

La diagramme de Raveau revisité avec l'entropie produite

par José-Philippe PÉREZ
et Stéphane OLIVIER

Dans plusieurs ouvrages d'enseignement de thermodynamique, on présente la discussion relative aux machines dithermes à partir du diagramme de Raveau (cf. [1] et [2]). Ce diagramme traduit les bilans énergétique et entropique dans le plan cartésien (Q_f, Q_c) défini par la chaleur Q_f reçue (algébriquement), au cours d'un cycle, par la machine de la part de la source froide et par la chaleur Q_c qu'elle reçoit (algébriquement), au cours du cycle, de la part de la source chaude.

La discussion à l'aide de ce diagramme peut être enrichie si l'on écrit le bilan entropique, non sous la forme d'une inégalité, comme on le fait souvent, mais sous la forme d'une égalité grâce au terme de production d'entropie S^P (cf. [3] et [4]). Cette méthode proposée aux étudiants de première année de DEUG A ne semble pas poser de problème pédagogique, au contraire [5].

1. RAPPELS DES BILANS ÉNERGÉTIQUE ET ENTROPIQUE SUR UNE MACHINE DITHERME

Les machines dithermes fonctionnent entre deux sources thermiques de températures différentes : T_c pour la source chaude et $T_f < T_c$ pour la source froide (Figure 1).

Comme les fluides considérés décrivent des cycles, la variation de l'énergie totale $\varepsilon = \varepsilon_c + \varepsilon_{p, ex} + U$ (somme de l'énergie cinétique macroscopique, de l'énergie potentielle extérieure et de l'énergie interne) et de l'entropie, après un cycle, est nulle. Par conséquent, si l'on désigne par W le travail reçu par le fluide, il vient :

$$\Delta(\varepsilon_c + \varepsilon_{p, ex} + U) = 0 = W + Q_c + Q_f$$

$$\text{et } \Delta S = 0 = S^r + S^p = \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} + S^p \quad \text{avec } S^p \geq 0.$$

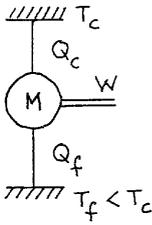


Figure 1

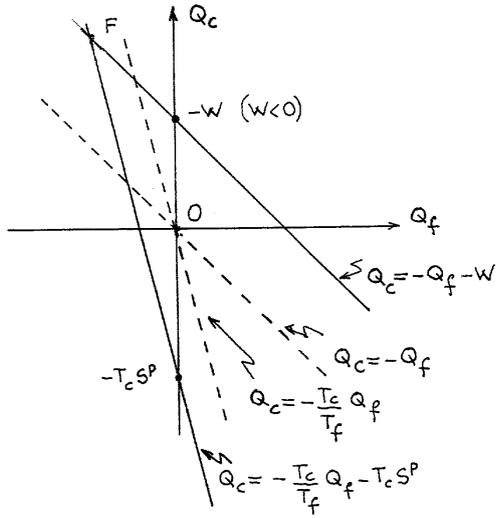


Figure 2

2. LE DIAGRAMME DE RAVEAU REVISITÉ

Comme dans le diagramme de Raveau, il est instructif d'utiliser le plan cartésien (Q_f, Q_c) pour représenter le point de fonctionnement d'une machine ditherme (Figure 2). D'après ce qui précède, ce point F appartient aux deux droites d'équations :

$$Q_c = -Q_f - W \quad \text{et} \quad Q_c = -\frac{T_c}{T_f} Q_f - T_c S^P .$$

La première est une droite de pente -1 dont l'ordonnée à l'origine représente le travail $-W$ que fournit la machine au milieu extérieur. Pour des températures T_c et T_f déterminées et une entropie de création S^P donnée (positive ou nulle), la deuxième droite est fixée. Elle passe par l'origine si l'évolution est réversible, c'est-à-dire si $S^P = 0$.

Remarque : Le cas singulier où $T_c = T_f$ permet de retrouver le résultat relatif aux transformations monothermes cycliques. En effet, les pentes des deux droites étant alors identiques, ces dernières ne peuvent se couper que si elles coïncident. Il en résulte que : $T_c S^P = W > 0$. On retrouve ainsi le signe positif du travail reçu dans de telles transformations.

