Annexe 1

La loi de l'entropie s'applique-t-elle au monde réel ?

Il est un ensemble de lois physiques qui jouissent d'un statut privilégié. Ce sont les lois de la thermodynamique, en particulier la deuxième, que l'on appelle parfois loi de l'entropie.

Le terme « entropie » a été forgé en 1868 par Rudolph Clausius (1822-1888), lequel avait constaté que, dans une enceinte close, les différences de température tendent à s'annuler : cette égalisation se poursuit jusqu'à l'uniformité calorique totale. Cette uniformité, que l'on peut voir comme un état d'équilibre, du point de vue thermodynamique du moins, il l'appela « entropie ».

Le concept lui-même est cependant bien plus ancien. Sadi Carnot (1796-1832) l'a employé le premier en 1827. Essayant d'élucider le principe d'une machine à vapeur, il avait compris qu'il résidait dans la différence de température entre la partie chaude et la partie froide du système. C'est cette différence qui permet à la machine de « faire le travail ». Elle tend à s'annuler, ce qui réduit la capacité du système à faire le travail : on dit que l'énergie s'est dissipée ; ce qui signifie qu'elle s'est dégradée vers un état plus homogène, assimilé à l'équilibre ou à ce que Clausius nommait « entropie ».

Voilà en raccourci en quoi consiste la loi de l'entropie, qui serait tout à fait recevable si on en limitait l'application à la thermodynamique. Mais on l'a hélas extrapolée à des champs de comportement qui sont très éloignés de la thermodynamique et dont les lois devraient paraître, à toute personne sensée, radicalement distinctes de celles du comportement de l'air chaud dans une enceinte fermée, ou de celui de la vapeur dans une chaudière de locomotive.

La loi de l'entropie a subi le sort de mainte théorie scientifique : elle est devenue objet de culte, vénérée comme la clef des secrets de l'univers. Le même phénomène s'est produit avec la théorie de l'information de Claude Shannon et de Warren Weaver (voir Annexe 2), elle aussi parfaitement admissible tant qu'on

l'applique aux communications, pour lesquelles elle fut conçue, mais qui n'a servi qu'à semer la confusion lorsqu'elle fut proclamée découverte scientifique capitale qui permettrait, entre autres, de mesurer la complexité ou l'organisation du monde vivant.

Comment savoir si la loi de l'entropie s'applique aux systèmes naturels dans l'écosphère ? La vie est apparue sur Terre il y a environ trois milliards d'années et depuis lors – ou plus précisément jusqu'à la période historique, il y a à peine dix mille ans – a plutôt gagné en complexité, en diversité et en stabilité. Autrement dit, elle s'est comportée, sur une période pour le moins significative, d'une manière diamétralement opposée à celle qui aurait été la sienne si elle avait été régie par la loi de l'entropie.

C'est d'ailleurs une source de grand embarras pour les chercheurs. « Comment est-il possible de comprendre la vie, s'interroge Brillouin[1], si l'univers entier est gouverné par le second principe de la thermodynamique, qui mène à la mort et à l'annihilation ? » En effet, ou bien nous sommes tous déments, rien de semblable à l'évolution n'a jamais eu lieu et l'écosphère avec ses myriades de formes de vie n'est qu'un mirage ; ou bien la loi de l'entropie ne s'applique pas au comportement des êtres vivants – mais uniquement à celui de la vapeur dans la chaudière d'une locomotive et de l'air chaud en enceinte fermée.

Parmi les philosophes de la biologie, certains des plus perspicaces, comme Koestler[2], semblent l'avoir compris :

> La Seconde Loi ne s'applique qu'au cas particulier des « systèmes fermés » (par exemple, un gaz enfermé dans une enceinte parfaitement isolée). Mais, même dans le monde naturel, aucun système de ce genre n'existe, et personne ne peut savoir si l'univers entier en est un. Tous les organismes vivants sont au contraire des « systèmes ouverts », autrement dit, ils échangent constamment énergie et matière avec leur environnement. Au lieu de « s'arrêter » comme une horloge mécanique qui perd son énergie par frottement, l'organisme vivant « construit » sans cesse des substances plus complexes à partir de celles dont il se nourrit, des énergies plus complexes à partir des énergies qu'il absorbe et des schémas d'informations plus élaborés – perceptions, sentiments, pensées – à partir des données des organes récepteurs.

