

VRAI OU FAUX

Bronze-t-on derrière une vitre ?

Oui. Une vitre bloque les rayonnements ultraviolets les plus énergétiques, mais en laisse passer d'autres, qui brunissent aussi la peau – et peuvent se révéler nocifs.

Évelyne Sage

Les surfaces vitrées tendent à se multiplier, tant dans les bâtiments que dans les véhicules. On croit souvent que les vitres bloquent les rayonnements ultraviolets (UV) et empêchent ainsi de bronzer ceux qui se trouvent derrière. Qu'en est-il ? Faut-il craindre de s'exposer au soleil derrière une vitre ?

Les rayonnements ultraviolets qui atteignent la surface de la Terre se répartissent en 95 pour cent d'UV-A, les moins énergétiques, dont les longueurs d'onde vont de 320 à 400 nanomètres, et cinq pour cent d'UV-B, de longueurs d'onde comprises entre 290 et 320 nanomètres. Or les deux types d'UV font brunir la peau, mais selon des mécanismes différents.

Les UV-B, les plus énergétiques, déclenchent la synthèse de mélanine, un pigment brun. De fait, ils activent un facteur de transcription (une protéine régulant l'expression des gènes) dans les kératinocytes (des cellules de l'épiderme) ; cela entraîne la synthèse d'une hormone nommée alpha-MSH et d'un peptide opioïde procurant une sensation de bien-être. Les molécules d'alpha-MSH sont libérées dans le milieu extracellulaire et se fixent sur des récepteurs membranaires des mélanocytes, les cellules productrices de mélanine. Il s'ensuit une cascade d'événements qui conduisent à la synthèse de mélanine. Ce pigment est empaqueté dans des granules, les mélanosomes, qui sont libérés puis absorbés par les kératinocytes. Ils viennent se placer au-dessus des noyaux cellulaires (où se

trouve l'essentiel de l'ADN), qu'ils protègent d'une exposition ultérieure aux ultraviolets. Les individus roux ne synthétisent pas de mélanine, de sorte qu'ils brûlent sans bronzer quand ils s'exposent au soleil.

Les UV-A donnent aussi à la peau une pigmentation brun foncé persistante, et ce plus vite que les UV-B, mais cette pigmentation résulte de l'oxydation de la mélanine préexistante et de ses précurseurs, et non d'une nouvelle synthèse de mélanine. Le bronzage dû aux UV-A n'est donc pas photoprotecteur – au contraire, il détruit et disperse les pigments protecteurs. En conséquence, une peau bronzée par ces rayonnements sera aussi vulnérable qu'une peau blanche lors d'une exposition ultérieure au soleil.

Visage pâle, bras bronzé

Comment une vitre classique filtre-t-elle ces différents rayonnements ? Elle bloque la plupart des UV-B (seuls les 15 pour cent les moins énergétiques la traversent), mais elle laisse passer presque tous les UV-A. Un double-vitrage est plus protecteur, puisqu'il ne transmet que 57 pour cent des ultraviolets, et 33 pour cent s'il est teinté.

En outre, grâce aux innovations de l'industrie du verre, des filtres efficaces sont incorporés dans les vitres modernes. Dans certains bâtiments commerciaux ou résidentiels récents, les vitres bloquent ainsi jusqu'à 99 pour cent des ultraviolets. Dans les automobiles, pour des raisons de sécurité, tous les pare-brise sont en verre laminé

(deux couches de verre sont collées sur une couche intermédiaire en plastique, afin que le verre ne tombe pas sur le conducteur s'il se casse), et ce type de verre arrête plus de 99 pour cent des ultraviolets.

En revanche, les vitres des fenêtres arrière et latérales sont en verre non laminé, moins photoprotecteur. Ainsi, le conducteur et les passagers peuvent recevoir une quantité considérable d'UV-A à travers ces fenêtres, même quand elles sont fermées : les parties de leur corps exposées à cette lumière latérale ou arrière (la main, le bras, l'épaule...) bronzent alors, tandis que celles qui ne reçoivent le soleil que par le pare-brise restent blanches.

Une telle exposition est-elle nocive ? Tous les types d'ultraviolets endommagent l'ADN et les cellules, d'où un risque de cancer de la peau. Les photons UV-B sont plus énergétiques, mais les photons UV-A nous atteignent en plus grand nombre : ils prédominent, aussi bien dans la lumière naturelle que dans celle des appareils de bronzage, et ils traversent mieux les vitres et l'épiderme. Dès lors, bien que les UV-B soient responsables de la plupart des cancers cutanés, les UV-A peuvent aussi accroître le risque de cancer, en particulier de mélanome. En outre, ils contribuent notablement au vieillissement de la peau. Mieux vaut donc éviter une exposition excessive et se protéger par de la crème solaire... même en voiture ! ■

Évelyne SAGE est directrice de recherche dans l'Unité Stress génotoxiques et cancer (CNRS UMR 3348), à l'Institut Curie, à Orsay.



La théorie de L'INFORMATION existe-t-elle ?



