique massique w_u (travail utile) et dans lequel il reçoit le transfert thermique massique q, le premier principe s'écrit, en négligeant la variation d'énergie cinétique :

$$\boxed{\boldsymbol{\Delta h = w_u + q}}$$

où Δh est la variation d'enthalpie massique entre l'entrée et la sortie de l'élément actif.



Application du Premier principe

Ce résultat général s'applique à chacun des quatre éléments de la machine :

- pour le **compresseur** : $\Delta h_{AB} = h_B - h_A = w_{comp}$
- pour le **condenseur** : $\Delta h_{BC} = h_C - h_B = q_{ch}$
- pour le **détendeur** : $\Delta h_{CD} = h_D - h_C = 0 \Longrightarrow h_D = h_C$
- pour **l'évaporateur** : $\Delta h_{DA} = h_A - h_D = q_{fr}$

L'efficacité de la machine est suivant sa fonction :

$$\boxed{\boldsymbol{e_{frigo} = \frac{q_{fr}}{w_{comp}} = \frac{h_A - h_D}{h_B - h_A}}}$$

$$\boxed{\boldsymbol{e_{pac} = -\frac{q_{ch}}{w_{comp}} = \frac{h_B - h_C}{h_B - h_A}}}$$

B- Diagramme des frigoristes

A quoi ça sert un diagramme Enthalpique?(1)

Ça sert à tracer **le cycle frigorifique de la machine** et ça sert surtout à faire **les calculs de base pour choisir et dimensionner les éléments de la machine frigorifique**.

Après avoir calculé le bilan thermique journalier d'une chambre froide par exemple (apports thermiques par les parois, les denrées, par le renouvellement d'air, par le personnel, par la ventilation, par l'éclairage, par la chaleur du matériel). Vous pouvez déterminer la puissance frigorifique de la future installation.

A quoi ça sert un diagramme Enthalpique?(2)

Suivant les denrées qui se trouvent dans la chambre froide, une température de conservation sera conseillé, il faut savoir qu'a chaque catégorie de produit (légume, viande etc…) il y a une température optimale de conservation.

De cette température découle :

- le choix du fluide frigorigène.
- la température d'évaporation et la température de condensation.
- la surchauffe.
- le sous-refroidissement.

Présentation du diagramme (1)

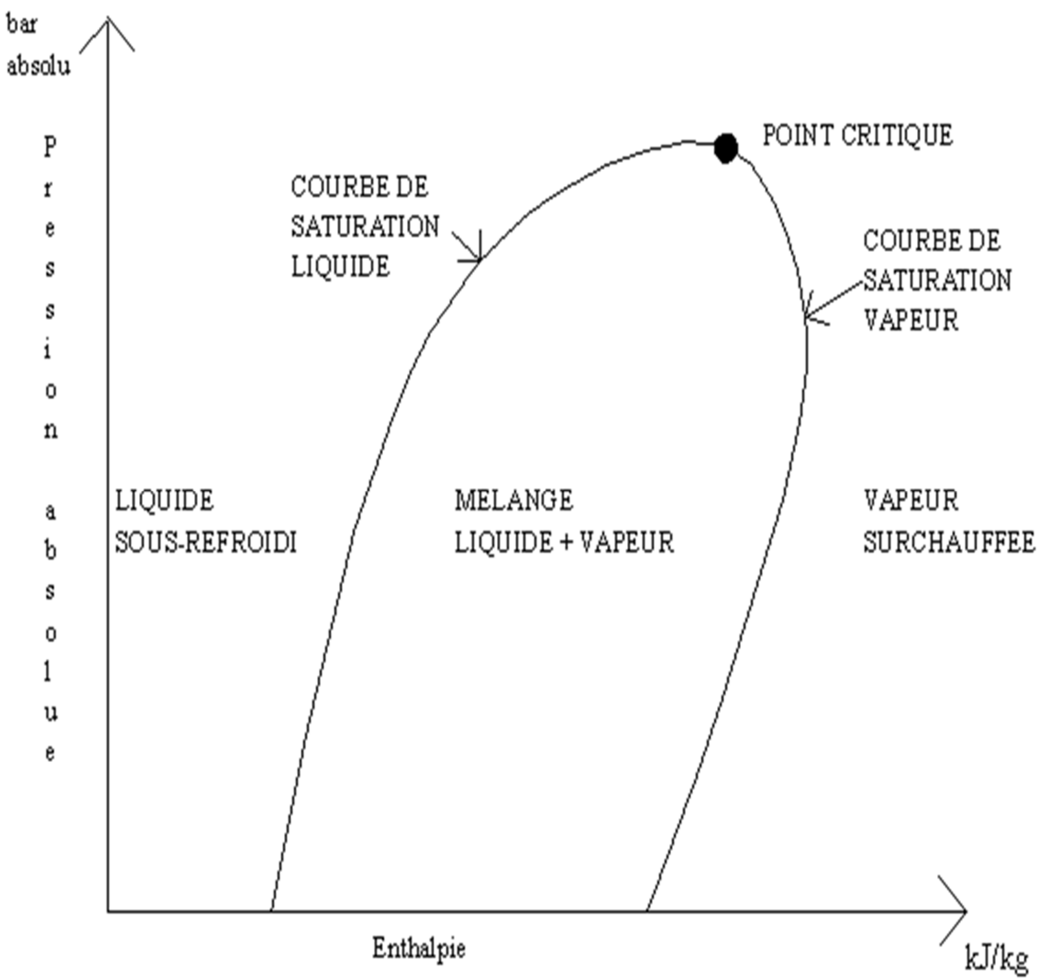
Pour un fluide frigorigène dans un système frigorifique, le diagramme enthalpique permet de suivre l'évolution de :

