

Énergie et Entropie

Hugues GENVRIN

2015

“Die Energie der Welt is konstant. Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu”.¹

RUDOLPH CLAUSIUS (1865).

Ce travail aura pour fil conducteur la notion de température bien qu’aujourd’hui on puisse en avoir une idée claire et distincte en tant qu’intensité de la chaleur, elle n’en reste pas moins depuis ces origines une représentation renvoyant à la chaleur. Si l’on doit à Black et aux thermodynamiciens la mise en place conceptuelle actuelle, l’archéologie du savoir nous fait remonter sans conteste à la période aristotélicienne. Le XX^e siècle fut marqué par une extension du domaine d’application de l’entropie, nous nous proposerons de revenir sur le théorème fondateur de Sadi Carnot avant de présenter les approches formelles de Clausius et Boltzmann. Enfin nous nous permettrons de proposer une décomposition de l’entropie.

1 Préambule

Il est des révolutions scientifiques qui se mettent en marche en deux temps, ce mécanisme est incarné par la dialectique de l’invention d’une technique et la découverte scientifique qui l’explique fondamentalement qu’on pourrait également appeler le couple matériel et spirituel, ou encore praxis et logos que rend idéalement l’image d’un balancier. Lorsqu’on étudie la révolution thermodynamique cela prend tout son sens. On distinguera plus exactement deux révolutions : tout d’abord la première liée à l’invention de la machine à vapeur, et la seconde qui va créer les bases scientifiques de la compréhension, de l’approfondissement du phénomène. Entre ces deux mondes, des hommes vont essayer de comprendre, de transfigurer cet inconnu, d’inventer des mots, qu’ils soient ingénieurs, professeurs d’université, scientifiques amateurs ou même philosophes, voire artistes... dans ce qu’on peut communément décrire comme un *zeitgeist* ². Nous élargirons le concept de théorie

¹On traduira par : l’énergie du monde est constante, l’entropie du monde croît vers un maximum.

²Expression allemande signifiant l’esprit du temps.



Figure 1: Pluie, vitesse et vent - W.Turner (1844).
[30, Wikipédia]

à celui de dispositif suivant la définition de Bachelard : un dispositif, c'est théorie matérialisée . Nous allons tout d'abord présenter l'invention d'un instrument qui s'est réalisé sur plusieurs siècles avant de devenir un standard. On peut préciser que sur cette période de mise au point, cet instrument mesurait plus globalement un état de la chaleur du corps qu'on identifiait à la chaleur réelle, et non pas l'intensité de la chaleur comme on le définira après l'expérience de Black.

1.1 Le socle Aristotélicien

La Métaphysique d'Aristote est un ouvrage qui a été écrit après *La Physique*, l'auteur y définit la métaphysique comme la philosophie première, la base de toutes les sciences. Le but est ici d'exposer des idées en rapport avec notre sujet d'étude, on verra combien les esprits ont pu et peuvent encore se nourrir de la trame conceptuelle développée par le Stagirite. Nous allons donc présenter les notions d'ontologie (à laquelle la métaphysique ne peut se réduire bien entendu), de catégories, de causalité, la logique, et nous permettrons d'avoir un regard sur ce qui en mesure d'être en rapport avec l'aléa, bien qu'Aristote ne mentionne jamais ce terme dans cet écrit.

1.1.1 Principe

La notion de principe est fondamentale chez Aristote, Principe se dit d'abord du point de départ du mouvement de la chose, tel est, par exemple le principe de la ligne et de la route, auquel répond un autre principe à l'extrême opposé [3]. On retrouvera cette terminologie à la base de la thermodynamique, les principaux acteurs revendiquant cet héritage, en cela elle s'opposera à

la philosophie naturelle de Newton qui cherchait à se rapprocher davantage d'Euclide, pour établir un modèle physique calqué sur la méthode mathématiques.

1.1.2 L'ontologie

L'auteur définit l'ontologie comme la science qui étudie l'être en tant qu'être, et les attributs qui lui appartiennent essentiellement. Elle ne se confond avec aucune des sciences dites particulières, car aucune de ces autres sciences ne considère en général l'être en tant qu'être, mais décomposent une certaine partie de l'être, c'est seulement de ces parties qu'elles étudient l'attribut . La déclinaison des différents types d'être repose sur la notion de prédicat qui permet de mettre en relation de correspondance un groupe d'éléments. Le prédicat permettant de faire la liaison entre le genre et les espèces ³. Il présente une exception en définissant la substance comme toutes ces choses sont appelées substance parce qu'elles ne sont pas des prédicats d'un sujet ; mais parce que, au contraire, les autres choses sont prédicats d'elles [4]. La substance sera définie comme la première catégorie de l'être.

1.1.3 Les catégories

La présentation est plus riche que dans L'Organon, Aristote nous y offre une classification plus détaillée, on retrouve donc les catégories suivantes la substance, la quantité, la qualité, la relation, le lieu, le temps, la position, la possession, l'action, la passion [13].

1.1.4 Les causes

Selon l'étude des causes premières, il aboutit à en distinguer quatre :

- la cause efficiente,
- la cause formelle,
- la cause matérielle,
- la cause finale.

La cause formelle est identifiée à la quiddité : Tout ce qu'elle peut pas ne pas être [5]. La causalité implique donc la prise en compte d'une potentialité en rapport avec le monde, néanmoins y sont exclues les causes accidentelles. La cause matérielle va correspondre au genre ou à la substance de l'être, on remarquera l'exemple de l'argent [6] qui est la cause première de la coupe. La cause efficiente sera le moteur d'une dynamique, d'où partira le mouvement.

³Ce thème est aussi abordé dans L'organon .

1.1.5 En acte, potentiel, et accident

La réalité de la notion de possible devient l'émergence d'une potentialité. Aristote distingue la puissance de l'acte, qu'il considère comme pouvant co-exister. En cela il s'oppose à l'école de Mégare : Quelque chose peut avoir la puissance d'être et cependant n'être pas, avoir la puissance de n'être et être [11]. Il rajoute : Une chose est possible, si son passage à l'acte dont elle dit avoir la puissance, n'entraîne aucune impossibilité[12]. On voit se dessiner un large périmètre de la potentialité, simplement restreint par l'exclusion de l'accident en tant que cause isolée.

1.1.6 L'état

État, en un sens, est comme un acte de ce qui est "eu" [7]. La notion d'état est aussi sujette au devenir : De même, en effet qu'il existe toujours un intermédiaire entre l'être et le non être, de même il y a aussi ce qui devient entre ce qui est et ce qui n'est pas [8]. On voit poindre ici l'idée d'une dynamique de l'être, qui s'expliquerait bien entendu par l'activation d'une cause efficiente. Aristote aborde d'un point de vue qualitatif des concepts de l'aléa, il définit la partie et le tout [9], puis des éléments de combinatoire qui émergeront plus tard dans les sciences en tant que concepts quantitatifs, par exemple disposition : s'entend de l'arrangement de ce qui possède des parties, selon le lieu, la puissance ou la forme , en ajoutant : un état peut se dire d'un dispositif . Plus large encore il définit la notion de similitude : Semblables, se dit de choses affectées, sur tous les rapports, de même attributs, de celles qui sont affectées de plus de ressemblances que de différences [10]. Comment ne pas étendre cette dernière perspective, tout d'abord à une relation entre un état macroscopique et des états microscopiques, l'être se déclinant par des dispositions microscopiques, bien évidemment on retrouvera chez Boltzmann une utilisation de tous ces concepts. D'autre part, la deuxième citation laisse envisager une mise en place d'une notion de classe, la singularité s'appuyant sur une extension de similitudes entre des choses, par des attributs propres.

