

Thermodynamique

La **thermodynamique** traite des modifications des variables macroscopiques qui caractérisent un système tel que la pression, le volume, et la température. Ces modifications résultent des échanges de chaleur avec le milieu ambiant et du travail accompli par le système sur le milieu qui l'entoure.

Chapitre 1: Température, dilatation thermique et loi des gaz parfaits.

1.1 LA TEMPÉRATURE

Un **thermomètre** est un instrument qui mesure la température. N'importe quelle propriété d'une substance ou d'un dispositif qui varie sous l'effet de la chaleur peut être utilisée comme thermomètre. Par exemple, la variation de température peut être définie comme proportionnelle à la variation de la hauteur d'une colonne de liquide dans un tube, à la variation de pression d'un gaz maintenu à volume constant ou à la variation de la résistance électrique d'un fil.

1.2 LES ÉCHELLES DE TEMPÉRATURE

L'échelle de température absolue est l'échelle fondamentale. La température s'y exprime en degrés Kelvins (K).

À une pression de 1 atmosphère,

le point de fusion de l'eau est 273,15 K,

le point de vaporisation de l'eau est 373,15 K.

L'échelle Celsius est une échelle avec le même "pas" mais dont les mêmes repères sont de 0 °C et 100 °C.

$$T = T_c + 273,15$$

1.3 LE PRINCIPE ZÉRO DE LA THERMODYNAMIQUE

L'état d'un système est caractérisé par un ensemble de variables macroscopiques comme la pression, la température et le volume. Lorsqu'un système est en **équilibre thermique**, ces grandeurs sont constantes dans le temps. Lorsque deux corps sont en équilibre thermique entre eux, ils ont la même température.

Selon le **principe zéro de la thermodynamique**, si deux corps A et B sont individuellement en équilibre thermique avec un corps C, ils sont également en équilibre thermique entre eux.

1.4 L'ÉQUATION D'UN GAZ PARFAIT

En 1662, Robert Boyle s'aperçut que le volume V d'un gaz maintenu à température constante était inversement proportionnel à la pression P , soit $V \propto 1/P$.

Autrement dit: $PV = \text{constante}$.

Sachant que le produit PV est proportionnel à la température absolue T et au nombre de molécules présentes dans l'échantillon, on obtient l'**équation d'un gaz parfait**:

$$PV = n RT$$

$$R = 8,314 \text{ J}/(\text{mol K}) = \text{constante des gaz parfaits}$$

n = nombre de moles dans l'échantillon.

Unités à utiliser: V en m^3 , T en Kelvin, P en Pascal

Une mole d'échantillon contient le nombre Avogadro N_A d'atomes ou molécules soit $6,02 \times 10^{23}$. Il est à noter que la masse d'une mole de substance est appelée masse molaire, par exemple l'oxygène moléculaire O_2 a une masse molaire de 32 g/mol.

1.5 LA DILATATION THERMIQUE

Lorsque la température d'un corps augmente (diminue), le corps se dilate (se contracte).

En résumé...

- Si le corps est un solide linéaire alors :

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T, \quad \alpha: \text{coefficient de dilatation linéaire}$$

- Si le corps est un solide cubique alors :

$$\Delta V = 3 \alpha V_0 \Delta T$$

- Si le corps est un liquide alors :

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T \quad \text{avec } \beta = \text{coefficient de dilatation volumique}$$

La différence observée dans les coefficients de dilatation linéaire de deux métaux peut être utilisée dans un interrupteur thermosensible. On soude ensemble deux de ces métaux pour former une bande bimétallique ou **bilame**. Que se passe-t-il quand la température augmente?

Coefficients de dilatation (20°C)

linéique	$\alpha (10^{-6}K^{-1})$
Aluminium	24
Cuivre	17
Acier/Fer	11,7
Verre	9
Laiton	18,7
Béton	10 à 12
volumique	$\beta (10^{-4}K^{-1})$
essence	9,5
Eau	2,1
alcool éthylique	11

EXERCICES:CHAPITRE 1

1.2 ÉCHELLES DE TEMPÉRATURE

1- L'alcool éthylique bout à 70°C et gèle à -117°C à une atmosphère de pression.
Convertir ces températures en degrés Kelvin.

2- Convertir en degrés Kelvin: 120°C, -15°C, -145°C.
Rép. 393 K, 258 K, 128 K

3- Convertir en degrés Celsius: 77 K, 777 K.
Rép. -196°C, 504°C

4- La température T sur un thermomètre est étalonnée selon la relation $T = (aR + b)^\circ\text{C}$, où R est la résistance électrique d'un fil et a et b sont des constantes. La résistance vaut 24 Ω °C et 35,6 Ω à 100°C. Trouvez: la résistance à 60°C; b) la température lorsque la résistance est égale à 29 Ω
Rép. 31,0 Ω , 43,0 °C.

1.4 ÉQUATION D'UN GAZ PARFAIT

5- Quel est le volume d'une mole d'un gaz parfait à 0°C et à 1 atm?
Rép. 22,4 L

6- La pression absolue dans un pneu est de 310 kPa à 10°C. Après une longue promenade, la température s'élève à 30°C. Quelle est la nouvelle valeur de la pression?

Rép. 332 kPa

7- On gonfle à une pression de jauge de 200 kPa à 15°C un pneu d'automobile dont le volume interne est de 0,015 m³. Après un certain temps, la pression monte à 230 kPa. a) Quelle est la température de l'air dans le pneu, si son volume n'a pas changé? b) Quelle masse d'air doit-on enlever pour que la pression revienne à 200 kPa? On suppose que la masse molaire des molécules d'air est égale à 29 g/mol.

Rép. 43,8 °C 4,95 mg

8- Deux moles d'hélium sont à 20°C et à une pression de 200 kPa. a) Trouvez le volume du gaz. b) Si l'on chauffe le gaz à 40°C et que l'on réduit sa pression de 30%, quel est son nouveau volume?

Rép. 24,4 L 37,2 L

1.5 DILATATION THERMIQUE

9- A 15°C une tige de cuivre mesure 2,5 m de long. Trouver l'allongement quand elle est chauffée à 35°C. Le coefficient de dilatation linéaire du cuivre est égal à $17 \times 10^{-6}/K$.