Brillouin[3] utilise le même argument. « Les principes de la thermodynamique ne s'appliquent qu'au système isolé, écrit-il, enfermés dans une enceinte à travers laquelle aucune chaleur ne

peut filtrer, aucun travail ne peut être accompli, aucune matière et aucun rayonnement ne peuvent être échangés. » L'univers, au contraire, n'est pas un système fermé. « Il reçoit constamment de l'énergie et de l'entropie négative de l'extérieur – la chaleur rayonnant du Soleil, l'énergie gravitationnelle provenant du Soleil et de la Lune (qui provoque les marées), des rayons cosmiques d'origine inconnue, etc. » Ainsi « le fait de vivre dans un monde qui n'est pas fermé permet d'échapper à la sentence de "mort par réclusion" », conclut Brillouin.

Waddington met en doute l'application de la loi de l'entropie aux processus biosphériques. Il fait remarquer qu'en se développant, l'embryon gagne en complexité, et il ne peut donc croire qu'« aucun embryologiste sérieux ait jamais envisagé que la seconde loi de la thermodynamique puisse s'appliquer de manière directe à son objet d'étude, en dépit des affirmations des physiciens orthodoxes ». Waddington[4] assure même que les physiciens les plus novateurs de son temps n'ont jamais voulu faire de la loi de l'entropie un « dogme rigide en biologie ».

Mais est-ce seulement parce que la Terre reçoit de l'énergie solaire, parce qu'elle est un système ouvert, que la loi de l'entropie ne s'applique pas ? Il semble y avoir d'autres raisons. Après tout, d'autres corps célestes sont des systèmes ouverts, et tous sont bombardés d'énergie, mais cela ne leur a pas permis de développer la vie comme la Terre l'a fait.

Rien d'étonnant au fond à ce que d'autres conditions soient nécessaires, car il est difficile d'imaginer que l'on puisse entièrement expliquer la formation de la biosphère simplement en termes d'énergie, comme le suppose la loi de l'entropie. C'est là un vieux mythe que l'on pourrait appeler le « réductionnisme énergétique ». Il semble avoir émergé comme tentative de contourner les problèmes liés à la compréhension de la matière. La théorie atomique de la matière était controversée. La thermodynamique était censée s'appuyer sur elle, mais Carnot montra qu'elle en était indépendante et ne mettait en jeu que des changements énergétiques. Comme le souligne Stephen Mason[5], ceci signifiait que « la thermodynamique pouvait se passer de modèle théorique quant à la nature de la matière ; en fait, elle pouvait se déployer sans postuler d'existence objective de la matière ». D'où le développement de l'école « énergétique », courant qui enseignait que les phénomènes naturels peuvent s'expliquer par des transformations d'énergie.

Bien sûr, d'autres ont prétendu que tout est nombre, tandis que des réductionnistes «extrémistes» affirment que la seule réalité est l'atome. Or l'organisation des atomes est aussi réelle que les atomes eux-mêmes. Il n'y a aucune raison de croire qu'ils ont plus de réalité que les tables, chaises, scarabées ou dés qu'ils constituent. De tels réductionnismes ne se défendent qu'en limitant leur application à des objets inanimés fort simples, comme les gaz ou les boules de billard. Dès que l'on considère le comportement de formes de vie complexes dans la nature, leur caractère illusoire apparaît. Comme le remarque Brillouin[6]:

> S'agissant de matière inerte, il suffit de connaître l'énergie et l'entropie. Pour les organismes vivants, il nous faut introduire la «valeur nutritive» des substances. Les calories contenues dans le charbon et celles contenues dans le blé et la viande n'ont pas la même fonction. La valeur nutritive doit elle-même être distinguée en fonction des catégories d'organismes vivants. La cellulose constitue un aliment pour certains animaux, mais pas pour d'autres. S'agissant de vitamines et d'hormones, on a affaire à de nouvelles propriétés qui ne peuvent s'exprimer en termes d'énergie ou d'entropie. Toutes ces données, encore assez vagues, semblent indiquer la nécessité d'une nouvelle idée directrice (ou principe ou loi) qui viendrait compléter la thermodynamique actuelle, pour pouvoir comprendre ces nouvelles classifications et relier de façon logique les propriétés typiques des êtres vivants.