On répète à l'envi que nous vivons dans une société de l'information, que les ordinateurs traitent l'information, que nous sommes submergés par l'information, etc. Mais le terme « information » qui revient si souvent a-t-il une signification précise ? Représente-t-il un concept scientifique universel qui témoigne d'un savoir unifié ? Son emploi dans toutes sortes de domaines, de la physique à l'économie en passant par la biologie et la robotique, est-il pertinent ?

On serait tenté de penser que l'information est une notion fourre-tout, mais elle est plus que cela. On sait la quantifier, du moins dans certains contextes. Plusieurs scientifiques la considèrent même comme une grandeur physique fondamentale, au même titre que l'énergie ou le temps. De fait, l'information est un concept protéiforme qui ne se laisse pas facilement appréhender. L'apparition d'une théorie scientifique de l'information ne date que de quelques décennies, et le concept suscite encore de nombreuses réflexions chez les scientifiques et les philosophes. La théorie de l'information reste, à l'heure actuelle, un édifice inachevé et hétéroclite.

Pour mieux comprendre la place de la notion scientifique d'information aujourd'hui, il est utile d'en esquisser la genèse, qui remonte aux années 1920, et le développement. Nous verrons que la théorie de l'information, pour autant que l'on puisse utiliser le singulier, a plusieurs origines et que, en dépit de son caractère inachevé, elle a pénétré de nombreux champs de la pensée et de l'activité humaine.

La théorie de l'information a ainsi orienté l'évolution de certaines disciplines scientifiques. C'est le cas de la biologie moléculaire qui a été dominée dans la seconde moitié du XX^e siècle par des approches centrées sur l'information génétique, selon lesquelles les gènes contiennent

toute l'information qui caractérise un organisme vivant. Dans le domaine des sciences humaines et sociales, des théories comme le structuralisme ou certaines conceptions néolibérales de l'économie s'appuient elles aussi sur une conception essentialiste de l'information.

Par ailleurs, les progrès scientifiques et techniques liés au codage et aux lignes de communication constituent des applications directes de la théorie de l'information et sont au cœur de développements qui ont bouleversé nos vies. Ce sont ces innovations de « l'ère numérique » (ordinateurs, traitement et transmission de textes, d'images ou de sons numérisés, réseau Internet, etc.) qui nous ont rendu familière la représentation de l'information sous la forme d'une suite de 0 et de 1, c'est-à-dire une

Jérôme Segal

Quantifier l'information et en faire un concept scientifique précis : tel est l'objet de la théorie de l'information, née il y a 65 ans. Une entreprise toujours actuelle, à laquelle les développements de la biologie posent de nouveaux défis.

suite de bits. Une telle suite de bits peut ensuite revêtir diverses formes graphiques, selon le codage choisi : par exemple une succession de traits verticaux parallèles pour le code-barres, ou un motif carré de pixels noirs ou blancs pour les codes QR de plus en plus fréquents (voir la figure 1).

Tous ces développements, dont nous n'avons pas fini d'observer les conséquences, ont pour origine les travaux de scientifiques de diverses disciplines qui ont placé deux textes au centre de leurs réflexions : *Une théorie mathématique de la communication*, article publié en 1948 dans une revue technique par Claude Shannon, un ingénieur américain, et *Cybernétique* -

1. LES CODES QR (QR pour *Quick Response*), inventés en 1994 par l'entreprise japonaise *Denso-Wave*, sont des sortes de codes-barres bidimensionnels de plus en plus répandus. Une telle image, facilement captée et décodée par un téléphone portable muni de l'application adéquate, véhicule le plus souvent l'adresse d'une page Internet, à laquelle on peut immédiatement se connecter. Formé de pixels noirs et blancs en général, un code QR peut représenter jusqu'à 4 296 caractères alphanumériques. Les trois coins dotés d'un motif carré définissent l'orientation de l'image à décoder.

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 Szilárd, 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,