Rép. : 0,85 mm

10- Un ballon en verre d'une capacité de 50,00 cm³ est rempli de mercure à 18°C. Trouver le volume de mercure qui débordera du ballon si la température est portée à 38°C. Le coefficient de dilatation linéaire du verre est $\alpha_v = 9 \times 10^{-6}/K$ et le coefficient de dilatation volumique du mercure est $\beta_m = 18 \times 10^{-5}/K$.

Rép. : 0,153 cm³

11- Trouver l'allongement d'un fil de cuivre qui mesure 150 m de long à 12°C, quand la température monte à 32°C. Le coefficient de dilatation linéaire est égal à $17 \times 10^{-6}/K$.

Rép. 0,051 m ou 5,1 cm

12- Une tige de 3 m s'allonge de 0,3 cm quand la température augmente de 100 K.
Trouver son coefficient de dilatation linéaire.
Rép. $0,00001 \text{ K}^{-1}$

13- Quelle est l'augmentation de volume de 0,1 l de mercure quand la température monte de 10°C à 35°C ? Le coefficient de dilatation volumique du mercure est égal à $0,00018/\text{K}$.
Rép. $0,45 \text{ cm}^3$

14- Trouver l'augmentation de volume d'un bloc de fer de $5 \times 10 \times 6 \text{ cm}$ quand la température passe de 15°C à 47°C . Le coefficient de dilatation linéaire est égal à $0,000010/\text{K}$.
Rép. $0,29 \text{ cm}^3$

15- Un tube en verre d'une capacité d'un litre est rempli de térébenthine à une température de 10°C . Trouver la quantité de liquide qui déborde quand la température est de 30°C . Le coefficient de dilatation linéaire du verre est égal à $9 \times 10^{-6}/\text{K}$ et le coefficient de dilatation volumique de la térébenthine est de $97 \times 10^{-5}/\text{K}$.
Rép. $18,9 \text{ cm}^3$

Chapitre 2: Le premier principe de la thermodynamique.

Lorsqu'on met en contact thermique deux corps de températures différentes, ils finissent par atteindre une température commune quelconque située entre les deux températures initiales. On dit que de la chaleur est passée du corps chaud au corps froid. La **chaleur** est un transfert d'énergie qui a lieu suite à une différence de température entre deux corps.

2.1 LA CHALEUR SPÉCIFIQUE

Pour qu'un corps augmente (baisse) de température, il faut qu'il ait absorbé (dégagé) de la chaleur.

La chaleur ΔQ nécessaire pour faire varier de ΔT la température d'une masse m est

$$\Delta Q = m c \Delta T$$

où c est la **chaleur spécifique** d'une substance. Elle est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 K la température de 1 kg de cette substance sans changer son état (solide, liquide ou gazeux).

Chaleurs spécifiques (20°C et 1atm)

substance	c(J/kg•K)
Aluminium	900
Cuivre	385
Acier/Fer	450
Plomb	130
Laiton	370
Étain(Sn)	220
Zinc	380
Mercure	140
Eau	4190
Glace (-10°C)	2100

2.2 L'ÉQUIVALENT MÉCANIQUE DE LA CHALEUR

Quoique historiquement la calorie a été définie comme la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de 1 gramme d'eau de 14,5°C à 15,5°C, c'est

équivalent mécanique de la chaleur qui est à l'origine de la définition moderne de la calorie: **1 calorie = 4,186 Joules**¹.

Pourquoi? On peut aussi produire une élévation de température d'un système à partir d'un travail mécanique. Par exemple la chute d'un poids entraîne une génératrice dont le courant électrique sert à chauffer un fil plongé dans l'eau d'un calorimètre. On arrive toujours à la conclusion que le travail mécanique nécessaire pour produire une variation donnée de température est proportionnel à la quantité de chaleur requise pour produire la même variation de température. Un changement d'état d'un système produit par l'addition d'une calorie peut être aussi produit par un travail de 4,186 J accompli au profit du système.

2.3 LA CHALEUR LATENTE

L'apport de chaleur à un système ne fait pas toujours varier sa température. La température reste constante lorsqu'une substance change de phase, lorsqu'elle passe par exemple de l'état solide à l'état liquide.

* La **chaleur latente de fusion** (c_f) d'un solide est la quantité de chaleur nécessaire pour fondre 1 kg de cette substance.

$$\Delta Q = m c_f$$

Pour l'eau, la chaleur de fusion est : $c_f = 3,35 \times 10^5$ J/kg à $T = 273,15$ K et $P = 1$ atm.

* La **chaleur latente de vaporisation** (c_v) d'un liquide est la quantité de chaleur nécessaire pour vaporiser 1 kg de cette substance.

$$\Delta Q = m c_v$$

Pour l'eau, la chaleur de vaporisation est : $c_v = 2,26 \times 10^6$ J/ kg à 373,15 K et 1 atm.

¹En alimentation on utilise la grosse calorie: 1 Calorie = 4,186 kJ. La *British Thermal Unit* (Btu) est la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de 1 lb d'eau de 63 °F à 64 °F. (1 Btu = 1055 J)

2.4 LA TRANSMISSION DE LA CHALEUR

Il y a trois modes de propagation de la chaleur: le rayonnement, la convection et la conduction.

A) Rayonnement: Tout corps dont la température dépasse le zéro absolu (0 K) émet de l'énergie sous la forme d'ondes électromagnétiques. Ce transfert de chaleur ne nécessite donc pas de milieu intermédiaire. La puissance rayonnée par un corps dépend de la nature de sa surface; elle est proportionnelle à son aire et à la puissance 4 de sa température absolue.

B) Convection: Transfert de chaleur par mouvement de matière dans un fluide. Elle peut être forcée ou libre. Dans le deuxième cas, le mouvement résulte des variations de masse volumique avec la température.

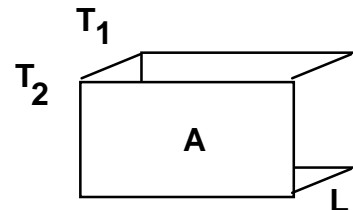
C) Conduction: C'est un transfert de chaleur dans un matériau (transfert d'énergie de vibration par collisions entre molécules voisines) sans qu'il y ait déplacement de matière.

