

## La notion d'entropie

*Marc Halévy*  
*Septembre 2010*

L'idée d'entropie est issue de la thermodynamique naissante du 19<sup>ème</sup> siècle. Elle a été pressentie par Carnot et définie par Clausius un peu plus tard, avant que Boltzmann n'en donne une formulation théorique proprement géniale.

L'histoire commence avec la naissance de la thermodynamique qui n'était encore que les techniques de maîtrise de la puissance du feu et de la chaleur. Face à la toute-puissante et superbe mécanique qui était le cœur de la science physique, l'étude de la chaleur et de ses applications (essentiellement en termes de force motrice) faisait pâle figure.

Et un phénomène d'une extrême banalité ne lassait pas de questionner la curiosité de ces chercheurs : pourquoi et comment la chaleur s'obstinaient-elle à équilibrer la température globale d'un système constitué d'un réservoir chaud, d'un réservoir froid et d'une jonction conductrice entre eux ? En mécanique, l'énergie cinétique se transmet par mouvements et chocs. Mais ici : point de mouvement, point de choc.

D'abord on voulut "mécaniser" les transports de chaleur au moyen d'un hypothétique phlogistique - rebaptisé par la suite en "calorique" - qui aurait dû être ce "fluide" mystérieux qui "coulait" du chaud vers le froid comme la pomme d'Isaac Newton tombait du haut vers le bas. Echec !

Le problème central était celui-ci : la mécanique, reine des sciences physiques, l'avait clairement entendu dans son principe axial d'inertie : en l'absence d'influences extérieures, il ne se passe rien ! Or, ici, la chaleur passe du chaud au froid sans que rien ni personne n'intervienne de l'extérieur pour enclencher ce transfert. Mystère ! Puisqu'il n'y a pas de force extérieure pour "pousser" ce transfert, il doit bien y avoir quelque chose de caché qui l'induit.

Ce "quelque chose", ce sera le second principe de la thermodynamique établi par Nicolas Léonard Sadi Carnot en France, vers 1820 (publication en 1824 de *"Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance"* qui fonde la thermodynamique) et formalisé, un peu plus tard, par l'allemand Rudolf Clausius, en 1850 (c'est lui qui inventa le mot "entropie").

Que dit ce second principe de la thermodynamique encore appelé, maintenant, principe ou loi de Carnot-Clausius ? Tout simplement qu'un système fermé (c'est-à-dire un système n'ayant aucun échange de matière ou d'énergie calorifique avec le monde extérieur, un système isolé, en somme) tend de lui-même, sans intervention externe, spontanément, à l'entropie maximale. Qu'est-ce à dire ?

L'entropie est un concept curieux qui donna - et donne encore - des cheveux blancs aux partisans du mécanisme. L'entropie est la mesure de l'homogénéité d'un système : plus l'entropie est grande, plus le système est uniforme, homogène, isotrope. Cela signifie que toutes les structures, organisations, architectures, des plus simples aux plus complexes, tendent naturellement, dans un système fermé, à se déliter, à se décomposer et à disparaître. C'est pourquoi - comme tout vivant - nous mourrons ! C'est pourquoi les montagnes finissent par s'user et les étoiles par s'éteindre. C'est pourquoi, l'univers dans son ensemble est censé finir un jour comme une mer plate, uniforme, à une température uniformisée de 3° Kelvin (soit -270° Celsius) ...

Revenons à notre mystère calorifique. Pourquoi la chaleur tend-elle à passer spontanément de la source chaude vers la source froide ? Réponse : pour dissiper l'inhomogénéité, pour amener le tout à température uniforme. Et elle y réussira s'il n'y a pas de plaisantin pour apporter de la chaleur à la source chaude afin d'en maintenir, artificiellement, la température élevée. Prenons un récipient séparé en deux par une cloison et emplissons une moitié d'eau froide et l'autre moitié soit d'eau chaude, soit d'encre. Ôtons la cloison. Après quelque temps, la température ou la couleur seront parfaitement homogènes et uniformes dans tout le volume du récipient. La loi entropique aura fait son œuvre.