2.1. Moteur thermique

C'est le premier cas caractérisé par un travail effectivement fourni à l'extérieur : $-W > 0$ soit $W < 0$. On peut déterminer le point F en partant de la chaleur Q_c nécessaire au fonctionnement du moteur (Figure 3a). L'intersection de la droite donnant Q_c avec la droite traduisant le bilan entropique donne F. On trouve le travail $-W$ fourni à l'extérieur en traçant de F une droite de pente -1 . On voit que F admet pour coordonnées $Q_c > 0$ et $Q_f < 0$: le moteur reçoit de la chaleur de la source chaude et en fournit à la source froide (Figure 3b).

Pour connaître l'influence de l'irréversibilité sur ce travail, il suffit de faire varier S^P : $-W$ est maximal si l'évolution est réversible.

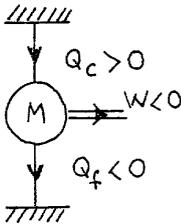


Figure 3a

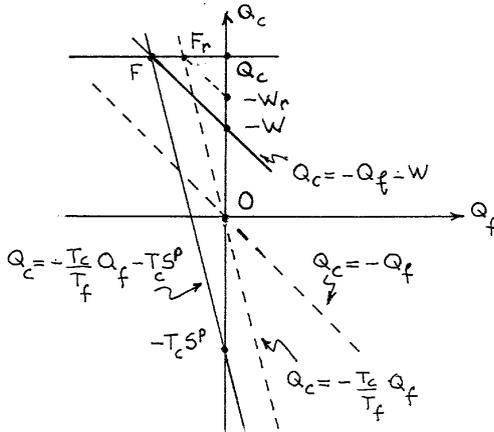


Figure 3b

2.2. Cycle inversé

Ce second cas est caractérisé par un travail effectivement reçu par la machine : $W > 0$, d'où le nom de cycle inversé (par rapport au moteur thermique).

Il y a ici deux possibilités.

– La première ($W > 0$, $Q_f > 0$, $Q_c < 0$) est très intéressante puisque, grâce au travail reçu, on prélève de la chaleur à la source froide et on en cède à la source chaude (Figure 4a). Suivant que l'on s'intéresse à la quantité Q_f ou à la quantité Q_c , le système est un *réfrigérateur* qui sert à «produire du froid», ou une *pompe à chaleur* qui sert à «produire du chaud».

- La seconde ($W > 0, Q_f < 0, Q_c < 0$) l'est beaucoup moins car la machine reçoit du travail et fournit de la chaleur aux deux sources (Figure 4b).

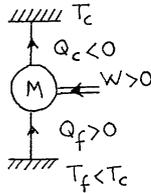


Figure 4a

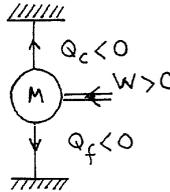


Figure 4b

a) Première possibilité : $W > 0, Q_f > 0, Q_c < 0$

(1) Réfrigérateur

On détermine le point F en partant de la chaleur Q_f nécessaire au fonctionnement du réfrigérateur (Figure 5a). L'intersection de la droite donnant Q_f avec la droite traduisant le bilan entropique donne F. On trouve le travail W reçu en traçant de F une droite de pente -1 . Pour connaître l'influence de l'irréversibilité sur ce travail, il suffit de faire varier S^p : on voit que W est minimal si l'évolution est réversible.

