

La grandeur entropie: histoire d'une découverte qui reste à démystifier

Le présent article s'appuie essentiellement sur le livre « Thermodynamique » de Georges Bruhat, 6ème édition, Masson, 1968. Des précisions sont tirées de divers sites internet, dont Wikipédia.

Avant propos

L'enseignement de l'entropie laisse à désirer, c'est bien le moins qu'on puisse dire. S'il n'en était pas ainsi, les scientifiques et le grand public seraient catastrophés par le simple spectacle de quelque chaudière de chauffage central, et on s'orienterait vers le développement systématique des chauffages par cogénération.

Quand bien même le rendement énergétique des appareils de chauffage traditionnels est toujours assez proche de 100%, les pertes entropiques y représentent typiquement 95% des ressources consommées dans le cas des chauffages par combustion, et 97% des ressources consommées pour les chauffages électriques.

En général, l'enseignement flou de l'entropie évoque sans la moindre analyse la découverte historique d'une grandeur mystérieuse appelée entropie. Il affirme ensuite magistralement que ladite entropie est une fonction d'état. Mais on ne voit pas de quoi il s'agit concrètement.

Cet article voudrait donner un aperçu du cheminement qui a abouti à la découverte de ladite entropie et des précisions qu'il aurait été bon d'y ajouter.

Il sera prolongé par un autre article intitulé: « entropie et autres grandeurs liées au second principe ». Mais de nombreux articles abordent déjà cette question sous différents angles. Il s'est avéré nécessaire de les multiplier parce que la gestion de l'énergie au niveau du chauffage refuse de prendre en compte les surconsommations de ressources liées aux productions d'entropie. Voir par exemple l'article récent intitulé: « Chauffage, les drôles de silences systématiques sur les pertes entropiques ».

A – Les premiers jalons

Dans la première moitié du 19ème siècle, le spectacle fabuleux des machines à vapeur a amené les physiciens à modéliser le fonctionnement de ces machines.

En 1824, dans ses « Réflexions sur la puissance motrice du feu », Sadi Carnot dégageait déjà quatre idées-clés:

a) Pour avoir un bon rendement, **intérêt d'un écart de température important** entre deux milieux différents, par exemple: foyer de la chaudière = source chaude, et milieu ambiant = source froide,

Article rédigé pour l'encyclopédie Larousse contributive en ligne par
Louis Rougnon Glasson (Ortograf-FR) F-25500-MONTLEBON tél: +(33)(0)3 81 67 43 64 sites:
1°) <http://www.alfograf.net> 2°) Ortograf Nouvelobs (censuré) 3°) <http://alrg.free.fr/ortograf>

b) Pour une source chaude et une source froide à températures données, l'idée d'un **rendement optimal** qui serait obtenu par un **moteur ditherme idéal**,

c) L'idée que le fonctionnement du moteur idéal était **réversible**, l'inversion du fonctionnement donnant ce qu'on a appelé bien plus tard une pompe à chaleur.

d) Pour deux "sources de chaleur" à températures données, l'idée que **le rendement optimal est toujours le même**, quel que soit le fluide utilisé. Exemples: vapeur d'eau, air ou autre gaz.

B – Le cycle de Carnot

Sadi Carnot a alors imaginé un moteur idéal où l'eau et sa vapeur étaient remplacées par un gaz, ce qui devait apporter une nouvelle possibilité à la fois théorique et expérimentale de calculer le rendement optimal pour deux sources à températures données, T_1 pour la source chaude et T_2 (température ambiante) pour la source froide.

La loi $p.V = \text{constante}$ était connue depuis 1662 (Boyle) et 1675 (Mariotte)

La loi $V_1 / T_1 = V_2 / T_2$ (proportionnalité du volume avec la température) était connue depuis 1787 (Charles)

La loi $P_1 / T_1 = P_2 / T_2$ (proportionnalité de la pression avec la température) était connue depuis 1809 (Gay-Lussac)

Dans le moteur idéal, le gaz décrit un cycle où il fournit du travail de manière réversible, en échangeant de la chaleur avec seulement deux sources: la source chaude qui lui fournit la quantité de chaleur Q_1 , et la source froide qui fournit la quantité de chaleur Q_2 .

