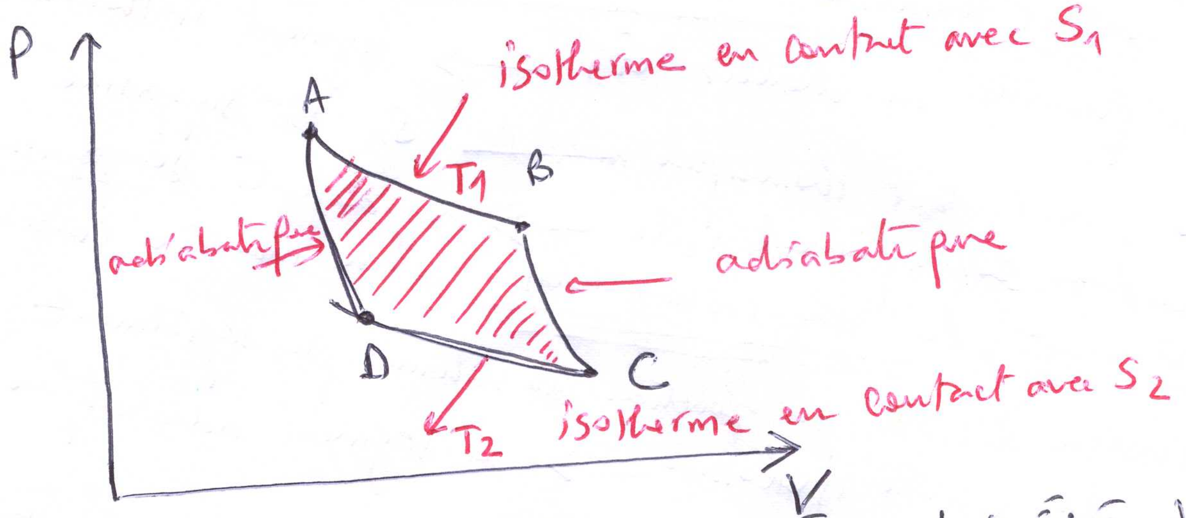


هذه الدورة تحتوي على 4 تحويلات مختلفة.

1 - التحويلة AB isotherme الجملة تتبادل كمية حرارة Q_1 مع المنبع الساخن S_1 ($T_1 = cte$).

2 - تحويلة كظومة BC نعزل في المنبع S_1 ثم نضع الجملة في حالة تماس مع المنبع البارد S_2 (T_2).

3 - تحويلة CD: الجملة تتبادل كمية حرارة Q_2 مع المنبع S_2 ($T_2 = cte$).

4 - ،، مكظومة DA نعزل في المنبع S_2 ثم نضع الجملة في حالة تماس مع المنبع S_1، بحيث تعود الجملة إلى الحالة الابتدائية.

دورة كرنو: إذا كانت كل التحويلات في الدورة السابقة عكوسة ⟸ نسمي هذه الدورة بدورة كرنو
cycle de Carnot

un exemple classique (fig).

le gaz est supposé enfermé dans 1 cylindre, surmonté d'un piston. Toutes les parois sont supposées adiabatiques sauf le fond supposé perméable à la chaleur

- l'état initial $\longrightarrow A(P_A, V_A)$

① le gaz $\longrightarrow$ détente isotherme pendant laquelle le fond est au contact thermique avec la source S_1 qui fournit au gaz la quantité de chaleur Q_1 $\longrightarrow$ segment isotherme. AB

② En B, le contact thermique ~~avec la~~ S_1 est supprimé, le fond est thermiquement isolé $\longrightarrow$ la détente se poursuit adiabatiquement, la température baisse d'une manière continue et la pression décroît en fonction du volume plus rapidement que pour la détente isotherme $\longrightarrow$ le segment adiabatique BC

③ On arrête cette détente adiabatique lorsque la température du gaz a atteint la valeur T_2. On établit le contact thermique avec la source S_2 de température T_2 et on comprime le gaz isothermiquement au contact de cette source $\longrightarrow$ le gaz échange la quantité de chaleur avec la source S_2 ($Q_2 < 0$, chaleur cédée par le gaz à la source) $\Longrightarrow$ segment isotherme CD.