- la pression
- la température
- l'enthalpie
- l'entropie
- volume massique
- du mélange liquide-vapeur

Il existe un diagramme enthalpique pour chaque fluide frigorigène (R22, R134a...).

Sur le diagramme enthalpique, il est possible de suivre les différents changement d'état du fluide.

Présentation du diagramme (2)

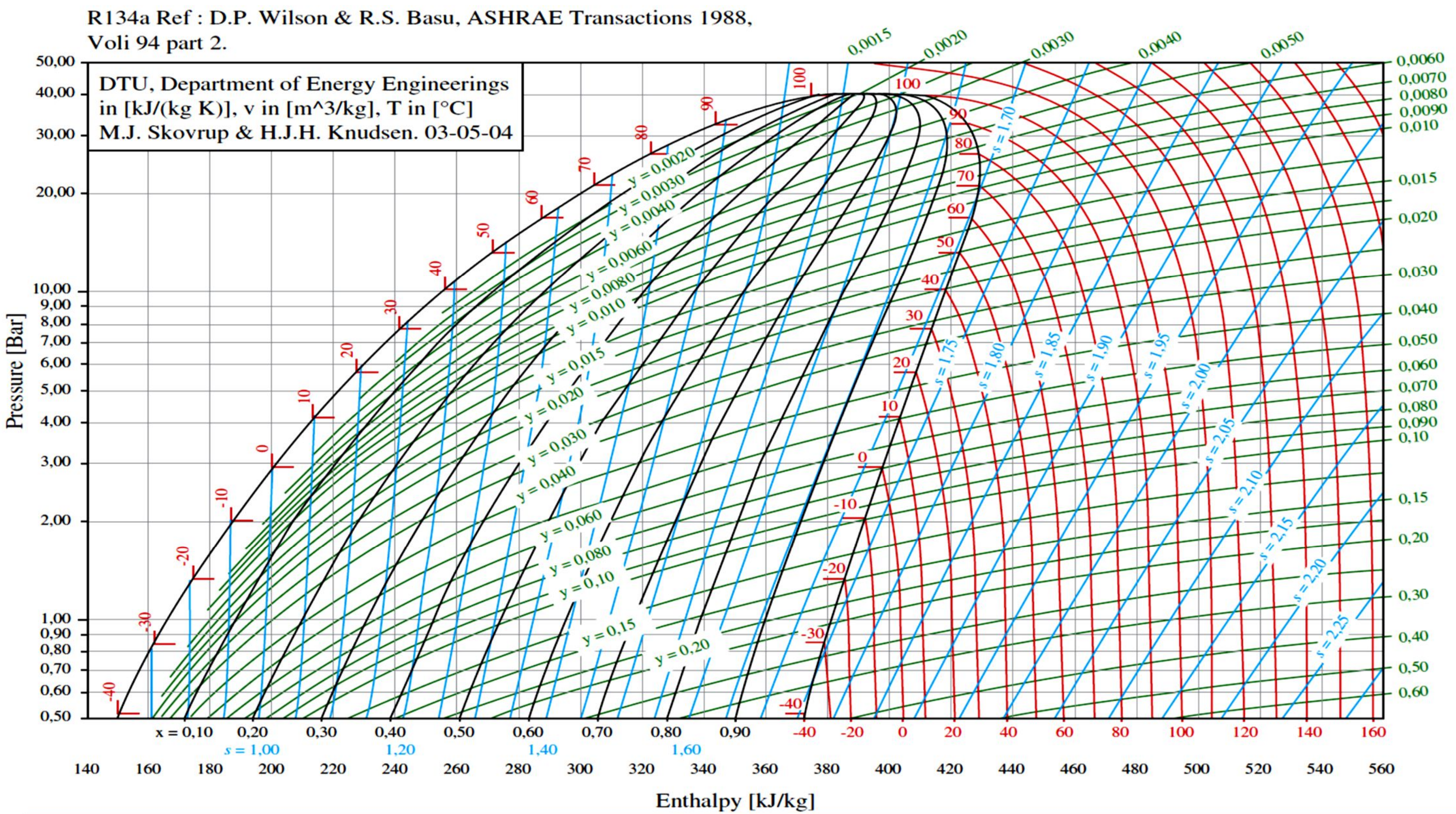


En abscisse, on trouve l'échelle des enthalpies. En ordonnée, on trouve l'échelle des pressions. Les courbes de saturation se rejoignent à un point, point critique, et divisent le diagramme en trois partie :