1.2 La Pentecôte de l'esprit

Nous paraphrasons dans ce titre la qualification attribuée par Maritain aux faits que nous allons décrire, qu'il avait dénommés La pentecôte de la raison

.
Le dix novembre 1619, alors qu'il résidait en Bavière dans les environs de la ville d'Ulm, à Neuburg très exactement, Descartes passa toute la journée dans une maison d'hôte. Il allait vivre ce jour-là une révélation, nous relatons ici le fameux épisode du poêle. A cette époque on précisera que les poêles de faïence allemands n'étaient pas logés dans les chambres des hôtes, mais localisés dans une pièce à part de l'habitation, un système de tuyauteries permettant d'alimenter en chaleur les différentes pièces de la maison.

Le philosophe se retrouva ainsi dans sa chambre close, isolé, toute la journée durant, la chaleur arrivant en abondance. Selon les termes de Baillet [1] l'enthousiasme le gagne . Il faut préciser qu'au sens étymologique : l'enthousiasme provient d'*entheos* qui renvoie à l'image des dieux ou du mystique qui viendraient s'infuser dans l'âme de l'individu. La description allégorique que Descartes en fera évoque le phénomène physique, il sent le feu lui prendre le cerveau [1]. Sous le coup de sentiments d'exaltation Descartes fera cette nuit-là plusieurs rêves, dont le troisième où il lui reviendra à l'esprit un poème d'Ausone dont il s'exclamera le titre au réveil : *Quod vitae sectabor iter ?* ⁴. Analogie entre le monde extérieur et le monde intérieur, Descartes saisit une loi encore cachée de la nature dans la plus pure tradition sensualiste qui en fait aujourd'hui dans la description de l'expérience vécue un véritable oxymore cartésien. Voilà donc un nouveau point d'inflexion de l'aventure de cette science qui n'est encore qu'un horizon lointain.

2 La première révolution thermodynamique

“Il n'est rien qui contribue plus au progrès de la connaissance que la découverte d'un nouvel instrument.”

DAVY.

A cette époque on appelait heuristique ⁵ un processus intellectuel qui permet de comprendre quelque chose (a fortiori un phénomène scientifique) sans nécessairement l'expliquer de fond en comble de manière rationnelle. Cela s'intégrait dans une démarche pragmatique largement utile dans l'univers technique et industriel. Lorsque Einstein écrira ses premiers travaux relatifs à l'effet photo-électrique, il n'hésitera pas à intituler son article : Un point de vue heuristique concernant la conception et la transformation de la lumière (1905). Mentionnons tout de même que s'il pouvait alors se placer comme un physicien-technicien, il fut aussi à l'aise plus tard dans les généralisations conceptuelles de grandes envergures comme le démontrèrent ses travaux sur la relativité générale. Pour revenir à notre sujet, on va s'intéresser plus particulièrement à une heuristique formalisée dans la création d'une machine : le condenseur.

Ici on se trouve véritablement dans le cas où l'invention d'une technique évolue de manière concomitante avec l'explication des faits. Replaçons nous dans la problématique originelle du XVIII^e siècle : la houille était utilisée comme source d'énergie fossile, or l'exploitation des mines à charbon nécessitait de pomper beaucoup d'eau qui provenait directement de la nappe phréatique, ou bien était épuisée par des fissures dans les sous-sols, empêchant un travail d'extraction correct de la part des ouvriers et techniciens.

⁴Quel chemin vais-je donc suivre ?

⁵Le terme est emprunté au grec heuristikê qui veut dire art de trouver.

Certes quand Watt déposa son brevet en 1769 : Un nouveau procédé de diminution de la consommation des machines à feu en vapeur et combustible [28], qui détermina l'avantage de son procédé de condensation, il existait déjà les machines de Newcomen (1712). Une des grandes réalisations de ce dernier fut sans doute la réalisation étanche de l'ensemble cylindre-piston, à laquelle Hook ne croyait pas. Mais comme on le dit judicieusement, ces machines fonctionnaient avec le feu et non à vapeur. D'ailleurs Watt et Boulton qui exploitèrent industriellement le brevet sur le condenseur à partir de 1775 avaient bien saisi l'énorme avantage en termes de productivité et d'économie. La machine de Boulton & Watt Corp. consommera en matières moins des deux-tiers de la machine de Newcomen pour obtenir un résultat identique. Ils adoptèrent une forme particulière de crédit toujours en vogue aujourd'hui : le leasing [28]. C'est à dire que les acheteurs de leur machine à vapeur allaient payer des redevances annuelles correspondant dans ce cas au gain de productivité par rapport à la machine de Newcomen, ce qu'on peut définir en termes économiques comme une redevance basée sur le gain marginal. En 1800 ils auront livré plus de cinq cents machines à vapeurs, la société entière se sera structurée autour de l'industrie.

Si nous revenons à l'aspect technique, précisons que Watt était facteur d'instruments scientifiques [20]. Autrement dit, il fabriquait des instruments pour le compte des professeurs de l'université de Glasgow, entre autres pour les professeurs Anderson et Black. Ce dernier qui était également médecin et chimiste, fut l'un des plus grands théoriciens de la chaleur. L'explication première de la supériorité du système de Watt, il allait l'expliquer en découvrant en 1763 la notion de chaleur latente qui concerne les transitions d'état de la matière et s'appliquant à fortiori à la transition eau-vapeur. Mais à cette date la machine de Newcomen était bien réelle tandis celle de Watt n'existait pas encore.

En 1763 alors qu'il travaillait sur un prototype en modèle réduit de la machine de Newcomen, Watt s'aperçut qu'avec l'effet d'échelle la chaleur produite s'épuisait à réchauffer le cylindre. Il pensa dans un premier temps que la quantité d'eau injectée pour condenser le cylindre était trop importante. À la suite de nouveaux calculs pour déterminer le volume d'eau adéquat, il s'aperçut que la théorie des mélanges ne fonctionnait pas lorsqu'une partie de l'eau était encore à l'état gazeux. Il découvrit[21] alors le principe de Black sur la chaleur latente de vaporisation sans toutefois l'interpréter. Cependant après avoir corrigé le volume d'eau correct, la machine démontra une baisse de puissance. On eut pu penser que l'eau restait trop proche de son point d'ébullition [22]. On savait alors que les températures constantes de fusion et d'ébullition de l'eau étaient relatives à une pression atmosphérique donnée. Pour remédier à cette baisse de puissance il modifia la machine originelle en ajoutant un cylindre où sera condensée la vapeur du cylindre moteur. Avec ce montage il inventa alors un nouvel instrument : le condenseur. Les causes de la dynamique du piston dans le cylindre n'étaient plus celles de la machine

de Newcomen. On passait à une machine à piston actionnée par de la vapeur sous pression, d'où le nom de machine à vapeur.