④ En D, on supprime le contact avec S_2 et on continue la compression adiabatiquement $\longrightarrow$ ce qui échauffe le gaz et le ramène à l'état initial A

$\Rightarrow$ Au cours d'1 tel cycle le gaz fournit au milieu extérieur 1 travail $\mathcal{T} = -W > 0$ représenté par l'aire ABCD

ملاحظة: في حالة الدورة الثانية المتبع عكس الجملة التي تنتج عمل $(W<0)$ $\Leftarrow$ تلعب دور آلة حرارية، أما في حالة العكس $(W>0)$ نقول أن الجملة تلعب دور آلة مبردة (frigorifique).

حسب المبدأ الأول : خلال دورة من التحويلات .

$W + Q_1 + Q_2 = 0. \Rightarrow -W = Q_1 + Q_2$

آلة حرارية $W < 0 \Leftarrow Q_1 + Q_2 > 0.$

نميز 3 حالات :

* $Q_1 > 0$ et $Q_2 > 0$

** $Q_1 < 0$ et $Q_2 > 0$ avec $Q_2 > |Q_1|$

*** $Q_1 > 0$ $Q_2 < 0$ $Q_1 > |Q_2|$

يمكن أن نبرهن أن الحالتين * و ** غير ممكنتين ⇐ فالحالة *** هي المحققة فقط .

Pour une machine thermique ditherme, on a obligatoirement $Q_1 > 0$ et $Q_2 < 0$ avec $Q_1 > |Q_2|$

آلة حرارية ثنائية المنبع تأخذ بالضرورة من المنبع الساخن كمية من الحرارة Q_1 وتقدم جزء منها إلى المنبع البارد ، والفرق $Q_1 - |Q_2|$ هو الذي يظهر كعمل τ .

Une machine thermique ditherme emprunte nécessairement de la chaleur à la source chaude et restitue une quantité de chaleur plus petite à la source froide. C'est la différence $Q_1 - |Q_2|$ qui apparaît sous forme de travail τ.

$Q_1 > 0$ (المنبع S_1 يقدم كمية حرارية للجملة).

$Q_2 < 0$ (الجملة تقدم " " للمنبع S_2).

العمل المنتج :

$$\boxed{\tau = Q_1 + Q_2 = Q_1 - |Q_2|}$$

Rendement d'une machine thermique ditherme. مردود الآلة الحرارية ثنائية المنبع

نسمي مردود آلة حرارية ثنائية المنبع النسبة بين العمل المنتج τ مع الكمية الحرارية المأخوذة من المنبع الساخن S_1

$$\eta = \frac{\mathcal{T}}{Q_1} = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} \Rightarrow \boxed{\begin{array}{l} \eta = 1 + \dfrac{Q_2}{Q_1} \\ \\ \eta = 1 - \dfrac{|Q_2|}{Q_1} \end{array}}$$

$\eta < 1$

le rendement d'une machine thermique est toujours inférieur à l'unité.

Théorème de Carnot : نظرية كرنو

"Toutes les machines thermiques réversibles fonctionnant entre 02 températures données T_1 et T_2 ont le même rendement"

"كل الآلات الحرارية ثنائية المنبع والعكوسة والتي تعمل تحت درجتي الحرارة T_1 و T_2 لها نفس المردود".

أي المردود مستقل عن طبيعة دورة التحويلات ومستقل عن طبيعة الجملة التي توصف بدورة التحويلات وله مفهوم مطلق.

Corollaire du Théorème de Carnot نتيجة كرنو

"مردود آلة حرارية ثنائية المنبع غير عكوسة irréversible يكون دوما أقل من مردود آلة حرارية ثنائية المنبع عكوسة تعمل تحت نفس درجتي الحرارة".

$$\eta_i < \eta_r \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \eta_i = 1 + \dfrac{Q_2'}{Q_1'} \\ \eta_r = 1 + \dfrac{Q_2'}{Q_1'} \end{cases}$$

لبرهان على ذلك.

* مردود آلة حرارية ثنائية المنبع وعكوسة :

رأينا في المثال السابق أن :

$$\eta_r = 1 + \frac{Q_2}{Q_1}$$

$$= 1 - \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow \boxed{\eta_r = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{\Delta T}{T_1}}$$

* Pour accroître le rendement d'une machine thermique il y aura intérêt à accroître la température de la source chaude et à diminuer la température de la source froide.