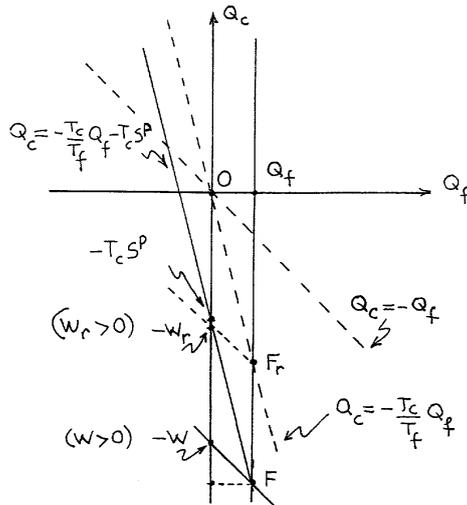


Figure 5a

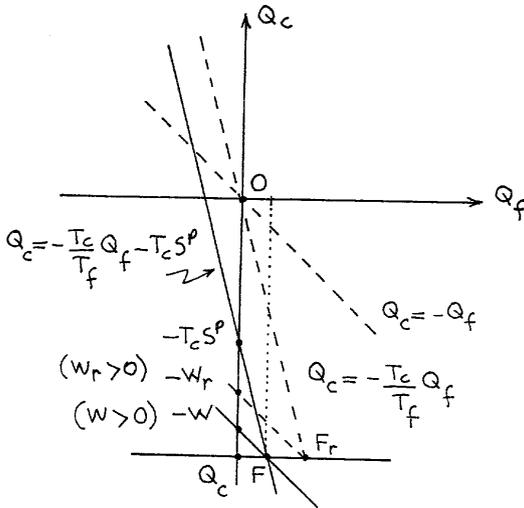


Figure 5b

(2) Pompe à chaleur

Dans ce cas, on détermine le point de fonctionnement F en partant de la chaleur Q_c à laquelle on s'intéresse dans une pompe à chaleur (Figure 5b). L'intersection de la droite donnant Q_c avec la droite traduisant le bilan entropique donne F. On trouve le travail W reçu en traçant de F une droite de pente -1 . Pour connaître l'influence de l'irréversibilité sur ce travail, il suffit de faire varier S^p : W est minimal si l'évolution est réversible.

Remarque : l'abscisse Q_f du point de fonctionnement F est positive pourvu que $Q_c < -T_c S^p$.

b) Deuxième possibilité : $W > 0, Q_f < 0, Q_c < 0$

Sur la figure 6, on a représenté cette possibilité qui n'a de sens que pour une évolution irréversible car $Q_c > -T_c S^p$ soit $T_c S^p > -Q_c > 0$.

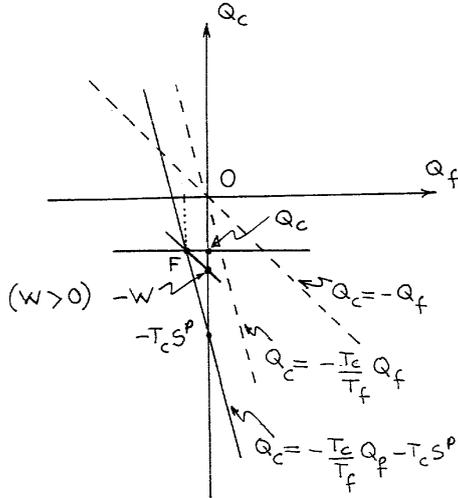


Figure 6

3. EFFICACITÉS OU COEFFICIENTS DE PERFORMANCE

Le *coefficient de performance* (COP) ou *efficacité* η d'une machine thermique est défini par le rapport des deux transferts d'énergie, celui qui est utile, compte tenu de la vocation de la machine, sur celui qui est dépensé pour la faire fonctionner.

3.1. Moteur ditherme

Dans un moteur ditherme caractérisé par le signe suivant des échanges d'énergie : $W < 0$, $Q_c > 0$ et $Q_f < 0$, on définit l'efficacité η_m par le nombre positif :

$$\eta_m \equiv \frac{-W}{Q_c} \quad \text{d'où} \quad \eta_m = \frac{Q_c + Q_f}{Q_c} = 1 + \frac{Q_f}{Q_c}$$

En tenant compte du bilan entropique, il vient, puisque $Q_f / Q_c = -T_f / T_c - T_f S^p / Q_c$, $Q_c > 0$ et $S^p > 0$:

$$\eta_m = 1 - \frac{T_f}{T_c} - \frac{T_f S^p}{Q_c} \leq 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

Ordre de grandeur : Si dans un moteur thermique, $T_f = 300$ K et $T_c = 400$ K, $\eta_m \leq 0,25$.

Ainsi, l'efficacité η_m est limitée supérieurement par une valeur maximale qui ne dépend que de la température des deux sources :

$$(\eta_m)_{\max} = 1 - \frac{T_f}{T_c} = \frac{T_c - T_f}{T_c}.$$

Notons que cette limitation supérieure de l'efficacité motrice de la machine est due à la nécessité d'avoir deux sources entre lesquelles il y a un transfert thermique et que seule la différence des transferts thermiques effectifs, $Q_c + Q_f = |Q_c| - |Q_f|$, importe.