- zone de liquide sous-refroidi ;
- zone de mélange liquide +vapeur ;
- zone de vapeur surchauffée.

Ces trois zones correspondent aux différents états du fluide frigorigène dans un système frigorifique. Au dessus, du point critique un changement d'état n'est plus possible.

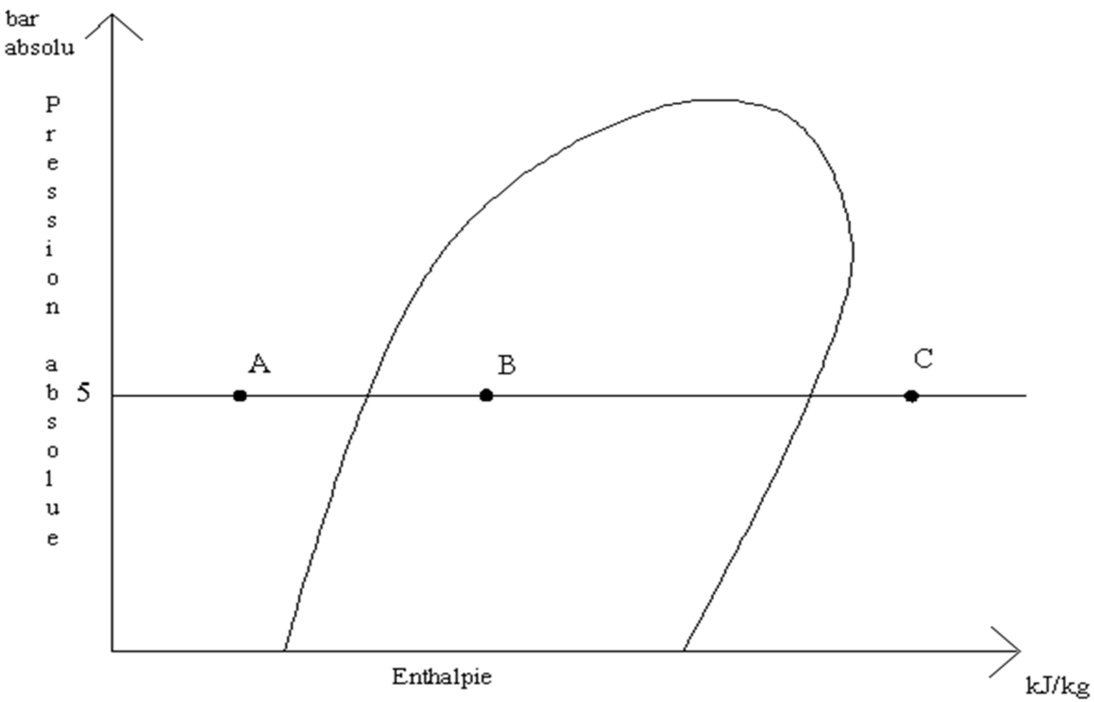
Présentation du diagramme (3)



Paramètres composant le diagramme (1)

❑ La pression

L'échelle des pressions évolue parallèlement à l'axe des enthalpies. Une transformation qui s'effectue à pression constante est une transformation **ISOBARE**.