Il est facile de montrer qu'un système naturel complexe privé de n'importe lequel de ses composants de base – énergie, information ou l'une des substances fondamentales de la vie – cessera de fonctionner correctement, se désintégrera progressivement et tendra vers un état de désordre, que les scientifiques orthodoxes appellent l'entropie. Il serait donc plus exact de parler d'«entropie de l'énergie», ce qui nous permettrait de distinguer cette notion de l'«entropie de l'information» et de l'«entropie de la matière». Nous disposerions alors d'un ensemble de lois de l'entropie, chacune énonçant que, en l'absence d'un des constituants essentiels de la vie, la tendance sera à l'entropie «générale». Une telle loi est implicite dans la théorie de l'information de Shannon et Weaver. Georgescu-Roegen en a formulé une relative à la matière: la «quatrième loi de la thermodynamique». Nous pouvons, en fait, aller plus loin encore et subdiviser l'entropie de la matière en entropie du carbone, entropie du phosphore, entropie de l'eau, etc., conférant une sorte d'énergie à chacun des ingrédients essentiels des êtres vivants. Tous ces concepts seraient aussi valables que celui de l'entropie de l'énergie, dont on fait si grand cas, mais cesseraient d'être opératoires lorsque les autres conditions favorables à l'évolution de la biosphère seraient réunies, car les systèmes seraient alors capables, soit de synthétiser leurs propres constituants, soit de les puiser ailleurs en quantités suffisantes.

La disponibilité de tous ces constituants conduit à un phénomène très étrange et semble-t-il unique. Ils tendent à s'organiser, non pas de façon aléatoire, comme le suggèrent Lotka, Volterra, May, Prigogine et tant d'autres, mais de manière extrêmement orientée. En outre, lorsque augmente la complexité des systèmes naturels, des seuils, appelés niveaux d'organisation, sont franchis. Dès que l'un est atteint, de nouveaux modes de comportement, aux caractéristiques nouvelles, émergent. Aux niveaux d'organisation les plus complexes, le comportement montre les traits que nous associons à la vie. Il est régi par un ensemble de lois totalement ignorées du physicien ou du chimiste, qui tirent leurs connaissances de l'étude des niveaux d'organisation inférieurs. Le fait que les êtres vivants soient capables de vaincre bon nombre de contraintes auxquelles le comportement de la matière inerte est soumis établit la thèse exposée dans cette annexe. «Considérez un organisme vivant», écrit Brillouin[7],

> ses propriétés particulières lui permettent de résister à la destruction, de cicatriser ses blessures et de guérir de maladies occasionnelles. C'est là un comportement très singulier. Rien de semblable ne s'observe dans la matière inerte. S'agit-il d'une exception au second principe? À première vue, cela semblerait être le cas, et nous devons nous préparer à admettre l'existence d'un «principe vital», susceptible de lui faire entorse. Quand la vie s'arrête et que survient la mort, le «principe vital» n'opère plus et le second principe retrouve son plein pouvoir, avec la désintégration de la structure vivante qu'il implique. Il n'y a plus de guérison, de résistance à la maladie; la destruction de l'organisme antérieur se poursuit sans entrave et parvient vite à son terme. On en arrive donc à se demander: la vie est-elle compatible avec le second principe? Les organismes vivants n'auraient-ils pas le pouvoir d'empêcher l'action du second principe?

La conception selon laquelle les êtres vivants possèdent une propriété qui les distingue de la matière inanimée est appelée « vitalisme ». Cette propriété était jadis considérée comme surnaturelle – c'était le cas de l'*entéléchie* d'Aristote et de l'*élan vital* de Bergson. Le vitalisme s'est condamné : il impliquait l'impossibilité de comprendre le monde en termes de physique pure ! Les physiciens – soucieux de conserver à leur discipline sa position dominante au sein de la science et de la connaissance en général – ne pouvaient évidemment l'accepter. En réalité, il n'est pas besoin de faire appel au vitalisme pour montrer que la deuxième loi ne permet en rien de comprendre le monde réel.

