

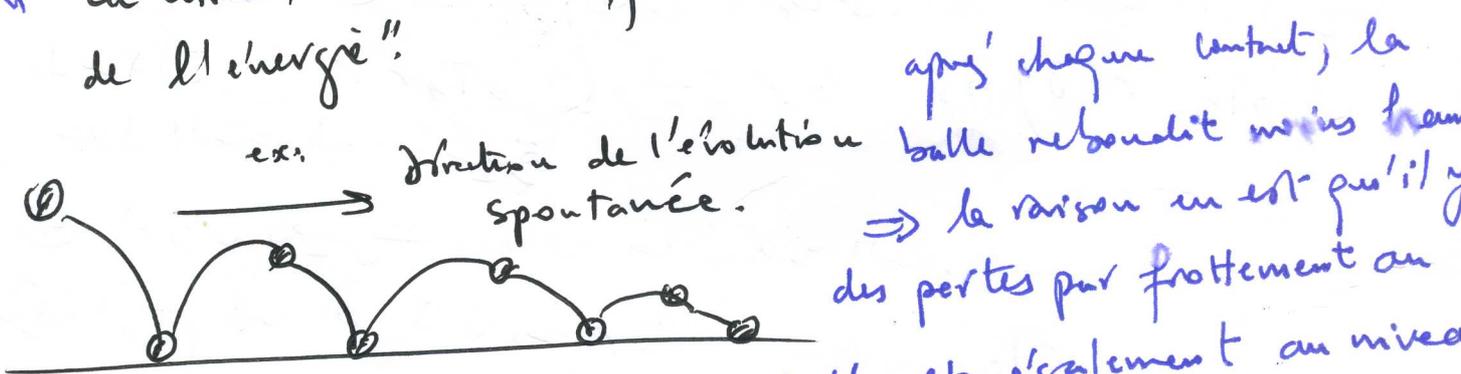
دروس الثاني للديناميكا الحرارية (مبدأ كرتون)  
Deuxième Principe de la Thermodynamique

Certains événements se produisent spontanément, d'autres pas.  
Un gaz se dilate pour remplir tout le volume disponible ;  
il ne se contracte spontanément pour occuper un volume plus  
petit. Un corps chaud se refroidit jusqu'à la température  
du milieu extérieur, il ne se réchauffe pas spontanément  
aux dépens du milieu extérieur. Le diamant en brûlant donne  
du dioxyde de Carbone chaud, le dioxyde de Carbone chaud  
ne se solidifie pas spontanément sous forme de diamants.

Quel que chose dans le monde détermine la direction des  
transformations spontanées, c'est à dire celles qui tendent à se  
produire dans un sens bien défini, sans l'intervention de notre  
technologie.

Qu'est-ce qui détermine la direction d'une transformation  
spontanée ?

"La direction de la transformation est liée à la répartition  
de l'énergie".



niveau du Caoutchouc de la balle et également au niveau  
du matériau formant le sol.

la balle et le sol deviennent un peu plus chauds à chaque  
rebondissement et le mouvement ordonné de la balle est diminué  
=> la direction de la transformation naturelle et spontanée  
correspond à une évolution (28) vers un état dans lequel

la balle est au repos. alors que toute son énergie a été dégradée en une agitation thermique désordonnée répartie dans le

Ex. إن الهدوء الأول للرياحيات الحرارية نرى على التكا فوهة اللقطة الموجودة بين الطوار الميكانيكية و الحرارية و لكن يبقى غير ثابت لأن لا يعطينا فكرة عن الاتجاه الذي تتطور فيه هذه التحولات الطبيعية القوية، إذ كما رأينا توجد تحولات مكوسية (إفكالية) وأخرى غير مكوسية. فالطوار المكوسية قلنا يمكن اعتبارها ككسامة مستمرة من حالات التوازن الحرارية على الاتجاهين و الطوار الغير مكوسية لا تكون إلا في اتجاه واحد (less unipare).