A l'origine, le concept et la loi de l'entropie apparurent comme singulièrement artificiels, comme le lapin sorti du chapeau par le prestidigitateur. Bien sûr, techniquement, applicativement, l'entropie rendait de bien grands services, surtout dans l'étude et la mise au point des moteurs naissants, à vapeur, à explosion, etc ... L'entropie n'était qu'un concept d'ingénieur, sans grand fondement physique. Une astuce ingénieuse, en somme. Mais l'ironie ou le dédain ne sont jamais une bonne réponse. Il y avait là quelque chose que les physiciens - les "vrais" - ne pouvaient faire semblant d'ignorer. Chemin faisant, comme le premier principe de la thermodynamique avait consacré la conservation de l'énergie et que l'énergie, c'est le domaine de la mécanique, reine des sciences, on chercha à mécaniser la thermodynamique, encore une fois, mais avec plus de succès grâce au recours aux approches statistiques. Car qu'est-ce qu'un système mésoscopique ("mésoscopique" signifie "à l'échelle médiane de l'humain", entre microscopique quantique et macroscopique cosmologique), sinon un nombre immense de molécules en relations réciproques (douze grammes de carbone ou deux grammes d'hydrogène ou dix-huit grammes d'eau contiennent, chaque fois,  $6.10^{23}$  molécules - c'est le nombre d'Avogadro).

La physique statistique eut tôt fait de montrer que la température d'un corps n'était que la moyenne des énergies cinétiques de ses molécules, ou que la pression d'une fluide sur une paroi n'était que la moyenne de l'impulsion des molécules de fluide à l'impact sur la paroi (une molécule arrivant perpendiculairement à la paroi et rebondissant sur elle, inverse son impulsion en transmettant son double à la paroi, d'où pression.

Oui, mais l'entropie dans tout cela ? Elle résistait. Elle ne se réduisait pas à une quelconque statistique sur des propriétés mécaniques des molécules, quoi que l'on fasse.

Ce fut l'autrichien Ludwig Boltzmann (1844-1906) qui trouva, en 1873, génialement ... mais au prix d'une réelle révolution conceptuelle.

Boltzmann est en quelque sorte l'inventeur de la physique statistique à laquelle contribuèrent, dans ses traces, des Planck, Einstein, Bose, etc ... et il parvient à donner une définition incroyable de l'entropie dans cette célèbre petite équation qu'il a fait, d'ailleurs, graver sur sa pierre tombale :  $S = k \cdot \ln W$ . Qu'est-ce à dire ?

S, c'est l'entropie ; k est une constante appelée, à bien juste mérite, "constante de Boltzmann" ; l'opérateur "ln" est le logarithme népérien classique. Reste la fonction W. C'est en elle que résident le génie et la révolution. W est, en termes techniques, la fonction de distribution ; en clair, c'est le nombre - immense, d'où l'usage d'un logarithme pour le mieux maîtriser - de configurations microscopiques possibles qui donneraient au système les mêmes propriétés macroscopiques. Pour dire les choses clairement, au moyen d'une métaphore : par combien de combinaisons arithmétiques différentes (configurations) des neuf premiers nombres (de 1 à 9) puis-je obtenir 45 comme résultat. Par exemple :  $1+2+3+4+5+6+7+8+9$  est une de ces combinaisons possibles, comme  $4+5+6+7+8+9+(1 \times 2 \times 3)$  ou comme  $9+8+7+6+5+4+3+2+1$ , etc ... Le terme W, dans l'équation de Boltzmann, permet de calculer le nombre de ces combinaisons qui donnent 45 pour résultat.

Cette fonction  $W$  est formalisable mais, l'histoire de la physique statistique le montra, elle prend des formes différentes selon que l'on regarde un système de molécules (forme de Maxwell-Boltzmann), de fermions (forme de Fermi-Dirac) ou de bosons (forme de Bose-Einstein). Soit. Mais qu'y a-t-il là dedans de si génial et de si révolutionnaire ?

Simplement ceci : pour la première fois en physique, une propriété fondamentale d'un système n'était pas réductible aux propriétés de ses composants.  $W$  n'est pas une moyenne ou un écart-type ou un quoique ce soit d'autre, statistiquement extrait des caractéristiques des molécules.  $W$  est une fonction globale, indépendante des propriétés des particules constituantes.  $W$  et l'entropie signent la fin du réductionnisme en physique, donc du strict mécanisme ! Il existe donc de l'irréductible, du non analytique, du non additif.

Et comme si cela ne suffisait pas, on montrera une propriété époustouflante de l'entropie : l'irréversibilité. D'après le second principe de la thermodynamique, toujours l'entropie augmente naturellement, spontanément ; elle ne diminue jamais. Le temps est donc orienté (ce qui contredit la symétrie temporelle portée par toutes les équations de la physique mécanique tant classique que quantique ou relativiste). Prigogine parlait de la flèche du temps. Le temps passe, mais il ne repasse jamais. Le temps s'accumule et ne s'efface jamais. Voilà le fond du fond de la loi de l'entropie.

L'entropie n'est donc pas une grandeur réductible et réversible. Elle est une grandeur globale, intégrale (voir l'annexe théorique pour plus de détails et la mise en application de cette notion de "grandeur intégrale"). C'est d'elle que vient la flèche du temps.

