

# Entropie et autres grandeurs liées au second principe de la thermodynamique:

## a) exergie ou énergie mécanique idéalement récupérable E.M.I.R.

## b) énergie définitivement dégradée E.D.D.

Nouvelle rédaction, reprise intégralement, à l'intention de l'encyclopédie contributive Larousse12-04-2011

## Avertissement

Le sujet traité ici est délicat, et le miracle pédagogique n'existe pas.

Le présent article est rédigé à l'intention d'un public scientifique non satisfait de la présentation habituelle de l'entropie. Il nécessite une étude attentive et bien qu'il en soit à sa deuxième rédaction, on ne garantit pas qu'il pourra convenir à des personnes n'ayant pas déjà une bonne approche de la thermodynamique élémentaire.

Une première approche du même sujet est par ailleurs destinée au public le plus large pour lui fournir le plus rapidement possible un aperçu substantiel de ses implications concrètes. Elle est intitulée: « Les drôles de silences systématiques sur les pertes entropiques ».

On n'y fait pas intervenir la grandeur « entropie ». En remplacement, l'astuce pédagogique consiste à faire intervenir le bilan énergétique des pompes à chaleur du commerce. Celles-ci fournissent un chauffage à faible production d'entropie, grâce à quoi leur rendement énergétique est très supérieur à 100%.

A partir de là, l'évocation de la pompe à chaleur idéale fournit la nouvelle référence idéale d'un chauffage sans production d'entropie, sachant que cette référence ne pourra jamais être atteinte en pratique, mais qu'on peut dès à présent s'en rapprocher considérablement grâce au développement de la cogénération en remplacement des chauffages traditionnels.

## A – L'entropie: sa découverte historique (rappel) et le problème pédagogique

### 1°) Rappel

Un moteur ditherme reçoit une quantité de chaleur  $Q_1$  fourni par une source chaude à la température  $T_1$  et rejette une quantité de chaleur  $Q_2$ , inférieure à  $Q_1$ , à une sources froide à une température  $T_2$ , inférieure à  $T_1$ .

Ortograf-fr, Louis Rognon Glasson F-25500-MONTLEBON tél: +(33)(0)3 81 67 43 64 sites: 1°) <http://www.alfograf.net> 2°) <http://alrg.free.fr/ortograf> 3°) Ortograf Nouvelobs (**censuré**)

Dans le cas d'un moteur ditherme réversible, le rapport des chaleurs échangées est, en raison de la définition de l'échelle de température adoptée par Kelvin, égal au rapport des températures:

$$Q2 / Q1 = T2 / T1$$

la différence

$Q1 - Q2$  représente l'énergie mécanique  $W$  fournie par le moteur.

Le **rendement** est alors « le rendement de Carnot »:

$$r = W / Q1 = (Q1 - Q2) / Q1 = 1 - (Q2 / Q1)$$

$$r = 1 - (T2 / T1)$$

Un fonctionnement réversible est un fonctionnement sans dégradation d'énergie, puisque, par définition, une simple inversion du fonctionnement permet de revenir exactement à l'état initial. Le moteur ditherme réversible est donc un moteur idéal et l'inversion de son fonctionnement donne la pompe à chaleur idéale.

L'égalité:

$$Q2 / Q1 = T2 / T1 \text{ entraîne:}$$

$$Q2 / T2 = Q1 / T1,$$

ce qui a amené Clausius à **donner la dénomination « entropie » à la grandeur  $S = Q / T$ .**

**La définition de cette nouvelle grandeur se justifiait donc par la propriété innée suivante: l'entropie cédée à la source froide par un moteur ditherme réversible est égale à l'entropie que ce moteur reçoit de la source chaude. Autrement dit:**

$$S2 = S1$$

(Remarque: cette relation devient  $S2 = - S1$  si l'entropie est une grandeur algébrique comptée positivement lorsqu'elle est reçue par la machine ditherme)

## 2°) Le problème pédagogique

A partir de cette définition formelle de la grandeur entropie se pose alors le problème de sa signification concrète.

Une première réponse est qualitative. Elle fait intervenir le fait que la chaleur est une énergie plus ou moins dégradée en fonction de la température du corps qui la porte.

La chaleur portée par un corps à température élevée est moins dégradée que celle portée par un corps à basse température. En effet, le premier peut réchauffer le second par un simple échange direct de

Ortograf-fr, Louis Rougnon Glasson F-25500-MONTLEBON tél: +(33)(0)3 81 67 43 64 sites: 1°) <http://www.alfograf.net> 2°) <http://alrg.free.fr/ortograf> 3°) Ortograf Nouvelobs (**censuré**)

chaleur alors que l'inverse n'est pas possible..

Une énergie mécanique ou électrique est une énergie non dégradée. Elle peut être transformée en chaleur sur un corps à n'importe quelle température, par exemple sur le filament à 2700°C d'une lampe à incandescence, ou sur une étoile filante aussi bien que dans l'air d'un appartement à 20°C.