Soit la puissance ou quantité de chaleur transmise par unité de temps au travers d'une

dalle de matériau $P = \frac{Q}{t}$ (1W = 1 J/s)

Ce taux de transmission de la chaleur dépend de l'aire (A) de la section, de l'épaisseur (L), de l'écart de température ($\Delta T = T_2 - T_1$) et de la **conductivité thermique** (k) du matériau.

$$P = k A \frac{(T_2 - T_1)}{L}$$



La conductivité thermique mesure la capacité d'un matériau à conduire la chaleur. Les métaux ont un k élevé surtout grâce aux électrons libres. Les propriétés isolantes (k faible) du duvet et de la laine proviennent essentiellement de leur capacité à emprisonner l'air. (Voir tableau accompagnant les exercices)

On nomme gradient de température l'écart de température par unité d'épaisseur, soit

$$\frac{T_2 - T_1}{L}$$

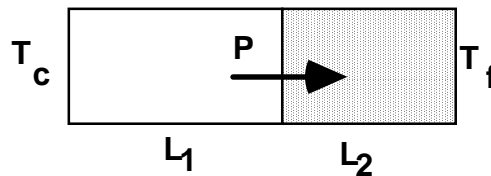
La **résistance thermique**¹ tient compte de l'ensemble des éléments intrinsèques d'un échantillon qui résiste au transfert de chaleur. Les unités SI de R sont les K/W.

$$R = \frac{L}{k A}$$

À partir des deux équations précédentes on obtient $P = \frac{\Delta T}{R}$ appelée loi d'Ohm thermique par analogie avec $i = \frac{V}{R}$

Le taux de transmission de la chaleur (le courant) est proportionnel à la différence de température (la différence de potentiel) et inversement proportionnel à la résistance thermique. (la résistance électrique).

Lorsque la même quantité de chaleur doit traverser deux dalles d'épaisseurs différentes et de conductivités différentes, les dalles sont "en série". La valeur de la résistance équivalente est alors la somme des résistances individuelles: $R = R_1 + R_2$.



Dans quelle situation aura-t-on des résistances en parallèle?

(Hint: on doit avoir la même différence de température mais les taux de transfert peuvent être différents)

¹La résistance thermique ainsi définie est liée au **facteur R** de l'échantillon qui est en fait $R = \frac{L}{k}$

Unités SI : K m² /W

Unités courantes non SI: pi² h °F / Btu

facteur "R" (unités courantes) = 5,68 x facteur "R" (SI).

EXERCICES:CHAPITRE 2

2.1 CHALEUR SPÉCIFIQUE 2.3 CHALEUR LATENTE

1- (a) Quelle quantité de chaleur faut-il fournir pour chauffer 100 grammes de cuivre de 10°C à 100°C ? (b) Si l'on fournit cette même quantité de chaleur à 100 g d'aluminium à 10°C, deviendra-t-il plus chaud que le cuivre ?

Rép. : 3,47 kJ moins chaud

2- Quelle est la quantité de chaleur dégagée quand 20 g de vapeur à 100°C sont condensés puis refroidis à une température de 20°C ?

5,19 x 10⁴ J

3- Combien de chaleur faut-il pour porter de 15°C à 65°C la température des substances suivantes: (a) 1 g d'eau; (b) 5 g de verre; (c) 20 g de platine. Les chaleurs spécifiques du verre et du platine sont respectivement 837 J kg⁻¹K⁻¹ (verre) et 134 J kg⁻¹K⁻¹ (platine).

Rép. 209 J; 209 J; 134 J

4- Trouver la chaleur dégagée quand on refroidit de 100°C à 20°C: (a) 2 kg de cuir; (b) 3 kg d'amiante. La chaleur spécifique du cuir est égale à 1 500 J kg⁻¹K⁻¹ et celle de l'amiante = 840 J kg⁻¹K⁻¹.

Rép. 2,40 x 10⁵ J; 2,02 x 10⁵ J

5- Combien de chaleur faut-il pour transformer 10 g de glace à 0°C en vapeur à 100°C ?

Rép. 30,1 KJ

6- Trouver la température finale du mélange suivant: 150 g de glace à 0°C sont placés dans un bain de 300 g d'eau à 50°C.

6,7 °C

7- Quelle est la température finale qu'on obtiendra en mélangeant 1 kg de glace à 0°C et 9 kg d'eau à 50°C ?

Rép. 37°C

8- On ajoute 5 kg de vapeur à 100°C à 250 kg d'eau à 4°C. Trouver la température finale du mélange.

Rép. 16,5°C

2.4 LA TRANSMISSION DE LA CHALEUR

Conductivité thermique	"k" (W/(Km))
Aluminium	240
Cuivre	400
Fer	80
Plomb	35
Verre	0,8-0,9
Bois	0,1-0,2
Béton	0,9-1,2
Eau	0,6
Platre	0,46
Brique	1,15
Laine de verre	0,04
Air	0,024

1- Calculer le taux de transfert de chaleur à travers une feuille de 1,2 m X 2,4 m d'un matériau isolant (laine de verre) de 8 cm d'épaisseur quand un côté est à 22 °C et l'autre à 4 °C.

Rép. 25,9 W

2- Une maison est recouverte avec 250 m² de contre-plaqué (k = 0,12 WK⁻¹m⁻¹) de 1,6 cm d'épaisseur. Quelle est la résistance thermique de ce recouvrement?

Rép. 5,3 x 10⁻⁴ K/W

3- Une plaque de fonte a une épaisseur de 2 cm et une surface de 0,5 m². La température est de 150 °C sur une face et de 140 °C sur l'autre. Trouver la quantité de chaleur transmise par seconde. La conductivité thermique de la fonte est de 60 WK⁻¹m⁻¹.

Rép. 15 kW

4- Il y a une différence de température de 32 °C entre les faces d'une plaque de nickel de 0,4 cm d'épaisseur. On sait que 800 kJ de chaleur est transmise par heure à travers une surface de 5 cm². Trouver la conductivité thermique du nickel.

Rép. 50 WK⁻¹m⁻¹

5- La conductivité thermique d'un alliage d'aluminium est égale à $200 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$. Quel est le gradient de température d'une barre de ce matériau qui transmet 350 kW par m^2 de surface?

Rép. $17,5 \text{ K/cm}$

6- Le liège transmet $3,6 \times 10^5 \text{ J}$ de chaleur par m^2 de surface et par jour quand le gradient de température est égal à 1 K/cm . Trouver la chaleur transmise en une journée par une feuille de liège qui mesure $0,75 \text{ m} \times 1,80 \text{ m}$ et fait 4 cm d'épaisseur et quand une surface est à $0 \text{ }^\circ\text{C}$ et l'autre à $18 \text{ }^\circ\text{C}$.