2.1 L'expérience de Black

En 1762, dans son laboratoire de l'université de Glasgow, Joseph Black mène les observations qui vont séparer définitivement deux notions jusque-là confondues : la *température* et la *quantité de chaleur*.

Son point de départ est qualitatif. Lorsqu'on chauffe un bloc de glace à 0°C , le thermomètre plongé dans le mélange eau-glace n'avance pas : tant qu'il reste de la glace, la température demeure rigoureusement à 0°C , alors même qu'on continue de fournir de la chaleur. Black en tire un argument resté célèbre : si toute la chaleur reçue servait à élever la température, le moindre apport ferait fondre la glace instantanément, et les dégels de printemps seraient des catastrophes soudaines. Or la fonte est lente et progressive. La chaleur fournie est donc « cachée » (*latente*) : elle réalise le changement d'état sans se manifester sur le thermomètre.

Pour quantifier le phénomène, considérons l'illustration calorimétrique idéalisée suivante (proche de l'esprit des mesures de Black, mais ramenée à des unités cohérentes). On enferme dans une enceinte isolée :

- 1 g de glace à 0°C ,
- 80 g d'eau liquide à 1°C .

À l'équilibre, toute la glace a fondu et l'on obtient 81 g d'eau à 0°C . Le bilan se lit alors directement. Les 80 g d'eau, en se refroidissant de 1°C , ont cédé

$$Q = m c_{\text{eau}} \Delta T = 80 \text{ g} \times 1 \text{ cal}/(\text{g}^\circ\text{C}) \times 1^\circ\text{C} = 80 \text{ cal},$$

et c'est exactement cette chaleur qui a fait fondre le gramme de glace **sans en élever la température**. On en déduit la chaleur latente de fusion de la glace :

$$L_{\text{fusion}} \approx 80 \text{ cal/g} \quad (\approx 334 \text{ J/g}).$$

(Black, travaillant en degrés Fahrenheit, avait estimé cette grandeur à l'équivalent d'environ 140°F — soit $\approx 78^\circ\text{C}$ —, remarquablement proche de la valeur admise aujourd'hui.) Reprenant ensuite la même méthode pour la vaporisation, il trouve une chaleur latente bien plus grande encore, de l'ordre de $L_{\text{vap}} \approx 540 \text{ cal/g}$ pour l'eau — ordre de grandeur qui éclairera plus tard la supériorité du condenseur de Watt.

Black tire de ces expériences deux énoncés :

1. Hors transition de phase, la chaleur fournie à un corps élève sa température.

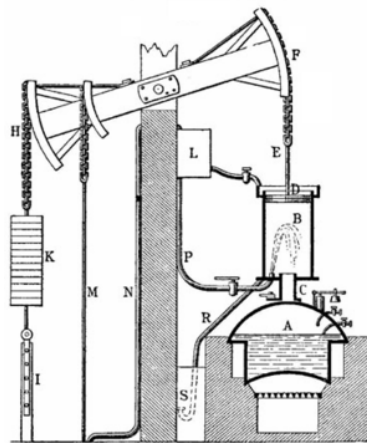


Figure 2: La machine de Newcomen (1712).
[25, Wikipédia]

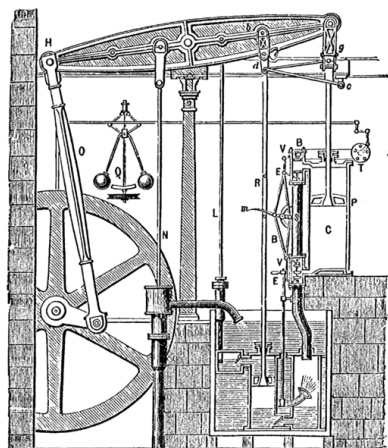


Figure 3: La machine de Watt (1769).
[31, Wikipédia]

2. Pendant une transition de phase, la chaleur absorbée (fusion, vaporisation) ou dégagée (solidification, liquéfaction) se fait **à température constante**.

Observant enfin que la chaleur nécessaire pour élever d'un degré une masse donnée dépend de la nature du corps, il dégage le concept de *chaleur spécifique* (capacité calorifique massique). On notera la distinction, capitale pour la suite, entre la chaleur spécifique à volume constant c_v et celle à pression constante c_p .

L'apport décisif de Black est ainsi épistémologique autant que physique : on passe d'une *qualité* (le chaud, identifié à une intensité) à deux *quantités* distinctes — la quantité de chaleur et la capacité à l'absorber — rapportées à cette qualité.

Définition 1 (Chaleur latente). Aux températures de changement de phase (fusion ou ébullition), la chaleur fournie à un corps ne produit pas d'élévation de température : elle a pour seul effet la conversion d'une phase à l'autre.

Définition 2 (Chaleur spécifique). La chaleur spécifique (ou capacité calorifique massique) d'un corps est la quantité de chaleur dQ à lui fournir pour élever d'une unité la température d'une unité de masse : $c = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT}$.

Remarque. La calorie se définit comme la chaleur élevant 1 g d'eau de 1 °C (conventionnellement entre 14.5 et 15.5 °C), avec l'équivalence de Joule 1 cal = 4.184 J. Tout ce passage est cohérent en gramme/calorie ; c'est le mélange « livre/litres » qui introduisait l'incohérence.

Si aujourd'hui la distinction des concepts de température et de quantité de chaleur est devenue assez claire dans les esprits, on peut remarquer que l'adoption de la définition de la quantité de chaleur par le système international des mesures reste relativement récente. Par ailleurs d'un point de vue épistémologique, il nous semble critiquable de poser la définition d'une chose à partir de son intensité. La température pouvant être perçue comme une intensité de la chaleur.

Définition 3 (Variables d'états). L'état d'un système thermodynamique est caractérisé par des variables appelées variables d'états qui sont reliés entre elles pour définir l'équation d'état du système : $p=f(T,V,n)$.

Où p fait référence à la pression, V désigne le volume, T la température et n la quantité de matière (en moles).

Voici les propos de Watt rapportés dans la biographie que Carnegie lui consacra, sur la découverte de Black [18] : *Being struck with this remarkable fact (effect of latent heat), and not understanding the reason of it, I mentioned it to my friend, Dr. Black, who then explained to me his doctrine of latent heat, which he had taught some time before this period (1764) ; but*

*having myself been occupied with the pursuits of business, if I had heard of it I had not attended to it, when I thus stumbled upon one of the material facts by which that beautiful theory is supported*⁶.

Voilà un point d'inflexion de cette grande aventure, mais nous restons encore très loin d'une explication complète des phénomènes thermodynamiques. Les découvertes liées à la technique principale se multiplièrent : on inventa la fraiseuse, les alésages devinrent un travail de plus en plus précis, le système bielle-manivelle vint remplacer le système de balancier, la double détente du piston supplanta le simple cylindre...

