



# L'entropie

### NAISSANCE DE LA THERMODYNAMIQUE

La thermodynamique voit le jour au début du <sup>19</sup>e siècle. Son objectif : étudier le fonctionnement des machines thermiques afin d'optimiser leur rendement. En 1824, Nicolas Léonard Sadi Carnot, physicien et ingénieur français, publie *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, ouvrage fondateur de cette toute nouvelle science. Une toute nouvelle science qui va bientôt s'attacher à décrire les transformations et à distinguer celles qui sont réalisables de celles qui ne le sont pas.

### UNE OBSERVATION SIMPLE...

Reprenant les travaux de Sadi Carnot, **Rudolf Julius Emmanuel Clausius**, physicien allemand, remarque qu'une machine ne peut pas, sans intervention extérieure, transférer de la chaleur d'un corps à un autre si ce dernier se trouve à une température supérieure au premier. En d'autres mots, la chaleur ne passe jamais d'elle-même d'un corps froid à un corps chaud. Une observation simple connue aujourd'hui sous le nom de second principe de la thermodynamique. Ce principe introduit l'idée de transformation irréversible. Ainsi, l'expérience nous apprend que la transformation « une tasse tombe et se brise » est possible alors que la transformation « une tasse brisée se recolle spontanément » ne l'est pas. Il s'agit là d'une transformation irréversible. Et, pour caractériser l'irréversibilité des transformations, Clausius propose la création d'un concept nouveau. En 1865, il le baptise entropie sur la base d'une racine grecque signifiant justement transformation. Il est dès lors entendu que lorsque l'entropie de l'état final d'un système est supérieure à l'entropie de son état initial, la transformation qui aura mené de l'un à l'autre sera des plus probables.

### ... POUR UN CONCEPT COMPLEXE

À la fin du <sup>19</sup>e siècle, Ludwig Eduard Boltzmann, physicien autrichien, se

penche à son tour sur la question de l'entropie. Ces travaux seront eux aussi à l'origine d'une science nouvelle que l'on appelle aujourd'hui physique statistique. Son idée : quitter un instant l'échelle macroscopique, pour étudier la constitution des objets à l'échelle microscopique. À cette échelle, la nature est composée d'atomes et les lois de la physique se révèlent relativement simples. Les particules étudiées sont chargées. Elles interagissent par l'intermédiaire de forces électriques et respectent les règles basiques de la mécanique quantique. Par contre, le nombre d'atomes mis en jeu est considérable. Il est donc impossible de saisir les caractéristiques de chacun d'entre eux. **Boltzmann**



opte alors pour une étude statistique et travaille sur des valeurs moyennes. Car, si à l'échelle macroscopique, le gaz contenu dans une boîte est entièrement caractérisé par seulement trois variables : la température, le volume et la densité. Il existe un grand nombre de configurations microscopiques susceptibles de mener à un état macroscopique donné. En 1877, Boltzmann montre que ce nombre de configurations microscopiques est relié à l'entropie de Clausius par l'intermédiaire d'une constante, connue aujourd'hui de tous les physiciens sous le nom de constante de Boltzmann. Selon la formule de Boltzmann, l'entropie augmente avec le nombre de configurations microscopiques.

### LE DÉMON DE MAXWELL

En 1867, **James Clerk Maxwell**, physicien écossais reconnu pour ses travaux sur l'électromagnétisme, conçoit une expérience dite du « démon de Maxwell ». Imaginons que dans un récipient divisé en deux parties égales, nommées A et B, l'on introduise quelques molécules de gaz. Un petit trou dans le cloison séparant les deux parties leur permet de passer librement de A en B et vice versa. Si on laisse faire la nature, les quantités