Rép. $2,2 \times 10^6 \text{ J}$

7- Le "massonite" transmet 17 kJ par heure par m^2 de surface pour un gradient de température de 1 K/cm . Trouver la chaleur transmise en une journée à travers une feuille qui mesure $1 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ et fait 2 cm d'épaisseur quand les deux côtés de la feuille sont respectivement à $3 \text{ }^\circ\text{C}$ et l'autre à $17 \text{ }^\circ\text{C}$.

Rép. $5,7 \text{ MJ}$

8- Une couche de 10 cm d'un isolant, dont la conductivité thermique est égale à $0,035 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$, est placée au-dessus d'une couche de 5 cm d'autre isolant, dont la conductivité thermique vaut $0,050 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$. Quelle est la résistance thermique d'une surface de 1 m^2 de cet agencement? Quel est le facteur R (les unités courantes non SI sont généralement omises) de chaque couche et de la combinaison des deux?

Rép. $3,86 \text{ K/W}$ 16,2 5,68 21,9

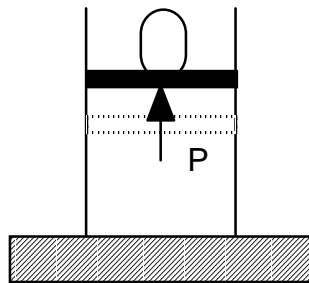
2.5 LE TRAVAIL EN THERMODYNAMIQUE

Dans ce qui suit nous analyserons le lien entre le travail effectué par un système et la chaleur qu'il échange avec son environnement.

Définitions

Un **réservoir thermique** est un corps dont la capacité thermique est à ce point considérable que des quantités considérables de chaleur peuvent y entrer ou en sortir sans modifier sa température de façon significative. Par exemple, un grand lac l'atmosphère ou une chaudière maintenue à température constante par un foyer sont des réservoirs thermiques.

Soit un gaz confiné dans un cylindre par un poids posé sur un piston mobile. Nous considérons que le *gaz comme est le système alors que le cylindre et le piston constituent l'environnement. (ou milieu extérieur)*. Si on laisse le piston se déplacer vers le haut, le gaz se dilate et accomplit un travail sur le piston, donc sur son environnement. Afin de calculer ce travail nous supposons que le processus est **quasi statique**. Dans ce cas les variables thermodynamiques (P, V, T, n , etc.) du système varient très lentement. Au cours d'un processus quasi statique le système demeure toujours assez proche d'un état d'équilibre. Le système dans son ensemble est à tout instant caractérisé par des valeurs uniques de ses variables thermodynamiques.



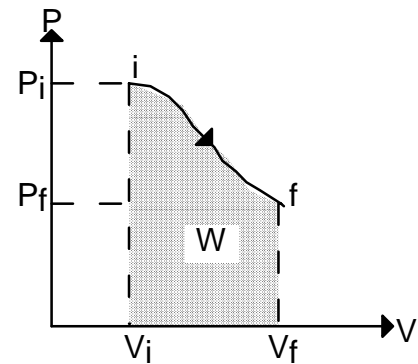
Ici il faut faire en sorte que le piston se déplace lentement, sinon une détente rapide ferait intervenir une turbulence et la pression ne serait pas la même partout dans le gaz.

Dans un processus quasi statique P et V sont toujours définis de manière unique et nous pouvons décrire le processus sur un diagramme PV .

Définition du travail

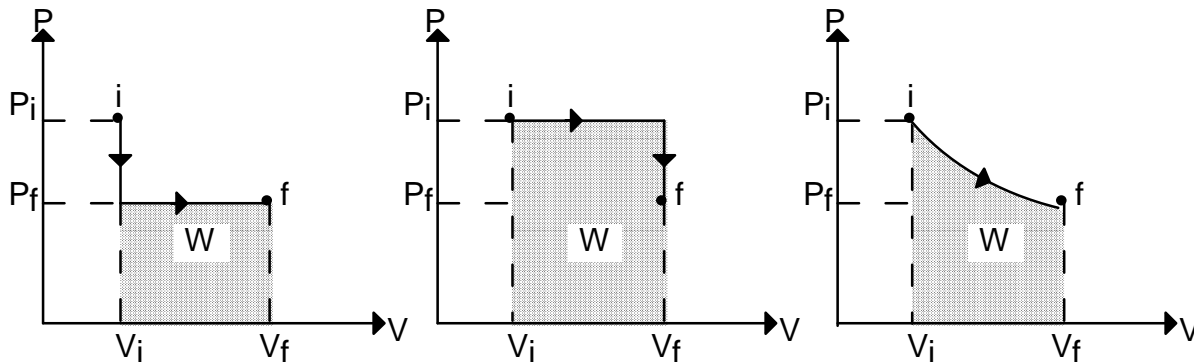
Lorsque le système passe d'un état d'équilibre i à un état d'équilibre f , le travail accompli par le gaz correspond à l'aire située sous la courbe, mathématiquement c'est l'intégrale.

$$W = \int_{V_i}^{V_f} P dV$$



Si $V_f > V_i$ comme dans le cas illustré ci-dessous, le travail accompli par le gaz est positif. Si autrement le volume diminue, alors $V_i < V_f$ et le travail accompli par le gaz est négatif.

En fait, le travail dépend non seulement des états initial et final mais aussi des conditions qui caractérisent le processus, soit du *parcours thermodynamique* entre les états extrêmes. Comme le montre les 3 illustrations ci-dessous, pour deux mêmes états i et f , le parcours thermodynamique détermine le travail.