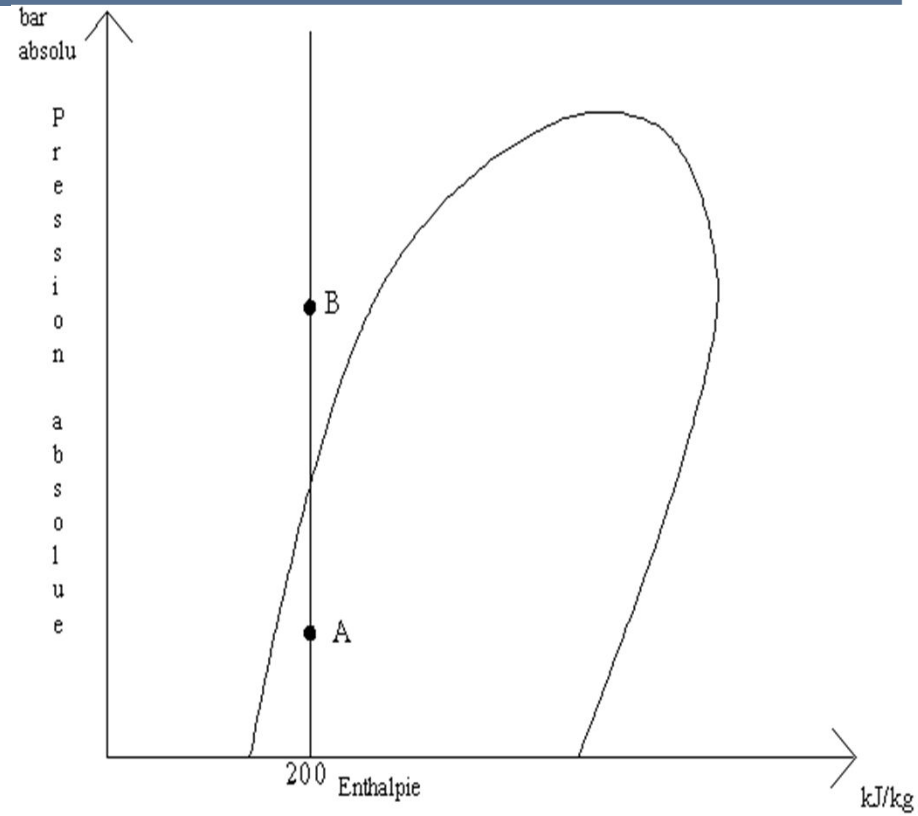


Ligne ISOBARE :
Pression en A = Pression en B = Pression en C = 5 bar absolus
Unité de la pression : bar

Paramètres composant le diagramme (2)

❑ L'enthalpie

L'enthalpie représente l'énergie totale emmagasinée (Q en J) par 1 kg de fluide frigorigène pour une pression et une température donnée. Une transformation qui s'effectue à enthalpie constante est une transformation **ISENTHALPE** (pas d'énergie emmagasinée par le fluide). L'échelle des enthalpies évolue parallèlement à l'axe des pressions.