مثال: Lorsque nous mettons en présence 1 corps chaud et 1 froid, leurs températures s'égalisent:

$$\left. \begin{array}{l} 1 \text{ kg d'eau à } 20^{\circ}\text{C} \\ \text{" " " à } 10^{\circ}\text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow 2 \text{ kg d'eau à } 15^{\circ}\text{C}$$

mais on peut aussi avoir  $1 \text{ kg d'eau à } 25^{\circ}\text{C}$  et  $1 \text{ kg d'eau à } 5^{\circ}\text{C}$ .

← cette évolution ne serait pas contraire au principe de conservation de l'énergie, pourtant une telle évolution n'a jamais été observée.

$$\sum dQ_i = 0 \Rightarrow m_1 c_1 (T_f - T_1) + m_2 c_2 (T_f - T_2) = 0$$

$$\left. \begin{array}{l} m_1 = m_2 \\ c_1 = c_2 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \textcircled{1} \Rightarrow (15 - 20) + (15 - 10) = -5 + 5 = 0 \\ \textcircled{2} \Rightarrow (25 - 20) + (5 - 10) = 5 - 5 = 0 \end{array}$$

2<sup>ème</sup> exemple: mélange de 2 gaz:

nous faisons communiquer 2 ballons contenant des gazs différents au bout d'un certain temps, les 2 gazs se mélangent  $\Rightarrow$  Evolution à sens unique, car nous n'observons jamais une séparation Spontanée de ces 2 gazs à température constante.

إذن من الواضح أن المبدأ الأول غير كافٍ لتعيين الاتجاه تحدث فيه  
التحويلات العنصرية تكونت ← المبدأ الثاني: مبدأ كرنو  
Principe de Carnot.

النص الأول: 1<sup>er</sup> énoncé (Clausius)

"Le passage de la chaleur d'un corps froid à un corps chaud n'a jamais lieu "spontanément" ou n'a jamais lieu sans compensation."

كأن انتقال الحرارة من جسم بارد إلى جسم ساخن لا يكون بطريقة عفوية ولا يكون بدون تعويض

أي لا تكون بدون أن يحدث تغيير في الوسط الخارجي.

النص الثاني: 2<sup>ème</sup> énoncé (Lord Kelvin)

"A l'aide d'un système qui décrit un cycle et qui est en contact par avec une seule source de chaleur, il est impossible de recueillir du travail."

"بواسطة جملته توصف به، ككاملة من التحويلات وتوجد في حالة ما سبق مع منبع حراري واحد من المستحيل أن نتصل بها على عمل ميكانيكي"  
( $w \geq 0$ )

حسب نص Kelvin بالنسبة لدرجة الحرارة المنبع من المستحيل أن يكون  $w > 0$  بعبارة أخرى لتحويل الطاقة الحرارية إلى عمل ميكانيكي يجب أن تكون لدينا انخفاضاً في درجة الحرارة ← هذا يعني أنه يجب أن يكون لدينا أكثر من منبع حراري.

Autrement dit, pour convertir de l'énergie calorifique en travail mécanique, il faut disposer d'une chute de température.

De même que pour actionner une machine hydraulique, il faut une différence de niveaux, de même pour faire fonctionner une machine thermique, il faut une différence de température ⇒ il faut disposer de 2 sources de chaleur.

c'est la l'idée fondamentale de Sadi Carnot exprimée en 1824 dans un petit opuscule "Réflexion sur la puissance Motrice du Feu!"

دراسة التحويلات أحادية المخرج:

Etude des transformations monothermes

\* دورة احادية المخرج كفيته:

سبب مبدأ كرتو (Lord Kelvin) يجب ان يكون لدينا  $w \geq 0$  ( $Q \leq 0$ )

باستعمال المبدأ الأول:  $Q = -w$   $\Leftrightarrow w \neq 0 \Rightarrow Q < 0$

من اجل دورة احادية المخرج كفيته يكون لدينا  $w > 0$  و  $Q < 0$

$w > 0 \text{ و } Q < 0$

\* دورة احادية المخرج ومكوسه:

اذا كانت الدورة احادية المخرج ومكوسه فانه يتربط ما يلي

في الاتجاه الاول  $w > 0$  و  $Q < 0$   $\Rightarrow$   $w \geq 0$  و  $Q \leq 0$   $\Rightarrow$   $w > 0$  و  $Q < 0$   $\Rightarrow$   $w = 0$  و  $Q = 0$

المعكوسه =  $w < 0$  و  $Q > 0$

مبدأ كرتو  $\Rightarrow$   $w = 0$  و  $Q = 0$



دورة احادية المخرج ومكوسه  $\Leftrightarrow$

r: réversible

$w_r = 0$ $Q_r = 0$
------------------------

\* التحويلة احادية المخرج ومكوسه

Transformation monotherme réversible

اذا انتقلت الجملة من حالة توازن A الى حالة توازن B بواسطة تويبة احادية المخرج ومكوسه  $\Rightarrow$  الحد الميكانيكي والحركة الميكانيكيين مع الوسط الخارجي لا تتعلقان! لا بالحالة الابتدائية والنهائية فقط، كما ان

رأينا سابقاً أنه من أجل دورة أحادية المتغير وكتوتية فإن

$$W_r = 0 \text{ و } Q_r = 0$$

$$W_{AB}^r = F_0(B) - F_0(A)$$

أي يمكن وضع العمل بالشكل:

$$\Rightarrow W_{AA}^r = 0 \quad (\text{Principe de Carnot})$$

و حسب المبدأ الأول:

$$\Delta U = U(B) - U(A) = W_{AB}^r + Q_{AB}^r$$

$$U(B) - U(A) = F_0(B) - F_0(A) + Q_{AB}^r$$

$$\Rightarrow Q_{AB}^r = [U(B) - F_0(B)] - [U(A) - F_0(A)] \quad (*)$$

$F_0$ : الطاقة الحرة  
الطاقة الحرة

$U - F_0$ : الطاقة الحرة المربوطة  
الطاقة الحرة المربوطة

دورة أحادية المتغير غير كتوتية: cycle non thermique irréversible

في الحالة العامة  $W > 0$  و  $Q < 0$

كتوتية  $W_r = 0$  و  $Q_r = 0$

من أجل دورة أحادية المتغير غير كتوتية:

$$W_i > 0 \text{ و } Q_i < 0$$

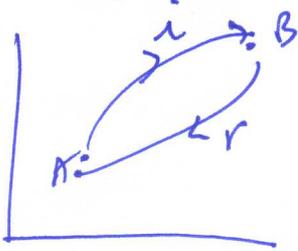
le système reçoit du travail mécanique et cède de la chaleur  $Q' > 0$  ( $Q' = -Q$ )

درجة الاكوتية التحويلة الأحادية المتغير نستطيع قياسها بواسطة  $W_i$  و  $Q_i$

"degré d'irréversibilité"

ex: l'expérience de brassage de l'eau de Joule.  
- la seule source de chaleur est l'atmosphère à température constante  $T_0$ .  $\rightarrow$  le système reçoit du travail  $W_i$  et cède de la chaleur  $Q < 0$  و  $W > 0$

Transformation macrotherme irréversible  
 كويلة احادية المتبع غير كويسة



التحويل A ← B غير كويسة

كويسة B ← A

الدورة غير كويسة

$$= w_{AB}^i + w_{BA}^r > 0$$

$$w_{AB}^i - w_{AB}^r > 0 \Rightarrow w_{AB}^i > w_{AB}^r$$

$$\Rightarrow w_i > w_r \Rightarrow w_i > F_0(B) - F_0(A)$$

و حسب المبدأ الأول:

$$w_i + q_i = w_r + q_r = U(B) - U(A)$$

$$q_i = q_r + (w_r - w_i) \quad \text{or} : w_r - w_i < 0$$

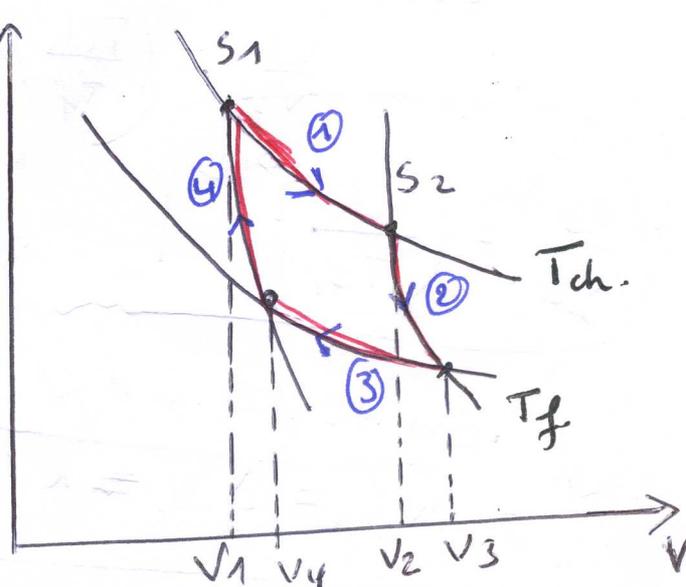
$$\Rightarrow q_i < q_r$$

La différence  $w_i - w_r$  peut servir de mesure de l'irréversibilité de la transformation.

Cycle diatherme - Cycle de Carnot - Machine thermique pure  
 الدورة الثنائية المتبع : دورة كرتو - الآلة الحرارية

- cycle de Carnot et entropie:

Le cycle utilisant un gaz parfait comme fluide fut présentée par Carnot en 1824. Son importance ne provient pas seulement du fait qu'il peut être considéré comme une limite pour les cycles réels, mais qu'il illustre clairement certaines idées de base.



le cycle de Carnot se compose de 4 transf. réversibles successives

Étape 1: Dilatation isotherme du volume  $V_1 \rightarrow V_2$  à la température constante  $T_{ch}$  (source  $S_1$ ); donc on a:  $PV = \text{cte}$ .

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \Rightarrow \boxed{\frac{V_2}{V_1} = \frac{P_1}{P_2}} \quad PV = nRT$$

l'énergie interne ne change pas à température constante

$$\Rightarrow \Delta U = W_1 + Q_1 = 0$$

$$\Rightarrow Q_1 = -W_1 = \int_{V_1}^{V_2} P dV = \boxed{nRT_{ch} \ln \frac{V_2}{V_1} = Q_1}$$

Étape 1: quantité de chaleur échangée avec le thermostat dans la première étape  $V_2 > V_1 \Rightarrow Q_1 > 0 \Rightarrow Q_1$  est la quantité de chaleur gagnée par le système au détriment du thermostat.

Étape 2: Dilatation adiabatique pour le fluide isolé de  $V_2 \rightarrow V_3$   
 $\Rightarrow$  la température passe alors de  $T_{ch} \rightarrow T_{fr}$  ( $T_{ch} > T_{fr}$ )

Pour le gaz parfait, l'éq d'état pour transf. adiabatique:

$$TV^\gamma = \text{cte}$$

$$T_{ch} V_2^\gamma = T_{fr} V_3^\gamma \Rightarrow P_2 V_2^\gamma = P_3 V_3^\gamma \quad \gamma = 1$$

$$T_{ch} V_2^{\gamma-1} = T_{fr} V_3^{\gamma-1} \Rightarrow \frac{T_{ch}}{T_{fr}} = \left(\frac{V_3}{V_2}\right)^\gamma$$

$$\Rightarrow \frac{V_3}{V_2} = \left(\frac{T_{ch}}{T_{fr}}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}$$

$$\boxed{\frac{V_3}{V_2} = \left(\frac{T_{ch}}{T_{fr}}\right)^{3/2}}$$

insérer!

$$\left(\gamma = \frac{5}{3}\right)$$

$$dQ = 0 \Rightarrow dU = dW$$

$$dU = dQ + dW$$

$$\Rightarrow W_2 = \Delta U_2 = n C_V (T_{fr} - T_{ch})$$

(3u)

Etape 3: compression isotherme de  $V_3 \rightarrow V_4$  ( $\hat{=}$  température  $T_{fr}$ )

$$\frac{V_4}{V_3} = \frac{P_3}{P_4} \quad \Delta U = 0 \quad (T = \text{cte}).$$

$$\Rightarrow Q_3 = -W_3 = n R T_{fr} \ln \frac{V_4}{V_3}$$

→ quantité de chaleur absorbée par le thermostat  
 Comme  $V_4 < V_3 \Rightarrow Q_3 < 0 \Rightarrow$  le gaz perd cette quantité de chaleur.