Le milieu scientifique restait très intéressé par cette invention aux multiples facettes à explorer. En particulier Sadi Carnot, dont le père Lazare Carnot : homme politique, général, scientifique de premier plan (tant en physique qu'en mathématique), fut l'un des plus grands hommes de la nation. Sadi Carnot théorisa en 1824 dans *La puissance motrice des machines à feu* ce que la technique démontrait par les faits. A savoir que les éléments des anciens : l'air, le feu, l'eau, la terre étaient mêlés pour produire dans des proportions jusque-là jamais égalées, mais avec une limite intrinsèque liée à la différence des températures des sources de chaleurs liées aux substances motrices. Sadi Carnot n'établit pas une démonstration de la dégradation de l'énergie, il en souleva l'idée comme allait le reconnaître plus tard Clausius. En effet, la conversion de la chaleur en énergie mécanique n'est pas totale, cette dégradation implique un rendement maximal qui ne pourra jamais être de 100 %, de ce phénomène naîtra le concept d'entropie.

2.2 L'œuvre de Sadi Carnot

La physique retient comme second principe de la thermodynamique ce qu'on appelle communément le principe entropique qui stipule que l'entropie d'un système ne peut que croître au cours du temps. D'un point de vue étymologique, l'entropie provient du grec $\epsilon\nu\tau\rho\omega\pi\eta$ qui signifie évolution. Il fut découvert par Clausius en 1850, il conduit directement à une grandeur associée à la transformation d'un système. En 1877 Boltzmann mettra à jour une formulation de l'entropie différente de celle de Clausius, qui sera elle rattachée à la représentation d'un système stable sous l'angle macroscopique, mais désordonné sous l'angle microscopique. Sans doute l'apport de Shannon en 1948, élargissant le concept d'entropie au traitement de l'information a permis de dessiner la perspective d'un concept dépassant largement la thermodynamique, pour en faire une qualité ontologique de tout système. Ce

⁶Nous nous proposons de le traduire ainsi : Étant frappé par ce fait remarquable (effet de chaleur latente), et ne comprenant pas la raison de ceci ; je le fis remarquer à mon ami le docteur Black, qui m'expliqua alors sa thèse de la chaleur latente, qu'il avait enseignée quelques temps auparavant (1764), mais étant accaparé par la poursuite de mes affaires, si j'en avais eu écho, je n'aurais pas fait le rapprochement, lorsque je fus confronté avec les faits bruts, par lesquels la belle théorie est vérifiée.

passage épistémologique délicat sera établi par la création d’une infrastructure théorique adaptée que nous explorerons dans le chapitre suivant.

Étant donné que tout système physique peut être caractérisé par des états, cela va nous permettre de considérer une fonction de cet état qu’on appellera entropie et qu’on notera .

2.2.1 Le théorème de Sadi Carnot

Pour cette section, nous utiliserons principalement deux références : de Sadi Carnot [27] ainsi que de Prigogine et Kondepui [PRIG1-2].

Sadi Carnot était un officier et ingénieur Français, il écrivit son ouvrage fondateur de la théorie de la thermodynamique en 1824, qu’il intitula : *Sur la puissance motrice des machines à feu*. Si on se replace dans la terminologie de l’époque, la puissance motrice signifierait aujourd’hui le travail. Sadi Carnot utilisa la notion de calorique pour approcher la chaleur, on retrouve dans ce texte les principales notions pour appréhender le fonctionnement des machines à vapeur, l’apport majeur restant la démonstration suivante :

Theorem 1 (Carnot). Partout où il existe une différence de température, il peut y avoir production de puissance motrice.

Nous allons présenter l’expérience de pensée imaginée par Sadi Carnot et l’interpréter, nous privilégierons les termes qu’il utilisa dans son livre, tout en utilisant pour quelques-uns d’entre eux des synonymes contemporains, plus adaptés dans le cadre de cette présentation du théorème de Carnot.

2.3 Le théorème de Carnot

Ce que Carnot établit réellement (1824). Dans *Sur la puissance motrice du feu*, Sadi Carnot raisonne encore dans le cadre de la théorie du calorique (la chaleur y est conservée, comme une eau « tombant » d’une source chaude vers une source froide). Son résultat ne porte pas sur une formule chiffrée mais sur une borne universelle.

Théorème 1 (Carnot). *Le rendement d’une machine thermique fonctionnant réversiblement entre deux sources de chaleur ne dépend que des températures de ces sources, et nullement de la substance employée ; aucune machine ne peut dépasser ce rendement.*

Carnot n’a donc pas écrit $\eta = 1 - T_B/T_A$: cette expression explicite, et le fait que les températures doivent y être *absolues*, sont l’œuvre de la reformulation de Clausius et de Thomson (Kelvin). C’est même l’inverse qui est vrai historiquement — c’est le théorème de Carnot qui *fonde* l’échelle de température absolue. Présentons la reconstruction moderne sur un gaz parfait, en gardant cette nuance à l’esprit.

Le cycle, sur un gaz parfait. Le système est une capacité contenant n moles de gaz parfait, mise alternativement en contact avec une source chaude (température absolue T_A) et une source froide (T_B , avec $T_A > T_B$). On pose $\gamma = c_p/c_v$ et l'on compte positivement la chaleur **reçue** par le gaz et le travail **fourni** par le gaz. Le cycle réversible parcourt les états $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1$, de volumes V_1, V_2, V_3, V_4 .

1. Détente isotherme à T_A ($1 \rightarrow 2$). Le piston est en contact avec le corps A . Le travail à fournir par la substance motrice dans cette phase de détente pour déplacer le piston sera égal à $W_{1 \rightarrow 2}$. L'énergie interne d'un gaz parfait ne dépend que de la température : à T constante, $\Delta U = 0$, donc toute la chaleur reçue est convertie en travail.

$$\begin{aligned} Q_A = W_{1 \rightarrow 2} &= \int_{V_1}^{V_2} p dV = nRT_A \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} \\ &= nRT_A \ln \frac{V_2}{V_1} > 0. \end{aligned} \quad (1)$$

2. Détente adiabatique ($2 \rightarrow 3$). On supprime l'alimentation de la source de chaleur de A , le piston poursuit sa détente adiabatique où il est supposé que la température de la chambre soit redescendue à T_B . Il n'y a pas d'échange de chaleur ($Q = 0$); La loi de Laplace donne :

$$T_A V_2^{\gamma-1} = T_B V_3^{\gamma-1}. \quad (2)$$

3. Compression isotherme à T_B ($3 \rightarrow 4$). Le cylindre est alors remis en contact avec le corps B , qui est à la température T_B . Un mouvement de compression s'accomplissant pour ramener le piston. Même raisonnement qu'en (1), le gaz cède de la chaleur :

$$Q_B = W_{3 \rightarrow 4} = nRT_B \ln \frac{V_4}{V_3} < 0 \quad (\text{car } V_4 < V_3). \quad (3)$$