Grâce à leur mode d'organisation, les êtres vivants sont capables de se procurer l'énergie nécessaire pour conserver leur stabilité – les plantes vertes par la photosynthèse, et les animaux en consommant ces dernières. Un physicien rétorquera peut-être que l'énergie solaire s'est dissipée. Nous lui répondrons : « Et alors ? » L'étude de l'écosphère nous apprend que la dissipation est indispensable pour alimenter la formation des êtres vivants et améliorer leur stabilité et celle de l'écosphère. Les arguments de Georgescu-Roegen en faveur de la quatrième loi sont *a priori* plus solides que ceux qu'il donne à l'appui de la seconde. En effet, si le monde est bien un système ouvert du point de vue de l'énergie, il est relativement fermé du point de vue de la matière. Mais là encore, les êtres vivants sont capables de vaincre cette contrainte en développant des stratégies pour recycler les matériaux dont ils ont besoin. Les déchets produits par certains processus biosphériques servent de matière première aux suivants.

La question que nous devons nous poser est : pourquoi les scientifiques s'acharnent-ils à nier les preuves théoriques et empiriques de l'impossibilité d'appliquer la loi de l'entropie aux êtres vivants ? Pour comprendre cet entêtement, interrogeons-nous sur ce qu'était la conception du monde ou le paradigme des sciences physiques au milieu et dans la seconde moitié du XIXe siècle. Elle considérait le monde comme une énorme machine, dont les parties constitutives se comportaient essentiellement comme des planètes ou des boules de billard. C'était précisément la conception qui permettait de rationaliser le courant vers le matérialisme, l'individualisme, l'utilitarisme et l'économisme – valeurs cardinales de l'époque industrielle. La science était alors assimilée à la physique, comme c'est d'ailleurs le cas aujourd'hui, toutes les autres sciences étant considérées inférieures, et

l'étant encore. C'est si vrai que leurs praticiens sont souvent soucieux de redorer leur blason en imitant servilement la méthodologie des sciences physiques. Pour que la physique soit la science par excellence, le comportement des objets inanimés – du genre boules de billard – *doit fournir le modèle à tous les êtres vivants*.

Mais il y avait dans le paradigme néo-darwinien deux obstacles qui rendaient l'entreprise impossible. Le premier et le plus important est que le temps newtonien était réversible. Comme les boules de billard, il pouvait fort bien aller d'avant en arrière, tandis que dans la réalité, le temps est irréversible : on ne peut faire abstraction de l'expérience ni restaurer le passé. Or Brillouin[8] nous dit :

> L'un des caractères essentiels du temps est son irréversibilité. Le temps s'écoule sans cesse et ne revient jamais en arrière. Face à cette évidence, la physique est troublée. Dans leurs formes les plus élémentaires, les lois de la physique sont réversibles.

Le paradigme newtonien n'expliquait pas davantage la direction du temps. Newton avait formulé les lois du mouvement des corps mais ne nous disait pas que ce mouvement s'opère dans une certaine direction. Voilà une fois de plus qui ne correspondait pas au comportement des êtres vivants.

La loi de l'entropie *a résolu la question*. L'énergie ne pouvant que se dégrader, le temps de cette dégradation devait être irréversible. Brillouin[9] l'a remarqué : « C'est une étrange coïncidence que la vie et la seconde loi représentent les deux grands exemples de l'impossibilité du mouvement rétrograde du temps. » C'est exactement ce que recherchaient les physiciens : la preuve, à leurs yeux irréfutable, que la loi de l'entropie gouvernait le comportement des êtres vivants. Le fait que, comme dans les processus vivants, l'énergie ne se déplace pas au hasard mais dans un sens déterminé venait encore étayer ce point de vue.

La formulation par Ludwig Boltzmann (1844-1906) de la loi de l'entropie comme loi statistique renforçait encore la thèse, puisque le comportement des êtres vivants était censé obéir à la statistique. Il est vrai que le nombre de processus dont on peut démontrer statistiquement l'irréversibilité est illimité. Même le jeu de l'oie entre dans cette catégorie. Qui songerait cependant à prétendre que ce jeu passionnant de notre enfance est un modèle

fidèle des processus du vivant ? Pourquoi le comportement d'un gaz dans une enceinte fermée en serait un meilleur reste obscur ; en revanche, l'enjeu de la démonstration pour nos aristoscientifiques est tout à fait clair.