* مردود آلة حرارية غير عكوسة :

$$\eta_i = 1 + \frac{Q_2^i}{Q_1^i} < \eta_r = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

$$\Rightarrow \frac{Q_2^i}{Q_1^i} < -\frac{T_2}{T_1} \Rightarrow -\frac{Q_2^i}{Q_1^i} > \frac{T_2}{T_1}$$

$$\Rightarrow -\frac{Q_2^i}{T_2} > \frac{Q_1^i}{T_1} \Rightarrow \left[\begin{array}{ll} \frac{Q_1^i}{T_1} + \frac{Q_2^i}{T_2} < 0 & \text{غير عكوسة} \\ \frac{Q_1^r}{T_1} + \frac{Q_2^r}{T_2} = 0 & \rightarrow \text{عكوسة} \end{array}\right.$$

كلوزيوس

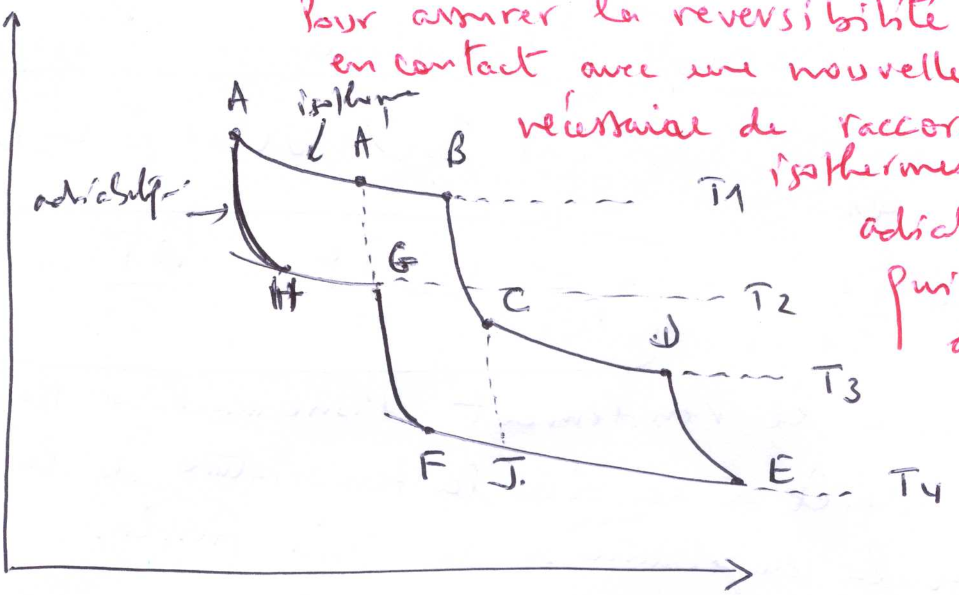
دورة ذات عدد منتهي من المنابع n :

لقد وجدنا أن :

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0 \quad \text{دورة عكوسة}$$

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} < 0 \quad \text{" غير عكوسة}$$

لنعمم من أجل $n > 2$:



Pour assurer la réversibilité lors de la mise en contact avec une nouvelle source il est nécessaire de raccorder 02 transformations isothermes par une transf adiabatique réversible pour assurer le passage du gaz de la température T_1 à T_j

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{Q_{AA'}}{T_1} + \dfrac{Q_{GH}}{T_2} = 0 \\[2ex] \dfrac{Q_{A'B}}{T_1} + \dfrac{Q_{JF}}{T_4} = 0 \\[2ex] \dfrac{Q_{CD}}{T_3} + \dfrac{Q_{EJ}}{T_4} = 0 \end{array}\right\} \Rightarrow \frac{Q_{AA'} + Q_{A'B}}{T_1} + \frac{Q_{GH}}{T_2} + \frac{Q_{CD}}{T_3} + \frac{Q_{EJ} + Q_{JF}}{T_4} = 0$$

$$\Rightarrow \frac{Q_{AB}}{T_1} + \frac{Q_{GH}}{T_2} + \frac{Q_{CD}}{T_3} + \frac{Q_{EF}}{T_4} = 0$$

$$\Rightarrow \boxed{\begin{array}{ll} \displaystyle\sum_{n=1}^{n} \frac{Q_n^r}{T_n} = 0 & \text{عكوسة} \\[3ex] \displaystyle\sum \frac{Q_n^i}{T_n} < 0 & \text{غير عكوسة} \end{array}}$$

تعميم في حالة عدد لانهائي من المنابع $(n \to \infty)$

من السهل أن نبرهن أنه إذا أصبح عدد المنابع $n \to \infty$ يكون لدينا.