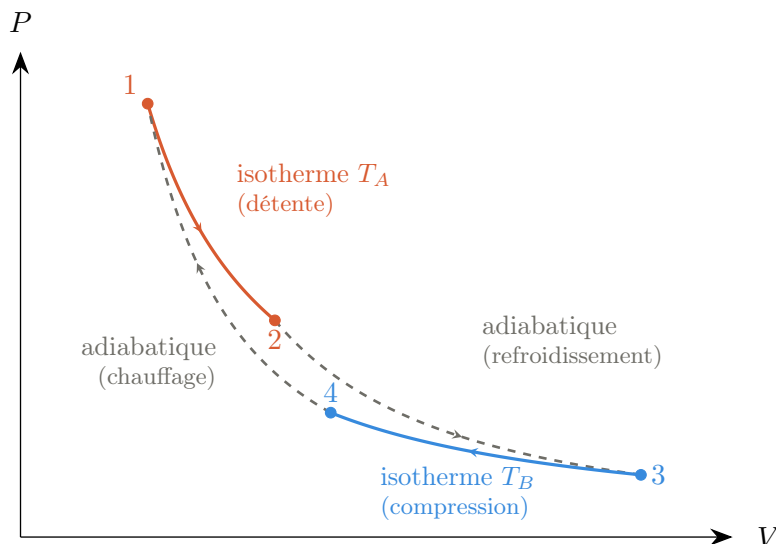
4. Compression adiabatique ($4 \rightarrow 1$). On supprime le contact entre le corps B . La compression se poursuivant jusqu'à ce que le cylindre atteigne une température T_A . On a donc un retour à T_A , $Q = 0$:

$$T_B V_4^{\gamma-1} = T_A V_1^{\gamma-1}. \quad (4)$$

L'étape décisive. En divisant membre à membre les deux relations adiabatiques (2) et (4) :

$$\frac{V_2^{\gamma-1}}{V_1^{\gamma-1}} = \frac{V_3^{\gamma-1}}{V_4^{\gamma-1}} \implies \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}. \quad (5)$$

C'est cette égalité des rapports de volumes — et non une simple coïncidence d'étiquetage — qui rend la démonstration concluante. Les travaux adiabatiques (2) et (4) sont par ailleurs opposés et se compensent sur le cycle. On en déduit le diagramme de Clapeyron.



Bilan et rendement. Le travail net fourni sur le cycle vaut, en utilisant (5) :

$$\begin{aligned} W &= Q_A + Q_B = nRT_A \ln \frac{V_2}{V_1} - nRT_B \ln \frac{V_3}{V_4} \\ &= nR(T_A - T_B) \ln \frac{V_2}{V_1}. \end{aligned} \quad (6)$$

Le rendement, rapport du travail récupéré à la chaleur prélevée à la source chaude, s'écrit alors :

$$\boxed{\eta = \frac{W}{Q_A} = \frac{nR(T_A - T_B) \ln(V_2/V_1)}{nRT_A \ln(V_2/V_1)} = 1 - \frac{T_B}{T_A}.} \quad (7)$$

Le point conceptuel central. Cette formule n'a de sens que pour des températures **absolues** (en kelvins). Elle entraîne deux conséquences : aucune machine ne peut atteindre 100 % (il faudrait $T_B = 0 \text{ K}$), et il n'y a production de puissance motrice que si $T_A \neq T_B$ — il faut une *différence* de température, comme l'avait vu Carnot. Surtout, on touche ici au basculement que notre fil conducteur peut exploiter : tant que Black raisonnait en degrés Celsius (la glace à 0°C , l'eau à 1°C), la température restait un repère conventionnel ; le théorème de Carnot impose au contraire une échelle où le zéro n'est plus arbitraire. La température cesse d'être une simple « intensité de la chaleur » pour devenir la grandeur thermodynamique fondamentale.

Remarque. Deux points de notation : la relation $pV = nRT$ est la loi des gaz parfaits, et non la loi de Boyle-Mariotte (qui en est le cas particulier $pV = \text{cste}$ à T fixée).

On a ainsi démontré le théorème de Carnot, et l'impossibilité d'avoir une création de puissance motrice si les températures des deux sources de chaleur sont égales. Clausius s'appuiera sur les écrits de Sadi Carnot pour développer le concept d'entropie.

L'équivalence de la notion de chaleur et de travail fut une idée soulevée par Von Mayer en 1841 [16]. Toutefois c'est en 1847 au terme de quatre années d'expériences, alors qu'il travaillait dans la brasserie familiale que Joule découvrit l'équivalent mécanique de la chaleur. Une avancée qui permit d'associer, de convertir les unités caloriques en unités de travail mécaniques : $1 \text{ cal} = 4.184 \text{ J}$. Malgré tout, si l'on pouvait dès lors associer la même unité aux dépenses caloriques et aux travaux mécaniques, reconnaissons que les différentes sciences ont toujours travaillé soit avec l'une soit avec l'autre, ce qui témoigne d'une relative indépendance pratique des concepts. Cette indépendance étant en partie due à sa non convertibilité avec un rendement unitaire de la chaleur en travail.

La science allait alors redécouvrir et inventer des mots, telle l'énergie, terme utilisé par Thomson en 1850 qui supplanta petit à petit la quantité de mouvement. A vrai dire l'étymologie renvoyait au mot d'origine grec *energeia*, mais ne prenait pas le sens actuel. Il fut introduit en physique par Young en 1807, dans un sens toujours décalé de son sens actuel [17], mais le concept contemporain de l'énergie se manifestait déjà dans la décomposition de l'équation de Johannes Bernoulli [17].

On reprit au même moment la terminologie aristotélicienne pour distinguer ce qui est en mouvement et ce qui est en acte, pour distinguer une énergie cinétique et une énergie potentielle, ce fut l'œuvre de Rankine en 1853. Un peu moins de quatre-vingt-dix ans après la découverte de Watt, en 1850 Clausius découvrit le concept d'entropie mais sans mentionner ce mot qu'il inventera presque quinze années plus tard, mais qui marquera l'explication de l'impossibilité de réaliser un mouvement perpétuel. La notion entropique est alors reliée à la dégradation de l'énergie entre deux états macroscopique ordonnés d'un même système. L'énergie dite non dégradée (ou de bonne qualité) étant celle susceptible de produire un travail mécanique. Cette dernière notion de travail fut éclaircie par les travaux de Lazare Carnot, Poncelet et Coriolis [16].

Au terme de cette ébauche, les principaux énoncés relatifs à l'entropie furent consignés sous forme de lois : ce qu'on appelle aujourd'hui la seconde loi fut posée par Clausius, stipulant que l'entropie croît, puis qu'elle tend vers un maximum. Curieusement il fallut attendre presque quinze années pour que s'établisse ce que nous appelons le premier principe : l'énergie totale d'un système fermé se conserve.

3 La deuxième révolution thermodynamique

Cette révolution s'amorça au début des années 1870, elle fut menée par Boltzmann qui détermina une explication statistique de l'entropie. Sans-doute allait-il bien plus loin que de clore les fondements de la thermodynamique. En fait il découvrit une nouvelle science qu'on appellera successivement mécanique statistique puis physique statistique. Bien souvent les révolutions tirées par la science peuvent se heurter non pas à la *technè* qui est en général exploitée par la classe dominante, mais par le milieu intellectuel où les dominants peuvent imposer un cadre de pensée, en référence aux cas de Galilée et Bruno en particulier. Les découvertes de Boltzmann aboutirent à une nouvelle expression de l'entropie qui pouvait désormais se quantifier par l'usage des probabilités, alors que l'entropie de Clausius était davantage une expression qualitative, quoi qu'elle aurait pu être calculée mais moins finement que celle de Boltzmann. Au-delà sa célèbre constante qui exprime une conversion de la température en énergie (J/K), ses découvertes permirent à Planck de procéder à la détermination de la courbe de densité du rayonnement du corps noir, qui marqua alors le début de la mécanique quantique, dont les successeurs étaient et demeurent pareillement aujourd'hui les héritiers de Boltzmann. D'un point de vue philosophique Boltzmann inaugura un changement de perspective entre le macro et le micro, tandis que l'homme était souvent envisagé comme un micro-acteur dans un macro-univers, il mit en lumière l'autre infini qu'avait laissé entrevoir Pascal, consentant de considérer un état macroscopique à dimension humaine comme un macro-univers constitué de micro-états atomiques.