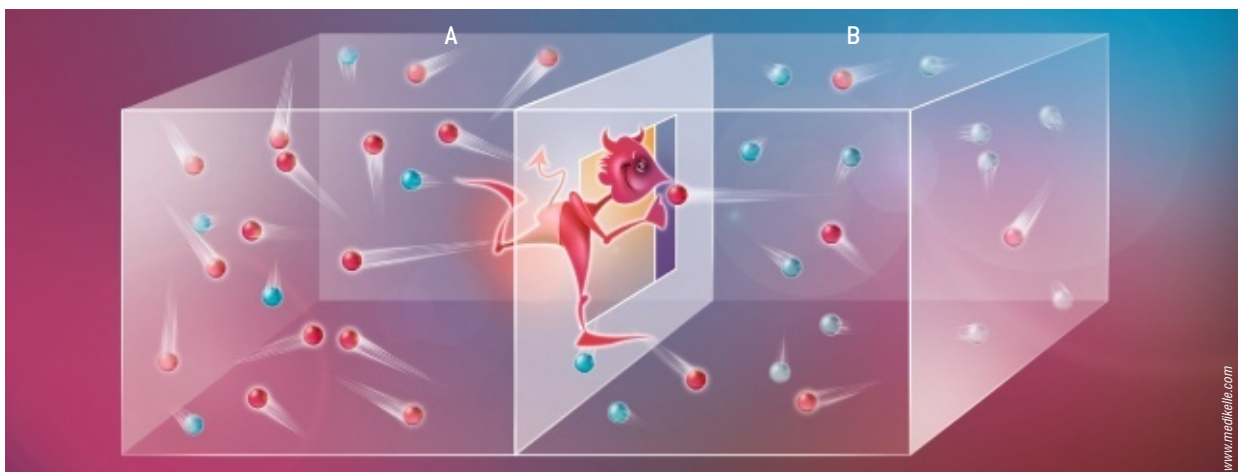
LE DÉMON DE MAXWELL

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.



Hartley définit la quantité d'information contenue dans une suite de N symboles élémentaires comme étant égale à $N \log S$, tout en soulignant que ces considérations sont indépendantes de la nature ou de la signification de l'information véhiculée.

C'est dans le contexte de la Seconde Guerre mondiale que les idées de Nyquist, Hartley et d'autres ingénieurs ou chercheurs convergent vers une « théorie de l'information », essentiellement grâce aux travaux de Shannon, également des Laboratoires Bell.

Ce mathématicien-ingénieur quelque peu excentrique rédige en 1945 *Une théorie mathématique de la cryptographie*, rapport classé secret jusqu'en 1957. Dans ce document, il a l'intuition de comparer les perturbations du signal engendrées par la clef de cryptage au « bruit » qui parasite les lignes de télécommunication

et que les ingénieurs essayent de minimiser. Shannon y définit en outre la quantité d'information, dans le cas discret, comme la moyenne logarithmique des probabilités de sélection des éléments constitutifs du message (voir l'encadré ci-dessous).

Parallèlement à ses recherches cryptographiques, Shannon a travaillé à l'automatisation de la défense antiaérienne. De la Première Guerre mondiale à la Seconde, les avions volaient deux fois plus haut et deux fois plus vite. Les opérateurs des radars n'avaient alors pas le temps de communiquer efficacement avec les équipes d'artillerie. Pour transmettre les données automatiquement, il fallait là encore, pour l'équipe de Shannon, trouver un codage adéquat et définir l'information à transmettre.

Une autre équipe des Laboratoires Bell, dirigée par Norbert Wiener, se pré-

occupait des perturbations dues aux dents des engrenages, qui affectaient la stabilité du bras déterminant l'axe de tir. Assisté de l'ingénieur Julian Bigelow, Wiener eut l'idée de consulter son ami cardiologue, Arturo Rosenblueth, qui avait déjà analysé des mouvements perturbés caractéristiques de certaines formes d'ataxie (difficulté de coordination) dans le tabès, une forme tardive de la syphilis.

De l'information dans les boucles de rétroaction

Ces échanges transdisciplinaires, liés à l'effort de guerre des États-Unis, ont conduit à l'élaboration d'une théorie générale de la régulation, que Wiener nomma cybernétique dès 1947. Cette théorie portant sur des systèmes quelconques, que ce soit des machines ou des organismes vivants, était

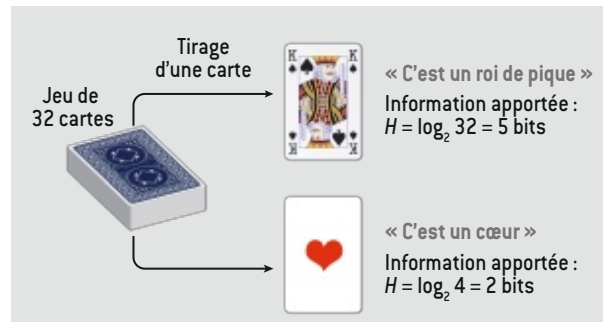
QUANTITÉ D'INFORMATION, INCERTITUDE, ENTROPIE

Pour définir la quantité d'information contenue dans un message d'une certaine longueur et formé à partir d'un certain alphabet de lettres ou symboles, Claude Shannon a cherché à quantifier l'incertitude ou le choix – ou encore le manque d'information – associé à l'ensemble des messages possibles ayant la même longueur et utilisant le même alphabet.

Supposons que l'on ait N messages possibles et que la probabilité de choisir le i -ème message soit p_i , avec $p_1 + p_2 + \dots + p_N = 1$. Shannon a cherché une fonction $H(p_1, \dots, p_N)$ qui quantifie l'incertitude associée à ces possibilités. En exigeant qu'elle satisfasse à certaines propriétés naturelles, il a prouvé que la fonction H , nommée entropie informationnelle ou entropie statistique, devait être de la forme : $H = -K(p_1 \log p_1 + p_2 \log p_2 + \dots + p_N \log p_N)$, où K est une constante positive arbitraire. Quand un seul choix est possible (tous les p_i sont nuls, sauf un), l'incertitude est nulle ; l'information apportée en spécifiant ce choix est donc elle aussi nulle. Dans le cas où les probabilités sont toutes égales ($\frac{1}{N}$), on a $H = K \log N$; cela correspond à une entropie ou une incertitude maximale, et l'information apportée en spécifiant le choix effectué est maximale.