de gaz présentes dans chacune des deux parties restent globalement identiques. C'est à ce moment qu'intervient le démon de Maxwell qui possède la faculté d'autoriser le passage des molécules de B vers A tout en leur interdisant de passer de A vers B. Après quelques instants, tout le gaz occupe donc la partie A. Or, l'entropie augmente avec le nombre de configurations. Et, il y a bien moins de configurations possibles lorsque toutes les molécules se trouvent dans la partie A que lorsqu'elles se partagent entre les parties A et B. Au cours de cette expérience l'entropie a donc diminué. Le second principe de la thermodynamique est violé. Un paradoxe qui n'a été résolu que très récemment par le physicien franco-américain Léon Brillouin. Un paradoxe qui en fait n'apparaît que si le démon sait à quel moment il doit laisser passer les molécules et à quel moment il ne doit pas les laisser passer. Et pour savoir, le démon doit obligatoirement observer les molécules et utiliser les informations qu'il retire de cette observation pour prendre sa décision. Décision qui mènera à la baisse de l'entropie. Or, toute observation crée de l'entropie. En effet, le principe de tout appareil de mesure est d'attendre, dans un état instable qu'un événement précis se produise qui lui permette de basculer vers son état de stabilité. Pour ramener l'appareil dans son état instable et le préparer à une nouvelle mesure, il faut nécessairement qu'augmente l'entropie. Le mérite de Léon Brillouin aura été de montrer que pour que le démon acquière une quantité d'information suffisante pour faire diminuer l'entropie de ses molécules de gaz, il aura fallu parallèlement que l'entropie du

système « boîte plus démon » augmente plus encore.

### EN MARGE DES CONSIDÉRATIONS PHYSIQUES

La théorie de la communication voit le jour en 1948 alors que Claude Elwood Shannon, un ingénieur électricien américain cherche, pour le compte des Laboratoires Bell, à améliorer les performances des lignes téléphoniques. Dans l'espoir de parvenir à chiffrer la quantité d'information échangée au cours d'une conversation, il se lance dans l'analyse détaillée de l'entité « système de communication ». Un tel système comporte un émetteur et un récepteur reliés par un canal de transmission. À la sortie de l'émetteur, le message est codé. Il voyage ensuite dans le canal de transmission avant d'être décodé par le récepteur. La qualité de la transmission dépend alors du débit du canal et de la perte de signal inévitablement enregistrée au cours de la transmission. En s'intéressant de plus près au message en lui-même, Shannon note que chaque message porte une certaine quantité d'information liée à la probabilité d'occurrence de ce message. Ainsi, si on tire au hasard une boule d'une urne contenant dix boules toutes de couleurs différentes, l'incertitude sur le résultat du tirage est maximale. Si l'urne contient maintenant neuf boules rouges et une bleue, la chance de tirer une boule rouge devient subitement largement plus grande. Révéler le résultat du tirage donne donc une quantité d'information plus importante dans le premier cas que dans le second. Shannon pose alors que la quantité d'information qui arrive au

récepteur est une fonction de la probabilité d'occurrence du message. Et qui plus est une fonction décroissante. Si un message a une probabilité forte d'arriver, on s'attend à ce qu'il arrive presque certainement et la quantité d'information que l'on reçoit finalement est donc très faible. La quantité d'information doit également être additive. Les quantités d'information de chaque message s'ajoutent. À la quantité d'information, Shannon associe une autre grandeur qui caractérise l'incertitude, le manque d'information. Sur les conseils d'un ami mathématicien, il baptise cette grandeur entropie, « premièrement parce qu'elle ressemble beaucoup à quelque chose qui existe déjà en thermodynamique, et deuxièmement parce que comme personne ne comprend vraiment le concept d'entropie, personne ne pourra lui reprocher ce choix. » Shannon énonce alors le théorème suivant : pour chaque ligne de communication, il existe un codage optimal qui permet d'aboutir à la meilleure des transmissions. Ainsi le codage utilisé pour le téléphone n'est pas le même que celui utilisé pour graver un CD ni que celui utilisé pour la transmission de photos. Les êtres vivants utilisent quant à eux leur propre codage, le codage génétique.