$$\sum \frac{Q_n^r}{T_n} = 0 \Longrightarrow \oint \frac{dQ^r}{T} = 0.$$

cycle reversible

$$\sum \frac{Q_n^i}{T_i} < 0 \xRightarrow[(12)]{} \oint_{cy} \frac{dQ^i}{T} < 0$$

irreversible

تعريف دالة الحالة الانتروبي (العقور، الراجح)

Définition d'une nouvelle fonction d'état : l'entropie S

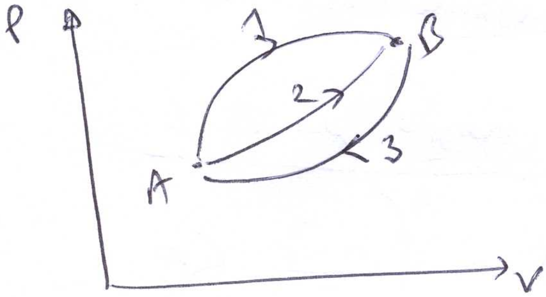
Nous avons montré que pour une suite de transformations réversibles d'un système thermodynamique formant 1 cycle, nous pouvons écrire la relation :

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0$$

↓ cycle réversible

لكن لدينا جملة ترموديناميكية تتطور من الحالة A إلى الحالة B

مما سبق :



$$\int_A^B \frac{dQ}{T}$$

مستقل عن التحويلة العكوسة المختارة لماذا ؟

En effet :

$$\left.\begin{array}{l} \displaystyle\int_A^B \frac{dQ_1}{T} + \int_B^A \frac{dQ_3}{T} = 0 \\ \displaystyle\int_A^B \frac{dQ_2}{T} + \int_B^A \frac{dQ_3}{T} = 0 \end{array}\right\} \Rightarrow \boxed{\int_A^B \frac{dQ_1}{T} = \int_A^B \frac{dQ_2}{T}}$$

l'intégrale a la même valeur qu'elle soit évaluée le long du chemin (1) ou le long du chemin (2) ou le long de tout autre chemin réversible.

Ceci étant posé, nous pouvons définir une fonction d'état S des variables indépendantes tq :

$$\boxed{\int_A^B \frac{dQ}{T} = S(B) - S(A) = \Delta S}$$

cette fonction S, qui a été introduite par Clausius en 1865 s'appelle la fonction Entropie.

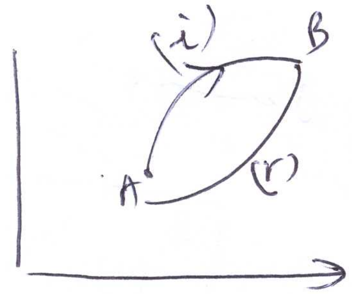
↓

la différentielle de cette fonction est

$$\int_A^B \frac{dQ}{T} = S(B) - S(A) = \int_A^B dS \Rightarrow$$

$$\boxed{dS = \frac{dQ}{T}}$$

la fct S elle même n'est définie qu'à une constante arbitraire près.



تحويلة غير عكوسة :

$$\int_A^B \frac{dQ_i}{T} + \int_B^A \frac{dQ_r}{T} < 0$$

$$\int_A^B \frac{dQ_i}{T} - \int_A^B \frac{dQ_r}{T} < 0 \Rightarrow \int_A^B \frac{dQ_i}{T} < \int_A^B \frac{dQ_r}{T}$$

$$\Rightarrow \boxed{\int_A^B \frac{dQ_i}{T} < S(B) - S(A)}$$

* تحويلة كظومة عكوسة :

$$dQ = 0 \Rightarrow dS = 0 \Rightarrow S = \text{cte} \quad [\, S(A) = S(B) \,]$$

الانتروبية ثابتة ←

Transformation isentropique

* تحويلة كظومة غير عكوسة :

Pour toute Transformation irreversible

$$\int_A^B \frac{dQ_i}{T} < S(B) - S(A) \qquad dQ_i = 0.$$

$$\Rightarrow S(B) - S(A) > 0 \Rightarrow \boxed{S(B) > S(A)}$$

" Lorsqu'un système thermiquement isolé évolue irreversiblement, son entropie augmente en fonction du temps"

" في حالة جملة معزولة ($dQ = 0$) تتطور حسب تحويلة غير عكوسة ⇐ الانتروبيا تزداد مع الزمن " .