Un exemple très simple est celui d'un message constitué d'un seul symbole binaire, généralement noté 0 ou 1. Il y a deux choix possibles ; s'ils ont même probabilité ($p_1 = p_2 = 1/2$), l'entropie de Shannon devient $H = K \log 2$. Par commodité, on prend $K = 1$ et des logarithmes de base 2 ; l'entropie de Shannon d'un symbole binaire devient alors $H = 1$, ce qui définit un

sibiles ayant la même probabilité, $1/32$, l'entropie de Shannon est égale à $\log_2 32$, c'est-à-dire cinq bits (puisque $32 = 2^5$). La quantité d'information apportée par cette annonce correspond au nombre de questions à réponse binaire (« oui » ou « non ») qu'il faut poser pour trouver la carte : « Est-elle de couleur rouge ? », « Est-elle égale ou supérieure au valet ? », etc.



bit d'information (le terme « bit », contraction de *binary digit*, a été proposé par le statisticien américain John Tukey). De la même façon, l'affirmation « Mon rendez-vous est le matin » apporte une information de un bit, alternative élémentaire, s'il est équiprobable que ce rendez-vous ait lieu le matin ou l'après-midi.

Autre exemple : l'annonce de la carte que l'on a choisie dans un jeu de 32 cartes. Les choix pos-

Shannon a aussi montré qu'on pouvait calculer l'« entropie » d'une langue à partir d'un calcul sur sa redondance. Bien des phrases restent compréhensibles lorsque des lettres sont enlevées ; c'est le principe des techniques de sténographie et à titre d'exemple, sans vouloir flatter les lecteurs, Shannon écrivait : « Ls lctrs ntlngnts cmprnnt fclmnt n txt sns vlls. »

En même temps, Shannon a toujours tenu à préciser que la dimension

sémantique de l'information était absente de ses travaux. Que ce soit à travers la définition statistique ou par l'utilisation de la redondance, l'ingénieur en télécommunications aura la même application à transmettre une déclaration de guerre, des cours de la Bourse ou un message dépourvu de sens pour lui.

La formule de l'entropie au sens de Shannon, $H = -K \sum p_i \log p_i$, ressemble beaucoup à la formule qui définit l'entropie en mécanique statistique, telle qu'elle a été établie par les physiciens Ludwig Boltzmann et Josiah Gibbs au XIX^e siècle. Il suffit d'adopter les logarithmes népériens et de prendre pour K la constante de Boltzmann ($k_B = 1,38 \times 10^{-23}$ joule/kelvin) pour obtenir une expression formellement identique, p_i désignant alors la probabilité du i -ème état microscopique accessible au système physique considéré. Toutefois, l'identification entre l'entropie/information de Shannon et l'entropie de Boltzmann-Gibbs a été contestée par de nombreux scientifiques ; le physicien et bio-informaticien américain Hubert Yockey, notamment, a souligné que les espaces de probabilités dans les deux situations ne sont pas isomorphes (leur correspondance n'est pas rigoureuse).

centrée sur la notion de « boucle de rétroaction » (*feedback* en anglais). Le thermostat est l'archétype d'un dispositif réalisant une telle régulation : il mesure la température et, en fonction du résultat, modifie son fonctionnement dans un sens ou dans un autre afin d'atteindre ou maintenir la température souhaitée.

Après la guerre, de 1946 à 1953, une dizaine de conférences interdisciplinaires, organisées avec le soutien de la Fondation Macy, ont permis à Wiener et d'autres scientifiques de classer ces phénomènes de rétroaction et d'y souligner le rôle clef de l'information – celle-ci étant définie par Wiener de façon similaire à l'information de Shannon, avec la même analogie par rapport à l'entropie statistique.

Les boucles de rétroaction permettent de déclencher automatiquement un système de régulation par action de mécanismes agissant dans le sens opposé à celui ayant causé un écart avec l'objectif désiré. Ces phénomènes étaient connus depuis longtemps (par exemple en mécanique pour les machines à vapeur ou en biologie pour la régulation de la température ou de la pression sanguine). Mais en considérant que c'était de l'information qui circulait dans ces boucles, les cybernéticiens ont pu construire une théorie abstraite des systèmes de régulation.

Parmi les scientifiques impliqués dans ces réflexions théoriques, voire philosophiques, figuraient bien entendu Shannon, mais aussi d'autres célébrités – des physiciens et mathématiciens comme John von Neumann, des biologistes comme Max Delbrück (l'un des pères de la biologie moléculaire), ou encore des anthropologues comme Margaret Mead ou Gregory Bateson.