Processus isobare

Dans une transformation **isobare**, la dilatation ou la compression se produit à pression constante P , l'aire sous la courbe est celle d'un rectangle et on obtient

$$W = P(V_f - V_i).$$

2.6 LE PREMIER PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE

Soit un système composé d'un gaz enfermé dans un cylindre par un piston. Supposons que le système passe d'un état initial caractérisé par P_i, V_i, T_i à un état final caractérisé par P_f, V_f, T_f . On constate que le travail accompli W et la chaleur Q transmise au système ou fournie par le système dépendent du parcours thermodynamique. Cependant la *différence* $Q-W$ est la même pour tous les parcours entre les états d'équilibre initial et final donnés. Ce fait nous permet de définir une nouvelle fonction U , appelée **énergie interne**, telle que la variation d'énergie interne du système soit

$$\Delta U = Q - W .$$

Nous adoptons la convention suivante

$Q > 0$ lorsque la chaleur est fournie au système

$W > 0$ lorsque le travail est effectué par le système sur le milieu extérieur

L'équation précédente exprime le premier principe de la thermodynamique. Son énoncé est:

l'énergie interne d'un système varie lorsqu'un travail est effectué au profit d'un système (ou par lui) et lorsque le système échange de la chaleur avec le milieu environnant.

Le premier principe est valable pour toutes les transformations, qu'elles soient quasi statique ou non. Il permet de définir la chaleur et établit l'existence de l'énergie interne comme une fonction qui dépend seulement de l'état thermodynamique du système. Si le système absorbe de la chaleur cela tend à augmenter son énergie interne. Si le système effectue un travail cela tend à diminuer son énergie interne.

On retiendra que l'énergie interne est la somme de tous les types possibles d'énergie emmagasinée dans le système: énergie mécanique, électrique, magnétique, chimique, etc. Elle ne comprend pas les énergies cinétique et potentielle associées au mouvement du centre de masse. L'énergie cinétique et potentielle correspondant au mouvement aléatoire des particules constituent *l'énergie thermique* et est incluse dans l'énergie interne.

2.6 APPLICATIONS DU PREMIER PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE

a) Système isolé

Soit un système isolé: il n'y a pas d'échange de chaleur ni de travail accompli sur le milieu extérieur. Donc à partir de $\Delta U = Q - W$, si $Q = 0$ et $W = 0$ on obtient

$$\Delta U = 0 \quad \text{ou} \quad U = \text{constante}$$

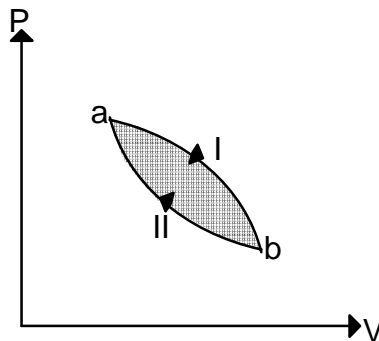
L'énergie interne d'un système isolé demeure constante.

b) Processus cyclique

Soit un système soumis à une **transformation cyclique**, c'est-à-dire un processus qui le ramène à son état initial. Dans cas, la variation d'énergie interne du système est nulle et la chaleur absorbée par le système doit être égale au travail accompli au cours du cycle. Donc à partir de $\Delta U = Q - W = 0$ on obtient

$$Q = W$$

Sur un diagramme pression-volume, le travail net accompli au cours du cycle est égal à l'aire délimitée par la trajectoire représentant la transformation.



Ainsi les moteurs fonctionnent par cycles durant lesquels le système, un gaz, revient périodiquement à son état initial. L'apport net de chaleur sert à accomplir un travail mécanique.

c) Processus adiabatique

Une **transformation adiabatique** se définit comme un processus au cours duquel le système n'échange pas de chaleur avec le milieu extérieur, c'est à dire $Q = 0$. Du premier principe on obtient:

$$\Delta U = - W$$

Concrètement, il y a deux façons de réaliser de type de transformation.

i) Le système est dans un contenant thermiquement isolé.

ii) Le processus se produit si rapidement que sa durée est insuffisante pour qu'une quantité de chaleur significative soit échangée avec le milieu extérieur.

Lorsqu'un gaz se détend en effectuant un travail sur un piston, le gaz accomplit un travail positif. Ainsi dans une détente adiabatique, l'énergie interne diminue, ce qui se caractérise en général par une baisse de température.

Dans le cas d'une compression le travail fait par le système est négatif (c'est en fait le milieu extérieur qui effectue un travail afin de comprimer le gaz). Donc $\Delta U > 0$, ce qui veut dire que *l'énergie interne augmente et la température s'élève au cours d'une compression adiabatique*.

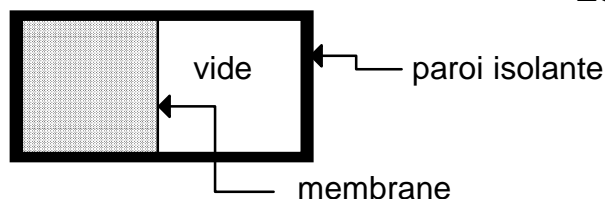
-Lorsqu'on se sert d'une pompe à bicyclette, on observe une élévation de la température.

- La phase de compression rapide dans un moteur diesel est pratiquement adiabatique. Le volume du mélange air-combustible diminue rapidement selon un facteur voisin de 15. L'élévation de température est si grande qu'elle provoque l'allumage spontané du mélange.

d) Détente libre adiabatique

Soit un récipient dont les parois sont thermiquement isolées, $Q = 0$. Le gaz est initialement confiné à un volume V_i dans une partie du récipient par une mince membrane. Si l'on perce la membrane, le gaz se détend jusqu'à atteindre un volume V_f mais sans accomplir de travail, $W = 0$. Ce processus est appelé **détente libre**. D'après le premier principe,

$$\Delta U = 0.$$



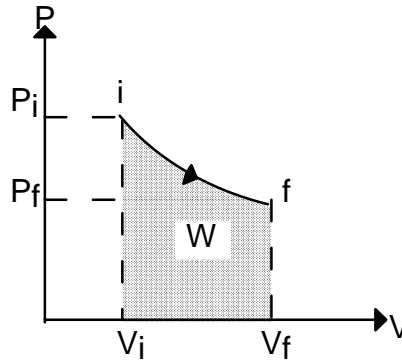
Dans une **détente libre adiabatique** l'énergie interne d'un gaz quelconque ne varie pas.

Dans le cas particulier d'un gaz parfait la température ne varie pas lors d'une telle détente. On peut montrer que *l'énergie interne d'une quantité donnée de gaz parfait dépend uniquement de sa température* et non de la pression ni du volume.

e) Processus isotherme d'un gaz parfait

Dans une **transformation isotherme**, le système est maintenu en contact avec un réservoir thermique à la température T . Le parcours suivi sur le diagramme PV durant la détente ou une compression à température constante est appelé isotherme.