Si l'entropie  $S_2 = Q_2 / T_2$  cédée à la source froide par un moteur ditherme est égale à celle qu'il reçoit de la source chaude, c'est uniquement dans le cas idéal où le fonctionnement de ce moteur est réversible. Or, un fonctionnement réversible, c'est un fonctionnement sans dégradation supplémentaire d'énergie par rapport aux formes initiales d'énergie..

Autrement dit, l'égalité  $S_2 = S_1$  est liée au fait que **la dégradation de l'énergie au niveau de la chaleur  $Q_2$  rejetée par le moteur ditherme réversible est égale à la dégradation de l'énergie au niveau de la chaleur  $Q_1$  reçue de la source chaude.**

Une valeur donnée de l'entropie  $S=Q/T$  constitue donc déjà, qualitativement, un **indice de la dégradation de cette énergie-chaleur.**

Dans les moteurs réels, l'énergie se dégrade soit par transformation directe d'énergie mécanique en chaleur (frottements), soit par passage direct de chaleur des parties chaudes vers les parties froides.

Pour une quantité de chaleur  $Q_1$  donnée, ces dégradations d'énergie ont pour effet d'augmenter la chaleur  $Q_2$  fournie à la source froide et donc de diminuer l'énergie mécanique fournie par le moteur, et aussi son rendement.

Pour que l'entropie ne soit pas un simple indice de dégradation de l'énergie-chaleur, mais qu'elle soit perçue comme une **vraie grandeur fournissant une mesure quantitative de cette dégradation**, il est maintenant nécessaire de faire apparaître la convertibilité de cette chaleur en énergie mécanique, ce qui amène à introduire un milieu ambiant supposé à température constante et uniforme  $T_{\text{ambiant}}$  et à faire intervenir une fois de plus le moteur ditherme réversible.

## **B - Le niveau zéro de qualité de l'énergie-chaleur est fourni par une modélisation simple de l'air du temps**

### **a) Intérêt de cette modélisation**

Moyennant cette modélisation où l'on suppose que l'air du temps a une température constante et uniforme, on va faire apparaître facilement les grandeurs suivantes liées à l'entropie. Celles-ci fournissent alors l'éclairage manquant sur le sens de cette grandeur, et on peut dire qu'elles amènent à la faire considérer comme une perte de monnaie sonnante et trébuchante, qui plus est, dangereuse pour l'environnement.

Ces grandeurs liées à l'entropie sont:

Ortograf-fr, Louis Rougnon Glasson F-25500-MONTLEBON tél: +(33)(0)3 81 67 43 64 sites: 1°) <http://www.alfograf.net> 2°) <http://alrg.free.fr/ortograf> 3°) Ortograf Nouvelobs (**censuré**)

1°) **l'énergie définitivement dégradée, E.D.D.**, ou amoindrissement entropique de la qualité de la chaleur  $Q$

2°) **l'exergie ou énergie mécanique idéalement récupérable, E.M.I.R.**, qui représente en quelque sorte la vraie valeur restante de la chaleur  $Q$ .

3°) le taux d'énergie définitivement dégradée

4°) le taux d'énergie mécanique idéalement récupérable.

Ces deux dernières grandeurs traduisent en pourcentages plus immédiatement parlants les grandeurs précédentes.

Un article ultérieur montrera comment on peut amener théoriquement de manière réversible un système donné dans un état donné défini d'avance. Il montrera que l'EDD aussi bien que l'EMIR et l'entropie sont des fonctions d'état, c'est à dire que chacune d'elles ne peut prendre qu'une seule valeur pour un état donné du système.

## **b) L'énergie-chaleur contenue dans l'air du temps est gratuite et de valeur nulle**

On a vu que la chaleur est une énergie plus ou moins dégradée en ce sens qu'elle offre beaucoup plus de potentialités si l'objet qui la porte est à température élevée que s'il est à basse température.

Pour donner un niveau zéro de valeur de l'énergie-chaleur, on modélise comme on l'a dit le « milieu ambiant », ou, si l'on préfère, « l'air du temps », en supposant qu'il est à la température constante et uniforme  $T_{\text{ambiant}}$ .

On peut alors considérer que la chaleur reçue ou fournie par l'air du temps ou par des corps à la même température est une énergie de valeur nulle

Par exemple, si l'on trouve une maison à  $5^{\circ}\text{C}$  alors que le thermomètre extérieur indique  $20^{\circ}\text{C}$ , on peut chauffer la maison gratuitement jusqu'à  $20^{\circ}\text{C}$ , tout simplement en ouvrant les fenêtres.

Autre illustration, on perd intégralement son argent si les fenêtres restent grandes ouvertes alors que le chauffage fonctionne.

Cette considération qualitative va se traduire par le fait que  $E_{\text{mir}} = 0$  lorsque  $T = T_{\text{ambiant}}$ . Autrement dit, l'amoindrissement entropique de l'énergie-chaleur fait alors perdre à celle-ci l'intégralité de sa valeur.

