

Commande et communication dans l'animal et la machine, livre publié la même année par un autre Américain, le mathématicien Norbert Wiener.

L'information, grandeur scientifique

C'est entre 1910 et 1930, dans trois domaines scientifiques bien différents, que l'information a été conceptualisée comme grandeur scientifique. En physique, ce développement a eu lieu en relation avec l'expérience de pensée du « démon de Maxwell ». Ce démon est un petit être imaginaire censé pouvoir connaître les vitesses et positions de chacune des molécules dans un gaz et qui utilise cette connaissance afin de séparer spatialement les molécules rapides de celles qui sont lentes ; il crée ainsi, à partir d'un gaz de température uniforme, deux régions de températures distinctes, simplement en ouvrant une petite trappe aux moments opportuns (voir l'encadré page ci-contre).

Toutefois, cette transformation étant obtenue moyennant un travail négligeable, elle contredirait le deuxième principe de la thermodynamique, selon lequel l'entropie d'un système isolé ne peut pas décroître. Rappelons que l'entropie est une grandeur fondamentale de la thermodynamique, science élaborée au XIX^e siècle – le siècle de la Révolution industrielle –, qui permet de quantifier la part de l'énergie d'un système transformable en énergie mécanique. Avec les travaux du physicien autrichien Ludwig Boltzmann, à la fin du XIX^e siècle, l'entropie a pu être interprétée dans le cadre de la physique statistique comme une mesure du « désordre » d'un système.

Plus précisément, l'entropie (statistique) mesure le nombre d'états microscopiques auxquels peut avoir accès le système considéré, compte tenu des contraintes macroscopiques telles que l'énergie totale et le volume (un état microscopique est par exemple caractérisé par les vitesses et positions à un instant donné de chacun des atomes dont est constitué le système).

Ainsi, dans le cas d'un gaz de température initiale uniforme et qui se voit séparé en deux régions de températures distinctes, l'entropie diminue (l'« ordre » augmente) et donc le démon de Maxwell semble violer le deuxième principe de la thermodynamique. C'est en réfléchissant à cette expérience de pensée que le physi-



2. QUATRE DES PRÉCURSEURS ou protagonistes de la théorie de l'information. De haut en bas, les portraits de : Marjan von Smoluchowski [1872-1917], Ronald Fisher [1890-1962], Claude Shannon [1916-2001] et Norbert Wiener [1894-1964].

cien polonais Marjan von Smoluchowski (1872-1917) a, le premier, souligné le rôle essentiel joué par la connaissance dont jouit le démon. Autrement dit, dès 1912, Smoluchowski a eu l'idée que l'acquisition d'information doit être mise en relation avec la diminution de l'entropie.

Ce lien entre information et entropie a été commenté en 1929 par le physicien hongrois Leo Szilard, et ce dernier a tenté de calculer de combien l'entropie du démon de Maxwell doit augmenter, lorsqu'il acquiert sa connaissance sur une molécule, afin que le deuxième principe de la thermodynamique soit préservé (il a obtenu que l'entropie doit augmenter d'au moins $k_B \ln 2$, où k_B est la constante de Boltzmann, qui relie température et énergie ou entropie et qui est égale à $1,380... \times 10^{-23}$ joule/kelvin, et où $\ln$ désigne le logarithme népérien, mais ce résultat s'est révélé faux).

Dans les années 1950, le physicien français Léon Brillouin poursuit ces réflexions. S'appuyant sur l'expression mathématique de l'information définie par Claude Shannon en 1948, expression identique dans sa forme (au facteur k_B près) à celle de l'entropie de la physique statistique (voir l'encadré page 22), Brillouin alla jusqu'à identifier l'information à l'opposé de l'entropie, la « néguentropie ». Mais cette identification fondamentale entropie-information a divisé la communauté scientifique, et reste à ce jour controversée.