Le gaz subit d'abord une compression où sa température est maintenue constante par le fait qu'il fournit de la chaleur, Q_2 , à la source froide. Il reçoit alors naturellement du travail.

Ensuite, le gaz subit une compression adiabatique, c'est à dire sans échange de chaleur. Cette compression fait monter sa température de T_2 à T_1 . Il reçoit encore du travail.

Dans une troisième phase, il se détend et fournit donc du travail. Sa température est maintenue constante grâce à de la chaleur fournie par la source chaude, en quantité Q_1 .

Quatrième phase: une détente adiabatique fait baisser sa température de la valeur T_1 à la valeur T_2 . Cette détente fournit encore du travail.

En fin de cycle, le gaz se retrouve dans son état initial. Le travail qu'il a fourni lors des deux phases de détente (détente isotherme puis détente adiabatique) est plus important que le travail reçu lors des deux phases de compression. Le bilan global est ainsi la fourniture d'un travail W .

A noter que l'équivalence du travail et de la chaleur n'était pas connue en 1824, date où Carnot a publié son opuscule: « Sur la puissance motrice du feu ». A cette date, Carnot pensait encore que la chaleur Q_2 restituée à la source froide était égale à la chaleur Q_1 reçue de la source chaude. Toutefois, cette

Article rédigé pour l'encyclopédie Larousse contributive en ligne par
Louis Rougnon Glasson (Ortograf-FR) F-25500-MONTLEBON tél: +(33)(0)3 81 67 43 64 sites:
1°) <http://www.alfograf.net> 2°) Ortograf Nouvelobs (censuré) 3°) <http://alrg.free.fr/ortograf>

équivalence de la chaleur et du travail se trouve bien établie dans des papiers qu'il a écrits avant 1832, date de son décès, et publiés en 1878. (cf. Bruhat, pages 74-75)

Ainsi, la définition du rendement par Carnot se limitait à l'expression: $r = W / Q_1$ et il était mesuré en « unité de puissance motrice par unité de quantité de chaleur ».

Donc, c'est par un abus de langage consacré par l'usage si l'on l'applique l'expression « rendement de Carnot » à la valeur r donnée par la formule

$$r = 1 - (T_2 / T_1)$$

En toute rigueur, cette expression « rendement de Carnot » s'applique en fait au **concept** du meilleur rendement concevable, lié à un fonctionnement réversible du moteur ditherme,

Un calcul de rendement maximum théorique a-t-il été fait alors à partir des propriétés des gaz que l'on connaissait déjà, pour deux températures données des deux sources de chaleur? Une recherche fouillée semblerait nécessaire pour pouvoir répondre à cette question.

Mais c'est la découverte tardive du premier principe de la thermodynamique: « équivalence de la chaleur et du travail, conservation de l'énergie », qui va permettre alors l'émergence de la notion d'entropie, qui relève du second principe de la thermodynamique, celui-ci concernant quant à lui la limitation des possibilités d'obtenir du travail à partir de la chaleur.

C – Découverte tardive du premier principe de la thermodynamique

En 1842, Robert Mayer, médecin allemand, énonce explicitement le principe de l'équivalence du travail et de la chaleur.

A partir de là, l'énergie interne d'un système est alors l'expression utilisée pour englober dans un même concept la grandeur « travail » et la grandeur « quantité de chaleur ». Ses variations sont déterminées par le travail et la chaleur que ce système échange avec l'extérieur, et qui sont des grandeurs algébriques.

L'énergie interne est alors une fonction d'état, définie à une constante près, c'est à dire que si le système passe d'un état A donné à un état B donné, la variation d'énergie interne dans cette transformation est déterminée uniquement par l'état initial et par l'état final, elle ne dépend pas de la manière dont le système est passé de A à B.

D – En 1852, Kelvin définit l'échelle universelle de température par la relation:

$$T_1 / T_2 = Q_1 / Q_2$$

Un thermomètre à mercure et un thermomètre à huile, par exemple, gradués pour être en coïncidence à la fois pour 0°C et pour 100°C, indiquent en principe quelque différence lorsque ils sont tous deux à

Article rédigé pour l'encyclopédie Larousse contributive en ligne par
Louis Rougnon Glasson (Ortograf-FR) F-25500-MONTLEBON tél: +(33)(0)3 81 67 43 64 sites:
1°) <http://www.alfograf.net> 2°) Ortograf Nouvelobs (censuré) 3°) <http://alrg.free.fr/ortograf>

une température différente de ces deux valeurs. Ceci pose le problème de l'arbitraire dans le choix d'une échelle de température.