Le fait que la chaleur est une énergie plus ou moins dégradée suivant la température du corps qui la contient va se trouver mesuré par la valeur numérique de l'amoindrissement entropique, autrement dit par la valeur numérique de l'énergie définitivement dégradée  $E_{\text{dd}} = T_{\text{ambiant}} \cdot S$ .

L'amoindrissement entropique est supérieur à 100%, autrement dit, la valeur de la chaleur est négative, lorsque

Ortograf-fr, Louis Rougnon Glasson F-25500-MONTLEBON tél: +(33)(0)3 81 67 43 64 sites: 1°) <http://www.alfograf.net> 2°) <http://alrg.free.fr/ortograf> 3°) Ortograf Nouvelobs (**censuré**)

la température du corps qui la porte est inférieure à celle de l'air du temps. Par exemple, l'énergie-chaleur qui s'installe subrepticement à l'intérieur d'un congélateur **nécessite une consommation d'énergie électrique** pour en être extraite.

Dans ce qui suit, on se place dans le cas le plus simple où la température  $T$ , du corps portant la chaleur  $Q$  et l'entropie  $S=Q/T$ , est supérieure à  $T_{\text{ambiant}}$ . Le moteur ditherme réversible fonctionne alors bien comme moteur et non comme pompe à chaleur. Mais les résultats obtenus s'extrapolent au cas contraire où  $T$  est inférieur à  $T_{\text{ambiant}}$ , le moteur ditherme réversible fonctionnant alors comme une pompe à chaleur idéale.

## **C – La quantité d'énergie mécanique idéalement récupérable à partir de la chaleur $Q$ est déterminée par le rendement de Carnot**

Soit un objet  $O$  à la température  $T$  et capable de fournir la quantité de chaleur  $Q$  en restant à cette température. Il possède donc l'entropie  $S = Q / T$  liée à cette énergie-chaleur.

Pour donner un sens physique précis et mesurable à l'entropie en question, on imagine un moteur réversible fonctionnant entre deux sources de chaleur,

- une de ces deux sources, c'est l'objet en question

- l'autre source de chaleur est le milieu ambiant, et, pour la modélisation la plus simple possible, on suppose que sa température est constante et uniforme, de valeur  $T_{\text{ambiant}}$ .

La vraie valeur de cette chaleur, ou, si l'on préfère, sa qualité, est alors donnée par l'énergie mécanique maximale que l'on peut espérer en tirer. On l'appellera ici « énergie mécanique idéalement récupérable » ou Emir.

Son calcul fait donc intervenir le rendement de Carnot,  $r$ , et elle vaut

$$\text{Emir} = r \cdot Q = (1 - (T_{\text{ambiant}} / T)) \cdot Q$$

$$= Q - (T_{\text{ambiant}} / T) \cdot Q$$

$$= Q - T_{\text{ambiant}} \cdot S$$

C'est cette relation simple entre l'Emir et l'entropie qui donne son sens à l'entropie.

**A un facteur près, l'entropie  $S = Q/T$  mesure un amoindrissement de l'énergie idéalement récupérable Emir, c'est à dire de l'énergie que l'on peut espérer tirer théoriquement de la quantité de chaleur  $Q$ .**

Produire de l'entropie revient à perdre de l'EMIR, c'est à dire des possibilités d'obtention d'énergie

mécanique, AUTREMENT DIT A CONSOMMER DES RESSOURCES ENERGETIQUES..

L'EMIR est appelée aussi exergie

## **D - L'énergie définitivement dégradée, ou amoindrissement entropique**

La quantité

$$E_{dd} = Q - E_{mir}$$

$$= T_{ambiant} \cdot S$$

représente alors la chaleur que le moteur ditherme réversible rejettera fatalement à la source froide, autrement dit dans l'air du temps, en même temps qu'il extraira de la chaleur  $Q$  toute l'énergie mécanique susceptible d'en être tirée.. On peut l'appeler « énergie définitivement dégradée EDD » ou amoindrissement entropique, ou décote entropique.

Remarque: on a utilisé les écritures EMIR et EDD comme sigles traduisant des abréviations, et les écritures Emir et Edd comme des symboles littéraux. L'utilisation ici des écritures avec indices  $E_{mir}$  et  $E_{dd}$  s'est avérée être à la fois ni commode, ni très lisible, ni indispensable.

En conclusion:

relativement à un milieu ambiant supposé à la température constante et uniforme  $T_{ambiant}$ , une quantité de chaleur  $Q$  portée par un corps à la température  $T$  peut idéalement se décomposer en deux constituants:

1°) une énergie mécanique idéalement récupérable, Emir ou exergie, donnée par le rendement de Carnot, et liée à l'entropie par la relation

$$E_{mir} = Q - T_{ambiant} \cdot S$$

2°) une énergie définitivement dégradée Edd, de valeur

$$E_{dd} = T_{ambiant} \cdot S,$$

donc proportionnelle à l'entropie  $S = Q / T$  de la quantité de chaleur  $Q$ .