Les fondements mêmes de plusieurs disciplines scientifiques furent réinterprétés à l'aune de la théorie de l'information et de la cybernétique. Dans le domaine des techniques, l'application de la théorie de l'information à la Shannon a eu de nombreuses retombées. Il suffit de penser aux codes correcteurs d'erreurs, utilisés aujourd'hui universellement pour protéger l'information numérique contre sa dégradation, aux techniques de compression de données, etc. Dans l'exemple de la compression de données, les travaux de Shannon et de ses continuateurs ont permis de conceptualiser la redondance : ainsi, pour coder numériquement une image montrant une partie de ciel bleu

uniforme, au lieu de coder chaque pixel (cordonnées du pixel, valeur de la couleur), un codage compressé de type JPEG utilisera une syntaxe permettant de traduire en langage informatique « de tel pixel à tel autre, afficher telle valeur de bleu ».

Au-delà des services rendus aux technologies de la communication, ce qui était le cadre originel de la théorie de l'information édifée par Shannon et son école, beaucoup de scientifiques ont été tentés de voir dans l'information une entité fondamentale, intervenant dans tous les domaines du savoir.

Matière, espace, temps et information : les nouveaux éléments ?

Il y a une vingtaine d'années déjà, Rolf Landauer (1927-1999), physicien chez IBM aux États-Unis, affirmait que « l'information est physique » et qu'elle doit avoir la même place, dans l'analyse du monde qui nous entoure, que la matière, l'énergie, l'espace et le temps. De même, en France, le physicien des hautes énergies Gilles Cohen-Tannoudji proposait d'introduire une quatrième constante fondamentale, une constante « informationnelle » (combinant la constante de Boltzmann et celle de Planck) ayant le même statut que la vitesse de la lumière c , la constante de gravitation G et la constante de Planck h pour rendre compte de l'importance de la notion d'information en physique théorique.

Une vision encore plus radicale est prônée par le physicien d'origine serbe Vlatko Vedral, qui travaille aux Universités d'Oxford et de Singapour et dont les recherches portent sur l'information quantique (un domaine actif de la physique moderne, où l'on cherche à exploiter les phénomènes quantiques pour mieux stocker, traiter, coder ou crypter l'information). Pour ce physicien, tout est information, et c'est cette notion, et non l'énergie, la matière, l'espace ou le temps, qui devrait apporter la clef de la compréhension de l'Univers. Dans cette conception, l'Univers équivaut à une sorte de gigantesque ordinateur.

Du côté de la biologie, la théorie de l'information a également marqué les esprits. Dans les années 1950, elle avait apporté un langage commun aux biologistes dans leurs recherches pour établir le « code » génétique, après la découverte

■ L'AUTEUR



Jérôme SEGAL est maître de conférences à l'Université Paris IV Sorbonne, actuellement en disponibilité à Vienne où il coordonne le Collège doctoral d'histoire et philosophie des sciences de l'Université de Vienne.

■ BIBLIOGRAPHIE

F. Conway et J. Siegelman, *Héros pathétique de l'âge de l'information - En quête de Norbert Wiener, père de la cybernétique*, Hermann, 2012.

J. Segal, *Le zéro et le un, Matériologiques* (édition électronique, www.materiologiques.com), octobre 2011.

P. M. Binder et A. Danchin, *Life's demons : information and order in biology*, *EMBO Reports*, vol. 12(6), pp. 495-499, 2011.

V. Vedral, *Decoding Reality – The Universe as Quantum Information*, Oxford University Press, 2010.

M. Triclot, *Le moment cybernétique – La constitution de la notion d'information*, Champ-Vallon, 2008.

G. Cohen-Tannoudji, *Les constantes universelles*, Hachette, 1996.

H. Yockey, *Information Theory and Molecular Biology*, Cambridge University Press, 1992.

de la structure en double hélice de l'ADN, en 1953. Peu après, c'étaient les idées issues de la cybernétique sur l'auto-organisation qu'avaient reprises de nombreux biologistes pour expliquer le vivant.

Aujourd'hui, avec l'émergence de la biologie de synthèse, où les chercheurs modifient profondément des cellules vivantes, on assiste à un nouveau souffle de la théorie de l'information et à de nouveaux questionnements. Pour mieux comprendre comment fonctionne une cellule vivante, des biologistes comme Antoine Danchin, instigateur de la génomique bactérienne en France et fondateur de la Société *AMAbiotics*, pensent qu'il faut voir les organismes vivants comme des systèmes qui recueillent de l'information et l'utilisent, l'information étant ici définie de façon plus large comme une quantité qui est transférée (sans nécessairement être conservée) au cours d'un processus de mesure, des corrélations étant créées entre le système mesuré et le système qui effectue la mesure.

Selon A. Danchin, il faut de nouveau faire appel à des démons de Maxwell : dans une cellule, de telles entités (des molécules ou des complexes moléculaires)

recueilleraient de l'information pour contrer les effets du vieillissement et permettre à la cellule de se reproduire. Par exemple, la cellule contiendrait des démons moléculaires capables de distinguer entre protéines normales et protéines dysfonctionnelles, et capables d'éliminer ces dernières (voir la figure 3).