Or, en raison de la conservation de l'énergie, la chaleur Q_2 que le moteur ditherme réversible cède à la source froide est inférieure à celle qu'il reçoit de la source chaude, la différence étant égale au travail fourni.

On a donc à la fois: t_1 supérieur à t_2 , ET Q_1 supérieur à Q_2 .

Les lettres minuscules pour t_1 et t_2 traduisent le fait que l'échelle de température utilisée ici est à priori arbitraire et quelconque.

En 1852, Thomson, le futur Lord Kelvin, propose de définir une échelle de température par la relation $T_1 / T_2 = Q_1 / Q_2$

Pour deux sources de chaleur à des températures données, le rapport Q_1 / Q_2 ne dépend pas du fluide utilisé pour le moteur thermique ditherme réversible, donc l'échelle de température définie par l'égalité des rapports ne dépend d'aucun fluide particulier.

Cette échelle de température a donc une valeur universelle.

A cette échelle universelle de température on attribue d'abord, par exemple pour la température de la glace fondante, la même valeur numérique de 273,15 degrés, identique à celle de l'échelle de température des gaz parfaits. On peut vérifier ensuite que cette échelle, appelée échelle thermodynamique de température, est identique à celle des gaz parfaits.

E – 1865: Clausius invente l'entropie

L'identité $T_1 / T_2 = Q_1 / Q_2$, qui définit "l'échelle thermodynamique de température" a deux conséquences:

1°) le rendement du moteur ditherme réversible, qui est devenu un nombre sans dimension en vertu de l'équivalence de la chaleur et du travail, prend pour expression:

$$r = W / Q_1 = (Q_1 - Q_2) / Q_1$$

$$= 1 - (Q_2 / Q_1) = 1 - (T_2 / T_1)$$

$$\mathbf{r = (T_1 - T_2) / T_1}$$
 « rendement de Carnot »

2°) La relation $T_1 / T_2 = Q_1 / Q_2$ a aussi pour conséquence:

$$\mathbf{Q_2 / T_2 = Q_1 / T_1}$$

Autrement dit, dans le cas d'un moteur ditherme réversible, la grandeur Q_2 / T_2 cédée à la source froide est égale à la grandeur Q_1 / T_1 reçue par ce moteur à la source chaude.

Article rédigé pour l'encyclopédie Larousse contributive en ligne par
Louis Rougnon Glasson (Ortograf-FR) F-25500-MONTLEBON tél: +(33)(0)3 81 67 43 64 sites:
1°) <http://www.alfograf.net> 2°) Ortograf Nouvelobs (censuré) 3°) <http://alrg.free.fr/ortograf>

L'idée d'une quantité de chaleur Q qui, après avoir transité à travers le moteur, se retrouverait intégralement en sortie de ce moteur est certes alors abandonnée depuis longtemps, mais, dans le cas d'un moteur réversible, **cette idée d'un simple transit s'applique bel et bien à la grandeur**

$$S = Q / T$$

Clausius, universitaire allemand, lui donne en 1865 le nom « entropie ».

« C'est à dessein que j'ai formé ce mot entropie, de manière qu'il se rapproche autant que possible du mot énergie; car ces deux quantités ont une telle analogie dans leur signification physique qu'une analogie de dénomination m'a paru utile ».

Mais cette analogie a ses limites. La même année 1865, Clausius énonce les deux principes de la thermodynamique en ces termes:

« 1 – L'énergie de l'univers **est** constante »

« 2 – L'entropie de l'univers **tend vers** un maximum »

F – Le gaspillage de ressources dû aux conclusions manquantes

Un siècle plus tard, lors de la sixième édition du célèbre livre « Thermodynamique » de Georges Bruhat, les idées liées au premier principe de la thermodynamique étaient devenues familières.

Au contraire, encore cinquante ans plus tard, bien que le second principe ait été découvert avant le premier, la notion d'entropie est restée complètement floue.