Considérons une détente quasi statique dans le cas d'un gaz parfait passant d'un état i de volume V_i vers un état f de volume V_f . À l'aide de $PV = nRT$ nous pouvons obtenir



$$W = nRT \ln \left(\frac{V_f}{V_i} \right)$$

Sur le diagramme, l'isotherme a la forme d'une parabole. Puisque pour un gaz parfait à température constante l'énergie interne ne varie pas on obtient que $Q = W$. La chaleur fournie par le réservoir est égale au travail fait par le gaz.

f) Processus isochore

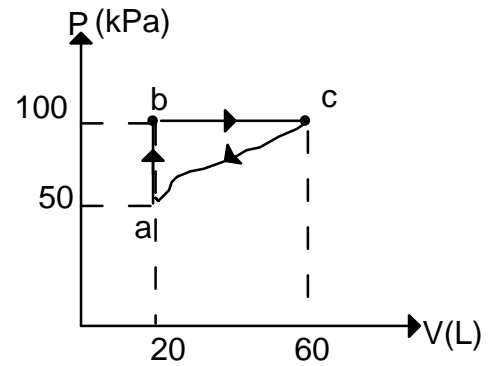
Une **transformation isochore** est une transformation qui se produit à volume constant. Le travail fait par la système doit être nul, $W = 0$ et

$$\Delta U = Q$$

Si l'on fournit de la chaleur à un système maintenu à volume constant, toute la chaleur sert à accroître l'énergie interne du système. Ainsi lorsque le mélange de vapeur d'essence et d'air explose à l'intérieur du cylindre d'un moteur, la température et la pression s'élèvent soudainement, car le volume du cylindre ne varie pas sensiblement au cours du bref intervalle de temps que dure l'explosion.

7- Un gaz est soumis au processus cyclique décrit ci-dessous. Au cours du processus abc , le système absorbe 4500 J de chaleur. L'énergie interne en a est $U_a = 600$ J.
 (a) Déterminez U_c . Rép. : 1100 J

La chaleur nette absorbée durant le cycle complet est égale à 1000 J. Pour le processus allant de c à a , trouvez (b) le travail effectué par le gaz; (c) le transfert de chaleur.
 rép: -3000 J -3500 J



Chapitre 3: Le deuxième principe de la thermodynamique et les machines thermiques

Le premier principe, en considérant la chaleur comme une forme d'énergie, est une généralisation du principe de conservation de l'énergie. Un accroissement d'énergie sous une forme doit nécessairement s'accompagner d'une diminution d'énergie sous une autre forme. Il ne comporte aucune restriction quant aux types de conversion d'énergie possible.

Le deuxième principe permet d'établir quelles sont les transformations possibles dans la nature. Il y a des phénomènes qui se produisent suivant un ordre régi par le deuxième principe: (1) Lorsque deux objets de température différente sont mis en contact thermique, l'échange de chaleur s'effectue du corps le plus chaud vers le corps le plus froid, mais jamais en sens inverse. (2) La dissolution du sel dans l'eau est spontanée, mais pour extraire le sel contenu dans l'eau salée, on doit exercer une influence extérieure. Ces exemples sont des **processus irréversibles**: leur déroulement naturel est à sens unique. Ils ne peuvent se dérouler à l'envers, c'est à dire en partant des conditions finales pour aboutir aux conditions initiales.

3.1 LES MOTEURS THERMIQUES ET LE DEUXIÈME PRINCIPE

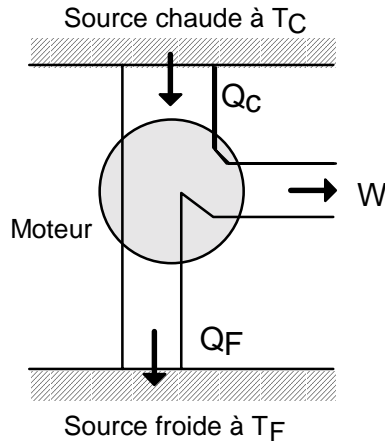
Un **moteur thermique** est un dispositif qui permet de convertir la chaleur en travail mécanique. Par exemple le moteur à combustion interne d'une automobile utilise la chaleur de combustion du carburant et en transforme une partie en énergie mécanique. Considérons les moteurs qui fonctionnent en soumettant un agent matériel à une transformation cyclique, c'est à dire une transformation au terme de laquelle l'agent matériel revient à son état initial. (Dans une machine à vapeur l'agent matériel est l'eau).

Énoncés généraux sur les moteurs thermiques cycliques.

Ils fonctionnent entre une source (réservoir thermique) chaude à température T_c et une source froide à température T_f .

Durant chaque cycle:

- le moteur absorbe la quantité de chaleur Q_C fournie par la source chaude,
- une partie de cette chaleur sert à accomplir un travail W ,
- la chaleur restante Q_F est cédée à la source froide.
- Le système revient à son état initial et son énergie interne n'est pas modifiée.



Partant du premier principe $\Delta U = Q - W$, si $\Delta U = 0$ on obtient $W = Q$. Le travail net accompli par le moteur dans un processus cyclique est l'apport net de chaleur.

$$W = Q_C - Q_F^1$$

Le **rendement thermique** ρ d'un **moteur** thermique est défini comme le rapport du travail fourni W sur la chaleur absorbée:

$$\rho = \frac{W}{Q_C} = 1 - \frac{Q_F}{Q_C}$$

Le deuxième principe de la thermodynamique (formulation de Kelvin-Planck)

Il est impossible pour un moteur thermique effectuant un processus cyclique de convertir intégralement en travail la chaleur absorbée au contact d'une source chaude.

Cet énoncé affirme que Q_F est toujours différent de zéro; il doit y avoir un source froide pour recevoir la chaleur cédée par le moteur. Par conséquent même pour un moteur parfait le rendement doit être inférieur à 100%. Par exemple, un moteur diesel a un rendement voisin de 30%.

