

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 édiflée 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).

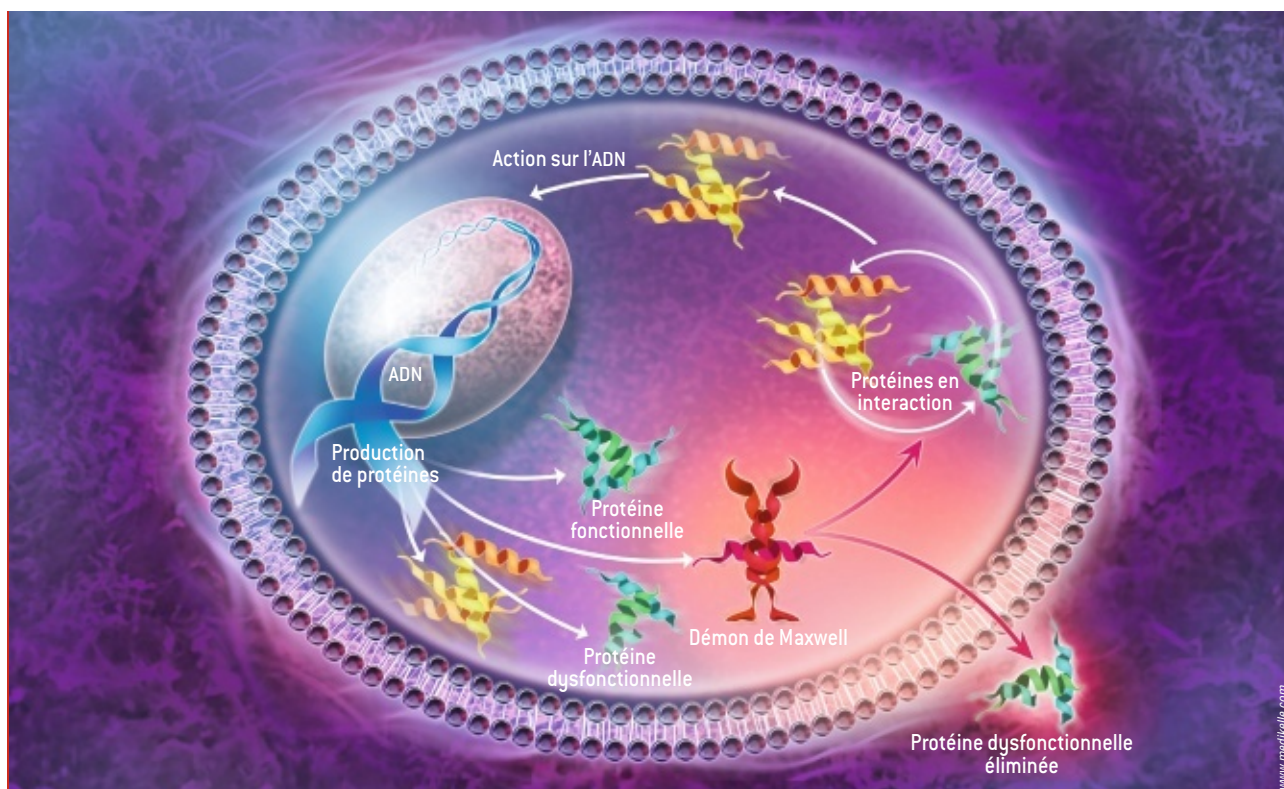
Effacer de l'information coûte de l'énergie

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.