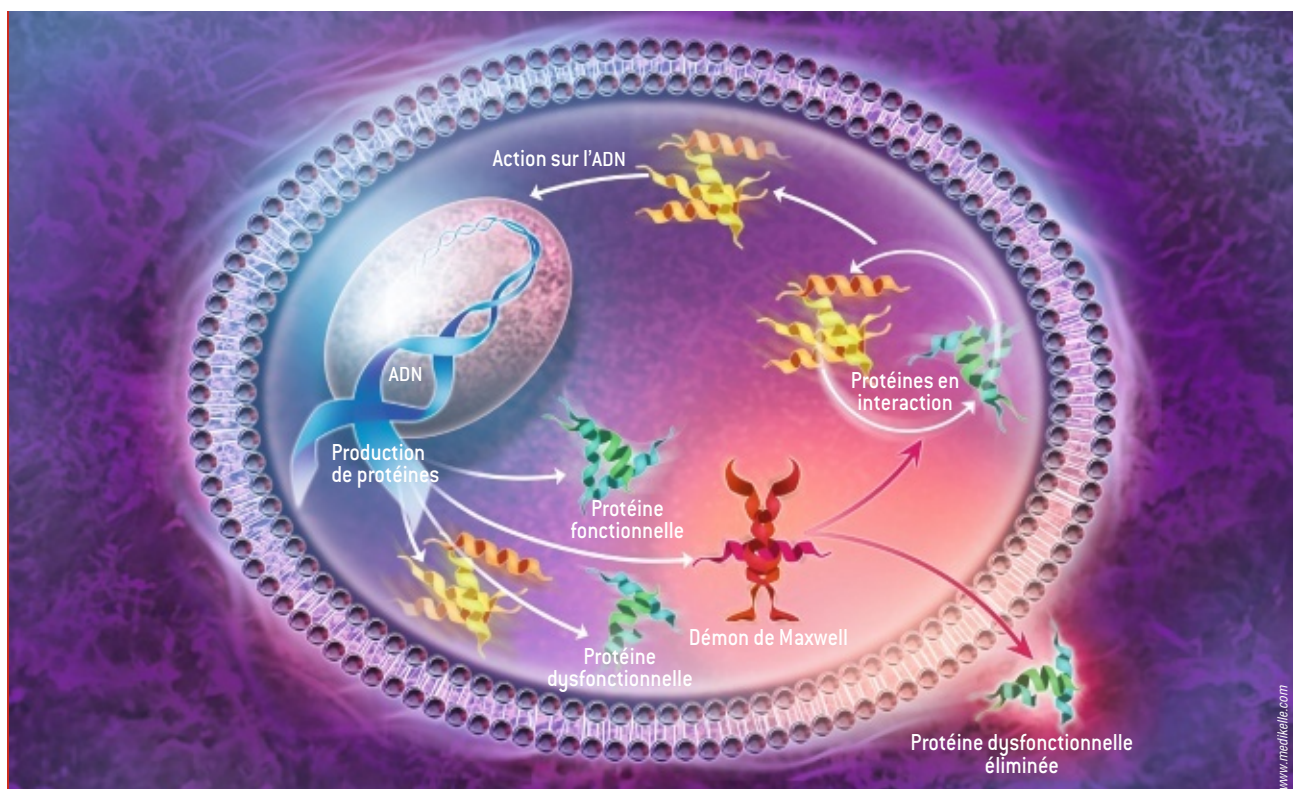
Effacer de l'information coûte de l'énergie

De telles considérations remettent en avant des travaux de Landauer effectués dans les années 1960 sur le coût, en termes d'entropie, lié à l'effacement de l'information. Car en recueillant de l'information, le démon de Maxwell biologique doit changer d'état, et pour fonctionner à nouveau, son état doit être réinitialisé. Or cela implique un coût en entropie, associé à un coût en énergie. En effet, Landauer avait montré que des opérations logiques réversibles, telles que l'opération NON (qui inverse la valeur d'un bit d'information, transformant 0 en 1, ou 1 en 0), peuvent se dérouler sans consommer d'énergie ; il avait aussi montré qu'en revanche, une opération irréversible telle que l'efface-

ment exige un minimum d'énergie : il faut une énergie au moins égale à $k_B T \ln 2$ pour chaque bit d'information perdu, où T est la température absolue.

Cette consommation d'énergie pourrait, selon A. Danchin, aider à identifier les démons de Maxwell cellulaires. S'ils existent, explique-t-il, ils doivent être codés par le génome, et plus particulièrement par le « paléome », un ensemble de gènes qui codent les fonctions essentielles à la vie. Or les biologistes ont constaté que certaines de ces fonctions, censées être impliquées dans la maintenance de la cellule, utilisent de l'énergie d'une façon qui ne leur correspond pas clairement. Autrement dit, une énergie dépensée de façon inattendue pourrait trahir un démon de Maxwell cellulaire.