### UN CONCEPT INTERDISCIPLINAIRE

Au cours du <sup>20</sup>e siècle, le concept

### Histoire d'un concept

**1865**  
Année de l'apparition du mot « entropie ».

**1867**  
Charles Maxwell conçoit l'expérience dite du « démon de Maxwell ».

**1948**  
Naissance de la théorie de la communication.

**5**  
Nombre de bits nécessaires au codage des 26 lettres de l'alphabet.

**Zéro absolu**  
À cette température, l'entropie d'un corps est nulle car il est parfaitement ordonné.

**1877**  
Boltzmann définit la constante qui porte son nom.

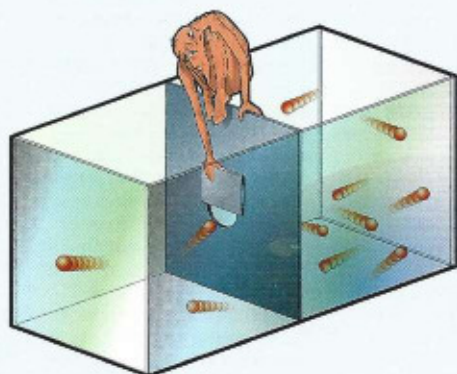
**1,38066.10<sup>23</sup>**  
C'est en joule par kelvin la valeur de la constante de Boltzmann.

### L'entropie



**1865**  
par le physicien allemand Clausius

### Le démon de Maxwell



entropie maximale



entropie minimale



d'entropie se généralise et de nombreux scientifiques s'appliquent à en donner une définition. Physiciens, informaticiens, mathématiciens et même économistes. Des définitions toutes plus abstraites les unes que les autres mais qui semblent se rejoindre sur un point capital. L'entropie serait en fait directement proportionnelle au manque d'information.

Du point de vue des physiciens, l'entropie est une grandeur des plus abstraites. Définie par Clausius comme la quantité de chaleur échangée par un système à une température donnée, elle ne dépend que de l'état initial du système considéré et de son état final et nullement du chemin parcouru pour aller de l'un à l'autre. C'est pourquoi les physiciens qualifient l'entropie de « fonction d'état ». D'autre part, des expériences leur ont permis de démontrer que l'entropie d'un système constitué de plusieurs parties est égale à l'entropie de chacune de ces parties prises séparément. L'entropie est une grandeur dite « extensive ». Mais, la thermodynamique statistique de Boltzmann apporte une vision plus concrète de la question. Selon elle, l'entropie mesure le degré de désordre d'un système au niveau microscopique. Plus les éléments d'un système sont désordonnés, plus l'entropie de ce système est élevée et plus la part d'énergie inutilisée est grande.

### ENTROPIE ET ÉNERGIE

Clausius l'affirmait : « 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. » Pourtant, entropie et énergie sont bien deux concepts profondément différents. Le premier principe de la thermodynamique le confirme. Alors que l'entropie peut varier, dans un sens ou dans un autre, l'énergie d'un système isolé est rigoureusement constante. Elle se transforme mais ne peut être ni créée ni détruite. Et puis, c'est l'énergie « perdue » par un système au cours d'une transformation irréversible sous forme de chaleur, qui contribue à l'augmentation du désordre global et donc à l'augmentation de l'entropie.

### LA FLÈCHE DU TEMPS

Il est aujourd'hui communément admis que l'évolution naturelle d'un système est celle qui mènera ce système à un état de désordre de plus en plus grand. Ainsi, l'entropie est-elle en constante augmentation et détermine-t-elle ce que les physiciens appellent « la flèche du temps ». Elle nous indique quels sont les événements possibles et quels sont ceux qui ne le sont pas. Du moins pas sans un certain effort. Si on laisse un jardin évoluer naturellement, les mauvaises herbes et le désordre s'installeront très vite. Mais, le jardinier a le pouvoir de venir contrer cette évolution naturelle. Ainsi, si la croissance de l'entropie est inexorable pour un système isolé, abandonné à lui-même, rien n'empêche l'ordre de

s'installer grâce à une intervention extérieure. Et nous en sommes peut-être la plus belle preuve puisque la vie représente la plus importante accumulation d'information et donc d'ordre que l'on puisse imaginer. Pourtant, pour compenser l'émergence d'un ordre local, un désordre encore plus grand doit nécessairement se créer ailleurs. Les étoiles par exemple, en rejetant leur lumière chaude dans un Univers plus froid accentuent le désordre total de l'Univers. Ainsi la vie sur Terre a pu naître grâce au désordre généré par le Soleil. Il compense largement l'ordre résultant de l'apparition de la vie sur Terre. Les lois de l'Univers autorisent donc l'existence d'entités comme les particules élémentaires, les étoiles, les galaxies ou encore les êtres vivants. Ces entités, en tant que systèmes dits ouverts, échappent au désordre intérieur car ils ont en permanence la possibilité d'exporter du désordre dans leur environnement.