De la statistique des épis de blé à l'information

Un autre domaine où est apparue une définition scientifique de l'information est celui des statistiques. À partir de 1922, le statisticien britannique Ronald Fisher, qui travaillait à la station agronomique de Rothamsted, a cherché à définir la quantité d'information en rapport avec ce qu'apporte un échantillon de données dans la connaissance des paramètres (par exemple la valeur moyenne) caractérisant la loi de distribution statistique des données. Il écrivit ainsi : « L'objet de la méthode statistique est la réduction des données. Il faut remplacer une masse de données, si importante qu'elle en est inintelligible, par un nombre relativement petit de quantités qui doivent représenter correctement cette masse, ou, en d'autres mots, doivent contenir la plus grande part possible si ce n'est

la totalité de l'information pertinente contenue dans les données d'origine. »

Supposons par exemple que la longueur des épis de blé soit en principe régie par une « loi normale » – loi statistique représentée par une courbe de Gauss (courbe en forme de cloche où, dans le cas présent, la proportion d'épis ayant une longueur x décroît exponentiellement avec le carré $(x - \mu)^2$ de l'écart à la longueur moyenne μ). Un des problèmes centraux de la théorie statistique consiste à déterminer, à partir de l'échantillon dont on dispose, les paramètres qui caractérisent la loi statistique correspondante, à savoir l'espérance μ et l'écart-type (c'est-à-dire la moyenne de $(x - \mu)^2$) dans le cas de la loi normale.

La démarche de Fisher a consisté à se demander, pour chaque échantillon mesuré, ce que ce dernier apporte comme « information » pour connaître ces paramètres. C'est ainsi que Fisher est parvenu en 1925 à quantifier l'information contenue dans un échantillon statistique. Plus tard, il fit lui aussi le rapprochement entre croissance de l'entropie et perte d'information, consta-

L'ESSENTIEL

■ Une science de l'information est née dans les années 1940 de travaux réalisés dans trois domaines différents : la physique, la statistique et les télécommunications.

■ Elle a été appliquée à de nombreuses disciplines, notamment à la biologie où le besoin d'un renouveau, voire d'une refondation de la théorie, se fait aujourd'hui ressentir.

■ Le concept d'information, par sa généralité apparente, a séduit de nombreux penseurs, mais a aussi donné lieu à des interprétations abusives.

tant que, « dans les processus irréversibles présents dans l'estimation statistique, où l'on ne peut pas reconstruire les données d'origine à partir des valeurs estimées, il peut y avoir une perte d'information, mais jamais un gain ».

Une troisième voie, enfin, vers une conception scientifique de l'information a été ouverte dans le domaine des télécommunications. Cherchant à augmenter la capacité de transmission des lignes télégraphiques existantes, deux ingénieurs des Laboratoires Bell, aux États-Unis, Harry Nyquist puis Ralph Hartley, posent les premiers éléments d'une théorie mathématique de la communication.

Les communications mathématisées

Ainsi, en 1924, Nyquist établit, moyennant certaines hypothèses, que la vitesse de transmission de l'information est proportionnelle au logarithme du nombre S de signaux ou symboles élémentaires utilisés (S est égal à deux dans le cas du code binaire). En 1928,

LE DÉMON DE MAXWELL

Dans l'une de ses formes, le deuxième principe de la thermodynamique stipule qu'il est impossible de faire passer de la chaleur d'un corps froid à un corps chaud sans apport de travail. Le principe de l'expérience de pensée du physicien écossais James Clerk Maxwell (1831-1879) consiste justement à imaginer une situation où ce phénomène aurait lieu. Dans une enceinte séparée en deux par une cloison percée d'une petite porte, on dis-

pose à gauche d'un gaz chaud (A) et à droite du même gaz à une température inférieure (B). En termes statistiques, la température correspond ici à la vitesse moyenne des molécules (plus précisément, la température absolue est proportionnelle à la moyenne du carré de la vitesse des molécules). En 1867, dans une lettre à Peter Tait, un autre scientifique écossais, Maxwell précise : « Maintenant, imaginez un petit être qui, par une simple ob-

servation, connaisse la position et la vitesse de toutes les molécules. Ce petit être ne fait aucun travail, sauf de soulever et d'abaisser la porte. » Ce « petit être » laisse passer du côté A les molécules venant de B qu'il identifie comme étant rapides et, inversement, autorise le passage des molécules lentes de A vers B. « [...] L'enceinte chaude est devenue plus chaude, et l'enceinte froide est devenue plus froide, sans qu'aucun travail n'ait été accom-

pli. Seule l'intelligence d'un petit être clairvoyant et observateur a été nécessaire. » En 1874, comprenant la richesse de cette expérience, notamment les extensions possibles à la théorie de la diffusion, William Thomson (lord Kelvin) donne naissance à l'expression « démon de Maxwell ». L'expérience de pensée du démon de Maxwell a joué un rôle central dans les réflexions sur les liens entre information et entropie.