Une telle dépense suspecte d'énergie pourrait être en jeu dans un mécanisme de vérification de la traduction des ARN en protéines, identifié dans les années 1970. Cela étant, d'autres pistes existent pour identifier des démons de Maxwell cellulaires. Par exemple, une famille de protéines nommées septines semblent impliquée dans le confinement de vieilles protéines dans des cellules de levure, ces vieilles protéines restant au sein de la cellule mère



3. LE FONCTIONNEMENT DU VIVANT met en œuvre des processus opérant de façon analogue à un démon de Maxwell. Ainsi, une cellule produit grâce à son ADN de nombreuses protéines, dont certaines sont défectueuses et à éliminer. Un « démon de Maxwell » moléculaire, lui-même produit par l'ADN cellulaire, effectuerait ce tri. Les entités moléculaires qui jouent le rôle de démons de Maxwell restent toutefois à identifier.

Théorie de l'information, cybernétique : dérives et abus

Dès le début du développement de la théorie de l'information, et malgré le caractère incomplet et hétéroclite de celle-ci (ou peut-être grâce à lui), certains milieux ayant des motivations avant tout idéologiques ont tenté de tirer profit de cette possible unification.

Lors des conférences de la fondation Macy, en 1949, c'est le fondateur de « l'Église » de la science, Ron Hubbard, qui approche Shannon pour s'immiscer dans le groupe des scientifiques. Il entretient ensuite sciemment une confusion entre *Dianétique*, le titre de son livre-testament, et la cybernétique. Sans doute parce que cette unité du savoir n'était pas revendiquée par une institution forte et suffisamment établie sur le plan international, des sectes ont voulu utiliser la théorie de l'information pour leur propre promotion.

En 1975, lorsque des prestigieux physiciens, chimistes et biologistes se sont retrouvés officiellement pour échanger autour du thème « La centralité de la science et les valeurs absolues », il n'était question que de la notion scientifique d'information, et le riche mécène qui avait invité les 11 lauréats du prix Nobel n'était autre que le « révérend » Sun Myung Moon, présenté comme le responsable de « l'Église de l'unification », que d'aucuns qualifient – non sans raison – de secte Moon. Des scientifiques tels Eugene Wigner, Ilya Prigogine ou John Carew Eccles y ont surtout servi de caution scientifique à la secte, même si Eccles, dans son allocution d'ouverture, a cité Moon selon qui le sens de cette unification est à trouver dans « l'esprit cosmique ».

Les propos tenus par d'autres scientifiques, tel le biologiste Gunther Stent, témoignaient clairement

d'une fétichisation de la notion d'information génétique. Pour Stent, par exemple, « transmettre par des signaux radio la séquence des nucléotides d'un chat vers une civilisation extraterrestre est équivalent à transmettre le chat lui-même ».

Une vingtaine d'années plus tard, au printemps 1997, à l'occasion de l'émoi que provoqua l'annonce de la naissance (un an auparavant) du clone d'une brebis adulte, la secte des raëliens poussa plus en avant encore ses élucubrations, annonçant que « la prochaine étape sera le transfert d'information et de la personnalité d'un individu vieillissant à son propre clone encore jeune », « comme le font les Élohim avec leurs 25 000 ans d'avance scientifique » (sic).

Dans d'autres cas, la théorie de l'information, et plus précisément la partie liée à la cybernétique, a pu apporter un ersatz de religion. En Répu-

blique démocratique allemande, par exemple, la cybernétique était d'abord bannie, considérée comme une théorie *made in USA* (ce qui suffisait déjà, en période de guerre froide, pour la discréditer), mais aussi comme la théorie à l'origine de l'automatisation, et donc du remplacement des valeureux ouvriers par des robots.

À partir du moment où, au début des années 1950, les militaires soviétiques ont pu faire comprendre aux apparatchiks qu'il était nécessaire pour la défense du pays d'ouvrir des centres de recherche spécialisés sur ces questions, la cybernétique a été considérée comme une incarnation du matérialisme dialectique, et même sa justification scientifique. En 1992, le dramaturge est-allemand Heiner Müller a ainsi fait remarquer que « la cybernétique avait été pendant un temps un substitut de religion pour les fonctionnaires ».

et ne passant pas aux cellules filles ; les septines seraient ainsi de possibles démons de Maxwell pour la cellule.

Identifier les démons de Maxwell à l'œuvre dans les cellules vivantes, déterminer comment ils fonctionnent exactement, etc., est donc pour A. Danchin et d'autres biologistes un enjeu majeur. Plus largement, l'étude de ces questions pourrait faire progresser la théorie de l'information, qui reste imparfaite : on ignore par exemple si l'information doit obéir à un principe de conservation analogue à celui de la conservation de l'énergie, et la théorie de Shannon ne traite pas de l'information en elle-même, mais plutôt de sa transmission, sans se préoccuper de sa signification.

Il y a un côté fascinant à considérer qu'une unité du savoir pourrait se forger autour du concept d'information. Cette perspective a parfois entraîné des dérives et des interprétations abusives (voir l'encadré ci-dessus). Mais des liens plus sérieux entre domaines différents se sont aussi établis autour du concept d'information. On peut citer l'exemple du structuralisme, né en grande partie de la rencontre, à New York dans les années 1940, entre le linguiste russe Roman Jakobson et l'anthropologue français Claude Lévi-Strauss. Or leur langage commun, ce qui justifiait

même leurs échanges, était la définition de la notion d'information. À cette époque et jusqu'à la fin des années 1960, il était question d'une unité du savoir autour des sciences du langage.