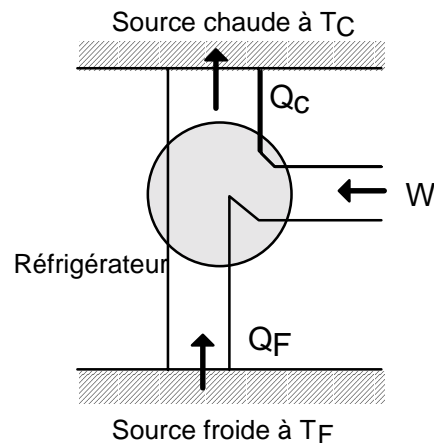
3.2 LES RÉFRIGÉRATEURS ET LE DEUXIÈME PRINCIPE

Le deuxième principe de la thermodynamique (formulation de Clausius)

Il est impossible pour une machine cyclique de faire passer de façon continue la chaleur d'une source froide vers une source chaude sans apport de travail ou autre effet sur le milieu extérieur.

¹dans les équations nous utilisons les valeurs absolue de W , Q_C et Q_F

La chaleur ne passe pas spontanément d'un corps froid vers un corps chaud. On le fait en réalisant un réfrigérateur. Un réfrigérateur (ou une pompe à chaleur) est en fait un moteur thermique qui fonctionne en sens inverse. Le travail W est fourni au système, qui absorbe une quantité de chaleur Q_F d'une source de basse température (le contenu du réfrigérateur) et qui cède une quantité de chaleur plus élevée Q_C à une source à température plus élevée (l'air ambiant)



Une pompe à chaleur prélève de la chaleur à l'air extérieur froid et cède une quantité de chaleur plus grande à l'air chaud d'une pièce.

La machine réalisant processus cyclique, l'énergie interne de l'agent matériel ne varie pas et le premier principe permet d'écrire

$$Q_C = W + Q_F^1$$

Pour un **réfrigérateur** on définit le **coefficient d'amplification frigorifique** (CAF) qui est le rapport entre la chaleur prélevée à la source froide Q_F et le travail requis W .

$$\text{CAF} = \frac{Q_F}{W}$$

En pratique, un bon réfrigérateur au coefficient d'amplification frigorifique voisin de 5.

Le **facteur calorifique** (FC) caractérise une **pompe à chaleur**, soit $\text{FC} = \frac{Q_C}{W}$.

¹Les valeurs absolues des quantités sont utilisées

EXERCICES CHAPITRE3

3.2 Les moteurs thermiques et les réfrigérateurs

N.B: la solution des exercices doit comprendre la représentation schématique de la machine thermique avec l'identification de ses paramètres.

1- Un moteur à essence a un rendement de 20 %. Il tourne à 1200 RPM et fournit 800W. Trouvez, pour chaque cycle: (a) le travail accompli; (b) la chaleur absorbée par la source chaude (c) la chaleur cédée à la source froide.

40 j 200j 160J

2- Un réfrigérateur a un coefficient d'amplification frigorifique de 4. Il cède 250 J par cycle à la source chaude. Trouvez: (a) la quantité de chaleur prélevée à la source froide; (b) le travail nécessaire.

200 J 50 J

3- En un cycle un moteur absorbe 800 J à la source chaude et cède 550 J à la source froide. Si un cycle dure 0,4 s, quelle est la puissance mécanique fournie?
625 W

4- La pompe à chaleur d'une résidence a un facteur calorifique de 4 et elle nécessite 10 kWh d'énergie électrique pendant une période donnée. Quelle serait la quantité de kWh nécessaire si la maison était chauffée par des radiateurs électriques?

40 kWh

5- Un moteur à essence de puissance 30 kW a un rendement thermique de 22 %. Déterminez: (a) le taux de chaleur absorbée; (b) le taux de chaleur cédée. (c) Si la chaleur de combustion de l'essence est de $1,3 \times 10^8$ J/gal, quel est le nombre de gallons consommés par heure?

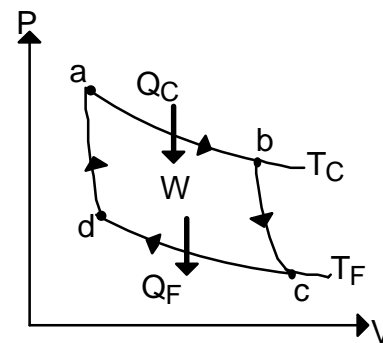
136 kW 106 kW 3,77 gal

6- En été, une pompe à chaleur extrait 6000 Btu/h d'une maison à 20 °C, l'air extérieur étant à 30 °C. Sa puissance requise est de 1 kW. (a) Quel est son facteur calorifique? (b) À quel taux cède-t-elle la chaleur au milieu extérieur? (1Btu/h = 0,293 W)

2,76 2,76 kW

3.3 LE CYCLE DE CARNOT

En 1824 l'ingénieur Sadi Carnot proposa un cycle réversible d'opérations constituant un cycle idéal, il peut être de nature électrique, magnétique ou chimique. Le rendement d'une *machine de Carnot* représente la limite supérieure de toute machine thermique. Soit un gaz idéal enfermé dans un cylindre par un piston sans frottement. Le cycle de Carnot est formé de deux processus isothermes et de deux processus adiabatiques et est représenté sur le diagramme PV ci-dessous.



Le système part du point a à la température T_C

1. La transformation a → b est une dilatation isotherme à température T_C au cours de laquelle le gaz est en contact thermique avec une source chaude de température T_C . Le gaz absorbe une quantité de chaleur Q_C et fait un travail W_{ab} sur le piston.
2. Au cours de la transformation b → c la source est supprimée et le gaz est thermiquement isolé du milieu extérieur. Le gaz est donc soumis à une détente adiabatique ($Q=0$) et il effectue sur le piston un travail W_{bc} en puisant dans son énergie interne jusqu'à ce que sa température baisse à T_F .
3. La transformation c → d est une contraction isotherme à température T_F au cours de laquelle le gaz est en contact thermique avec une source thermique de température T_F . Le gaz cède au réservoir une quantité de chaleur Q_F et le piston fait un travail W_{cd} sur le gaz.
4. La phase finale d → a est une compression adiabatique ($Q = 0$) durant laquelle la température augmente jusqu'à T_C résultat du travail accompli sur le gaz par le piston est W_{da} .

Selon le premier principe $\Delta U = Q - W$ et le processus étant cyclique, l'énergie interne ne varie pas. Par conséquent le travail net effectué par le gaz sur le piston est égal à la quantité nette de chaleur absorbée.

$$W = Q_C - Q_F$$

W est représenté sur le diagramme par l'aire délimitée par le cycle $abcd$.