Plus précisément, l'existence du second principe de la thermodynamique est une bonne preuve que le temps s'accumule. S'il ne faisait que passer, rien n'interdirait qu'il repassât en sens inverse : ce ne serait jamais qu'un point curseur qui circule sur une axe. Pour que l'irréversibilité soit totale et irrécusable, il suffit que le temps soit le reflet d'une accumulation, par essence irréfragable. Si le temps ne peut que s'accumuler, toutes ses variations, dans un sens ou l'autre, ne feraient que s'empiler sur les variations passées. CQFD.

Par pure logique, tout processus cumulatif est *forcément* irréversible ! Et puisque *tout* est irréversible, *tout* est cumulatif. Et réciproquement. Re-CQFD.

Et puisque tout est cumulatif, tout objet doit être considéré comme l'intégrale de tous ses états antérieurs ce qui signifie que l'objet n'a que peu d'intérêt face au processus cumulatif dont il n'est que l'apparence instantanée, *hic et nunc*.

On comprend, j'espère, toute l'importance de l'œuvre de Boltzmann, premier pionnier, sans doute, des sciences de la complexité.

Mais, depuis, l'horizon s'est assombri. Après cette première victoire, des questions surgirent : si le triomphe entropique est inéluctable, si tout est condamné à se fondre dans le marais final, si le second principe s'oppose à toute forme d'organisation, alors comment la Vie ou la Pensée ou la Conscience pourraient-elles exister sans l'existence d'un autre principe, non physique, spirituel, comme une âme immatérielle dispensée d'obéir aux lois de la physique ?

Comment des organisations sophistiquées pourraient-elles émerger si tout s'oppose, au niveau le plus fondamental, à quelque organisation que ce soit ?

Cette question est le vrai point de départ crucial des sciences de la complexité. Complexité et entropie sont antagoniques. Pour aller à la caricature : ou bien nous n'existons pas, ou bien le second principe de la thermodynamique est faux !

Pas si vite, papillon ! Le second principe parle toujours d'un système *fermé*. Or, au sein de notre univers, il n'existe aucun système véritablement fermé. Même notre bonne vieille Terre, quoique tournoyant dans le vide, reçoit, à chaque instant, une grosse quantité d'énergie venant, surtout, du soleil.

En fait, le second principe dit plus précisément ceci : pour empêcher que l'entropie n'augmente au sein d'un système quelconque, il faut lui apporter, continuellement, de l'énergie. Sans énergie solaire, point de vie sur Terre. Sans énergie géothermique, point de cristaux rocheux.

Ouf ! Pour peu qu'il y ait apport régulier d'énergie - sous la forme adéquate et avec les autres ressources nécessaires à leur survie -, des organisations, même sophistiquées, sont possibles. Ilya Prigogine, au début des années 1970, a même pu démontrer que des processus d'auto-organisation spontanée étaient observables et modélisables dans le cadre du strict respect des règles de la thermodynamique, mais à la condition de se trouver loin de l'équilibre. C'est l'origine des fameuses structures dissipatives : loin de l'équilibre thermodynamique, un système, pour dissiper les importants gradients qui "l'agressent", engendre parfois des structures organisationnelles globales tout simplement parce que leur rendement de dissipation est bien meilleur que le rendement dissipatif des comportements désordonnés de ses constituants laissés indépendants les uns des autres.

L'illustration classique est celle des cellules de Bénard : plaçons une nappe d'eau sur le feu, dans une cuisine - ou un laboratoire - à température ambiante. Cette eau a un problème : elle doit dissiper, mieux et le plus vite possible le gradient thermique entre le chaud dessous elle et le froid dessus elle. Plus le feu chauffe fort, plus son problème s'aggrave.

Les molécules d'eau en contact avec le bas chaud, vont gagner de l'énergie et perdront de la densité : elles remonteront à la surface. Là, au contact de l'air froid, elles céderont leur énergie excédentaire et refroidiront et gagneront de la densité ... pour redescendre ... et ainsi de suite. C'est le phénomène bien connu de convection. Chaque molécule travaille pour elle seule, indépendante, de façon non coordonnée avec ses consœurs. Mais vient un moment, peu avant l'ébullition, où ces va-et-vient désordonnés ne suffisent plus. Alors, comme par miracle, les molécules vont coordonner leurs mouvements pour former des cellules convectives collectives (des structures dissipatives, donc) dont le rendement dissipatif est bien meilleur (ces cellules sont parfaitement observables et leur meilleur rendement de dissipation est parfaitement calculable). L'émergence de la néguentropie (de l'organisation, donc) est compatible avec les lois de la thermodynamique. Ouf ! CQFD ? Pas tout à fait ...