Une théorie qui a encore de beaux jours devant elle

Dans un deuxième temps, avec le développement de ce qu'on a appelé (peut-être un peu abusivement) la « deuxième cybernétique » (ou cybernétique de deuxième ordre) – selon laquelle des systèmes autorégulés peuvent créer de l'ordre (on parle d'autopoïèse) –, la théorie de l'information a connu des applications importantes dans la conception des systèmes économiques. Le marché devait dès lors s'autoréguler sans intervention de l'État, et des penseurs économistes tels que l'Autrichien Friedrich Hayek ont cru pouvoir justifier scientifiquement, sur cette base, une conception libérale de l'économie. Étendue ensuite à des domaines *a priori* non marchands, cette conception a donné naissance au « néolibéralisme » tel qu'il fut défini et surtout promu par l'École de Chicago.

Toutefois, c'est dans les domaines plus strictement scientifiques et techniques que le concept d'information s'est révélé le plus fécond et le plus pertinent. Nous en avons mentionné quelques exemples, avec notamment le démon de Maxwell en physique théorique. On peut aussi citer l'astrophysique des trous noirs, où le sort de l'information ou de l'entropie engloutie avec la matière reste une question stimulante et non résolue. Quant aux applications concrètes, elles sont innombrables, qu'elles relèvent des télécommunications ou de l'informatique.

Qui plus est, les recherches liées à l'information quantique commencent à porter leurs premiers fruits technologiques. L'entreprise *ID Quantique*, par exemple, jeune pousse de l'Université de Genève, en Suisse, a déjà pu prendre en charge, à l'aide d'un procédé de cryptage quantique, une partie des communications cryptées liées à la Coupe du monde de football ; à Vienne, en Autriche, l'équipe rassemblée autour d'Anton Zeilinger est parvenue à battre le record de distance pour une transmission (sur plus de 140 kilomètres) à partir de photons dont les états quantiques étaient intriqués. La théorie de l'information a aujourd'hui 65 ans, mais, comme la plupart des sexagénaires, elle a encore de beaux jours devant elle. ■

UNE NOUVELLE VIE pour l'ADN ancien

Kevin Campbell et Michael Hofreiter

Les scientifiques résolvent des énigmes physiologiques de la paléontologie en reconstituant, à partir de fragments d'ADN, des protéines d'espèces disparues, tel le mammouth.

Pendant plus de 150 ans, les paléontologues ont reconstitué les vertébrés des temps passés à partir d'os et de dents fossilisés. Les squelettes révèlent la taille et l'apparence de ces animaux disparus ; les empreintes des muscles sur les os indiquent s'ils étaient robustes et comment ils se déplaçaient ; la forme et l'usure de leurs dents témoignent du type de nourriture qu'ils ingéraient. Bref, ces restes pétrifiés ont constitué une mine d'or pour les scientifiques. En de rares occasions, des animaux momifiés ou des cadavres congelés particulièrement bien conservés ont apporté de précieux renseignements supplémentaires tels que l'épaisseur du pelage, la forme des oreilles ou le menu du dernier repas. Toutefois, malgré toutes les informations recueillies sur les caractéristiques physiques de ces animaux, on ne connaît presque rien des processus physiologiques sous-jacents.

Pour l'instant. Car grâce aux avancées récentes des biotechnologies, les biologistes reconstituent des gènes anciens à partir d'animaux disparus. Introduits et exprimés dans des bactéries, ces gènes conduisent à la synthèse des protéines qu'ils codent – des protéines qui, au sein des animaux disparus, participaient au fonctionnement de leurs cellules. Une nouvelle discipline

s'ouvre ainsi aux paléontologues : la paléophysiologie ou l'étude du fonctionnement des organes et des tissus d'organismes disparus. Nous n'en sommes qu'aux prémices, mais nous avons déjà obtenu des indications étonnantes sur la façon dont l'un des mammifères emblématiques de la Préhistoire, le mammouth laineux, s'est adapté aux rudes conditions de son époque glaciaire. Si le clonage d'animaux préhistoriques relève de la science-fiction, nos recherches montrent qu'il est possible d'accéder aux processus physiologiques qui régissaient la vie d'organismes ayant depuis longtemps disparu de la surface de la Terre.

Étudier la physiologie du mammouth

Tout a commencé un soir de 2001. L'un d'entre nous, Kevin Campbell, regardait une émission télévisée sur l'exhumation des restes d'un mammouth laineux retrouvés dans le pergélisol sibérien. S'appuyant sur le récent clonage de la brebis Dolly (en 1997), les invités de l'émission avançaient – à tort comme le dira la suite – que grâce à l'ADN de ce mammouth, les scientifiques ramèneraient bientôt de tels géants à la vie. La vision de K. Campbell était quant à elle plus ciblée