Partant de la définition du rendement d'un moteur thermique et pouvant démontrer que $Q_F/Q_C = T_F/T_C$ on obtient le **rendement du cycle de Carnot**:

$$\rho_C = \frac{W}{Q_C} = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

Le rendement du cycle de dépend que des températures Kelvin des deux sources. Le rendement est toujours inférieur à 100% car $T_F > 0$. Carnot a démontré que:

- le résultat obtenu est valable pour tout moteur réversible fonctionnant entre les deux mêmes sources,
- le rendement d'un moteur irréversible est inférieur à celui d'un moteur réversible fonctionnant entre les deux mêmes sources de chaleur.

Un moteur réel quelconque est irréversible à cause des frottements et de la conduction de la chaleur due aux différences de température.

Un réfrigérateur idéal (de même qu'une pompe à chaleur) est un moteur de Carnot dont le sens de fonctionnement est inversé, les valeurs numériques pour Q_F , Q_C et W étant les mêmes. On obtient:

pour un réfrigérateur, le **coefficient d'amplification frigorifique maximal**

$$FAC_{\max} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

le **facteur calorifique maximal** d'une pompe à chaleur

$$FC_{\max} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

3.3 Le cycle de Carnot : exercices

7- Une machine thermique cyclique évolue entre une source froide à 300 K et une source chaude à 500 K. Au cours de chaque cycle, elle absorbe 800 J de la source chaude. (a) Quel est le rendement maximal de la machine thermique? (b)

Déterminez le travail maximal que la machine peut accomplir à chaque cycle.

40% 320J

8- Une pompe à chaleur fonctionnant entre deux sources à $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ consomme une énergie électrique de 1,2 kJ pour chaque cycle. (a) Quelle est la valeur maximale possible du facteur calorifique? Déterminer pour chaque cycle (b) la chaleur cédée à la source chaude; (c) la chaleur prélevée à la source froide.

11,7 14 kJ 12,8 kJ

9- Un réfrigérateur idéal est un moteur de Carnot dont le sens de fonctionnement est inversé. Quel est son coefficient d'amplification frigorifique si les températures des deux sources sont de 260 K et 300 K? 6,5

10- Un moteur de Carnot fonctionne entre des sources à 400 K et à 300 K. Il cède 330 J à la source de température la plus basse. (a) Quel est le travail effectué? Lequel des phénomènes suivants a le plus d'effet sur le rendement: (b) une élévation de 5 K de la température de la source chaude, ou (c) une diminution de 5 K de la température de la source froide?

110 J (c) une diminution de T_F

11- On a suggéré d'utiliser dans un moteur thermique la différence de température entre l'eau à la surface d'un océan tropical (à $22\text{ }^{\circ}\text{C}$) et l'eau plus froide à plusieurs centaines de mètres de profondeur (à $5\text{ }^{\circ}\text{C}$). (a) Quel est le rendement maximal possible d'un tel moteur. (b) Si la puissance utile vaut 1 MW, à quel taux la chaleur est-elle cédée à l'eau en profondeur ? 5,76% 16,4 MW

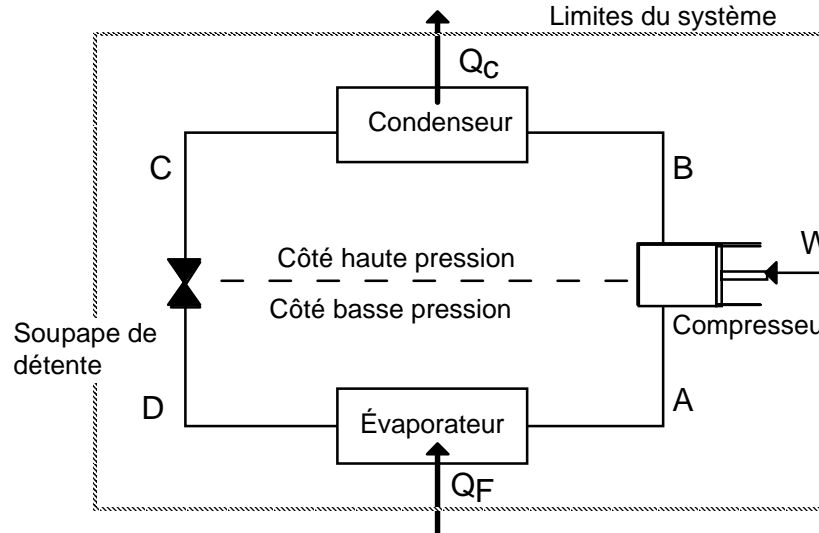
12- Une maison a besoin en moyenne d'un apport de chaleur de 5 kW pour que la température à l'intérieur reste à $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ lorsque l'air extérieur est à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. (a) Si la maison est chauffée par des radiateurs électriques et que le kWh coûte 5 cents, quel est le coût d'une journée de chauffage? (b) Si l'on installait une pompe à chaleur idéale, quel serait le coût de consommation quotidienne d'électricité?

\$6.00 \$0.41

3.4 APPLICATIONS

A) CYCLE DE RÉFRIGÉRATION À COMPRESSION DE VAPEUR

Voici un cycle de réfrigération idéalisé utilisant un fluide réfrigérant tel le fréon.



Nous partons du point A: Le fluide de basse pression et température est de la *vapeur saturée*, c'est à dire un gaz dont la température est égale à la température de vaporisation pour cette pression.

De A à B: à partir d'un travail W fourni par le milieu extérieur, ici un moteur, le compresseur produit une compression adiabatique (réversible) sur le gaz qui se retrouve en B avec une pression et une température plus élevée.

De B à C, le fluide passe au travers du condenseur. Ce dernier est en contact thermique avec une source extérieure chaude à T_C (par un serpentin dans l'air de la pièce), le gaz est refroidi jusqu'à la température de vaporisation puis condensé en liquide. Le fluide réfrigérant cède une quantité de chaleur Q_C au cours d'une transformation à pression constante.

De C à D, le liquide saturé passe au travers de la soupape de détente (un long tube capillaire). En passant dans la soupape, le fluide a subi une détente adiabatique irréversible. Il en sort sous une forme de mélange liquide et gaz de température et pression abaissées.

De D à A, le fluide passe dans l'évaporateur (serpentin) en contact thermique avec une source froide à T_F (l'intérieur du frigo!). Il absorbe une quantité de chaleur Q_F et en sort totalement gazeux et plus chaud. Cette dernière transformation se fait aussi à pression constante et est réversible.