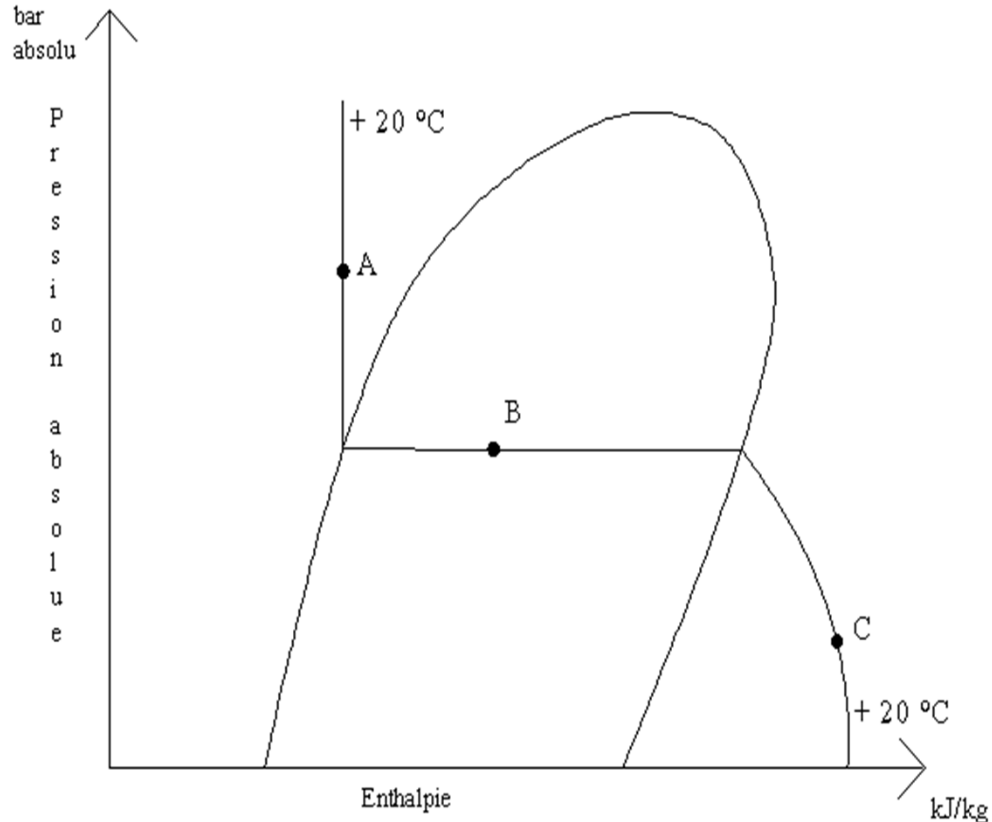


Ligne ISENTHALPE : enthalpie en A = enthalpie en B = 200 kJ/kg
Unité de l'enthalpie : kJ / kg

Paramètres composant le diagramme (3)

❑ La température

Dans la zone de mélange liquide + vapeur , la température et la pression sont **liées**. Dans les autres zones la température et la pression ne sont pas liées. Une transformation qui s'effectue à température constante est une transformation **ISOTHERME** .

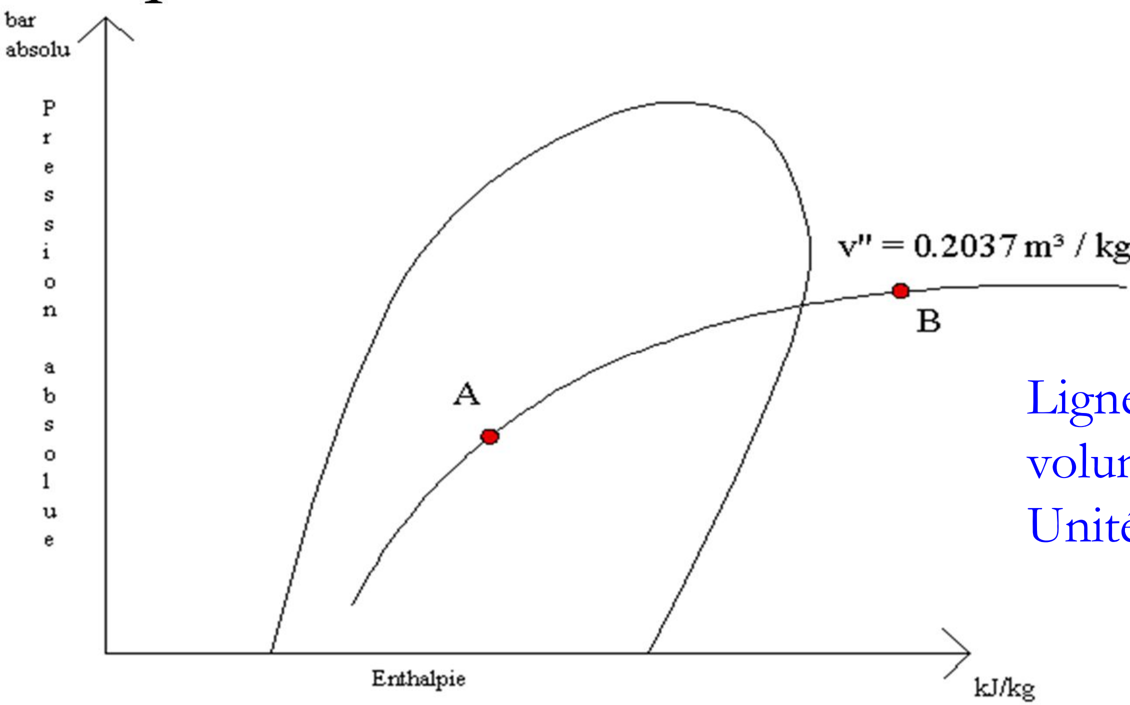


Ligne ISOTHERME : température en A = température en B = température en C = + 20 °C. Unité de température : ***°C***