4 Contexte scientifique de la découverte de l'entropie

Nous allons voir que les concepts qui prennent part au corpus de la thermodynamique s'étendent sur une période qu'on fera remonter jusqu'à Aristote. Elles allaient se répandre en philosophie, balbutier dans des domaines scientifiques émergeant (on pense à l'invention du thermomètre par exemple), avant une éclosion et un épanouissement synergique sur une période qui s'écoula entre le milieu de XVII^e siècle et le début du XX^e siècle. Il va de soi que cette dynamique du paradigme de la thermodynamique n'est pas encore achevée si on l'inclut dans un projet qu'on désignera par la systémique. Le sera-t-elle un jour ? Sans-doute l'achèvement d'un corpus ne se réalise que lorsqu'on démontre que celui-ci est obsolète, voire faux, comme ce fut le cas de la science newtonienne que la relativité d'Einstein vint saborder dans l'espace propre à la relativité. En définitive ce n'est pas jouer sur le sens des mots que de dire que toute pensée sera un jour achevée lorsqu'une nouvelle idée, plus puissante, viendra la surpasser.

4.1 La chaleur

Une chose est produite, puis elle peut circuler, être stockée, avant d'être consommée. Sans doute le grand oubli de la philosophie marxiste fut la circulation qui peut tant influencer l'économie ou la société. L'histoire des sciences a été marquée par les questions sur l'éther, la chaleur, les atomes . . . Si le feu fut domestiqué il y a 350 000 ans, le concept de chaleur a suscité de multiples théories, depuis la phlogistique qui supposait que les corps émettaient de la chaleur, au calorique qui présumait que la chaleur était un fluide. C'est dans le cadre du calorique que Sadi Carnot allait développer sa théorie qui reliera production, consommation de chaleur et dynamique.

L'étude de la diffusion de la chaleur fut l'œuvre de Fourier. En 1822, il modélisa le mouvement de la chaleur, en partant pour hypothèses que la chaleur se propage entre molécules voisines et que la vitesse de diffusion est proportionnelle à la différence de température, il déduit que la quantité de chaleur véhiculée par unité de surface et de temps (soit la densité surfacique du flux de chaleur) est proportionnelle au gradient de température [29].

4.2 La thermodynamique à partir de 1824 jusqu'en 1865

En 1865 les grands concepts fondateurs étaient scellés tandis que les lois de la thermodynamique attendaient une formulation, nous allons présenter les trois événements les plus importants d'un point de vue de l'histoire des sciences qu'on identifie à trois concepts découlant de la machine de Watt :

1. Concept qualitatif de la Chaleur: La **chaleur latente** de transition (résolu par Black 1762).
2. Concept de classe d'équivalence : L'**équivalent mécanique de la chaleur** (résolu par Joule 1847).
3. Concept de modulation: Il y a impossibilité d'avoir un rendement de 100% qui est du à un **effet entropique** (résolu par Sadi Carnot en parti en 1824 et Clausius en 1872).

4.3 Concepts de base de la thermodynamique [14]

La matière se caractérise par des états qu'on appelle phases, pour lesquels elle apparaît uniforme d'un point de vue physico-chimique. On peut distinguer les états solides, liquides, gazeux, où des corps peuvent avoir plusieurs phases dans un état donné. La transition de phase est le passage d'une phase à une autre sous des conditions de pression et température données. Le diagramme des phases d'un corps permettant de se représenter les différents états de la matière en fonction des paramètres : pression, volume et température, voici ci-dessous celui de l'eau.

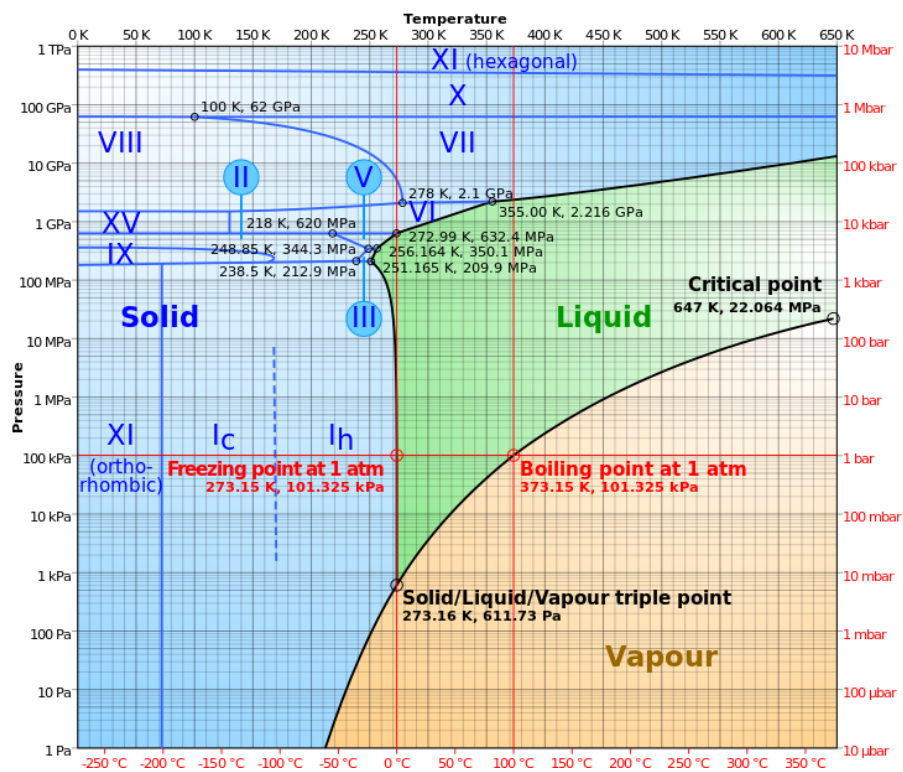


Figure 6: Diagramme des phases de l'eau.
[24, Wikipédia]

4.3.1 De la distinction entre la chaleur et la température

Dans l'esprit cartésien la chaleur restait du domaine des *qualia* ⁷, ce biais perceptif dans cette appréciation allait durer longtemps, même après l'expérience de Black. L'acceptation du nouveau paradigme de la chaleur par Black fut très long, il suffit, nous dit Prigogine, de toucher un morceau d'une table en bois et d'un morceau d'acier posé sur cette table pour penser qu'ils possèdent des températures différentes. Replaçons l'expérience dans son contexte historique, le jugement perceptif et en particulier le toucher permettait un mode en prise directe sur le monde. Au XVIII^e, certains savants pensant même que l'expérience visuelle n'avait pour but que de simuler le tactile[19]. L'invention du thermomètre allait donc permettre la quantification d'un indicateur de la chaleur d'un corps. On posait alors implicitement et sans le savoir l'axiome de l'équilibre thermique, à savoir que si deux corps sont en contact, à l'équilibre thermique ils auront emmagasiné (par échange) la même quantité de chaleur. Ainsi lorsqu'on met en contact un thermomètre et un corps dont on veut mesurer l'intensité de la chaleur, la colonne de mercure du thermomètre s'élevant jusqu'à un certain niveau permettra de quantifier la température du corps par rapport à un étalon.