Il faut encore faire un pas de plus. L'auto-organisation mécanique existe comme le prouvent les cellules de Bénard ou le brusselator (une autre structure dissipative de Prigogine qui est un exemple de réaction chimique autocatalytique et oscillante comme celle de Belousov-Zhabotinsky). Mais toutes les structures auto-organisées ne rentrent pas dans ce moule-là. Les systèmes autopoïétiques complexes ne se réduisent pas à de simples structures dissipatives. En l'élargissant, Prigogine avait réussi à sauver le second principe de la thermodynamique : l'augmentation globale de l'entropie demeure, mais, localement, dans certains cas très particuliers, moyennant un bain énergétique soutenu, loin de l'équilibre, des structures dissipatives auto-organisées peuvent apparaître. Soit. Mais où que l'on regarde dans l'univers, partout, à tous les niveaux, on ne voit *que* des systèmes auto-organisés. Ils ne constituent nullement des exceptions locales et rares ; ils sont la *règle* partout où ce n'est pas le vide intersidéral qui règne ! Il ne s'agit donc pas seulement de phénomènes de foire. Il s'agit de toute la réalité active.

Il faut donc revenir au second principe de la thermodynamique et voir s'il est possible de le généraliser de façon telle que l'autopoïèse (la production spontanée et naturelle de néguentropie) soit fondamentalement un processus fondateur et pas seulement une curiosité. Il nous faut encore recourir à une petite métaphore pour comprendre cette généralisation du principe entropique (à ne pas confondre, surtout, malgré l'homophonie, avec le principe anthropique que nous avons discuté plus haut). Imaginons une surface plane - disons le

plancher d'un garage - sur laquelle un facétieux a fait jeter quelques tonnes de gravats. Ces gravats jonchent le sol du garage, en parfait désordre. Un chaos ! Impossible de rentrer la voiture dans le garage ce qui, étant donné le vandalisme ambiant, est pourtant une nécessité patrimoniale évidente. Pour corser l'histoire, il est absolument impossible de sortir quelque gravats que ce soit de notre garage car toute évacuation des déchets est, pour le moment, interdite. Il faudra faire avec. Comment ?

Reposons le problème dans des termes proches de la thermodynamique. Le chaos désordonné des gravats empêche mon espace-temps (le garage) d'être suffisamment euclidien (vide et plat) pour y déployer un processus donné (mettre la voiture à l'abri durant la nuit). Il n'y a que deux manières de faire.

Primo, je concasse les gravats et en uniformise la dispersion sur le sol de mon garage. Ainsi, j'obtiens une surface plane disponible pour y mettre la voiture - moyennant une rampe d'accès, j'en conviens, mais basta ! Cette solution est la solution la plus banale, la plus élémentaire (c'est d'ailleurs la première qui vous est venue à l'esprit, n'est-ce pas cher lecteur ?). C'est la solution entropique : l'homogénéisation (concassage) et l'uniformisation (la dispersion égale). Mais, secundo, il y a une autre tactique possible, plus sophistiquée, mais bien plus élégante et aussi efficace : il suffit, dans un petit coin du garage d'organiser les gravats en les empilant les uns sur les autres, après les avoir badigeonnés de ciment à prise rapide (une métaphore pour dire : apport d'énergie). Mieux je les organiserai, comme des pièces d'un puzzle, moins de place au sol ils consommeront. Une fois ma colonne cimentée de gravats finie, la presque totalité du sol de mon garage sera libre et je pourrai rentrer mon véhicule sans souci. En plus, esthète comme je me sais, j'aurai artistement disposé ma colonne de coin pour en faire une jolie œuvre d'art ...

Cette seconde solution au problème est typiquement néguentropique. J'ai produit une organisation, une architecture, un ordre qui n'est pourtant pas l'ordre uniforme de l'entropie. Bien sûr, j'ai dû consommer du ciment et je devrai régulièrement en consommer à nouveau pour réfectionner mon "œuvre" qui subira les outrages du temps (une autre application du principe entropique). Mais qu'importe, j'ai inventé une solution alternative à mon problème ...

Conclusion ? Face à un problème d'optimisation de l'occupation de l'espace-temps - donc de l'énergie (cfr. plus haut) -, deux solutions opposées s'ouvrent : soit l'uniformisation entropique, soit la création néguentropique. Pour le dire plus mathématiquement, le problème n'est pas la maximisation de l'entropie, mais son extrémisation (donc soit sa maximisation, soit sa minimisation). CQFD. Le second principe de la thermodynamique est généralisé et l'autopoïèse devient l'alternative naturelle à l'uniformisation entropique.

\*

\*\*