Paramètres composant le diagramme (4)

❑ Le volume massique

Le volume massique représente le volume occupé par 1 kilogramme de fluide frigorigène. Une transformation qui s'effectue à volume massique constant est une transformation **ISOCHORE**.



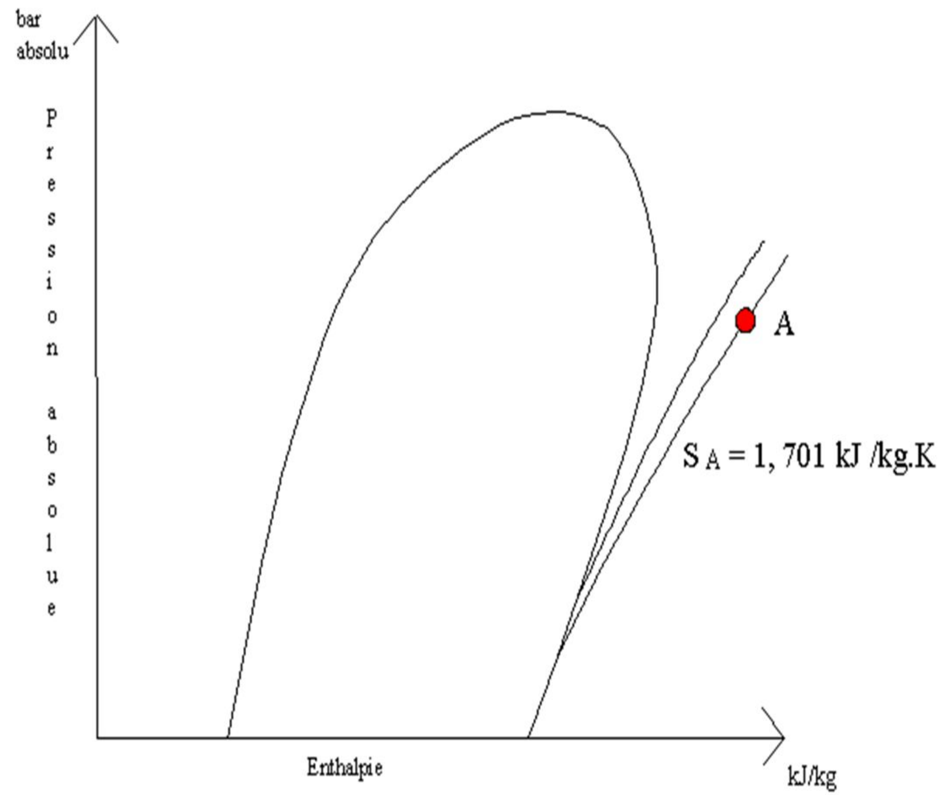
Ligne ISOCHORE : volume massique en A = volume massique en B = 0,2037 m^3/kg

Unité du volume massique : **m^3 / kg**

Paramètres composant le diagramme (5)

❑ L'entropie

L'entropie représente l'énergie interne emmagasinée (Q en J) par 1 kg de fluide frigorigène et par Kelvin. Une transformation qui s'effectue à entropie constante est une transformation **ISENTROPE** (pas d'énergie emmagasinée).