Remarque : On désigne souvent par rendement l'efficacité η_m du moteur thermique. Il nous semble préférable de réserver ce mot au rapport r de l'efficacité η_m sur l'efficacité maximale $(\eta_m)_{\max}$: $r \equiv \eta_m / (\eta_m)_{\max}$ est alors *inférieure ou égale* à 1.

3.2. Réfrigérateur et pompe à chaleur

De telles machines sont caractérisées par les signes suivants des échanges d'énergie : $W > 0$, $Q_c < 0$ et $Q_f > 0$.

a) Réfrigérateur

On définit l'efficacité η_r d'un réfrigérateur par le rapport :

$$\eta_r \equiv \frac{Q_f}{W} \quad \text{d'où} \quad \eta_r = \frac{Q_f}{-Q_c - Q_f} = \frac{1}{-1 - Q_c/Q_f}.$$

En tenant compte du bilan entropique, il vient, puisque $Q_c/Q_f = -T_c/T_f - T_c S^p/Q_f$, $Q_f > 0$ et $S^p > 0$:

$$\eta_r = \frac{1}{T_c/T_f - 1 + T_c S^p/Q_f} \leq \frac{1}{T_c/T_f - 1}.$$

Ainsi, l'efficacité η_r est limitée supérieurement par une valeur maximale qui ne dépend que de la température des deux sources :

$$(\eta_r)_{\max} = \frac{1}{T_c/T_f - 1} = \frac{T_f}{T_c - T_f}.$$

Ordre de grandeur : Si dans un réfrigérateur, $T_f = 260$ K et $T_c = 340$ K, $\eta_r \leq 3,25$.

b) Pompe à chaleur

On définit l'efficacité η_p d'une pompe à chaleur par le rapport :

$$\eta_p \equiv \frac{-Q_c}{W} \quad \text{d'où} \quad \eta_p = \frac{-Q_c}{-Q_c - Q_f} = \frac{1}{1 + Q_f/Q_c}.$$

En tenant compte du bilan entropique, il vient, puisque $Q_f/Q_c = -T_f/T_c - T_f S^P/Q_c$, $Q_c > 0$ et $S^P > 0$:

$$\eta_p = \frac{1}{1 - T_f/T_c - T_f S^P/Q_c} \leq \frac{1}{1 - T_f/T_c}.$$

Ainsi, l'efficacité η_p est limitée supérieurement par une valeur maximale qui ne dépend que de la température des deux sources :

$$(\eta_p)_{\max} = \frac{1}{1 - T_f/T_c} = \frac{T_c}{T_c - T_f}.$$

Ordre de grandeur : Si dans une pompe à chaleur, $T_f = 263$ K et $T_c = 293$ K, $\eta_p < 9,77$.

Remarque : Ici aussi, le rendement r d'un réfrigérateur ou d'une pompe à chaleur, défini comme le rapport de $\eta_m/(\eta_m)_{\max}$ est toujours *inférieur ou égal à 1*.

En conclusion, retenons que la prise en compte explicite de l'entropie produite S^P dans le diagramme de Raveau, relatif aux machines dithermes, peut présenter un intérêt sur un plan strictement pédagogique. Sur le plan scientifique, l'intérêt de cette prise en compte, et plus largement celui de distinguer, dans la variation d'une grandeur extensive, la contribution produite de celle reçue (algébriquement), n'est plus à établir (cf. [3], [4], [6]).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] S. FAYE, «Thermodynamique», Magnard, 1981.
- [2] P. et J.-P. PROVOST, «Thermodynamique physique et chimique, Cedic / Fernand Nathan, 1984.
- [3] P. GLANSDORFF et I. PRIGOGINE, «Structure stabilité et fluctuations», Masson, 1971.
- [4] S.R. de GROOT et R. MAZUR, «Non-equilibrium thermodynamics», Dover-Publications, 1984.
- [5] J.-Ph. PÉREZ, A.M. ROMULUS et G. ZANCHI, «Thermodynamique», Masson, 1993 (à paraître).
- [6] J.-Ph. PÉREZ, R. CARLES et R. FLECKINGER, «Électromagnétisme», chapitre 18 sur l'énergie électromagnétique, Masson, 1990.