Etape 4: Pour terminer nous ramènerons le système dans son état initial par une compression adiabatique de  $V_4 \rightarrow V_1$ , la température augmente de  $T_{fr} \hat{=} T_{ch}$ .

$$\frac{V_1}{V_4} = \left( \frac{T_{fr}}{T_{ch}} \right)^{3/2} \quad \Rightarrow \quad \Delta Q = 0 \quad W_4 = \Delta U_4 = n C_V (T_{ch} - T_{fr})$$

Faisons le bilan énergétique global pour le processus.

$$\Delta U_{\text{tot}} = (Q_1 + W_1) + W_2 + (Q_3 + W_3) + W_4.$$

$$= \Delta U_1 + W_2 + \Delta U_3 + W_4.$$

$$= W_2 + W_4.$$

$$W_2 = n C_V (T_{fr} - T_{ch})$$

$$W_4 = n C_V (T_{ch} - T_{fr})$$

$$\Rightarrow \Delta U_{\text{tot}} = 0, \text{ comme il le doit pour un cycle}$$

$$Q_1 = n R T_{ch} \ln \frac{V_2}{V_1}, \quad Q_3 = n R T_{fr} \ln \frac{V_4}{V_3}$$

$$\frac{V_3}{V_2} = \left( \frac{T_{ch}}{T_{fr}} \right)^{3/2}, \quad \frac{V_1}{V_4} = \left( \frac{T_{fr}}{T_{ch}} \right)^{3/2}$$

$$\frac{V_3}{V_2} = \frac{V_4}{V_1} \Rightarrow \frac{V_4}{V_3} = \frac{V_1}{V_2} \Rightarrow \frac{Q_1}{T_{ch}} = n R \ln \frac{V_2}{V_1}$$

(35)

$$\frac{Q_3}{T_{fr}} = nR \ln \frac{V_1}{V_2} = -nR \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$\Rightarrow \frac{Q_1}{T_{ch}} = -\frac{Q_3}{T_{fr}} \Rightarrow \boxed{\frac{Q_1}{T_{ch}} + \frac{Q_3}{T_{fr}} = 0}$$

← cette équation est très importante car elle n'est pas seulement valable pour notre cycle particulier de Carnot. Toutes les expériences nous indiquent qu'elle reste vraie pour tout cycle réversible. Si l'on décompose le cycle de Carnot en fractions infinitésimales,

$$\Rightarrow \oint \frac{dQ_{rev}}{T} = 0$$

la grandeur  $\frac{Q}{T}$  s'appelle quantité de chaleur réduite.

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4$$

$$= -Q_1 + cv(T_{fr} - T_{ch}) - Q_3 + cv(T_{ch} - T_{fr})$$

$$W = -(Q_1 + Q_3) \Rightarrow \text{le travail produit par le cycle de Carnot.}$$

$$W = -nR(T_{ch} - T_{fr}) \ln \frac{V_2}{V_1} = -(Q_1 + Q_3)$$

←  $W < 0 \Rightarrow$  le travail fourni par le cycle

$\Rightarrow$  une machine de Carnot transforme de la chaleur en travail.

l'efficacité (le rendement) de la machine:

$$\boxed{\eta = \frac{|W|}{Q_1} = \frac{Q_1 + Q_3}{Q_1} = 1 + \frac{Q_3}{Q_1} = 1 - \frac{T_{fr}}{T_{ch}} = \frac{T_{ch} - T_{fr}}{T_{ch}}}$$

(36) l'efficacité augmente avec la différence de  $T_{ch} - T_{fr}$ .