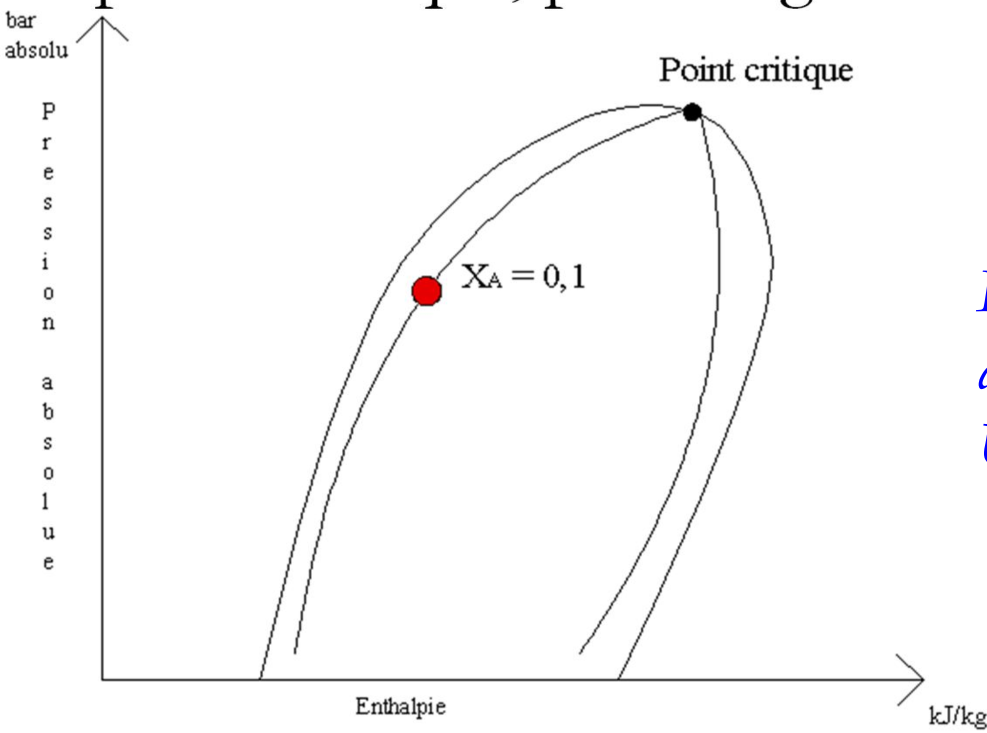


Ligne ISENTROPE : entropie en A = 1,701 kJ / kg.K
Unité de l'entropie : ***kJ / kg.K***

Paramètres composant le diagramme (6)

❑ Le titre

Le titre représente le pourcentage de vapeur par rapport au liquide. Si le titre reste constant, on parle de **ISOTITRE** (pourcentage de vapeur identique, pas d'augmentation de la quantité de vapeur).



Ligne ISOTITRE : titre en A = 0,1 (10 % de vapeur et 90 % de liquide)
Unité : %

Paramètres composant le diagramme (7)

Courbe	Horizontal grise	Vertical grise	Rouge	Verte	Bleue	Noire*
Nature	isobare	isenthalpique	isotherme	isochore	isentropique	isotitre
Grandeur constante sur la courbe	P	h	T	v	s	x

* ce tracé n'a évidemment de sens que dans un mélange liquide-vapeur, donc sous la courbe de saturation.

Après avoir tracé le diagramme ? (1)

On peut calculer :

- ✓ le débit masse (qm),
- ✓ le volume aspiré (Va)
- ✓ le taux de compression
- ✓ le rendement volumétrique
- ✓ le volume balayé du compresseur
- ✓ la puissance théorique pour la compression
- ✓ la puissance réelle pour la compression
- ✓ la puissance utile à l'arbre du compresseur
- ✓ la puissance utile du moteur électrique
- ✓ la puissance du condenseur
- ✓ la puissance du détendeur.

Après avoir tracé le diagramme ? (2)

Ensuite on peut sélectionner le matériel :

- ✓ Le compresseur avec l'aide de la documentation constructeur.
- ✓ On détermine la puissance du condenseur
- ✓ On détermine la puissance de l'évaporateur

Dernière étape :

On dimensionne la tuyauterie (le calcul des pertes de charges).

Le diagramme constitue donc une étape clé dans le dimensionnement d'une installation, il est indispensable.

Étude du cycle dans le diagramme (P, h) (1)

Le diagramme est un outil puissant pour calculer la performance du cycle. On place sur le diagramme les points A , B , C et D représentant les états successifs du fluide, puis on lit leur abscisses h_A, h_B, h_C, h_D pour calculer le rendement.

Le cycle représenté sur la figure ci-dessous est le cycle d'une machine réelle destinée à produire du froid.