### UN BRIN DE SUBJECTIVITÉ

Ce qui fait aussi le caractère mystérieux de cette grandeur baptisée entropie, c'est peut-être le fait qu'elle ne définit pas un objet mais seulement le degré de connaissance que l'observateur a de cet objet. Un degré de connaissance souvent associé au désordre. Car, qu'est-ce que le désordre si ce n'est l'expression de ce que nous ne parvenons pas à maîtriser. « La confusion, de même que l'ordre, n'est pas une propriété des objets matériels en soi mais seulement en rapport avec l'esprit qui les perçoit », se plaisait à rappeler Maxwell. Voilà donc, au cœur du royaume gouverné par l'objectivité qu'est celui de la science, que l'on introduit un concept relevant d'une part certaine de subjectivité. L'entropie présente un caractère anthropique ! De quoi sans doute désarçonner quelques esprits.

Autre particularité déroutante : le fait que la seconde loi de la thermodynamique, dont est issu le concept d'entropie, soit une loi statistique. Plus le nombre d'objets considérés est grand, plus l'évolution vers le désordre devient probable. Sans pour autant jamais être totalement certaine. Même si la probabilité de retrouver un jeu de carte parfaitement ordonné après l'avoir mélangé est très faible, elle n'est pas nulle ! Si l'entropie présente cette tendance que l'on pourrait parfois qualifier de fâcheuse à s'accroître, c'est simplement qu'il existe beaucoup plus de configurations désordonnées que de configurations ordonnées. On ne décompte ainsi qu'une seule et unique façon de disposer les pièces d'un puzzle pour qu'elles forment une image cohérente alors qu'il existe un nombre extraordinaire de manières de les agencer si on ne prête pas attention à l'image. Le désordre se révèle donc être la solution la plus fréquente, car la plus probable.

Ainsi pour les physiciens et selon le second principe de la thermodynamique, l'état macroscopique le plus probable est celui qui laisse la porte ouverte au plus grand nombre de configurations microscopiques. Cet état est qualifié d'état d'équilibre. L'entropie augmentant avec le nombre de configurations microscopiques, les scientifiques en déduisent qu'à l'équilibre, l'entropie d'un système est maximale.

### L'ENTROPIE DANS LA PRATIQUE

Dans la pratique, c'est certainement le principe dit de l'entropie maximale qui a eu le plus de répercussions sur notre vie quotidienne. Riche en enseignements dans le domaine du traitement des données et de l'image, il est notamment à la base de techniques d'imagerie médicale et d'outils



informatiques tels que la reconnaissance automatique des caractères. Le principe de l'entropie maximale s'applique à des phénomènes dont on ne possède qu'une connaissance imparfaite. Du point de vue de l'observateur, ces phénomènes sont gouvernés par des lois de probabilité. D'après le principe de l'entropie maximale, parmi ces lois, c'est celle qui présente la plus grande entropie qui donne la meilleure image du phénomène. Choisir une loi de moindre entropie supposerait en effet que l'on considère comme vraies des informations que l'on ne possède pas sur le phénomène en question.

### LES APPLICATIONS DE LA THÉORIE DE LA COMMUNICATION

Le bit, contraction de l'anglais *binary digit* signifiant chiffre binaire, est la quantité d'information reçue au cours d'un événement ayant une chance sur deux de se produire, comme le tirage à pile ou face par exemple. Le bit est aujourd'hui une unité très utilisée, en informatique notamment. La théorie de Shannon donne le nombre minimum de bits nécessaires à la numérisation d'un document sans perte d'information. Un renseignement également utile pour la compression de fichiers. Cette dernière ambitionne de réduire l'espace nécessaire à la représentation d'une certaine quantité d'information. Dans le cas d'une compression dite sans perte, la quantité d'information reste la même. Pour réduire la place occupée par les données, on les réécrit seulement de façon plus concise. La compression dite avec pertes repose sur le fait que les récepteurs humains, œil ou oreille notamment, n'ont par nature pas accès à tous les détails d'un document. Il apparaît donc inutile de conserver les données relatives à ces détails. La compression d'une image au format jpeg ou la compression d'un son au format MP3 sont des exemples

courants de compressions avec pertes. Aujourd'hui les algorithmes qualifiés d'optimaux compressent les fichiers en fichiers présentant une entropie minimale.