S'ils montrent tant d'empressement à défendre la loi de l'entropie, c'est aussi parce qu'elle est facilement quantifiable. Considération décisive, car c'est un dogme de l'aristoscience que seule une proposition quantifiable accède à la dignité scientifique. La « méthode statistique » est bien sûr tout à fait indiquée. En effet, si l'on voit dans la loi de l'entropie une loi statistique, l'évolution de l'écosphère au cours des trois derniers milliards d'années, loin de constituer une violation flagrante de cette loi peut être interprétée comme une simple exception, qui ne l'invalide nullement.

Georgescu-Roegen[10] est conscient de tout ce que la solution de compromis proposée par Boltzmann a d'insatisfaisant. « En vertu de cette discipline nouvelle », écrit-il,

> un tas de cendres peut très bien réussir à chauffer une chaudière. Et un cadavre ressusciter et mener une seconde vie s'écoulant dans un ordre inverse de la première. On concède cependant que la probabilité de tels événements est fantastiquement faible.

En d'autres termes, la seconde loi, dès lors qu'on la considère comme une loi statistique, ne nous dit rien du monde réel, qui demeure un événement aléatoire. Elle ne permet pas non plus de comprendre les lois biologiques, sociales et écologiques de l'évolution. Celles-ci sont si improbables du point de vue statistique qu'elles ne méritent pas d'être prises en compte. Le fait que les lois de la thermodynamique soient inconciliables avec elles n'a plus aucune espèce d'importance.

Un autre artifice destiné à maintenir la loi de l'entropie face à toutes les preuves contraires consiste à postuler que, si la Terre est un système ouvert, l'univers dans son ensemble est un système fermé. Autrement dit, la vie sur Terre ne peut se développer qu'*au prix d'une augmentation de l'entropie de l'univers*. La faiblesse de cet argument est que rien ne permet de supposer que l'univers soit un système fermé. Mark Braham[11] fait ressortir qu'un système complètement fermé est « une construction théorique », que « nous n'avons aucun moyen de déterminer si l'univers est fermé ou non ». Mais postuler qu'il est un système ouvert soulève un certain nombre de problèmes épineux. Cela signifierait, par exemple, qu'il échange de l'énergie avec un certain environnement dont nous ne savons rien ; si celui-ci existe, il doit donc faire partie d'un autre univers, un « super-univers », dont le nôtre n'est qu'un sous-système.

« Quelles sont alors les limites de cet autre univers ou de ce super-univers, et ainsi de suite ? » demande Braham[12]. Comme il nous est impossible de répondre à ces questions, il est bien venu de postuler que l'univers est clos. Mais à quoi cela nous avance-t-il ? Comme le souligne Braham[13],

> Supposer cette fermeture revient à admettre l'existence d'une frontière. Or, par définition, une frontière sépare deux territoires ; il doit donc y avoir quelque chose de l'« autre côté ». Pour que nos spéculations relatives à cette frontière aient un sens, nous avons besoin d'information concernant l'« autre côté », ce qui suppose manifestement une fuite à travers la paroi du système, en d'autres termes, son absence de fermeture.

Même si nous pouvions contourner cette objection et accepter l'idée que le système est fermé et que, un jour, l'énergie du Soleil sera entièrement dissipée, quelle est la portée pratique de cette considération ? Pas un seul des terribles problèmes auxquels nous sommes confrontés (ni le réchauffement planétaire, ni le trou de la couche d'ozone, ni l'explosion démographique, ni la pollution chimique des nappes phréatiques, des cours d'eau, des mers et des estuaires) *n'est imputable à une quelconque diminution de l'énergie générée par le soleil*. Se focaliser sur la possibilité qu'une telle diminution survienne un jour ne sert qu'à distraire notre attention des problèmes bien réels, vers un long terme spéculatif (puisque personne ne suggère que le Soleil devrait cesser de briller avant plusieurs millions d'années). C'est détourner une énergie et un temps précieux des problèmes à résoudre, et les mobiliser sur un autre auquel nous ne pouvons rien, puisque même les technomaniaques les plus fanatiques n'ont pas encore proposé de chercher à remplacer le Soleil…