- L'idée de la conservation de l'énergie a pris son assise grâce essentiellement aux bons soins de la fée électricité, capable de produire de l'énergie mécanique aussi bien que de l'énergie rayonnante ou de la chaleur. Quant au fait que l'énergie d'un système soit une fonction d'état, il est tout simplement la formulation scientifique d'une idée intuitive. -

En revanche, aujourd'hui en 2011, la compréhension du sens concret de cette grandeur n'est pas satisfaisante, comme en témoigne le succès du **slogan de consolation « entropie = désordre »**

Un indice beaucoup plus lourd de conséquences de cette incompréhension, c'est notre gestion de l'énergie au niveau du chauffage des immeubles.

Une chasse féroce aux productions d'entropie a été faite sans qu'on le sache dans les diverses transformations d'énergie, grâce aux dispositifs les plus divers: formes aérodynamiques des avions et des voitures, roulements à billes, utilisation des transformateurs et des lignes haute tension pour le transport de l'énergie électrique, amélioration du rendement des systèmes d'éclairage, etc.

Or, pendant ce temps, les pertes entropiques liées au chauffage constituent un énorme gaspillage dont on ne réalise pas l'ampleur, tout simplement parce qu'un aspect essentiel de la grandeur entropie n'a pas été dégagé clairement.

Article rédigé pour l'encyclopédie Larousse contributive en ligne par
Louis Rougnon Glasson (Ortograf-FR) F-25500-MONTLEBON tél: +(33)(0)3 81 67 43 64 sites:
1°) <http://www.alfograf.net> 2°) Ortograf Nouvelobs (censuré) 3°) <http://alrg.free.fr/ortograf>

Le chauffage qui minimise le mieux les pertes entropiques, c'est le chauffage par cogénération. Il est quasi inexistant.

La pompe à chaleur est un autre chauffage à faible production d'entropie, grâce à quoi son rendement est trois à quatre fois supérieur à celui d'un chauffage électrique. Elle s'est développée grâce aux savoirs déjà acquis par les industriels au niveau des machines frigorifiques., mais les pertes entropiques y sont encore considérables.

Les chauffages traditionnels tiennent toujours le haut du pavé alors que les pertes entropiques y représentent au moins 95% des ressources consommées.

G – Le formalisme mathématique a fait oublier l'aspect physique immédiat

Clausius a d'abord établi que l'entropie d'un système est une fonction d'état, ce qui fournissait une analogie prometteuse avec la grandeur énergie, et les promesses en question se sont parfaitement vérifiées par les prévisions de phénomènes ou par les explications de phénomènes observés.

Mais pour un très large public, cette idée de l'entropie, fonction d'état, reste très abstraite dans la mesure où l'on n'a pas explicité ce que cette grandeur représente concrètement ni la manière selon laquelle elle se trouve être logée dans un système donné.

A l'origine de la découverte de l'entropie, celle-ci ne se manifestait que par les échanges de chaleurs réalisés avec la source chaude et avec la source froide.. Pour pouvoir multiplier les sources de chaleur, ou pour faire varier la température de chaque source, Clausius passe naturellement au calcul infinitésimal, en introduisant l'expression. $dS = dQ / T$ mais ceci ne nous donne toujours pas l'idée de ce que l'entropie peut représenter concrètement.

Avec de l'énergie, on peut soulever une charge, donner de la vitesse à un véhicule, chauffer de l'eau. Mais quelles sont les possibilités ou les diminutions de possibilités liées à une entropie donnée $S = Q / T$? Où l'entropie se loge-t-elle?

La réponse précise est déjà dans divers articles. Elle sera reprise prochainement dans un nouvel article intitulé: « Entropie et autres grandeurs associées au second principe ». Qualitativement, on peut déjà dire:

"L'entropie d'une quantité de chaleur Q fournie ou reçue par un corps à la température T mesure un amoindrissement de l'énergie-chaleur Q par rapport à la même quantité d'énergie prise sous la forme d'énergie mécanique ou d'énergie électrique.

La relation en $1 / T$:

$S = Q / T$ est liée au fait que, pour une quantité de chaleur donnée, cet amoindrissement est plus faible lorsque la température est plus élevée"