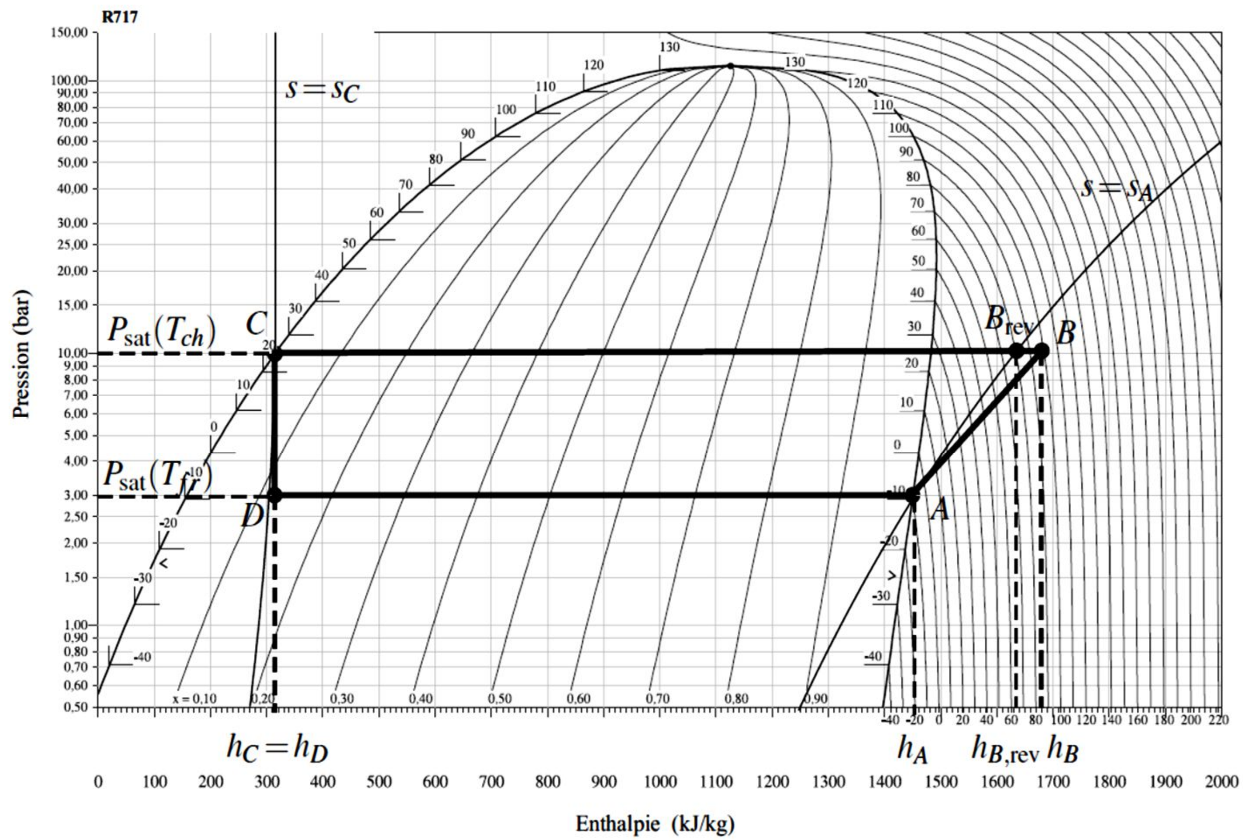


Figure 25.13 – Cycle d'une machine frigorifique : $T_{ch} = 298$ K, $T_{fr} = 263$ K.

Étude du cycle dans le diagramme (P, h) (2)

En A on a de la vapeur sèche et en C du liquide juste saturant. On lit sur le diagramme, $h_A = 1452 \pm 2\ \mathrm{J.kg^{-1}}$, $h_B = 1680 \pm 2\ \mathrm{J.kg^{-1}}$,$h_C = h_D = 313 \pm 2\ \mathrm{J.kg^{-1}}$. On en déduit l'efficacité :

$$e_{\text{frigo}} = \frac{1452 - 313}{1680 - 1452} = 5{,}00 \pm 0{,}09$$

L'efficacité d'une machine frigorifique réversible travaillant entre les mêmes températures serait :

$$e_{\text{frigo,rev}} = \frac{T_f}{T_C - T_f} = \frac{263}{298 - 263} = 7{,}51$$

L'efficacité réelle est plus petite, signe que le cycle n'est pas réversible.