4.3.2 Les concepts d'énergie

C'est en 1850 que Thomson introduisit le mot énergie, mais déjà en 1847 à l'époque de l'expérience de Joule, la communauté scientifique pensait pouvoir unifier les dimensions du travail et de la chaleur. En 1853, Rankine proposera alors de distinguer deux types d'énergie. Se référant en cela à la distinction Aristotélicienne entre l'*energeia* (l'énergie en acte) et la *dynamis* (en puissance). On peut remarquer que les mécaniciens Lagrange et Hamilton avaient aussi anticipé cette distinction qualitative, mais rapportée alors à la quantité en mouvement. Sans-doute le travail de Lagrange a pu aider les thermodynamiciens à s'inspirer de cette dichotomie. Ce sera en 1867 que Thomson et Tait poseront le principe de conservation de l'énergie dans un ouvrage qui allait devenir une référence : *Treatise on natural philosophy*. La conservation de l'énergie dans un système isolé devenait le premier principe de la thermodynamique, bien qu'il ne fut formulé définitivement qu'une quinzaine d'années après le principe de Clausius. Mentionnons, qu'on retrouve une expression de ce principe dans un mémoire de Helmholtz écrit en 1847 : Sur la conservation de la force , mais exprimée avec la notion de force.

L'énergie cinétique L'énergie cinétique est celle qui se rapporte à la grandeur en mouvement, on est dans le schéma direct où la cause finale est imposée par la cause efficiente qui procure le mouvement, elle peut se relier aisément à la notion de quantité de mouvement qui est bien connue. Le

⁷On entend ici des propriétés de la perception, via l'expérience sensible.

concept central de la physique jusqu'en 1840 étant celui de force, on utilisa longtemps la notion de force vive : *vis viva* pour la distinguer de l'autre catégorie de force.

L'énergie potentielle Rankine attribuera l'origine de cette forme d'énergie nouvelle à Lazare Carnot, qui mettra sur la scène des concepts physiques la notion de force vive virtuelle . Aussi Rankine posera la définition suivante l'énergie potentielle est la faculté que recèlent des agencements à produire un travail . On retrouve là une définition qui pointe vers l'inconnu ou tout au moins ce qui est en sommeil et non pas une définition synonyme ou un alias vers ce qui existe déjà. On peut donc dire qu'il met en lumière l'invisible présence dans un acte qui se révélera extrêmement fructueux. Helmholtz proposera en 1855 une définition plus acceptable par rapport à notre terminologie : L'énergie d'un système matériel au repos, qui peut permettre d'entrer en mouvement se nomme énergie potentielle .

4.3.3 La thermodynamique au siècle de l'énergie

Le XX^e siècle est souvent considéré comme le siècle de la maîtrise de l'énergie, que ce soit dans la production, le transport, ou la consommation. L'exploitation de l'énergie nucléaire est apparue comme une des plus grandes conquêtes de l'homme bien qu'elle fut aussi très meurtrière.

La matière aujourd'hui A l'aube du siècle dernier : Planck découvrit la courbe de densité du rayonnement d'un corps noir (1900), Einstein publia ses expériences sur les grains de lumières (1905), et Jean Perrin apporta la preuve de l'existence des molécules (1906). Tout au long du XX^e siècle on assista à une domestication progressive de l'infiniment petit. Aujourd'hui, on peut affirmer que 1 cm³ d'air est composé de 10¹⁹ molécules, on plonge dans des ordres de grandeurs où les quantités de molécules en jeu sont très grandes, la statistique est idéale pour étudier de tels systèmes, c'est une caractéristique dite minimaliste de cette classe de systèmes, qui fait qu'on appelle la théorie utilisée : physique statistique, précédemment appelée mécanique statistique. Constatons le basculement du concept d'aléa entre le XVIII^e et le XX^e, comme le fit remarquer Von Neumann : elle était passée de concept sans fondement réel à celui de seule réalité. [2]

5 Systèmes entropiques

Définition 4 (Systèmes entropiques). On appelle système entropique, un système dont le mode de fonctionnement s'appuie sur des mécanismes entropiques, ou qui relève du principe de l'entropie.

Gaz	Formule	Volume(%)	Masse(%)
Diazote	N ₂	78,08	75,53
Oxygène	O ₂	20,95	23,14
Argon	Ar	0,93	1,28
Dioxyde de Carbone	CO ₂	0,04	0,047
Gaz rares	N/A	0,01	0,01

Figure 7: La composition de l'air au niveau de la mer [15].

5.1 De l'approche contemporaine à une décomposition de l'entropie

Un système qu'on notera ST peut se définir comme un complexe d'éléments en interactions dans un milieu qu'on appellera espace. Définir le système revient avant tout à déterminer la nature du milieu, celle des éléments le constituant ou évoluant (si immersion), et des relations qui caractérisent les différentes interactions.

5.1.1 Le Milieu

Il peut-être de plusieurs natures :

1. Il y a bien entendu les milieux continus : par exemple l'espace ou bien un substrat biologique.
2. On peut aussi isoler des milieux discrets : par exemple un réseau maillé à grande densité comme peut l'être un réseau neuronal chez un individu, un réseau maillé moins complexe comme peut l'être un graphique en réseau représentant une tournée pour un voyageur de commerce, ou encore un réseau en arbre dans des modélisations plus abstraites pour la description de certains phénomènes.

Bien entendu, on peut concevoir une superposition d'espaces pour un même système, qui s'appliqueraient comme des calques s'intégrant dans une même réalité. Par exemple, l'espace du cerveau peut-être appréhendé comme la superposition de trois espaces :

1. Un espace continu formé par la matière cérébrale,
2. Un espace réticulé formé par le réseau neuronal,
3. Un espace réticulé par le réseau sanguin : artères, veines et capillaires.

On se retrouve face à des choix : on peut adopter un principe de séparabilité⁸ de ces calques. Mais il existe d'autres approches pour appréhender cet

⁸Ce dit de ce qui est séparable.

espace, dont on peut saisir l'origine chez Leibnitz et qu'on retrouve dans les structures fibrées⁹, qui nous les feraient considérer comme un tout.

5.1.2 Eléments

Les unités élémentaires retenues seront fonction du niveau de structure retenu, elles seront modélisées par des unités mathématiques : points, nœuds, arcs, arêtes, unité de traitements ...

5.1.3 Les Relations

Il va de soi que les outils relationnels pour gérer les interactions, la logistique et le traitement seront dépendants de l'espace et des éléments étudiés. Cependant on pourra conformément au premier principe de la thermodynamique considérer une fonction d'état notée E qui ne dépendra que de l'état initial et final de notre système. Et ce indépendamment du chemin suivi, mais aussi de la nature de l'espace dans lequel on travail : continu, discret, réticulé,... cette caractéristique est importante.