### QUAND L'ENTROPIE INFILTRÉ L'ÉCONOMIE

C'est Nicholas Georgescu-Roegen qui, en 1971, pose les bases d'une théorie baptisée la bioéconomie selon laquelle « tout processus économique n'est qu'une extension de l'évolution biologique ». Ainsi, pour le mathématicien économiste américain d'origine roumaine, décédé en 1994, l'économie se doit de sagement obéir aux lois de la physique et notamment au second principe de la thermodynamique. Car si l'entropie d'un métal est plus basse que celle du minerai dont il est issu, cela ne signifie pas que l'activité économique échappe à la loi de l'entropie. Le raffinage du minerai est largement compensé par l'accroissement de l'entropie de l'environnement qu'il entraîne. Ainsi, d'un point de vue entropique, le coût de toute entreprise économique est toujours plus grand que son produit. On n'a rien sans rien ! De plus, les ressources en énergie et en matière première ne sont pas intarissables. En appliquant au monde économique les règles du second principe de la thermodynamique, Nicholas Georgescu-Roegen recommande une décroissance de la production. Une décroissance qu'il qualifie de soutenable, destinée à mener à une meilleure qualité de vie, pour les générations actuelles et pour les générations futures. Mais la théorie de la bioéconomie connaît son lot de critiques. Pour certains, elle oublie tout bonnement les phénomènes d'émergence et de néguentropie qui apparaissent dans des systèmes complexes comme l'est l'organisation d'une société humaine. Selon la théorie de l'émergence, à partir d'un certain seuil de complexité, les systèmes développent des propriétés que ne présentent pas les éléments les constituant pris séparément. Ce n'est pas parce que les chats aiment chasser les souris qu'il faut en conclure que chaque molécule qui constitue un chat aime aussi chasser les souris ! La néguentropie quant à elle symbolise la faculté d'un système à s'organiser. Comme son nom l'indique, elle s'oppose à l'entropie.

Ainsi, une cellule vivante conserve sa néguentropie, son organisation, en consommant de l'énergie venant de l'extérieur. Par définition, une cellule morte quant à elle ne peut plus exploiter l'énergie extérieure. Peu à peu, elle cède à l'entropie et se désagrège. Une autre critique de la bioéconomie avance simplement qu'elle repose sur un postulat erroné : le caractère absolu de la loi de l'entropie. Car, si elle est tout à fait fondamentale, cette loi n'en reste pas moins une loi statistique. Un état de fait de Nicholas Georgescu-Roegen n'a apparemment jamais voulu prendre en compte. Un état de fait qui pourtant semble prendre une importance croissante dans la société de l'information dans laquelle nous vivons. Une information délivrée au moment opportun permet en effet de lutter efficacement contre la dictature de l'entropie.

### L'ENTROPIE GÉNÉRALISÉE

Les implications cosmologiques de l'entropie restent sujettes à controverses. En effet, si l'Univers dans son ensemble est considéré comme un système fini, donc isolé, il pourrait bien être soumis à la dictature de la seconde loi de la thermodynamique et évoluer jusqu'à atteindre un état d'entropie maximale. État synonyme pour lui de mort car alors toute son énergie aurait été convertie en chaleur et il ne resterait plus aucune énergie utile aux mouvements ou à la vie. Mais, de récents travaux tendent à montrer qu'il serait illusoire de vouloir appliquer une loi aussi basique que celle du second principe de la thermodynamique à un système aussi complexe que l'Univers dans sa globalité. Pour les biologistes, le concept d'entropie a également une signification. Ainsi ils le définissent par exemple comme le nombre de nucléotides distincts présents dans une portion d'ADN. L'ADN est en effet intégralement constitué d'une succession de nucléotides baptisés A, C, G et T. Détecter des séquences d'ADN ayant une faible entropie permet de mettre en évidence des zones présentant des singularités inaccessibles à d'autres méthodes.



### Théorie de la communication