On retiendra comme paramètres les états du système qu'on notera ST_t pour la date t . Les états initiaux et finaux étant notés : $ST_0 = ST_i$ et $ST_n = ST_f$.

5.2 L'énergie

Dans la perspective contemporaine de l'énergie, Atkins présente la chaleur et le travail comme des méthodes ou procédures de la nature pour transférer de l'énergie [26]. Par suite, fournir un travail sera défini comme la modification de l'énergie d'un objet sans faire intervenir de variation de température . Lorsqu'on met en pratique ce que Sadi Carnot appela la puissance motrice du feu, de l'énergie a été prise à une source sous forme de chaleur puis transférée sous forme de travail [27], il subsistera une différence fondamentale entre la chaleur et le travail. Si celui-ci n'exerce aucun effet sur l'entropie, celle-là exercera une action directe. On retrouve cette idée dans la principale propriété de l'entropie formulée par Clausius :

$$dS \geq \frac{dQ}{T}.$$

On comprend aisément alors pourquoi le rendement d'une machine thermodynamique ne pourra jamais atteindre 100%. En effet, en prélevant de l'énergie par la chaleur a un système ST_{source} pour appliquer un travail issue de cette quantité d'énergie mise à disposition, en supposant que le rendement soit de

⁹On entend ici par espace fibré un produit cartésien local ou global suivant le cas d'un espace topologique donné. Par exemple le cylindre est le produit cartésien d'un cercle et d'un segment.

100% alors l'entropie de *source* décroîtrait, suivant le quotient de la quantité de chaleur fournie sur la température de la source, et l'entropie globale du monde décroîtrait, ce qui serait contraire au second principe de la thermodynamique. Ainsi la déperdition d'une partie de la l'énergie transférée par la chaleur se fera en direction d'une source froide appelée $ST_{destination}$ où elle permettra la création d'une entropie : $\frac{\Delta Q_{des}}{T_{des}} > \frac{\Delta Q_{sou}}{T_{sou}}$.

Références

- [1] Baillet A. “Vie de Monsieur Descartes”. In : 1°. Texte original de 1691. La table ronde, 1946, p. 33-38. ISBN : 2-7103-0534-8.
- [2] Barberousse A. “La mécanique statistique : de Clausius à Gibbs”. In : 1°. Belin, 2002, p. 33-38. ISBN : 9-782701-130736-01.
- [3] ARISTOTE. “La Métaphysique”. In : 1°. T. 1. $\Delta - 1$. Vrin, 1986, p. 245. ISBN : 2-7116-0013-0.
- [4] ARISTOTE. “La Métaphysique”. In : 1°. T. 1. $\Delta - 8$. Vrin, 1986, p. 273. ISBN : 2-7116-0013-0.
- [5] ARISTOTE. “La Métaphysique”. In : 1°. T. 1. Z-1. Vrin, 1986, p. 346. ISBN : 2-7116-0013-0.
- [6] ARISTOTE. “La Métaphysique”. In : 1°. T. 1. $\Delta - 2$. Vrin, 1986, p. 248. ISBN : 2-7116-0013-0.
- [7] ARISTOTE. “La Métaphysique”. In : 1°. T. 1. Z-1. Vrin, 1986, p. 347. ISBN : 2-7116-0013-0.
- [8] ARISTOTE. *La Métaphysique*. 1°. T. 1. traduction J.Tricot. Vrin, 1986. ISBN : 2-7116-0013-0.
- [9] ARISTOTE. “La Métaphysique”. In : 1°. T. 1. $\Delta - 25$. Vrin, 1986, p. 311-312. ISBN : 2-7116-0013-0.
- [10] ARISTOTE. “La Métaphysique”. In : 1°. T. 1. $\Delta - 9$. Vrin, 1986, p. 276. ISBN : 2-7116-0013-0.
- [11] ARISTOTE. “La Métaphysique”. In : 1°. T. 2. $\Theta - 3$. Vrin, 1986, p. 488. ISBN : 2-7116-0013-0.
- [12] ARISTOTE. “La Métaphysique”. In : 1°. T. 2. $\Theta - 3$. Vrin, 1986, p. 492. ISBN : 2-7116-0013-0.
- [13] ARISTOTE. “Organon”. In : 1°. Vrin, 1997. Chap. Catégories, p. 5. ISBN : 9-782711-600168.
- [14] De Paula ATKINS. *Chimie Physique*. 3°. De Boeck, 2008. ISBN : 978-2-8041-5306-9.
- [15] De Paula ATKINS. “Chimie Physique”. In : De Boeck, 2008, p. 11. ISBN : 978-2-8041-5306-9.

- [16] Cercignani C. “Ludwig Boltzmann - The man who trusted atoms”. In : 1°. Oxford, 1998, p. 60. ISBN : 978-0-19-850154-1.
- [17] Cercignani C. “Ludwig Boltzmann - The man who trusted atoms”. In : 1°. Oxford, 1998, p. 59. ISBN : 978-0-19-850154-1.
- [18] A. CARNEGIE. *James Watt*. <http://www.gutenberg.org/ebooks/26131>. eBook. [accessed 03-October-2013].
- [19] J.-P. CHANGEUX. *La lumière au siècle des lumières et aujourd’hui*. 1°. Odile Jacob, 2005. ISBN : 2-7281-1644-2.
- [20] COLLECTIF. “Les pères fondateurs de la science : Carnot”. In : *Science et vie* 20 (Avril 1994), p. 13. ISSN : 1157-4887.
- [21] COLLECTIF. “Les pères fondateurs de la science : Carnot”. In : *Science et vie* 20 (Avril 1994), p. 14. ISSN : 1157-4887.
- [22] COLLECTIF. “Les pères fondateurs de la science : Carnot”. In : *Science et vie* 20 (Avril 1994), p. 15. ISSN : 1157-4887.
- [23] J. JOULE. *Plateau expérimental*. http://fr.wikipedia.org/wiki/James_Joule. Expérience. 1845.
- [24] N/A. *Diagramme des phases de l’eau*. http://en.wikipedia.org/wiki/Phase_diagram. Diagramme.
- [25] J. NEWCOMEN. *Machine à balancier*. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Newcomen>. Machine. 1712.
- [26] Atkins P.W. *Les 4 grands principes qui régissent l’univers*. 1°. De Boeck, 2010. ISBN : 978-2-8041-6100-2.
- [27] Carnot S. *Sur la puissance motrice des machines à feu*. 1°. Réédition de 1978. Vrin, 1824. ISBN : 9-782701-130736-01.
- [28] Strandh S. *Les machines*. 1°. T. 1. A.B. Nordbok, 1997. ISBN : 2-7000-2015-4.
- [29] Boudenot J.-C. SAMUELI J.-J. *Trente livres de Physique qui ont changé le monde*. Ellipses, 2007. ISBN : 978-2-7298-3376-3.
- [30] W. TURNER. *Pluie, Vapeur, Vitesse*. https://fr.wikipedia.org/wiki/Pluie,_Vapeur_et_Vitesse. Tableau. 1844.
- [31] J. WATT. *Machine de Watt et Boulton*. https://en.wikipedia.org/wiki/James_Watt. Diagramme.